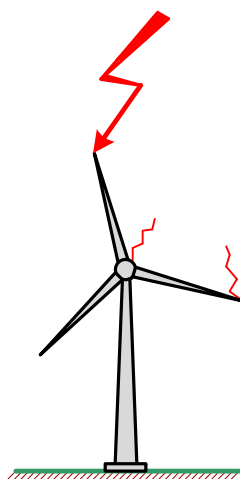


УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Бранко М. Радичевић

АНАЛИЗА МЕТОДА ЗА ЗАШТИТУ
ВЕТРОЕЛЕКТРАНА
ОД ДИРЕКТНОГ АТМОСФЕРСКОГ
ПРАЖЊЕЊА

докторска дисертација



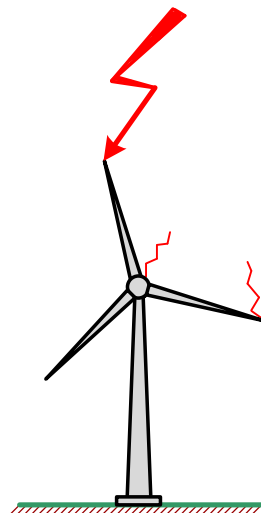
Београд, 2012.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING**

Branko M. Radičević

**ANALYSIS OF THE METHODS FOR
WIND TURBINE PROTECTION
AGAINST DIRECT ATMOSPHERIC
DISCHARGES**

Doctoral Dissertation



Belgrade, 2012



КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД, ОЦЕНУ И ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Ментор:

1. др. **Милан С. Савић**, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

Чланови комисије:

2. др **Никола Рајаковић**, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

3. др **Љубомир Герић**, редовни професор
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду

4. др **Златан Стојковић**, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду



Електротехнички факултет
Београд, 22. мај 2012. године



ВАЖНИЈИ РАДОВИ У НЕПОСРЕДНОЈ ВЕЗИ СА ТЕМОМ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ (остали радови су наведени у списку литературе):

1. **Б. Радичевић** и М. Савић, “Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1181–1190, Децембар 2011. (Врхунски научни часопис, **М21**).

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?asf_arm=null&asf_iid=6083464&asf_pun=null&asf_in=null&asf_rpp=null&asf_iv=null&asf_sp=null&asf_pn=3

2. **Б. Радичевић** и М. Савић, “The Impact of Wind Turbine Blade Rotation on the Lightning Strike Incidence”, in *Proc. 31st International Conference on Lightning Protection*, Беч, Аустрија, Септембар 2–7, 2012, pp. 1–6. (Саопштење са мађународног скупа штампано у целини, **М33**).

3. **Б. Радичевић**, Д. Микичић и Ж. Ђуришић, “Estimation of wind energy potential”, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol.19, no. 1, pp. 47–61, 2006. (Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком, **М24**).





ЗАХВАЛНОСТ

Ова докторска дисертација представља резултат вишегодишњег теоријског и експерименталног веома изазовног и сложеног истраживања из области анализе метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.

У принципу докторска дисертација увек има једног аутора и проистиче из самосталног рада кандидата. Међутим, њена реализација је практично немогућа без помоћи ментора, професора, инжењера, колега и пријатеља, који имају велику жељу, али и знање и могућност, да кандидату за највише академско звање пруже разноврсну подршку и помоћ. Истраживање које је представљено у дисертацији не би било могуће без неопходног знања и стручности које сам превасходно стекао на Енергетском одсеку Електротехничког факултета у Београду.

На првом месту, желео бих да изразим своју искрену захвалност ментору др **Милану Савићу**, редовном професору Електротехничког факултета у Београду, који ме је упутио у изузетно захтевну област **Технике високог напона и атмосферских пражњења**. Било је фантастично радити и делити све ове године са човеком као што је проф. др Милан Савић, који ми је својим корисним саветима увек указивао на најбољи начин рада. Он је бриљантан научник и инжењер, беспрекорно научно поткован, пун сјајних идеја, и што је још важније, веома стрпљив и изузетно предусретљив. Постигнути резултати и квалитет докторске дисертације, који се огледају у објављеним научним радовима у најпрестижнијим светским часописима, нераздвојно су везани за заједнички рад са проф. др Миланом Савићем.

Изузетну захвалност дугујем др **Душану Микичићу**, редовном професору Електротехничког факултета у Београду, сада у пензији, врсном педагогу и стручњаку са огромним знањем и искуством, који ме је још за време студентских дана заинтересовао за изузетно комплексну, али и атрактивну и све значајнију област **Обновљивих извора енергије**. Проф. др Душан Микичић, заједно са проф. др Зораном Стојиљковићем, био ми је ментор на дипломском и магистарском раду из области ветроенергетике. Читав низ година док смо сарађивали на бројним пројектима и истраживањима непрестано ме је усмеравао, давао бројне корисне савете и сугестије и охрабривао да се што више усавршавам из области обновљивих извора енергије, који су неминовно будућност човечанства.

Члановима комисије др **Николи Рајакловићу**, редовном професору, др **Златану Стојковићу**, редовном професору и др **Јовану Цветићу**, редовном професору, сви са Електротехничког факултета у Београду и др **Љубомиру Герићу**, редовном професору са Факултета техничких наука у Новом Саду, иначе изванредним стручњацима, се нарочито захваљујем на заинтересованости током прегледа дисертације, веома корисним дискусијама и стручним саветима. На тај начин су ми омогућили да искористим њихово богато искуство у току израде дисертације.

Дипл.инж.ел. **Ратку Ковачићу**, сада у пензији, иначе врском практичару и проналазачу, се најискреније захваљујем на великој и несебичној помоћи и ангажовању у току припреме, организације и извођења експерименталног дела истраживања. Колеги Ковачићу се нарочито захваљујем на подршци да се у критичним моментима никада не одустаје и да се увек пронађе оптимално решење за многобројне проблеме који су неминовно постојали током израде ове дисертације.

Користим прилику да се посебно захвалим др **Ђукану Вукићу**, редовном професору, дипл.инж.ел., са којим већ дужи низ година радим и на Пољопривредном факултету у



Београду, на несебичној, стручној и пријатељској подршци у реализацији појединих сегмената рада која ми је много значила.

Велику захвалност дугујем следећим институцијама и фирмама, без чије значајне техничке и финансијске помоћи ова докторска дисертација не би могла успешно да буде приведена крају:

1. **ИСМЕТ - Research, Development and Testing National Institute for Electrical Engineering, Craiova, Румунија**, на уступљеној високонапонској лабораторији где је обављен главни део експерименталног истраживања, и нарочито господину **Д. Попи**, директору за сарадњу са науком и колеги **И. Бадеи**, дипл.инж.ел. из предметне лабораторије.
2. **ЕЛБИ компанија**, Ваљево, Србија, и нарочито колегама **Жики Цветковићу**, директору, **Дејану Белушевићу**, дипл.инж.маш. и **Милану Јовановићу**, дипл.инж.ел., на уступљеном модификованом комерцијалном моделу ветрогенератора мале снаге, који је коришћен приликом наменских високонапонских испитивања и на несебичној помоћи у свим фазама током истраживања.
3. **АБС Минел Електроопрема**, Рипањ, Србија, и нарочито колегама **Зорану Кукобату**, дипл.инж.ел., бившем техничком директору и **Николи Русићу**, дипл.инж.маш., на бројним модификацијама на моделу ветрогенератора, како би успешно могао да се користи током захтевних високонапонских испитивања, као и на по први пут у свету специјално конструисаној лучној електроди, која је коришћена током експеримената.
4. **Dehn+Söhne Company**, Neumarkt, Немачка, и нарочито господину **П. Респондеку**, бившем директору, сада у пензији, на сарадњи и стручној помоћи.

Захваљујем се и свим осталим професорима, сарадницима и колегама са факултета, многобројним инжењерима, техничарима и радницима из Србије, Румуније и Немачке на сарадњи и техничкој помоћи у појединим фазама у току израде дисертације, као и на подстицајној и пријатељској атмосфери.

На крају захвалност дугујем и својој породици на подршци, стрпљењу и разумевању током израде ове докторске дисертације.

Београд, 22. мај 2012. године

Асистент мр **Бранко М. Радичевић**,
дипломирани инжењер електротехнике

Бранко М. Радичевић



Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења

Резиме

Тема докторске дисертације је веома актуелна због интензивног ширења примене ветроелектрана широм света са једне стране, а са друге стране због њихове осетљивости на атмосферске ударе и тешких последица које при томе настају. Ветрогенераторе су високе нестандартне конструкције са ротирајућим елементима, које се обично инсталирају на локацијама на којима је кераунички ниво веома висок и лоши услови уземљења, и као дистрибуирани извори електричне енергије имају повећан ризик од удара грома.

Најистакнутији делови ветротурбина, као што су дугачке елисе и гондола, типично су направљени од композитних материјала, који не могу успешно да издрже директне ударе грома са струјама интензитета до 200 kA, нити протицање струја пражњења по њиховој површини, при чему значајан део ове струје, приликом спровођења у земљу, има путању преко или у близини практично свих виталних компоненти ветротурбине. Континуиран развој заштитних система ветроелектрана од атмосферских пражњења има изузетан значај како би се смањиле штетне последице због механичких оштећења елиса, кварова на електричној и електронској опреми и испада ветроелектрана из погона.

Оригинална теоријска разматрања, примена софтверско-нумеричких поступака, и веома изазовно и финансијски захтевно експериментално испитивање, омогућили су да се у докторској тези на квалитетан начин изврши анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења и добију значајни доприноси. Истраживања која су спроведена у току израде докторске дисертације су доста сложена, због природе појава које се испитују и нестандартних начина испитивања, а истовремено и мултидисциплинарна, јер обухватају добро познавање следећих области: техника високог напона, ветроенергетика, физика атмосферских пражњења и громобранска заштита.

У првом делу дисертације објашњен је све већи значај које ветроелектране имају у савременом децентрализованом ЕЕС-у, дат је преглед актуелног стања и стандарда у вези са атмосферским пражњењима у ветротурбини и указано је на специфичности метода њихове громобранске заштите. Приказани су главни делови савремене ветротурбине, која је веома комплексан уређај, при чему је посебна пажња посвећена анализи карактеристика и начинима заштите компоненти кроз које протиче главни део струје пражњења. Размотрени су различити принципи за заштиту композитних материјала од атмосферског пражњења и објашњено је које врсте композита и у којој мери могу да се користе за израду елиса ветротурбина. Дат је преглед релевантних параметара и карактеристика директних атмосферских пражњења која се типично дешавају на ветротурбинама које су у погону.

У тези је размотрен општи принцип громобранске заштите ветроелектрана, заснован на одређивању потребног нивоа заштите громобранске инсталације. Анализирана су четири нивоа заштите, при чему су за сваки од њих дефинисани критеријуми које треба да задовољи сваки од елемената громобранског заштитног система. Испитивање ових критеријума треба да обезбеди да вероватноћа ефикасног деловања заштите буде у оквиру унапред дефинисаних граница, које су карактеристичне за сваки од нивоа заштите. Предложени су поступци за израчунавање рачунске ефикасности громобранске инсталације ветроелектране и ударног растојања на основу којих се јединствено одређује ниво заштите штитење ветроелектране.



Користећи унапређени електрогеометријски модел, нумеричко моделовање и комерцијалне софтвере, истражене су карактеристичне вредности ударног растојања (максимално растојање које скоковити лидер може да пређе у свом последњем скоку) и процењене су могуће тачке удара грома у истакнуте делове ветротурбине. С обзиром да не постоји апсолутно сигурна заштита од директног удара грома у ветротурбину која би била економски исплатива, у тези су размотрене зоне заштите у којима се ветроелектране могу са великом вероватноћом сматрати заштићене од директног удара грома. Процењен је и максимални ниво ризика оштећења ветроелектрана који се може толерисати, и који зависи од интензитета грмљавинске активности на одређеним локацијама које су погодне за њихову изградњу. Извршена је естимација очекиваног броја година рада ветротурбине без оштећења елиса приликом директних атмосферских пражњења за различите примењене методе громобранске заштите на елисама, што представља један од битних доприноса тезе.

Главни циљ истраживања је процена угрожености ветроелектрана од директних атмосферских пражњења и анализа специфичности и функционисање различитих примењених система громобранске заштите. Код анализе пражњења узети су у обзир сви битни електрични и метеоролошки параметри грмљавинске активности, а код моделовања принципа заштите размотрени су различити типови прихватног система, спусних проводника и употреба изолационих *GFRP (glass fiber reinforced plastic)* и делимично проводних *CFC (carbon fibre composites)* композитних материјала за израду елиса. Посебна пажња је посвећена анализи физичких феномена услед ротације елиса, јер је на основу расположиве базе података највећи број тачака удара грома детектован на врховима дугачких елиса. Истражене су штетне последице и вероватноћа директних атмосферских пражњења у елисе мимо постојеће заштите. Проучене су карактеристике и одзив појединих елемената ветротурбина у условима напрезања проузрокованих директним атмосферским пражњењима, уважавајући ефекте заштитних средстава за ограничење пренапона. Процењене су могуће тачке удара грома на елисама ветротурбина пуне величине и размотрене су последице које при томе могу настати.

У оквиру дисертације је по први пут у свету учињен покушај да се испита да ли постоји утицај ротације елиса (у распону од минималне до номиналне брзине обртања) на број и карактеристике атмосферског пражњења у зони прихватног система на врховима елиса ветротурбине и на таласни облик напона, што се до сада није систематски проучавало. Примењена је метода физичког моделовања, лабораторијског испитивања и извршена је оригинална и детаљна теоријска анализа. Поређење броја удара у стационарне ветротурбине са укоченим елисама у односу на ветротурбине које су у стандардном радном режиму, у оквиру исте фарме током дужег временског периода (10-15 година), је могући начин да се у реалним условима одреди утицај ротације елиса ветротурбине на учесталост атмосферског пражњења. Међутим, ово је јако тешко извести у пракси. Такође, испитивања у лабораторијским условима са ротирајућим елисама пуне величине су практично немогућа. Због наведених разлога конструисан је модел ветротурбине умањених димензија који је употребљен за високонапонска испитивања у току израде докторске дисертације.

Основни очекивани резултати истраживања су развој методологије испитивања ефикасности громобранске заштите ветроелектрана у условима ротације елиса, формирање физичког модела, унапређење модела пражњења и избор оптималне методе за одређивање промене атрактивног ефекта. У том циљу је извршено експериментално утврђивање разлике у прескочним ударним напонима између посебно обликоване лучне електроде и елиса умањеног и специјално конструисаног модела ветротурбине, покретане помоћу фреквентно управљаног индукционог мотора. Атмосферски ударни напони $1,2/50 \mu\text{s}$ нису сасвим погодни за обављање експеримената због кратког трајања чела таласа и облика карактеристике. Зато је стандардни склопни таласни облик ударног напона $250/2500 \mu\text{s}$ примењен на лучној електроди као најрепрезентативнији за симулирање електричног поља у



близини ветротурбине и који пружа довољно времена за развој иницираног лидера и одговарајућих стримера.

Специјална лучна електрода, на коју је преко напонског делитеља прикључен ударни генератор, има улогу еквивалентног извора електричног поља, који симулира утицај врха скоковитог лидера у претпоследњем скоку, а да при томе тренутни положај елиса уопште не утиче на величину међуелектродног размака. Пре почетка мерења процењена је вредност амплитуде напона која је довољна да би се добио прескок. Модел ветротурбине је потпуно веран оригиналу, само смањених димензија и без електричног генератора. У тези је дат приказ мерних шема са одговарајућом опремом, описане су испитне процедуре и поступци мерења. Овакав начин високонапонског испитивања је потпуна новина у свету и никада до сада није вршено.

У току испитивања на моделу извршена је компарација и упоредна анализа ефикасности примењених различитих метода громобранске заштите елиса ветротурбине (примена уземљених проводних капа на врховима елиса од изолационог материјала, употреба електрода-рецептора у облику дугмади у близини врхова елиса и испитивање елиса без инсталираних заштитних система). На основу теорије сличности утврђене су карактеристике директних атмосферских пражњења за следеће типичне брзине ротације елиса: $\omega = 0$ о/мин (када се ветрогенератор не обрће), $\omega = 250$ о/мин (за ветрове умерене јачине), и $\omega = 400$ о/мин (номинална брзина ротора). Као критеријум се користи 50% прескочни ударни склопни стандардни напон одређен методом горе-доле за елисе које мирују и које се врте наведеним брзинама, за примењене различите методе громобранске заштите. Испитивање промене еквивалентног ударног растојања атмосферског пражњења у високонапонској лабораторији обављено је користећи ударне таласе негативног поларитета до 2000 kV и таласе позитивног поларитета до 3500 kV. На основу промене прескочног напона анализом резултата донет је закључак у односу на промену угрожености ветротурбина од директног атмосферског пражњења у условима мировања и ротације елиса и имплицитно су одређене промене атрактивних зона.

У лабораторијским условима је детектовано благо смањење броја директних удара у зони прихватног система на елисама ветротурбине када се ротор обртао, у односу на случај када су елисе стационарне. Такође, у ваздушном зазору између лучне електроде и ротирајућих елиса ветротурбине истовремено са повећањем брзине обртања елиса забележено је смањење вредности резултујућег електричног поља и пораст 50% прескочних напона оба поларитета, који су добијени на основу методе горе-доле. Описани ефекти су били знатно више изражени код тестова са позитивним пражњењима, што се такође поклапа са теоријским разматрањима. Анализирајући таласне облике ударних напона оба поларитета примећена је повећана дисперзија прескочних напона и такође приметно изражена транзијентност ударних напона током ротирања елиса ветротурбине. Наведени ефекти постајали су доминантнији са повећањем брзине ротације и били су израженији код тестова са позитивним пражњењима. На основу теорије дугих прескока дато је физичко тумачење анализираних феномена за стационарно стање, када елисе мирују и у случајевима када се елисе обрћу променљивом брзином и извршена је дискусија добијених резултата.

Иако модел ветротурбине умањених димензија није у потпуности погодан за испитивање ефикасности громобранских заштитних система на елисама које су израђене од композитних материјала, лабораторијско истраживање је показало да се добијени резултати на моделу у стационарном стању у потпуности поклапају са резултатима истраживања која су извршена на елисама пуне величине. Ово је изузетно битна чињеница, јер потврђује тачност добијених резултата и приликом експеримената са ротирајућим елисама модела ветротурбине.



Нумеричке методе за процену могућих тачака удара грома у елисе ветротурбина, које су до сада биле усавршаване од стране многих аутора широм света, полазиле су од претпоставке да се ветротурбина третира као статички објекат. Пошто ротација елиса ветротурбине има приметан утицај на број удара грома и карактеристике атмосферског пражњења на елисама, као што је и показано у току израде докторске дисертације, неопходно је извршити ревидирање постојећих метода у вези са заштитом ветроелектрана од директног атмосферског пражњења. Наведене чињенице такође представљају битан допринос тезе.

Ефикасност примењених громобранских заштитних система на умањеном моделу ветротурбине је била релативно висока. Прихватни систем у облику проводних капа на врховима елиса имао је већу ефикасност заштите у односу на рецепторски заштитни прихватни систем. Електрично пражњење негативног поларитета са лучне електроде је погађало проводне капе/рецепторе у скоро 100% случајева и при свим разматраним брзинама ротације елиса. Са друге стране, позитивно поларисано пражњење у више наврата изазивало је оштећења/напрснућа на изолационој површини елиса, јер су се удари дешавали мимо заштитних система у облику капа/рецептора. Приликом лабораторијских испитивања извршена је и оптимизација хидрофобних својстава елиса са негативним површинским наелектрисуњима (позитивни удари). Показано је да на влажним хидрофобним узорцима елиса пражњење има тенденцију да следи површину елисе дуж растојања које има већу дужину, и на тај начин се спречава ризик од термичких оштећења. Ефекти са наелектрисуњима позитивног поларитета (негативни удари) не зависе од присуства влаге на површини елиса.

На основу испитивања на физичком моделу, анализе различитих концепата заштите ветротурбина од удара грома, симулације рада ветроелектрана у реалним условима и као резултат целокупног истраживања, предложен је оптималан громобрански заштитни систем елиса, који представља унапређен и ефикаснији принцип заштите ветроелектрана од атмосферског пражњења. Објашњено је да се добијени резултати у високонапонској лабораторији, на основу теорије сличности, могу применити и на актуелне ветротурбине великих снага које су у погону.

Сасвим је реална претпоставка да постоји разлика у броју директних удара и начину атмосферског пражњења на врховима дугачких елиса савремених ветротурбина великих снага када се ротор обрће, у односу на случај када су елисе непомичне. Ова тврдња уједно представља и најбитнији допринос докторске дисертације. Током високонапонског испитивања на моделу ветротурбине у лабораторијским условима добијен је одређен број неочекиваних резултата који се не поклапају са теоријским хипотезама. Зато је потребно додатно проверити и потврдити добијене резултате у реалним условима. Такође, важно је извршити и додатна истраживања.

Кључне речи: Атмосферско пражњење, ветроелектрана, громобранска заштита, модел, елиса, ротација, прескочни напон.

Научна област: Електроенергетски системи. **Ужа научна област:** Обновљиви извори енергије и Техника високог напона.

УДК: 621.3



Analysis of the Methods for Wind Turbine Protection Against Direct Atmospheric Discharges

Summary

The subject of this PhD Thesis is a very current subject due to intensive progress in applying wind turbines around the world on one hand, and on the other hand due to their sensitivity to atmospheric discharges and serious consequences that can arise. Wind turbines are tall and non-standard constructions with rotating elements, usually installed in locations at which the keraunic level is very high and grounding conditions are bad, and as distributed sources of electrical energy they are more prone to lightning stikes.

The most prominent parts of the wind turbines, e.g. long blades and nacelle are typically made of composite materials, which cannot successfully withstand direct lightning strikes with currents up to 200 kA, neither current discharge flow on their surface, during which a significant part of this current at grounding has a path over or in vicinity of practically all vital components of the wind turbine. Continuous development of protective wind turbine systems for atmospheric discharges has a remarkable significance in order to reduce negative consequences of mechanical damages of blades, failure of electrical and electronic equipment and outage rate.

Original theoretical discussions, applying software numerical procedures and very chalinging and financially demanding experimental testing enabled a high quality analysis to be preformed in the PhD Thesis regarding direct atmospheric discharges and to significantly contribute to the subject. The research conducted during work on this PhD Thesis are rather complex due to nature of the events that are the subject of the research and non-standard ways of testing and at the same time multidisciplinary because they involve a good knowledge of the following fields: high-voltage technique, wind energy, atmospheric discharge physics and lightning protection.

In the first part of this thesis the increasing significance that wind turbines have in contemporary decentralized EES, an overview of actual state and standards with regards to atmospheric discharges into wind turbines, and the specifics of the methods of their lighting protections have been pointed out. The main parts of the modern wind turbine are shown, because the wind turbine is a very complex device, and special attention is paid to the analysis of characteristics and means of protection of components through which the main part of the discharge current flows. Different principles for protection of composite materials from atmospheric discharges are discussed and explanations on which types of composites can be used to construct wind turbine blades and to what extent. An overview is given of the relevant parameters and characteristics of direct atmospheric discharges, which typically happen on wind turbine in service.

The general principle of lightning protection of wind turbines is discussed in the thesis, based on determination of the necessary level of protection of electrical installation for lightning protection. Four levels of protection are analyzed, and for each of them criteria are defined which need to be meet by each element of the lightning protection system. The testing of these criteria needs to enable the probability of efficient work of protection is within predefined limits which are characteristic for each level of protection. The proposed procedures for calculating evaluation efficiency of lightning protection installation of wind turbine and striking distance based on which the level of protection of the protected wind turbine is uniquely determined.



By using an advanced electro-geometrical model, the numeric modeling and commercial software, characteristic values of the striking distance (maximum distance that the stepped leader can reach in its last jump) are researched and possible lightning attachment points to the prominent parts of wind turbine are estimated. Regarding the fact that there is no absolutely safe protection from the direct lightning strike into a wind turbine which would be cost-effective, the thesis discusses protection zones in which wind turbines may be regarded protected from a direct lightning strike to a large extent. The maximal level of risk for damaging wind turbines which could be tolerated is also estimated, and it depends on the intensity of lightning discharges on specific locations suitable for their construction. An estimate is made of the expected number of years of work of wind turbines without damage during direct atmospheric discharges for different applied methods of lightning protection for blades, which is one of the important contributions of this thesis.

The main aim of the research is the estimate of danger for the wind turbines to suffer from direct atmospheric discharges and the analysis of specificity and functioning of different applied systems for lightning protection. The analysis of discharge takes into account all relevant electrical and meteorological parameters of lightning, and modeling of the principles of protection takes into account different types of air termination systems, down conductors and usage of isolating *GFRP* (*glass fiber reinforced plastic*) and partially conducting *CFC* (*carbon fibre composites*) composite material for construction of blades. Special attention is given to analysis of physical phenomena during blade rotation, because the largest number of attachment points was detected in the tops of long blades. Damaging consequences and probability of direct atmospheric discharges into blades regardless of the existing protection are researched. Characteristics and response of specific elements of wind turbines are researched in the conditions of load caused by direct atmospheric discharges, taking into account the effects of protective devices for restricting surge. Possible lightning attachment points are estimated on the blades of wind turbines of full size and the consequences which could occur.

In this thesis for the first time in the world an attempt has been made to question whether there is an influence of blade rotation (in the range of minimal to rated rotating speed) to the incidence and characteristics of the atmospheric discharges in the zone of air termination system on the tops of blades of wind turbines and on the voltage waveform, which has not been studied systematically so far. The method of physical modeling is applied, laboratory testing and an original and detail theoretical analysis was made. Comparison of number of strikes into stationary wind turbines with blades that are not moving with regards to the ones in the standard working regime, within the same wind farm during a long time period (10-15 years) is a possible way to determine in real conditions the impact of rotation of blades of wind turbine to the incidence of atmospheric discharge. However, this is very hard to accomplish in practice. Also, the testing in laboratory conditions with rotating blades of full size is practically impossible. Because of the named reasons, a reduced-size wind turbine model was constructed and used for the purpose of testing during work on this thesis.

The basic expected results of the research are development of methodology of the testing of efficiency of lightning protection of wind turbines in the conditions of rotation of blades, forming of physical model, advancements of the model of atmospheric discharge and the choice of optimal method for determining the change of an attractive effect. For that purpose an experimental determining of difference was conducted in flashover impulse voltages between the specially shaped arching electrode and blades of the reduced-size and specially constructed model of wind turbine driven by a frequency controlled induction motor. Lightning impulse voltages $1,2/50 \mu\text{s}$ are not quite suitable for experimenting because of the short lasting of the front of the wave and characteristic form. That is why the standard switching impulse voltage waveform $250/2500 \mu\text{s}$ is



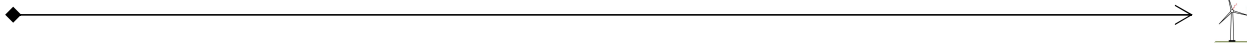
applied to arching electrode as the most representative for simulating an electrical field in vicinity of the wind turbine and which allows for sufficient time for development of initiated leader and corresponding streamers.

Special arching electrode, onto which through the voltage divider an impulse generator was connected, has a role of equivalent source of electric field, which simulates a strike on top of stepped leader before the last jump and without the current position of the blades having no influence on the size of the distance between electrodes. Before the start of measuring the estimated value of the voltage amplitude sufficient to get a flashover was estimated. The model of wind turbine is completely the same as the original, only with reduced size and without electrical generator. The thesis gives a review of the measuring schemes with the appropriate equipment and research procedures and also measuring techniques are described. This way of high voltage testing is completely new in the world and has not been done so far.

During the testing on the model a comparison and comparative analysis were done of the efficiency of applied various methods of lightning protection of the blades of wind turbine (applying grounded conductive caps on the ends of blades made of insulating materials, usage of electrodes-receptors in the shape of knobs in vicinity of the tops of blades and testing of blades without installed protective systems). Based on similarity theory, characteristics of direct atmospheric discharges are determined for the following typical speeds of blade rotation: $w = 0$ r/min (when wind turbine is not rotating), $w = 250$ r/min (for winds of moderate strength), and $w = 400$ r/min (rated rotor speed). As a criterion a 50% flashover impulse switching voltage is used, determined by an up-and-down method for blades that are still and that are rotating within the mentioned speeds, for applied various methods of lightning protection. The testing of change of equivalent striking distance of atmospheric discharges in high-voltage laboratory was done using impulse waves of negative polarity up to 2000 kV and waves of positive polarity up to 3500 kV. Based on changes of flashover impulse voltage with the analysis of the results a conclusion was made with regard to the change of danger for wind turbine to suffer from direct atmospheric discharges in the conditions of non-movement and rotation of blades and the changes of attractive zones were implicitly determined.

In laboratory conditions a mild decrease of the number of direct strikes in the zone of air termination system was detected on the blades of the wind turbine when the rotor is rotating than when the blades are not rotating. Also, in the air gap between the arching electrode and rotating blades of the wind turbine simultaneously with the increase in speed of rotating of blades a decrease of the value of the resulting electric field was noted and an increase by 50% of the flashover voltages of both polarities, which were determined on the basis of the up-and-down method. The described effects were notably more expressed in tests with positive discharge, which is also in line with the theoretical assumptions. By analyzing impulse voltages waveforms of both polarities an increased dispersion was noted of the flashover voltages and also a notably expressed transience of the impulse voltages during rotation of the wind turbine blades. The named effects were becoming more dominant with the increase in speed of rotation and were expressed in tests with positive discharge. Based on the theory of long sparks, a physical interpretation was given of the analyzed phenomena for the stationary state, when blades are not rotating and in cases when blades are rotating with changeable speed and discussion on the results was performed.

Although the reduced-size wind turbine model is not completely suitable for testing of efficiency of systems for lightning protection on the blades made of composite material, laboratory research showed that the gained results on the model in the stationary state completely correspond to the results of the research conducted on the blades of full size. This is a very important fact,



because it confirms the correctness of the results obtained during the experiments with rotating blades of the wind turbine model.

The numeric methods for evaluation of possible lightning attachment points to the wind turbine blades, which have up to now been improved by many authors around the world, were based on the assumption that the wind turbine is treated as a static object. Since the rotation of wind turbine blades has a notable influence on the number of lightning strikes and on the characteristics of the atmospheric discharges on the blades, as shown during the work on the thesis, it is necessary to perform a revision of the existing methods with regards to wind turbines protection from direct atmospheric discharges. The facts given also represent an important contribution of the thesis.

The efficiency of the applied system for lightning protection on the reduced-size wind turbine model was relatively high. The air termination system in the shape of conductive caps on the tops of the blades had a higher efficiency with regard to receptor protective air termination system. Electrical discharge of negative polarity from the arching electrode hit conductive caps/receptors in almost 100% of cases and in all discussed speeds of blade rotation. On the other side, positively polarized discharge in more occasions caused damages/fractures on the insulating surface of the blades, for the strikes occurred past the protective systems in the shape of caps/receptors. During laboratory testing an optimization of hydrophobic properties of blades was made with regard to negative surface discharges (positive strikes). It has been shown that in moist hydrophobic samples of blades discharges tends to follow the surface of the blade along the distance that has a longer length, and in that way the risk of thermal damage is prevented. The effects of positive polarity discharges (negative strikes) do not depend on the presence of moisture on the surface of the blades.

On the basis of testing on the physical model, the analyses of different concepts of protection of wind turbine from lightning strike, simulation of work of wind turbines in real-conditions as well as the result of the whole research, an optimal lightning protection system was suggested, which represents an advanced and more efficient principle of protection of wind turbines from atmospheric discharges. It was explained that the results obtained in high-voltage laboratory, on the basis of similarity theory, may be applied on the actual large wind turbines.

The assumption that there is a difference in the number of direct strikes and in the manner of atmospheric discharges on the tops of the blades of the wind turbine when the rotor is rotating and when the blades are not rotating is realistic. This claim also represents the most important contribution of this thesis. During the high-voltage testing on the model of wind turbine in laboratory conditions a certain number of unexpected results which do not match with theoretical hypothesis was obtained. This is why the obtained results need to be additionally checked and confirmed in real conditions. Also, it is important to perform additional research.

Index Terms: Atmospheric discharge, wind turbine, lightning protection, model, blade, rotation, flashover voltage.

Scientific field: Electric power systems. **Major in:** Renewable Energy and High-voltage Technics.

UDC: 621.3



САДРЖАЈ:

ПОГЛАВЉЕ 1

УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1	Интензиван развој ветроенергетике у свету	001
1.2	Проблеми заштите ветроелектрана од атмосферског пражњења	007
1.3	Преглед међународних стандарда за громобранску заштиту ветроелектрана	008
1.4	Ветроелектране великих инсталисаних снага са дугачким елисама инсталиране на мору	010
1.5	Искуства из авио индустрије	011
1.6	Усавршавање конструкције елиса ветроелектрана и развој принципа за њихову заштиту од директног атмосферског пражњења.....	012
1.7	Полазне хипотезе рада, предмет, циљ и научне методе истраживања	018
1.8	Кратак садржај докторске дисертације по поглављима	020

ПОГЛАВЉЕ 2

ВЕТРОЕЛЕКТРАНЕ

ГЛАВНЕ КОМПОНЕНТЕ, ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА ЗА ГРОМОБРАНСКУ ЗАШТИТУ И ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ЗАШТИТЕ ОД ДИРЕКТНИХ И ИНДИРЕКТНИХ АТМОСФЕРСКИХ ПРАЖЊЕЊА

2.1	Ветроелектране у оквиру савременог ЕЕС	021
2.2	Главне компоненте ветроелектрана у односу на могућу путању струје директног атмосферског пражњења	025
2.3	Зоне громобранске заштите ветроелектрана	034
2.4	Примена композитних материјала за громобранску заштиту ветроелектрана	034
2.4.1	Прихватни систем и спусни проводници	036
2.4.2	Пораст температуре проводних материјала и површина	040
2.4.3	Проводни материјали	041
2.4.4	Проводне површине	042
2.5	Актуелно стање громобранске заштите ветроелектрана	043
2.6	Приказ комплетног система за заштиту ветроелектрана од атмосферских пражњења и индукваних пренапона	045

ПОГЛАВЉЕ 3

АТМОСФЕРСКА ПРАЖЊЕЊА У ПРИСУСТВУ ВЕТРОЕЛЕКТРАНА

3.1	Кратак преглед теорије атмосферских пражњења	046
3.1.1	Акумулација наелектрисања	046
3.1.2	Статичко електрично поље и иницирање лидера	048
3.1.3	Последњи скок	056
3.1.4	Параметри удара грома	057
3.2	Искуства на основу рада ветроелектрана у реалним условима	058
3.3	Међународни стандарди за заштиту ветроелектрана од директних и индиректних атмосферских пражњења	060
3.3.1	<i>IEC</i> стандарди	060
3.3.2	<i>SEA</i> и <i>EUROCAE</i> стандарди	062
3.4	Актуелни проблеми заштите ветроелектрана од атмосферских пражњења	063
3.5	Нумеричке методе	065
3.5.1	Анализа електростатичког поља	065
3.5.2	Елиса од непроводних композитних материјала	066
3.5.3	Елиса са рецептором	066
3.5.4	Симулације на комплетном моделу ветротурбине	068

ПОГЛАВЉЕ 4

ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА УТИЦАЈА РОТАЦИЈЕ ЕЛИСА ВЕТРОЕЛЕКТРАНА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА

4.1	Ефекти електричних пражњења на елисама ветроелектрана	072
4.1.1	Конструкција елиса савремених ветроелектрана и карактеристике система за прихват струје грома	072
4.1.2	Удари у прихватни систем на елисама	075
4.1.3	Удари мимо прихватног система на елисама	075



4.2	Утицај обраћања елиса ветроелектрана на карактеристике атмосферског пражњења	077
4.2.1	Временски период трајања удара	077
4.2.2	Ефекат прелаза удара грома	080
4.2.3	Преостали начини атмосферског пражњења на елисама ветроелектрана	082
4.2.4	Анализа феномена утицаја ротације елиса ветроелектрана	084

ПОГЛАВЉЕ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

5.1	Модел ветротурбине умањених димензија	085
5.2	Високонaponsка електрода	088
5.2.1	Планарна (равна) електрода	089
5.2.2	Штапна електрода	091
5.2.3	Лучна електрода	092
5.3	Тестирања са ударним струјама	095
5.4	Испитивани случајеви, тест процедура, примењена метода и експериментални услови	096
5.5	Експериментални резултати	098
5.5.1	Компарација примењених заштитних громобранских система	098
5.5.2	Утицај ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења	101
5.5.2.1	Тестови са негативним склопним прескочним напонима (елисе на позитивном потенцијалу)	101
5.5.2.2	Тестови са позитивним склопним прескочним напонима (елисе на негативном потенцијалу)	108
5.5.3	Таласни облици напона	109
5.6	Предлог унапређеног модела заштите елиса ветроелектрана	110
5.7	Процена очекиваног броја година рада ветроелектрана без оштећења елиса приликом директних атмосферских пражњења	112

ПОГЛАВЉЕ 6

ФИЗИЧКО ТУМАЧЕЊЕ АНАЛИЗИРАНИХ ФЕНОМЕНА И

ПРИМЕНА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА НА ВЕТРОЕЛЕКТРАНАМА ПУНЕ ВЕЛИЧИНЕ

6.1	Стационарни режим рада ветротурбине ($w = 0$ о/мин)	114
6.2	Режим ротирања елиса ветротурбине ($w > 0$ о/мин)	119
6.3	Дискусија	121

ЗАКЉУЧЦИ, НАУЧНИ ДОПРИНОСИ И БУДУЋИ РАД

7.1	Главни закључци и научни доприноси докторске дисертације	126
7.2	Будући рад и додатна истраживања	128

ЛИТЕРАТУРА, ПОПИС СЛИКА И ТАБЕЛА И БИОГРАФИЈА АУТОРА

8.1	Списак коришћене литературе у току израде докторске дисертације	130
8.2	Попис слика и табела по поглављима	133
8.3	Биографија аутора	138

ПРИЛОГ 1

Преглед и спецификација коришћене лабораторијске и додатне опреме	П1 I-VI
---	---------

ПРИЛОГ 2

Прорачун изложености ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења применом електрогеометријског модела	П2 I-VI
--	---------

ПРИЛОГ 3

Рад објављен у истакнутом међународном часопису са SCI листе у непосредној вези са темом докторске дисертације	П3 I-X
--	--------

ПРИЛОГ 4

Изјаве	П4 I-III
--------------	----------



ПОГЛАВЉЕ 1

УВОДНА РАЗМАТРАЊА

У оквиру уводног поглавља размотрен је константан пораст инсталираних снага ветроелектрана у свету и њихов велики значај, као дистрибуираних извора електричне енергије, у савременом електроенергетском систему (ЕЕС). Због све већег броја ветротурбина које су у погону, њихове повећане осетљивости на атмосферске ударе и тешких последица које при томе настају, тема докторске дисертације је веома актуелна. Указано је на специфичности директног атмосферског пражњења у елисе ветротурбина, као најугроженије компоненте, дат је преглед међународних стандарда из области заштите ветроелектрана од удара грома и примена искустава из авио индустрије. Приказан је развој конструкције елисе, наведене су битне карактеристике материјала за њихову израду и перформансе громобранског заштитног система ветроелектрана. На крају је представљен кратак садржај докторске дисертације по поглављима.

1.1. Интензиван развој ветроенергетике у свету

Поред употребе снаге животиња и енергије биомасе, ветар представља један од најстаријих извора енергије коју човек експлоатише. Снага ветра је од давнина коришћена за покретање бродова, млинова, пумпи за воду и за производњу електричне енергије за локалне потребе мањих домаћинстава. Претеча свих модерних ветротурбина са хоризонталном осом за производњу наизменичне струје сматра се да је била 200 kW *Gedser Møllen*, која је изграђена 1957. године у јужном делу Данске. На врху бетонског стуба висине 25 m, била је монтирана гондола, која је носила генератор, редуктор и троелисни ротор пречника 27 m. Ветротурбина је у то време била необичног изгледа и успешно је радила наредних 10 година [1]-[2].

Пошто су цене фосилних горива све до појаве нафтне кризе 1977. године биле релативно ниске, готово да и није постојало значајније интересовање за коришћење ветроелектрана. Међутим, од тада почиње права ренесанса ветроенергетике у свету, при чему је Данска уз помоћ америчких истраживача преузела водећу улогу у производњи и инсталирању ветротурбина у свету. Давне 1978. године, такође у Данској, инсталирана је ветротурбина мале номиналне снаге са три аеродинамичке елисе, асинхроним генератором и челичним стубом. Савремена истраживања из области употребе енергије ветра за производњу електричне енергије почела су средином 20. века у Немачкој, на Универзитету у Штутгарту. Концепт савремених ветроелектрана се данас још увек заснива на конструкцијама наведена два случаја (Слика 1.1(а)-(б)), иако је у знатно мањој мери приметан и развој ветротурбина са вертикалном осом и турбина које раде на принципима магнетне левитације, које нису предмет докторске дисертације - Слика 1.1(в)-(г), [3].

Анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења је у оквиру докторске дисертације спроведена првенствено за ветротурбине са хоризонталном осовином, код којих је оса ротације паралелна са површином тла. Преко 90% комерцијално доступних турбина мале и велике снаге припада овој категорији. Њихове највеће предности су мала вредност минималне брзине укључења и једноставно



покретање. Степен искоришћења им је релативно висок. Међутим, код ових турбина редуктор и генератор морају да буду смештени на врху стуба, што конструкцију чини сложенијом и скуљом. Такође, због присуства релативно осетљиве претварачке електронике у унутрашњости ветротурбина са променљивом брзином обртања, повећан је ризик од оштећења опреме услед атмосферских пренапона. За производњу електричне енергије првенствено се користе троелисне турбине, које су веома тихе и стабилне у раду, јер је аеродинамичко оптерећење релативно униформно.



(а)



(б)



(в)



(г)

Слика 1.1. Различите конструкције ветротурбина. **(а)** Ветропарк турбина са хоризонталном осом на копну, данас преовлађујући. **(б)** Ветропарк турбина са хоризонталном осом на мору и дуж морске обале, све присутнији концепт развоја ветроенергетике. **(в)** Ветроурбина са вертикалном осом на Балтичком мору снаге 2,3 MW у оквиру ветропарка на мору. **(г)** Маглев ветротурбина.

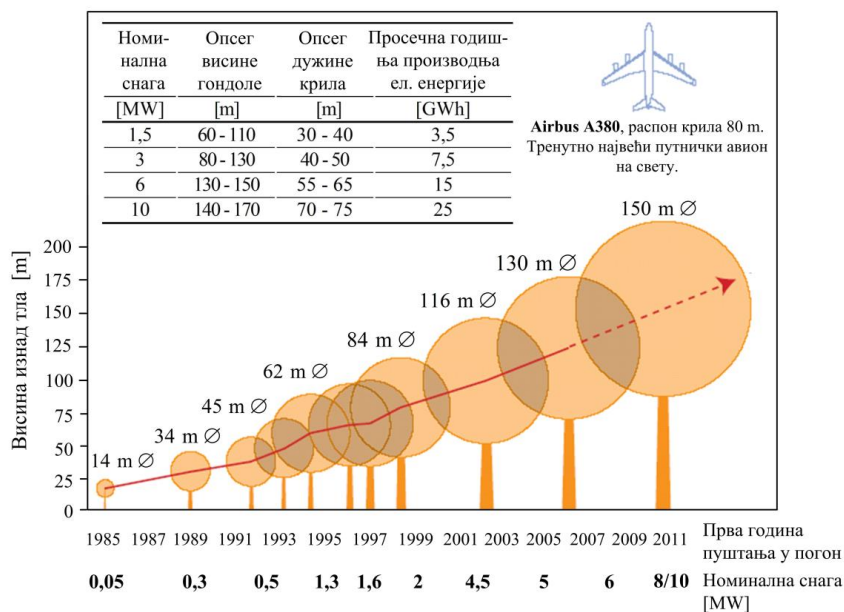
Зависно од смера окретања у односу на смер ветра, турбине са хоризонталном осовином се деле на турбине које ротирају уз ветар (*upwind*) и на оне чије се елисе обрћу низ ветар (*downwind*). Код *upwind*-ветротурбина ротор се поставља у положај који је супротан смеру дувања ветра. Код ових турбина не постоји могућност да се турбина нађе у заветрини стуба, јер ветар прво пролази кроз ротор. Овде је изузетно важан механизам који ће турбину увек држати у жељеном положају у односу на смер дувања ветра. *Downwind*-ветротурбине су знатно флексибилније и не захтевају механизме за одржавање и усмеравање у жељеном смеру. Међутим, пошто ветар прво наилази на стуб, а потом на ротор, постоји могућност да се турбина нађе у заветрини, што ће за последицу имати мању произведену електричну енергију.

Изузетно је важно разумети варијације брзине ветра током анализираниог периода, јер то има велики утицај на произведену електричну енергију. Типична брзина при којој ветротурбине почињу да раде је у опсегу 2,5-3,5 m/s. Већина ветротурбина



достиге номинални радни режим у опсегу брзина 10-13,5 m/s на мање ветровитим локацијама, и од 14-18 m/s на веома ветровитим локацијама. Да би се избегла механичка оштећења, због великих напрезања, ветротурбине престају да раде када су брзине ветра веће од 25-30 m/s. Урађене студије показују да током 20-годишњег периода годишња варијација средње снаге ветра не прелази 10% [4]. На основу тога се може закључити да током пројектованог животног века ветроелектране (20-25 година) неизвесност по питању очекиване произведене електричне енергије није велика, што је важно са становишта економичности њене изградње (нпр. неизвесност при процени величине тока реке ради изградње хидроелектране је знатно већа) [5]. Да би изградња ветроелектране била економски оправдана потребно је да средња годишња брзина ветра на локацијама које су погодне за њихову изградњу на висини од 120 m буде од 5-7 m/s.

Иако је цена електричне енергије добијене из ветроелектрана у почетном периоду развоја ветроенергетике била 2 до 30 пута виша од цене из конвенционалних извора, захваљујући многим подстицајним мерама и државним субвенцијама, долази до наглог развоја ветроенергетике у свету у последњих 20 година. Ветрогенератори су значајно усавршени, многи учени недостаци су отклоњени, тако да се данас израђују веома поуздане и високо аутоматизоване ветротурбине, које као дистрибуирани произвођачи електричне енергије, по релативно конкурентној цени, учествују у регулацији активне снаге истовремено са конвенционалним централизованим електранама у оквиру савременог ЕЕС [6]-[11].



Слика 1.2. Повећање номиналне снаге и величине ветротурбина.

Ветроелектране су обично груписане у велике фарме на копну (*onshore*) или мору (*offshore*) чије се укупне инсталисане снаге крећу у опсегу од неколико десетина MW па све до 0,8 GW, за највећи ветропарк на свету у Тексасу (САД), који има 630 ветротурбина. Важно је напоменути да већ на садашњем степену развоја ветроелектране у значајном проценту учествују у укупној производњи електричне енергије у многим земљама у свету (у Данској са преко 30%, а у Немачкој са око 10%), а на глобалном нивоу са око 3% [1].

Повећана потреба и захтеви за коришћењем еколошки чисте енергије резултовали су у значајном порасту броја инсталираних ветротурбина велике снаге у



свету у последњој деценији – Слика 1.2. Коришћење индукционих генератора са двоструким напајањем и синхроних генератора са перманентним магнетима, развој енергетске електронике, усавршавање теорије управљања радом електричних машина и све већа употреба композитних материјала из области аеромеханике омогућили су значајно повећање физичких димензија и номиналне снаге ветротурбина. Највећа ветротурбина у овом тренутку је Enercon E-126, чија инсталисана снага износи 6 MW, висина стуба 135 m и пречник ротора 126 m. Многи други произвођачи нуде ветротурбине распона инсталисаних снага од 4,5-5 MW, са дужинама елиса у опсегу од 45-65 m, при чему се сматра да још није достигнут лимит у максималној дужини елиса, нарочито за ветропаркове на мору [12]-[21].

Употреба ветроелектрана у ЕЕС има своје значајне **предности** [22]:

- ▶ Енергија ветра је бесплатна, не загађује ваздух, не емитује угљен-диоксид, не проузрокује киселе кише, не зрачи, не разара озонски омотач, не захтева енергетску зависност, временски је неограничена и расположива свуда, за разлику од гаса и нафте, чија су већа налазишта ограничена на неколико области у свету. Ветар је као обновљиви извор енергије довољно великог капацитета да може да замени сва фосилна горива;
- ▶ У еколошком смислу, ветроелектране се сматрају чистим изворима електричне енергије, и њиховом интензивном изградњом, која баш и није еколошки чиста, смањује се потреба за фосилним горивима и приметно се утиче на мању емисију гасова са ефектом стаклене баште;
- ▶ Употреба ветра, у технолошком погледу, представља један од најјефтинијих начина за добијање електричне енергије. У оквиру ЕЕС ветроелектране омогућавају да се електрична енергија производи на местима која су ближе потрошачима, као и акумулацију енергије у системима са пумпањем воде (пумпно-акумулационе хидроелектране), ваздушним компресорима, акумулаторима, уређајима за складиштење водоника, ултра-кондензаторима, инерционим масама и суперпроводним магнетним материјалима;
- ▶ Ветроелектране се могу прикључити на мрежу било ког напонског нивоа, могу се градити појединачно или као фарме (паркови) ветроелектрана, што омогућава њихову релативно брзу изградњу свуда где су повољне прилике у односу на брзине ветра и број ветровитих дана;
- ▶ Ветроелектране прикључене на дистрибутивну мрежу омогућавају извесну аутономност дистрибутивног система и већи комфор у локалном управљању напонским приликама у дистрибутивној мрежи. Осим тога, дистрибуирана производња обезбеђује већу сигурност у напајању потрошача, смањује укупне губитке активне снаге у систему и растеређује преносну мрежу.

Битни **недостаци** коришћења енергије ветра су:

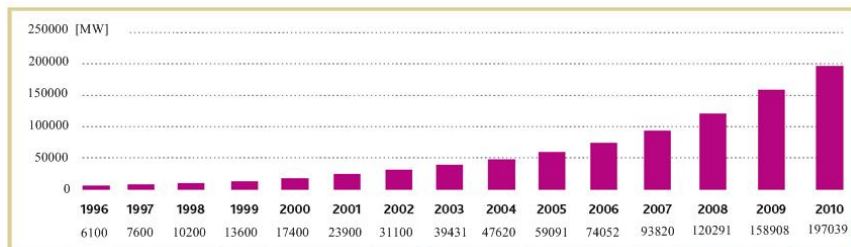
- ◀ Ветар је стохастичка и интерминентна појава и не дува увек када је потребна електрична енергија. Електрични генератори који се покрећу снагом ветра нису контролабилни. Употреба система за акумулирање електричне енергије, ради превазилажења овог проблема у великим ветроелектранама, довела би до неприхватљиво високих трошкова. Коришћење енергије ветра се зато често комбинује и са другим обновљивим изворима енергије;



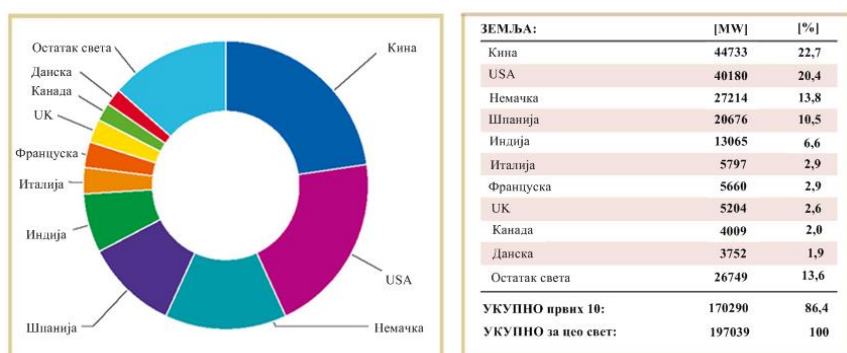
- ◀ Локације које су погодне за изградњу ветроелектрана су обично изложене утицају значајних директних и индиректних атмосферских пражњења, која могу да доведу до хаварија и дуготрајних испада ветроелектрана из погона. С обзиром да је радни век савремене ветротурбине око 20–25 година до првог већег ремонта, интензивно се усавршавају громобрански заштитни системи, са посебном пажњом за заштиту елиса;
- ◀ Области са добром ветровитошћу су најчешће удаљене од великих потрошачких центара, што захтева изградњу дугих водова одређеног напонског нивоа. Иако је набавна цена ветроелектрана последњих година опала (око 800.000 ” за 1 MW инсталисане снаге), иницијални инвестициони трошкови су и даље високи, јер се цена изградње повезних водова и постројења не може занемарити;
- ◀ Изградња ветроелектране захтева закуп или куповину одређене површине земљишта, које се, са друге стране, може искористити за посао који је профитабилнији од производње електричне енергије;
- ◀ Мада је утицај ветроелектрана на околину занемарљив у односу на конвенционалне изворе, постоје извесни отпори због буке коју праве елисе ротора и у вези са заштитом птица, а присутан је и естетски утицај на околину;
- ◀ Иако је током претходних двадесет година, цена електричне енергије добијене из ветроелектрана снижена за преко 80%, оне још увек нису потпуно конкурентне конвенционалним изворима (ХЕ и ТЕ). Мада је приметан пад цена компоненти ветроелектрана, јединична цена по kW инсталисане снаге је још увек виша него код конвенционалних електрана (посебно када су у питању гасне електране);
- ◀ Велике варијације у генерисању снаге стварају низ техничких проблема у погледу планирања производње у систему, стабилности рада, како ветроелектрана тако и целокупног ЕЕС, и варијација напона у дистрибутивној мрежи;
- ◀ Немогућност потпуне планске производње електричне енергије у ветроелектранама ограничава њихово максимално процентуално учешће у производњи електричне енергије у једном ЕЕС и захтева повећање регулационе резерве, а тиме и цене произведеног MWh из ових електрана. У том погледу, неопходност постојања система за акумулацију енергије у ЕЕС су лимитирајући фактор за њихову изградњу. Развој метеоролошке дугорочне и краткорочне прогнозе је од суштинског значаја за правилно планирање производње у ЕЕС са великим инсталисаним капацитетима ветроелектрана;
- ◀ Ветроелектране које су прикључене на слабу дистрибутивну мрежу могу да доведу до нестабилности система. Проблеми стабилности и напонских прилика морају се анализирати при пројектовању ветроелектране. У том погледу, мора се посебно размотрити потреба ојачавања електричне мреже на коју се прикључују ветротурбине. Такође, по потреби, треба предвидети компензациона постројења (статичка или динамичка) која би помогла генерисање реактивне енергије у ветрогенераторима, чиме би се побољшале напонске прилике у дистрибутивној мрежи. Важно је напоменути да су ветроелектране, односно њихов управљачки систем, врло осетљиве на напонске фликере, па је стабилност напона неопходна



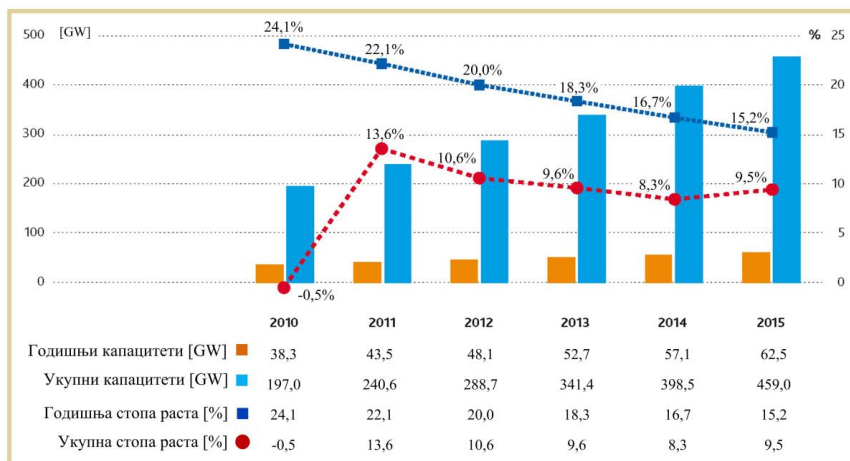
и за самоодрживост ветрогенератора на мрежи. Осим тога, прикључењем ветротурбина на дистрибутивну мрежу она постаје активна, па се целокупан концепт релејне заштите елемената у дистрибутивној мрежи, односно планирање и изградња ових мрежа, мења.



(а)



(б)



(в)

Слика 1.3. (а) Укупно инсталисани ветрогенераторски капацитети у свету у протеклих 15 година. (б) Првих 10 земаља у свету на основу укупно инсталисане снаге ветроелектрана до почетка 2011. године. (в) Прогноза развоја тржишта ветроенергетике до 2015. године [23].

Према расположивим подацима до почетка 2011. године у свету је у погону око 130.000 ветротурбина, укупне инсталисане снаге преко 197 GW – Слика 1.3(а). Највећи број ветротурбина је инсталисан у Кини, САД, Немачкој, Шпанији и Индији (Слика 1.3(б)). Највеће процентуално учешће енергије ветра у производњи укупне електричне енергије је у Данској (око 30%), а у појединим покрајинама на северу Немачке и преко 50%. Највећи светски произвођач ветротурбина је Данска [24].

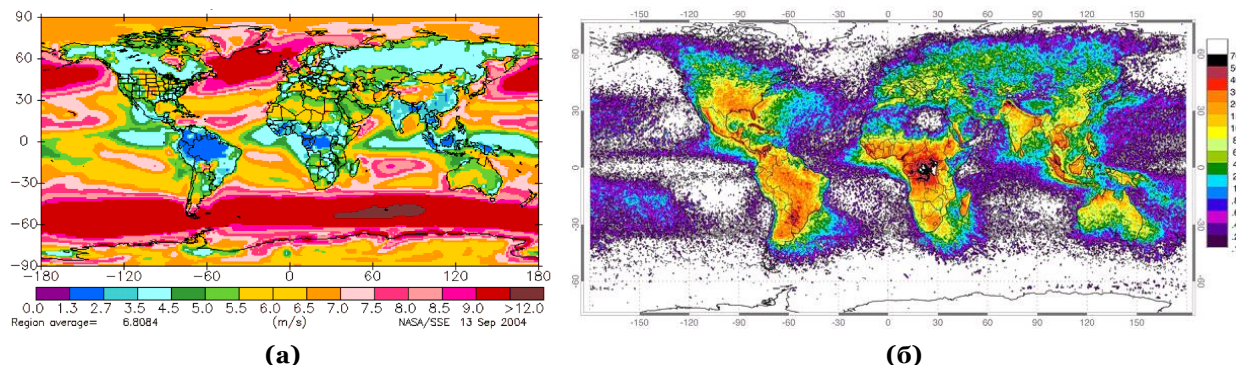


1.2. Проблеми заштите ветроелектрана од атмосферског пражњења

Нарочита пажња у току израде докторске дисертације посвећена је проучавању карактеристика атмосферског пражњења у присуству ветроелектрана. Појава и феномени атмосферских пражњења импресионирали су човека још од давних времена, годинама су проучавани и тек је средином 18. века утврђено да имају електричну природу. Механизам настајања наелектрисаних облака још увек није употпуности разјашњен, иако постоји више теорија које објашњавају ову појаву [25].

У природи до атмосферских пражњења долази свакодневно и у сваком тренутку је преко 2000 олуја са грмљавинским активностима (са око 100 удара грома у секунди) активно широм света. Перспективе даљег развоја ветроенергетике у свету су веома оптимистичне (Слика 1.3(в)). С обзиром да су ветроелектране веома осетљиве на директна и индиректна атмосферска пражњења, њихова ефикасна заштита од удара грома је од изузетне важности, због великог броја специфичности и нетипских принципа заштите које имају [26]-[29].

У току израде докторске дисертације главна пажња је посвећена анализи метода за заштиту ветроелектрана од директног удара грома, при чему је нагласак дат на испитивању громобранске заштите ветротурбина у условима ротације елиса променљивом брзином. Истраживања која се спроводе из ове области су мултидисциплинарна, јер обухватају познавање следећих области: техника високог напона, ветроенергетика, физика атмосферских пражњења и громобранска заштита.



Слика 1.4. (а) Просечна годишња брзина ветра у свету на висини 60 m од равнoг тла. (б) Глобална изокерауничка карта (дистрибуција просечног годишњег броја директних удара грома по квадратном километру равнoг тла у периоду 1995 – 2005. године у свету). Извор НАСА.

Ветроелектране су нестандартне високе конструкције висине до 200 m са ротирајућим елементима (елисе, гондола, механички системи). Обично се инсталирају на ветровитим локацијама (Слика 1.4(а)) на којима је кераунички ниво типично веома висок (Слика 1.4(б)) и лоши су услови уземљења (висока специфична отпорност тла). Осим тога, када су ветротурбине међусобно електрично повезане у велике фарме на копну и/или мору, као дистрибуирани извори електричне енергије у оквиру ЕЕС, веома су подложне атмосферским пражњењима. Најистакнутији делови ветротурбина, као што су елисе и гондола, најчешће су направљени од композитних материјала, који не могу успешно да издрже директне ударе грома са струјама интензитета до 200 kA, нити протицање струја пражњења по њиховој површини. Такође, значајан део ове струје приликом спровођења у земљу, има путању преко или у близини практично свих виталних компоненти ветротурбине [30].



1.3. Преглед међународних стандарда за громобранску заштиту ветроелектрана

У почетној фази развоја метода за заштиту ветроелектрана од атмосферских пражњења, пошло се од сличности са примењеним громобранским системима у водоторњевима, светионицима, радарско-антенским торњевима, D/GPS базним станицама, стамбено-пословним кулама и другим високим објектима – Слика 1.5. Међутим, успешна заштита ветроелектрана од удара грома је представљала још већи изазов. Ветрогенератори осим стубова имају и ротирајуће делове за које се не могу применити стандардни начини заштите, а погонски склопови и веома осетљиве електронске компоненте су смештене у гондоли која је на висини до 150 m изнад тла.

Као полазне референце за громобранску заштиту ветрогенератора од удара грома коришћени су постојећи међународни IEC стандарди (*International Electrotechnical Commission*) IEC 60060 1-3, IEC 61024, IEC 61662, IEC 61312 1-5, IEC 62305 1-5 за високонапонска испитивања, за заштиту стационарних стандардних уземљених објеката, за процену ризика од директног удара грома и индукованих пренапона, и стандарди из авио индустрије SAE (*Society of Automotive Engineers*) и EUROCAE (*The European Organisation for Civil Aviation Equipment*) [31]-[34].



Слика 1.5. Сличности између громобранске заштите високих објеката и ветрогенератора.

Нагли развој ветроенергетике иницирао је и многе проблеме које је било неопходно решити. Због велике конкуренције произвођача ко ће први да направи ветрогенератор што већих димензија, кратких рокова производње и огромног потенцијалног тржишта, које је захтевало све већи број ветрогенератора у погону, у појединим етапама експанзије индустрије ветроенергетике инсталирале су се ветрогенераторе недовољно добрих перформанси, и које конструктивно и са техничке стране гледишта нису биле у потпуности усавршене. То је био случај са главним деловима ветрогенератора, као што су зупчаници, генератори, специјалне врсте трансформатора и посебно када је у питању громобранска заштита елиса. У принципу, проблем је био у томе што техничка решења која су се годинама развијала и била у потпуности прилагођена за ветрогенераторе малих снага на копну, нису могла да се једноставно скалирају и примене на све већи број ветрогенератора великих снага инсталираних на мору, које у веома суровом окружењу треба да раде бар 20 година без кварова [1].

Највећа унапређења и структурне измене у периоду развоја ветроенергетике доживеле су елисе ветрогенератора, које су најугроженија компонента када су у питању директни удари грома. Све до касних 80-их година елисе су биле третиране само као потпуно механички део ветрогенератора. Њихова главна и једина сврха била је да конвертују кинетичку енергију ветра у ротациону енергију у виду расположиве механичке снаге на главној осовини ветрогенератора [2]. Овај основни захтев је био задовољен израдом елиса од дрвета или од специјалних композитних материјала, што је



омогућило да имају добре аеродинамичке особине, као и њихова специфична конструкција како би могле да издрже велике механичке силе и напрезања током целокупног пројектованог радног века ветротурбине.

Почетком 90-их година када су почеле да се производе елисе чије су дужине веће од 20-30 m и без адекватних громобранских прихватних система, директни удари грома, посебно у врхове елиса, били су доста учестали и постајали су све већи проблем за произвођаче ветротурбина. Иако су се за израду елиса користили наведени изолациони и електрично непроводни материјали, због недопустиво великог броја оштећења елиса изазваних директним атмосферским ударима и испада ветротурбина из погона, долази до убрзаног развоја одговарајућих заштитних система за прихват струје грома на елисама ветротурбина и њено сигурно одвођење у земљу. Резултати обимног истраживања претежно данских стручњака сумирани су 1999. године у виду препорука (*Defu Rekomendation 25*) које се баве свим аспектима громобранске заштите елиса, али и контролно-управљачких система, лежајева и других битних компоненти ветротурбина [2].

Пошто је у то време изгледало да су проблеми у вези са поузданом заштитом ветроелектрана од удара грома решени, главни резултати истраживања су 2002. године објављени у виду техничког извештаја *IEC TR 61400-24 Wind Turbine Generator Systems – Part 24: Lightning Protection*. У овом документу дате су смернице и упутства како треба извршити интеграцију различитих компоненти громобранске заштите ветротурбина, како би се омогућила њена максимално могућа поузданост. Пошто су истраживања која су резултирала издавањем техничке препоруке трајала више година (препука је објављена више од 10 година након детекције проблема у нормалном функционисању ветротурбина) технички комитет је издао одређен број препорука за будући рад.

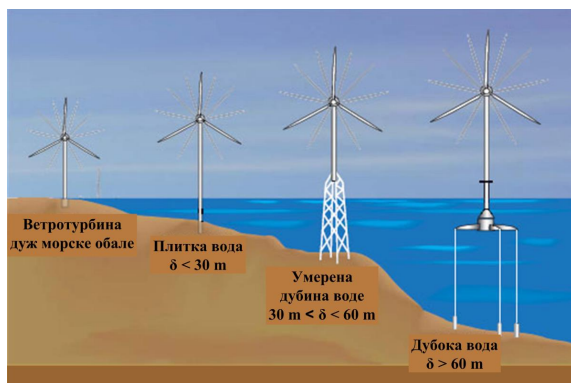
Наглашено је да будући стандард мора у већој мери да третира ветротурбине чија укупна висина превазилази 100-150 m и које се у све већем броју инсталирају у виду ветропаркова на мору. Због све већих дужина елиса и употребе нових материјала за њихову конструкцију, посебна пажња је усмерена ка повећању ефикасности громобранске заштите елиса и даљим испитивањима интеракције између атмосферских пражњења и прихватног система на врховима елиса ветроелектрана. Распољиви подаци о битним параметрима атмосферских пражњења у ветроелектране су прикупљани током последњих 20 година са великог броја локација широм света. Прилично велика база добијених података статистички је анализирана од стране верификованих и стручних комисија за стандардизацију са циљем одређивања референтних вредности параметара атмосферских удара. Тек у јулу месецу 2010. године појавила се коначна верзија стандарда *IEC TR 61400-24* где су сумирани најновији закључци у вези са заштитом ветроелектрана од атмосферског пражњења [35].

Ветроенергетика је млада индустријска грана која се и даље интензивно усавршава. Зато су поред постојећих стандарда и препорука, посебно када је реч о заштити ветроелектрана од атмосферских пражњења, неопходна додатна и веома захтевна истраживања. Главни циљеви испитивања из ове важне области су да се утврди како на елисе ветротурбина утиче веома неповољно електрично окружење током олујних невремена и удара грома, како да се избегну штетне последице које могу да настану услед директних и индиректних пражњења, и коначно на који начин може да се верификује и тестира да ли дизајн елиса и заштитни громобрански систем инсталиран од стране изабраног произвођача на елисама, може успешно да поднесе ефекте настале као последица удара грома.

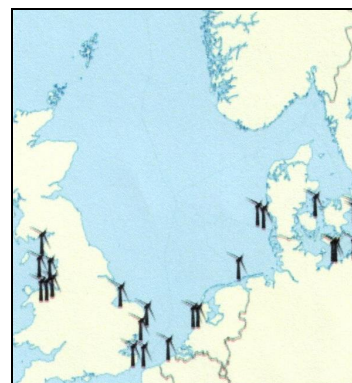


1.4. Ветроелектране великих инсталираних снага са дугачким елисама инсталиране на мору

Ради што већег искоришћења енергије ветра произвођачи сваке године пласирају на тржиште ветротурбине све веће инсталиране снаге и све више турбина се инсталира на мору, типично на удаљености од 10–30 km од морске обале и на дубинама мора до 60 m (Слика 1.6(a)). Први ветропарк на мору Vindeby укупне снаге 5 MW инсталиран је почетком 90-их година у Данској [2].



(a)



(b)

Слика 1.6. (a) Развој технологије за инсталирање ветротурбина на мору. **(б)** Локације у северној Европи где су тренутно инсталирана 22 највећа ветропарка на мору (од укупно 25 у свету) [23].

Највећи број фарми ветроелектрана на мору се налази у Европи – Слика 1.6(б). До почетка 2011. године инсталирано је 1136 ветротурбина на мору укупне снаге 2946 MW у оквиру 45 фарми у 9 Европских земаља, које годишње у просеку произведу око 11,5 TWh електричне енергије. Велики број нових пројеката је у фази изградње. Користећи SCADA управљање (*Supervisory Control and Data Acquisition*) ови ветропаркови партиципирају у регулацији активне снаге заједно са конвенционалним изворима у оквиру ЕЕС.

Табела 1.1. Упоредни преглед 25 највећих ветропаркова на мору у свету у 2011. години.

Назив ветропарка на мору		Укупна инсталисана снага [MW]	Земља	Број и назив ветротурбина	Година пуштања у рад
1.	Thanet	300	Уједињено краљевство	100 × Vestas V90-3MW	2010
2.	Horns Rev II	209	Данска	91 × Siemens 2,3-93	2009
3.	Rodsand II	207	Данска	90 × Siemens 2,3-93	2010
4.	Lynn and Inner Dowsing	194	Уједињено краљевство	54 × Siemens 3,6-107	2008
5.	Walney I	184	Уједињено краљевство	51 × Siemens SWT-3,6-107	2011
6.	Robin Rigg (Solway Firth)	180	Уједињено краљевство	60 × Vestas V90-3MW	2010
7.	Gunfleet Sands	172	Уједињено краљевство	48 × Siemens 3,6-107	2010
8.	Nysted (Rodsand I)	166	Данска	72 × Siemens 2,3	2003
9.	Bligh Bank (Belwind)	165	Белгија	55 × Vestas V90-3MW	2010
10.	Horns Rev I	160	Данска	80 × Vestas V80-2MW	2002
11.	Princess Amalia	120	Холандија	60 × Vestas V80-2MW	2008
12.	Lillgrund	110	Шведска	48 × Siemens 2,3-93	2007
13.	Egmond aan Zee	108	Холандија	36 × Vestas V90-3MW	2006
14.	Donghai Bridge	102	Кина	34 × Sinovel SL3000/90	2010
15.	Kentish Flats	90	Уједињено краљевство	30 × Vestas V90-3MW	2005
16.	Barrow	90	Уједињено краљевство	30 × Vestas V90-3MW	2006
17.	Burbo Bank	90	Уједињено краљевство	25 × Siemens 3,6-107	2007
18.	Rhyl Flats	90	Уједињено краљевство	25 × Siemens 3,6-107	2009
19.	North Hoyle	60	Уједињено краљевство	30 × Vestas V80-2MW	2003
20.	Scroby Sands	60	Уједињено краљевство	30 × Vestas V80-2MW	2004
21.	Alpha Ventus	60	Немачка	6 × REpower 5M, 6 × AREVA Wind M5000-5M	2009
22.	Baltic I	48	Немачка	21 × Siemens 2,3-93	2011
23.	Middelgrunden	40	Данска	20 × Bonus (Siemens) 2MW	2001
24.	Jiangsu Rudong Wind Farm	32	Кина	2 × 3 MW, 2 × 2,5 MW, 6 × 2 MW, 6 × 1,5 MW	2010
25.	Kemi Ajos I + II	30	Финска	10 × WinWinD 3MW	2008



Да би се боље разумела и нагласила разлика у броју директних удара у уземљене високе објекте, који су процењени стандардним математичким прорачунима, у односу на реално стање на терену, у оквиру уводних разматрања узећемо као пример фарму ветроелектрана на мору Horns Rev у Данској. Овај ветропарк се састоји од 80 Вестас V80-2MW турбина укупне инсталисане снаге 160 MW, које су инсталиране на удаљености 20 km од обале, пуштен је у погон 2002. године и опремљен је савременим сензорским системима за детекцију директних атмосферских пражњења – Табела 1.1.

Укупна површина ветропарка Horns Rev је око 20 km² и пре његове изградње просечна вредност густине пражњења износила је 0,3 удара по km² годишње. После прорачуна еквивалентне површине зоне привлачног дејства, што ће бити детаљно објашњено у наредним поглављима докторске дисертације, процењен је број од 6 удара за цео ветропарк годишње. Међутим, искуство у реалном раду је показало сасвим другачију ситуацију, јер је забележено више од 50 удара годишње [2]. На овај начин потврђена је и добро позната чињеница да инсталирање уземљених ветротурбина висине 110 m на отвореном мору у великој мери повећава ризик од директног удара грома.

На основу расположивих података и искуства у раду ветротурбина из претежно Немачке и Данске у протеклих 20 година, може се закључити да се најчешћа оштећења дешавају на елисама, које су појединачно најскупља компонента ветротурбина и чија замена или поправка захтева дужи прекид у раду ветротурбине [35]. С обзиром на непрекидно усавршавање громобранских заштитних система ветротурбина реално је очекивати да ће број кварова проузрокован услед директног удара грома у елисе ветротурбина бити минимизиран. Међутим, са друге стране пошто су планови многих земаља да интензивно крену у значајнију изградњу ветропаркова на мору, при чему је тенденција да се инсталирају ветроелектране све већих инсталисаних снага и пречника ротора до 150 m, сигурно је да ће осетљивост атрактивне зоне на изузетно дугачким елисама у односу на атмосферска пражњења бити значајно повећана [36]-[41].

1.5. Искуства из авио индустрије

Атмосферска пражњења су одувек била значајан проблем у авионској индустрији. У току године се оствари преко 30 милиона летова у свету, и сваки авион у просеку годишње доживи бар један директан удар грома [42]. Директна пражњења у авионе обично се дешавају приликом полетања и слетања и могу да буду силазног типа (облак-облак и/или облак-земља), као и узлазног типа. Јадан од разлога зашто овај број није већи је због тога што су авиони опремљени савременим радарским системима и веома лако могу избећи олујно невреме, тако што ће летети измењеном рутом.

Труп великих комерцијалних авиона је претежно направљен од проводних материјала (легуре алуминијума) тако да директан удар грома у суштини улази и излази преко површине трупа. Међутим, све више се користе разни композитни изолациони и делимично проводни материјали. Boeing 747 који је пуштен у саобраћај 1970. године садржао је око 1% композитних материјала у укупној тежини, да би се овај проценат за најновији Boeing 787 попео на 50%. Такође, 25% структурних компоненти у Airbus A380 је направљено од композитних материјала.

Струја пражњења тече у површинском слоју трупа који се понаша као Фарадејев кавез и који је због ојачања целе конструкције појачан челичним жичаним тракама. Једине изолационе површине које нарушавају овакав савршен спољашњи оклоп су



пилотско ветробранско стакло, путнички прозори, купола у носу авиона у којој су смештени радарски и комуникациони системи, изолационе заштитне облоге секундарне антене итд. Да би заштита ових изолационих површина од удара грома била успешна, оне морају да имају довољну дебљину или инсталиран систем сегментираних проводних трака за прихват струје грома (*diverter strips*), као што је случај са куполом радара [2].

Спољашње површине трупа мањих авиона су обично израђене од стаклених или угљених влакана ојачаних полимерима великог отпора. Овакве композитне структуре могу се успешно штитити од директног удара грома постављањем проводног заштитног слоја на спољашњој површини летилице. На овом слоју се типично детектују тачке удара грома и он има улогу да прихвати струју пражњења, што може довести до интензивног омског површинског загревања. Због мале дебљине слоја, може доћи до испаравања на површинама у околини тачака удара и усмеравања корена лука ка суседним областима на трупу. Загревање потпорних структура испод проводног слоја ће на тај начин бити минимално и битне механичке компоненте неће бити оштећене. Када авион слети, лако може да се утврди степен оштећења и изврше све неопходне поправке. Учестала су истраживања да се материјали коришћени у авио индустрији примене и за израду елиса и других угрожених делова ветротурбина.

Са друге стране, очекује се да громобрански заштитни систем који је инсталиран на елисама савремених ветротурбина ефикасно функционише, без значајнијег одржавања, током целокупног пројектованог радног века ветротурбине (20-25 година). Такође, авиони су приликом полетања/слетања на недефинисаном (лебдећем) потенцијалу, док су уземљене ветротурбине на потенцијалу земље. Ветротурбине су стационарне конструкције са ротирајућим елементима и у знатно већој мери су изложене атмосферским пражњењима, која су претежно узлазног карактера и иницирана са врхова дугих елиса. У наредним поглављима биће анализирано у којој мери се принципи заштите који се успешно примењују у авио индустрији могу имплементирати приликом израде елиса ветротурбина.

1.6. Усавршавање конструкције елиса ветроелектрана и развој принципа за њихову заштиту од директног атмосферског пражњења

Елисе ветротурбина имају веома сложену структуру и пре свега су пројектоване да имају добре механичке особине. Оне морају да имају супериорне аеродинамичке карактеристике, треба да буду лагане и довољно чврсте да би издржале велика оптерећења услед краткотрајних налета јаког ветра, неопходно је да поднесу интензивна напрезања због великих вредности сила које делују на врховима елиса током обртања ротора и да без битних оштећења у конструкцији, најчешће због директних удара грома, буду у функцији цео радни век ветротурбине. Ради константног побољшања перформанси елиса, избор различитих типова конструкције и одговарајућих материјала, који су најпогоднији за задовољавање наведених захтева је веома мали, и зато на располагању остаје само веома мали број параметара за усавршавање целокупне громобранске заштите.

Узимајући у обзир претходна разматрања поставља се неколико битних питања. Који параметри се могу оптимизовати у процесу производње елиса који је заснован на стандардној и већ доста усавршеној технологији, са циљем побољшања укупне конструкције елиса у односу на електрична пражњења. За конвенционалне елисе ветротурбина на којима је инсталиран стандардни громобрански заштитни систем, на



постојећем нивоу развоја технологије из ове области, оптимизација одређених карактеристика конструкције и примењених материјала ће побољшати укупну ефикасност громобранске заштите. Међутим, упркос томе важно је спроводити и даља истраживања како би се верификовала и упоређивала различита решења за оптималан систем заштите ветроелектрана од атмосферских удара.

У вези са развојем нових метода и процедура испитивања, намеће се и питање на који начин је могуће поуздано обавити тестирање елиса савремених ветротурбина, како би се извршила провера њихових конструктивних карактеристика и ефикасности инсталираног громобранског заштитног система. У оквиру докторске дисертације приказани су оригинални принципи за испитивање, компарацију и побољшање различитих заштитних система на елисама ветротурбина и извршена је процена века трајања ветротурбине без озбиљнијих оштећења. Такође, детаљно је испитано да ли ротација елиса ветротурбине има ефекат на перформансе громобранске заштите, што је потпуна новина у стручној литератури.

На основу расположивих података из праксе о понашању ветротурбина у односу на атмосферска пражњења, закључено је да око 20-25% кварова настаје услед директног удара грома у ветротурбину са прописано инсталираном громобранском заштитом (превасходно на врховима елиса), а преостали значајан проценат чине кварови због индиректног дејства атмосферског пражњења у прикључне напојне водове, нисконапонске инсталације слабе струје за комуникацију и осетљива електронска кола за аквизицију података, надзор и управљање – Слика 1.7(а). У просеку између 3,5-9% ветротурбина годишње испадне из погона због дејства директног и индиректног атмосферског пражњења [35].

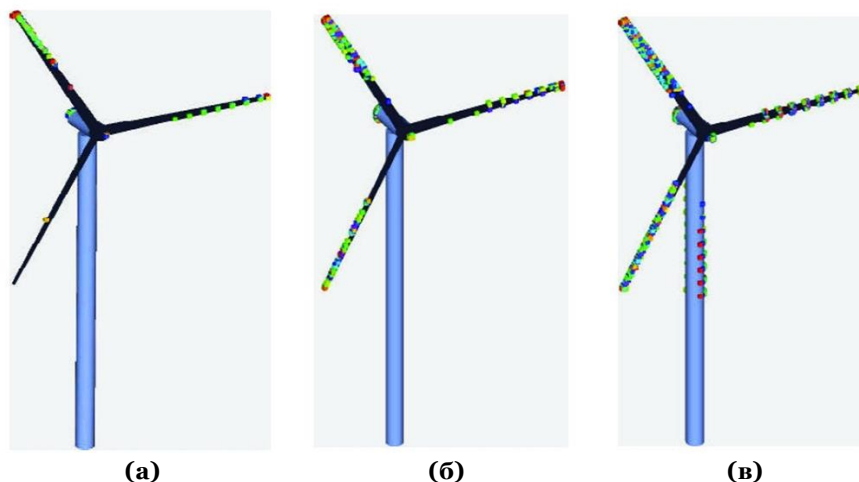


Слика 1.7. (а) Типична дистрибуција кварова по компонентама ветротурбине. **(б)** Најчешћа детектована расподела тачака удара грома дуж елисе ветротурбина већих димензија.

Готово сви директни удари грома у ветротурбине погађају роторске елисе, које су најскупље појединачне компоненте ветротурбина (учествују у цени укупних трошкова са око 15-20%, њихово сервисирање најдуже траје и нарочито је скупо за ветропаркове на мору) и/или евентуално друге истакнуте делове ветротурбина (метеоролошки инструменти, сигнална светла, спољна конструкција гондоле итд.). Више од 88% директних удара грома настаје унутар растојања од 1 m од врха елисе, где је она најтања (дебљина површинског слоја на врху елисе је између 2-10 mm) - Слика 1.7(б) [43]. Такође је уочен и повећан ризик од оштећења дуж спољашње конструкције гондоле и стуба ветротурбине за струје пражњења чије су вредности мање од 20 kA - Слика 1.8 [44]. Расподела вероватноће вредности очекиваних струја директних пражњења показује да су



удари грома на елисама праћени са највећим амплитудама струја у односу на друге истакнуте компоненте [45].



Слика 1.8. Повећање ризика од удара грома са струјама мањих амплитуда по спољној површини гондоле и стуба. Могуће тачке удара грома за 2000 најјачих удара и за: **(а)** $I_{\max} \leq 100$ кА. **(б)** $I_{\max} \leq 50$ кА. **(в)** $I_{\max} \leq 20$ кА. Иницирање узлазног лидера настаје са већег растојања у односу на врх силазног лидера при већим очекиваним максималним вредностима струја главног пражњења, при чему ниже максималне вредности ових струја омогућавају да се силазни лидер приближи више ветротурбини пре него што започне пропација узлазног лидера.

У току развоја и усавршавања конструкције елиса ветротурбина могу се уочити следеће битне фазе (Слика 1.9):

- **Фаза I:** До 2000. године највећи број елиса ветротурбина није имао громобранске заштитне системе. Само на ветротурбинама највећих снага на врховима елиса су биле инсталиране проводне капе и водећи рецептори, који су преко спусних проводника у унутрашњости елиса спроводили струју пражњења у земљу. Сматрало се да заштита није неопходна пошто су елисе биле направљене од непроводног *GFRP* (*glass fiber reinforced plastic*) композитног материјала – фибер стакло ојачано пластиком (полиестер или епоксид). Типичне карактеристике ових материјала су: затезна чврстоћа $\sigma=200$ MN/m², густина $\rho=1,8$ t/m³ и $\rho/\sigma=9 \cdot 10^3$.

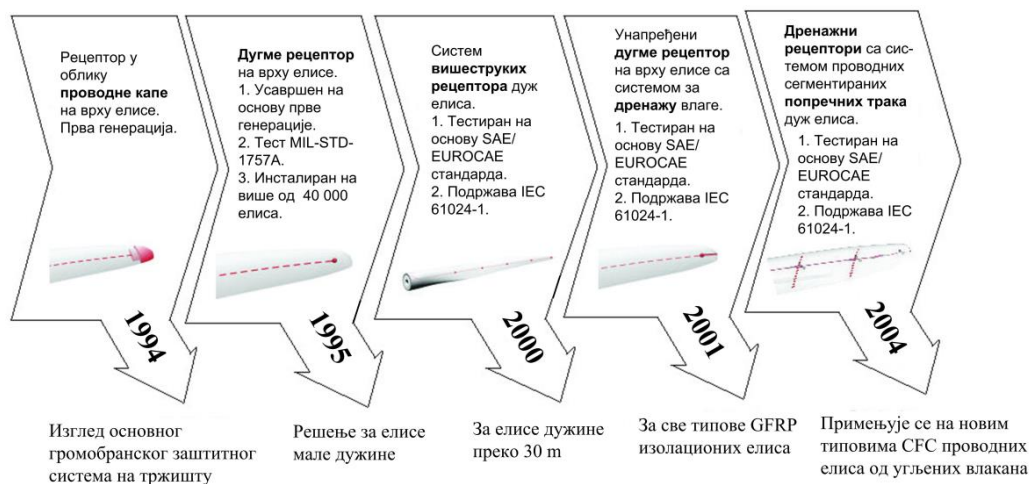
Табела 1.2. Статистички подаци о директним атмосферским пражњењима у истакнуте делове ветротурбина на испитиваном узорку у периоду 1995-2005. година [35].

Држава	Број ветротурбина (V) · број година експлоатације (G), $R = V \cdot G$	Број директних удара у ветротурбине (N)	Однос N/R
Данска	22000	850	0,0386
Немачка	9205	740	0,0804
Шведска	1490	85	0,0571

Међутим, пракса је показала да долази до значајног пражњења у елисе и друге истакнуте делове ветротурбина због чега је претходни приступ морао да буде промењен – Табела 1.2. Уобичајена фреквенција укупног броја кварова била је између 4-14 на 100 ветротурбина годишње, у зависности од локације изградње и



типа ветротурбина [35]. Трошкови сервисних интервенција су се повећавали са порастом инсталисане снаге и величине ветротурбина. Усавршавањем конструктивних, енергетских и управљачких система ветротурбина број кварова се видно смањивао. Разни композитни материјали на бази дрвета нису комерцијално прихваћени. Такође, челик и легуре алуминијума имају проблем са замором материјала и тежином.



Слика 1.9. Константан развој громобранских заштитних система на елисама ветротурбина.

- **Фаза II:** Од 2000. године све елисе ветротурбина, иако су направљене од *GFRP* непроводних материјала, имају инсталиран прихватни систем у виду бар једног рецептора на врху елисе, ако су оне мањих дужина, до 20 m (на дужим елисама више рецептора је у дискретним корацима монтирано од врха ка корену елисе) и систем спусних проводника за одвођење струје у земљу [35]. И поред овако изведеног начина заштите и даље су бележена оштећења на елисама, али у знатно мањем проценту.
- **Фаза III:** Од 2004. године, нарочито на ветроелектранама већих снага на мору, код којих маса крака ротора достиже и до 20 t, почиње интензивна употреба елиса од *CFC* (*carbon fibre composites*) композита, због супериорних аеродинамичких и механичких карактеристика и мале тежине. Међутим, пошто су *CFC* композити делимично проводни ($\sigma_{CFC} = (3,8-7,4) \cdot 10^4$ S/m – до 1000 пута су мање проводни од алуминијума), јер се састоје од угљених влакана и арамида (Кевлар) ради ојачавања конструкције, детектован је повећан број удара у елисе и поред инсталиране унапређене рецепторске громобранске заштите. Карактеристике ових материјала су: затезна чврстоћа $\sigma=650$ MN/m², густина $\rho=1,5$ t/m³, $\rho/\sigma=2,3 \cdot 10^3$ и знатно су скупљи од *GFRP* композита.

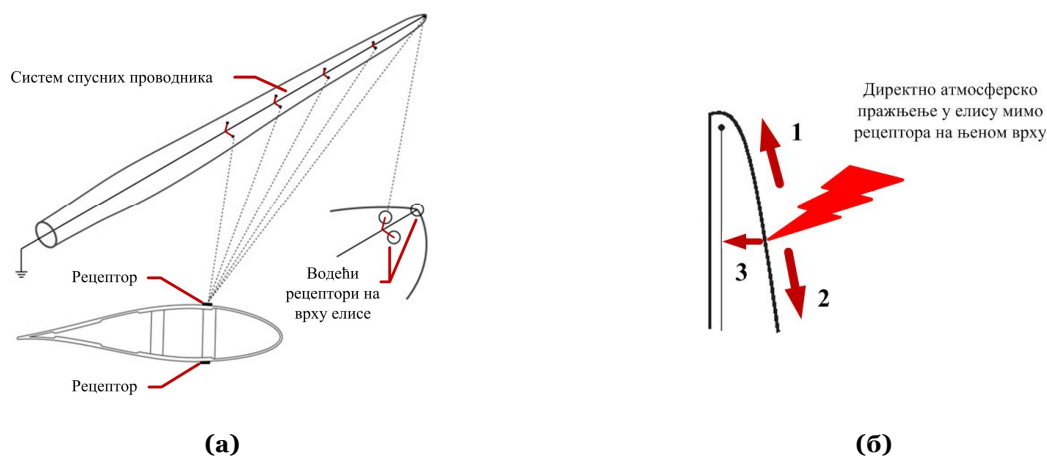
Због појаве вртложних струја у унутрашњости *CFC* композита и повећаних расипних губитака, изражено је механичко напрезање елиса. У циљу умањивања наведених ефеката, уместо једног, честа је употреба два спусна проводника на свакој елиси (смањују се вредности магнетног поља у унутрашњости елисе) и примењује се нормална орјентација композита у односу на правац спусних проводника (смањују се губици услед расипања). Такође, неопходно је и електрично спајање проводних делова *CFC* композита у површинском слоју елисе и елемената громобранске заштите.



Постојећи системи за прихват струје пражњења на елисама ветротурбина су тако пројектовани да могу успешно да поднесу око 98% директних удара, али још увек постоји ризик од локалних оштећења и продора пражњења, нарочито у тачкама удара или у њиховој околини. Овај проценат у највећој мери зависи од врсте композитног материјала који је употребљен за израду елиса (изолациони GFRP композити са стакленим влакнима или делимично проводни CFC композити од угљених влакана), затим од типа инсталираног громобранског заштитног система на елисама и њихове дужине [46]-[48].

Током многобројних истраживања у којима се врше напори да се пронађе најповољније решење за смањивање степена оштећења на елисама због директних атмосферских удара, неопходно је анализирати унутрашње и спољашње услове рада ветроелектране. Унутрашњи услови разматрају конструкцију елиса и врсте употребљених композитних материјала за њихову израду, а спољашњи услови обухватају различите временске прилике којима су елисе изложене током обртања променљивом брзином [1]-[2].

Избором и комбиновањем одговарајућих материјала на оптималан начин, произвођач може значајно да повећа могућност најутроженијих делова конструкције ветротурбине да у већој мери поднесу последице услед директног удара грома. Ово се може урадити побољшањем диелектричне пробојне чврстине изолационих или делимично проводних материјала, узимајући у обзир какви ће бити ефекти електричног поља на проводним елементима елиса и естимацијом у којим тачкама на површини елиса може доћи до иницирања стримера и лидера пре главног пражњења. Сви наведени утицаји се морају у потпуности размотрити и узети у обзир приликом пројектовања и конструкције елиса и током истраживања сложених физичких појава које настају на врховима ротирајућих елиса у условима јаких електричних поља и агресивног спољног окружења [49].



Слика 1.10. (а) Приказ типичног заштитног громобранског система на елисама ветротурбине. **(б)** Директан удар грома у елису ветротурбине мимо рецептора на њеном врху и могуће путање струје пражњења: **1.** Путања пражњења дуж површинског слоја елисе ка њеном врху (ка рецептору); **2.** Путања пражњења дуж површинског слоја елисе ка њеном корену; **3.** Пражњење кроз композитни материјал елисе ка спусном проводнику у њеној унутрашњости – бочни удар.

Поред тога, потребно је применити различите громобранске мере заштите [50]-[53]. Прихватни систем на елисама се фабрички уграђује у току њихове производње или се накнадно инсталира на новим елисама, са циљем да заштити елисе од оштећења која могу да настану услед директних атмосферских удара. С обзиром да се последњих година



израђују елисе од СFC проводних композита са дужинама и преко 65 m, ова чињеница је од изузетне важности. Као што ће бити детаљно представљено у наредним поглављима докторске дисертације, заштитни систем на елисама ветротурбина се најчешће састоји из два главна дела – компоненте за прихват струје пражњења у тачки удара (рецепторски системи) и система спусних проводника.

Тачка удара је место где долази до спајања канала пражњења грома са тачком на спољној површини уземљене ветротурбине (најчешће на врховима елиса) [54]-[55]. Најпожељнија ситуација би била она, када се положај тачке удара на површини елисе не би мењао током протицања струје пражњења. У овом случају, могуће је инсталирати рецепторски заштитни систем у процењеној тачки удара, који би прихватио струју пражњења и омогућио њено одвођење у земљу током удара. Искуство показује да рецептор постављен на врху елисе представља ефикасну заштиту ако елисе имају дужину до 20 m. На елисама већих дужина осим водећег рецептора на врху, инсталира се и одређен број додатних рецептора (на обе стране елисе) у равномерним корацима од врха према корену елисе - *Слика 1.10(а)*. Такође, проводници у систему ове заштите морају да имају адекватну површину попречног пресека [35].

Основни механизам оштећења настаје када струја директног атмосферског пражњења запали површину елисе и успостави се електрични лук у ваздуху у њеној унутрашњости (*Слика 1.10(б)*). Максимална температура у каналу пражњења може краткотрајно да достигне вредност до $30 \cdot 10^3$ °C, што је око 5 пута више од температуре на површини Сунца (извор LM Glasfiber A/S, Данска, водећи светски произвођач елиса за ветротурбине). Због напрезања којима је тада елиса изложена може доћи до површинских оштећења и напрснућа конструкције, а због испаравања унутрашњег композитног материјала елисе, услед развијене топлоте, ствара се велики пораст притиска у околини корена лука, који доводи до експлозије елисе – *Слика 1.11*. За елисе ветротурбина у влажном и загађеном окружењу (типични услови за ветропаркове на мору), много је мања ефикасност постојећег громобранског заштитног система, у односу на случај када су елисе суве (што је при временским непогодама тешко очекивати) и израђене од изолационих или делимично проводних материјала са незапрљаним спољним површинама.



Слика 1.11. Типична тешка оштећења која могу да настану у зони привлачног дејства на елисама, гондоли и другим истакнутим компонентама ветротурбине услед директног удара грома.

Након што се струја атмосферског пражњења, преко постављених проводника, доведе до средишта ротора, остаје проблем како да се талас задржи ван стуба и безбедно спроведе у тло. При томе, треба обезбедити да се опрема на стубу не оштети. Дакле, када се детектује тачка удара, струја пражњења се одводи ка уземљивачу ветротурбине преко самог стуба, ако је он метални, или преко спусних проводника, који се могу инсталирати на неколико различитих начина. Материјали који се користе за израду прихватног



система и спусних проводника, као што су бакар, алуминијум, челик и њихове легуре, морају имати одличне термалне и електричне карактеристике [35].

Контролни и електрични уређаји се штите од атмосферских пражњења дељењем ветротурбине на зоне, зависно од тога да ли је могућ директан продор атмосферског таласа и колика је вредност струје и електромагнетног поља у свакој зони [30]. Унутар сваке зоне компоненте су тако пројектоване да издрже очекивана напрезања. Основни механизми који доводе до оштећења електричних и контролних уређаја су директно провођење великих струја и њихово електромагнетно спрезање са положеним инсталацијама, док су главне мере заштите квалитетно спајање (изједначавање потенцијала), ефикасно оклапање и употреба адекватних уређаја пренапонске заштите на границама појединих зона.

Спољашњи услови се односе на интеракцију елиса ветротурбине и различитих временских услова током лепог времена, као и настанак јаких, променљивих и неуниформних електричних поља за време олуја праћених грмљавином.

1.7. Полазне хипотезе рада, предмет, циљ и научне методе истраживања

Тема докторске дисертације је изузетно актуелна због, као што је већ објашњено, интензивног ширења примене ветроелектрана широм света са једне стране, а са друге стране због њихове осетљивости на атмосферске ударе и тешких последица које при томе настају. Константан развој заштитних система ветроелектрана од директног удара грома и индукованих пренапона има изузетан значај, како би се смањиле штетне последице због механичких оштећења елиса, кварова на електричној и електронској опреми и испада ветроелектрана из погона.

Основни циљ истраживања је процена угрожености ветроелектрана за различите примењене методе заштите од директног удара грома. У првом делу докторске дисертације дат је преглед постојећих метода за заштиту ветроелектрана од директних и индиректних атмосферских пражњења. Извршено је детаљно разматрање карактеристика електричног пражњења у присуству ветроелектрана и специфичности њихових громобранских заштитних система. Такође, урађена је компарација и упоредна анализа различитих типова заштитних система.

Познато је да због стохастичке природе ветра брзина ротације елиса савремених ветротурбина w варира у опсегу између 0 и 25 о/мин. Управљачки систем ветротурбине обезбеђује максимално могућу расположиву електричну снагу p_{el} у сваком тренутку и при свакој брзини ветра $v_{ветра}$. Номинална брзина обртања ветротурбина великих снага и са дугачким елисама је између 13-18 о/мин [1]. У литератури има мало података о утицају ротације елиса ветрогенератора на атрактивну зону пражњења. У оквиру докторске дисертације је, први пут у свету, направљен покушај да се испита да ли постоји утицај ротације елиса на број и начин атмосферског пражњења у зони прихватног система на врховима изолационих и/или проводних елиса ветротурбине, што се до сада није систематски проучавало. Примењена је метода физичког моделовања и лабораторијског испитивања.

Основни очекивани резултати истраживања су: развој методологије испитивања ефикасности громобранске заштите ветроелектрана у условима ротације елиса, формирање физичког модела, унапређење модела пражњења и избор оптималне методе



за одређивање промене атрактивног ефекта. У том циљу је извршено експериментално утврђивање разлике у прескочним ударним напонима између посебно обликоване лучне електроде и елиса умањеног и специјално конструисаног модела ветротурбине, која је покретана помоћу фреквентно управљаног индукционог мотора. Специјална лучна електрода има улогу еквивалентног извора електричног поља, који симулира утицај врха скоковитог лидера у претпоследњем скоку, а да при томе тренутни положај елиса уопште не утиче на величину међуелектродног размака. Модел ветротурбине је потпуно веран оригиналу, само смањених димензија и без електричног генератора. Овакав начин високонапонског испитивања је потпуна новина у свету и никада до сада није вршено.

У току испитивања на моделу обављена је детаљна анализа ефикасности примењених различитих метода громобранске заштите елиса ветротурбине (примена уземљених проводних капа на врховима елиса од изолационог материјала, употреба електрода-рецептора у облику дугмади у близини врхова елиса и испитивање елиса без инсталираних заштитних система). На основу теорије сличности утврђене су карактеристике директних атмосферских пражњења за следеће типичне ротационе брзине елиса: $\omega = 0$ о/мин (када се ветрогенератор не обрће), $\omega = 250$ о/мин (симулирани су ветрови умерене јачине) и $\omega = 400$ о/мин (номинална брзина ротора). Доказано је да се добијени резултати и закључци могу применити и на ветроелектранама великих снага, што је један од најважнијих доприноса докторске дисертације.

Као критеријум се користио 50% прескочни ударни склопни стандардни напон одређен методом горе-доле за елисе које мирују и које се врте наведеним брзинама, за примењене различите методе громобранске заштите [33]. Испитивање промене еквивалентног ударног растојања атмосферског пражњења у високонапонској лабораторији обављено је користећи ударне таласе негативног поларитета до 2000 kV и таласе позитивног поларитета до 3500 kV. На основу промене прескочног напона анализом резултата донет је закључак о утицају ротације на атрактивност елиса ветрогенератора на атмосферске ударе.

У лабораторијским условима детектовано је смањење броја директних удара у зони прихватног система на елисама ветротурбине када се ротор обртао, у односу на случај када су елисе биле стационарне. Такође, у ваздушном зазору између лучне електроде и ротирајућих елиса ветротурбине истовремено са повећањем брзине обртања елиса забележено је смањење вредности резултујућег електричног поља и пораст 50% прескочних напона оба поларитета, који су добијени на основу методе горе-доле. Описани ефекти су били знатно више изражени код тестова са позитивним пражњењима, што се такође поклапа са теоријским анализама.

Анализирајући таласне облике ударних напона оба поларитета примећена је повећана дисперзија прескочних напона и приметно изражена транзијентност ударних напона током ротирања елиса ветротурбине. Наведени ефекти постајали су доминантнији са повећањем ротационе брзине елиса и били су израженији код тестова са позитивним пражњењима. Током високонапонског испитивања на моделу ветротурбине у лабораторијским условима добијен је одређен број неочекиваних резултата који се не поклапају са теоријским хипотезама. Зато је потребно додатно проверити и потврдити добијене резултате у реалним условима. Такође, важно је да се изврше и додатна истраживања.

На основу особина директног атмосферског пражњења, узимајући у обзир стохастичку природу ветра и утицај ротације елиса на број пражњења и користећи



комерцијално доступне софтвере, у оквиру додатних доприноса током истраживања, извршена је процена очекиваног броја година рада ветротурбине без оштећења елиса од директног удара грома за различите примењене методе заштите. Такође, на основу испитивања на физичком моделу, анализе различитих концепата заштите ветротурбина од удара грома и симулације рада у реалним условима, предложен је унапређен принцип заштите ветроелектрана од директног атмосферског пражњења [56]-[57].

1.8. Кратак садржај докторске дисертације по поглављима

У уводном поглављу је објашњен значај ветроелектрана у оквиру савременог ЕЕС и дат је преглед актуелног стања из области громобранске заштите ветроелектрана. Како би се заштита елиса ветротурбина од директног удара грома сместила у шири контекст, у другом поглављу су укратко приказани главни делови савремене ветротурбине, која је веома комплексан уређај. Посебна пажња је посвећена анализи карактеристика и начинима заштите појединих виталних компоненти кроз које протиче главни део струје пражњења. Такође, у овом поглављу су размотрени различити принципи за заштиту композитних материјала од атмосферског пражњења и објашњено је које врсте композита и у којој мери могу да се користе за израду елиса ветротурбина.

У трећем поглављу дат је преглед специфичности, карактеристика и релевантних параметара атмосферских пражњења која типично погађају ветроелектране које су погону. Анализирани су нумерички поступци за процену ударних растојања и могућих тачака удара грома у ветротурбину. Главне особине и принципи заштитних система ветроелектрана од атмосферских пражњења детаљно су приказани у поглављу бр. 4. Извршена је анализа могућих тачака удара грома у елисе савремених ветроелектрана пуне величине и размотрене су последице које при томе могу настати. Затим је са теоријског становишта детаљно испитан утицај ротације елиса ветротурбина на број и особине атмосферског пражњења.

У петом поглављу су дати резултати експерименталног истраживања. Извршена је компарација ефикасности примењених различитих метода громобранске заштите на елисама умањеног модела ветротурбине. Добијени су важни закључци у погледу промене угрожености ветроелектрана од атмосферских пражњења у условима мировања и ротације елиса и имплицитно су одређене промене атрактивних зона. Као резултат целокупног истраживања усвојен је унапређен принцип заштите ветроелектрана од директних атмосферских удара. Објашњено је да се добијени резултати у високонапонској лабораторији могу, на основу теорије сличности, применити и на актуелне ветротурбине које су у погону широм света. Ова тврдња уједно представља и најбитнији допринос докторске дисертације. Такође, извршена је процена очекиваног броја година рада ветротурбине без оштећења елиса приликом директних атмосферских пражњења за различите примењене методе громобранске заштите на елисама ветротурбина.

У шестом поглављу, на основу теорије дугих прескока, дато је физичко тумачење анализираних феномена за стационарно стање (када елисе мирују) и у случајевима када се елисе обрћу променљивом брзином. Извршена је дискусија добијених резултата. У поглављу бр. 7 дати су главни закључци и доприноси докторске дисертације и смернице за будући рад. У последњем поглављу наведен је списак коришћене литературе, дат је попис слика и табела по поглављима и биографски подаци о аутору. На крају су дати прилози, објављен рад у часопису са ScI листе у вези са темом дисертације и изјаве.



ПОГЛАВЉЕ 2

ВЕТРОЕЛЕКТРАНЕ

ГЛАВНЕ КОМПОНЕНТЕ, ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА ЗА ГРОМОБРАНСКУ ЗАШТИТУ И ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ЗАШТИТЕ ОД ДИРЕКТНИХ И ИНДИРЕКТНИХ АТМОСФЕРСКИХ ПРАЖЊЕЊА

Како би се громобранска заштита елиса ветроелектрана ставила у шири контекст, ово поглавље је написано ради кратког прегледа главних компоненти савремене ветротурбине, која је веома сложен електро-механички уређај. Друго, анализирани су принципи за громобранску заштиту ветроелектрана применом различитих изолационих и делимично проводних композитних материјала, а на основу искуства из авио индустрије. На крају је дата комплетна типична шема заштите ветроелектране од директних атмосферских удара и индукованих пренапона.

2.1. Ветроелектране у оквиру савременог ЕЕС

Расположива енергија ветра је кинетичка енергија велике масе ваздуха који се креће изнад површине земље. Елисе ротора ветротурбине прихватају енергију струјања ваздуха, која се затим трансформише у електричну или механичку енергију. Ефикасност конверзије енергије ветра у друге корисне облике енергије примарно зависи од ефикасности интеракције ротора ветротурбине и ветра. Снага ветротурбине је сразмерна са трећим степеном брзине ветра [7]. Дакле, боље је инсталирати ветроелектрану на месту где постоји могућност повремене појаве јаких ветрова него у подручју са константном брзином ветра. Као дистрибуирани извори електричне енергије ветроелектране су изузетно осетљиве на директна атмосферска пражњења.

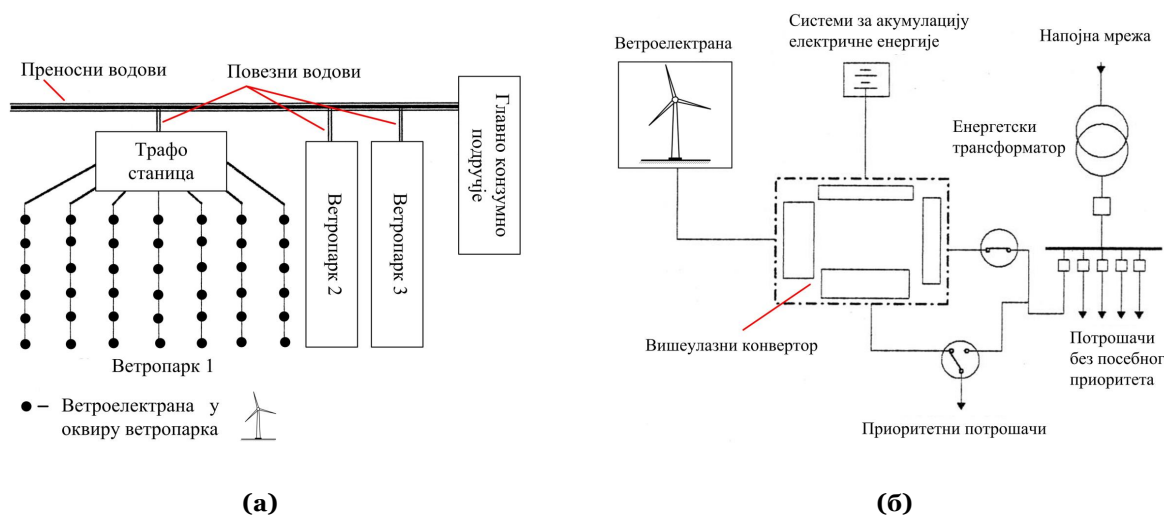
Локални ефекти ветра су веома важни са становишта избора турбине, јер се може догодити да ветроелектрана буде лоцирана у ветровитом подручју, али да на потенцијално одабраном месту њеног инсталирања ветровитост буде значајно мања. Главни ефекти који се типично разматрају су: храпавост терена у близини ветротурбине, променљивост брзине ветра, турбуленције, препреке испред турбине, ефекат слабљења ветра, ефекат парка, ефекат тунела, ефекат брда итд. Анализа токова ветра је потребна за сваку локацију појединачно, при чему се варијације брзине ветра најчешће представљају Вејбуловом (*Weibull*), или Рејлејевом (*Rayleigh*) расподелом [1].

На данашњем степену развоја ветротурбине производе електричну енергију са најнижим могућим трошковима и са највећом могућом поузданошћу. Од 1991. године када је у Данској изграђен први ветропарк на мору, један од главних циљева истраживања је био како остварити да велики број ветротурбина ради заједно као једна електрана. Досадашњи резултат је да велики ветропаркови учествују у регулацији напона и фреквенције исто као и централизоване конвенционалне електране. Штавише, управљање се остварује много већом брзином, тако да се производња електричне енергије може регулисати од нуле до пуног оптерећења за мање од десет секунди [2].

Заједничка производња из више ветроелектрана има важан и позитиван утицај на погон ЕЕС и квалитет електричне енергије. Повећањем броја ветротурбина у постојећим



ветропарковима се елиминира негативан утицај турбулентних пикова ветра, јер удари ветра не погађају све турбине у исто време. У идеалним условима, проценат варијације излазне снаге опада сразмерно са $\sqrt{n^{-1}}$, где је n -број ветрогенератора (број ветротурбина у ветропарку не мора да буде велики да би се остварио значајан ефекат) [22]. Изградњом ветропаркова на већим географским површинама се значајно смањује негативан утицај дневних и синоптичких пикова, јер се промене времена не одражавају једновремено на све ветропаркове. Ако се талас креће преко веће територије, варијација у производњи ће бити знатно мања ако се има више мањих ветропаркова на већој површини, него ако је већи број ветротурбина сконцентрисан у једном ветропарку. Колика треба да буде површина на којој ће бити распоређени ветропаркови, са којим бројем турбина и са којом снагом зависи од метеоролошких прилика и конкретне конфигурације терена.



Слика 2.1. (а) Принципијелна шема прикључења неколико фарми ветроелектрана на преносну мрежу. (б) Типична шема везивања дистрибуираних генератора са ветротурбином.

Прикључење ветротурбине на мрежу зависи од њене намене (могу да раде појединачно, или у оквиру фарме ветроелектрана - ветропарк) – Слика 2.1(а). Ветроелектране се, најчешће, прикључују на средње-напонску дистрибутивну мрежу и на преносну мрежу (изузетно, у случају мале инсталисане снаге, могуће је прикључење и на ниско-напонску мрежу). Ако је постојећа електрична мрежа далеко, или уопште не постоји, за напајање електричном енергијом, могу се користити ветроелектране које самостално раде (плански острвски рад). Параметри произведене електричне енергије морају да одговарају прописаним вредностима. Хибридни системи су они системи у којима се комбиновано користе ветроелектране са другим изворима електричне енергије (обично се користе комбинације ветротурбина-фотонапонске ћелије, или ветротурбина-дизел агрегат). Током периода са довољном брзином ветра, или ако постоји систем за акумулирање електричне енергије, типична конфигурација приказана на Слици 2.1(б) се користи као подршка за одржавање жељеног квалитета електричне енергије, или за изравнавање дијаграма оптерећења.

Процена да ли се ветроелектрана може прикључити на мрежу првенствено се базира на њеном утицају на друге кориснике мреже. Кључни параметри релевантни за прикључење ветроелектрана на мрежу су: споре промене напона у стационарном стању, брзе промене напона (које могу довести до појаве фликера), изобличење напонског таласа (виши хармоници), неравнотежа напона и транзијентне варијације напона. При



анализи спорих промена напона у стационарном стању узимају се у обзир два гранична случаја: минимална потрошња-максимална производња и максимална потрошња-минимална производња дистрибуираног извора. Поједине ветроелектране могу бити искључене са мреже у случају екстремних експлоатационих услова. Ако се ветроелектране великих снага прикључују на слабу мрежу потребно је спровести додатне анализе када су у питању падови напона и стабилност система.

Прикључењем ветроелектране на мрежу не сме да се снизи квалитет електричне енергије, као ни квалитет напајања потрошача [22]. За ветротурбине са променљивом брзином обртања, где се користе уређаји енергетске електронике, мора се размотрити хармонијска дисторзија напона. Код ветротурбина сталне брзине обртања неопходно је анализирати могућност недозвољеног повишења напона у тачки прикључења. Током нормалног погона континуално се мења произведена снага ветроелектране. Због тога се јављају периодичне варијације снаге, са учесталосту једнакој учесталости обртања ротора турбине (приближно 1 Hz за велике турбине), које се могу суперпонирати на споре варијације, које су последица промена брзине ветра. Такође, могу се јавити и вишефреквентне варијације снаге (учесталости неколико Hz), узроковане динамиком турбине. Код ветротурбина променљиве брзине обртања брзе варијације снаге се не преносе у мрежу, јер се пригушују захваљујући инерцији ротора. Међутим, код турбина сталне брзине обртања, које обрћу индукционе генераторе, брзе варијације снаге ће узроковати промене излазне снаге, што ће резултирати у варијацији мрежног напона.

Подаци из праксе по питању квалитета електричне енергије показују да када се прикључују ветропаркови са великим бројем генератора (више од 10) критичан је пораст напона током стационарног погона. Уколико се појединачне ветроелектране везују на слабу мрежу ограничавајући фактор могу да буду транзијентне промене напона. Испуњење захтева у вези са квалитетом електричне енергије намеће нова конструкциона решења и повећава употребу турбина променљиве брзине обртања са активним *stall*-управљањем, чиме се редукују транзијентне варијације излазне снаге ветроелектране [7].

Пропади напона (0,1-0,9 р.ј. у периоду до 1 минута као последица кварова у мрежи) су од нарочитог интереса, јер могу да доведу до недозвољене брзине ротације ветротурбине сталне брзине обртања. На овај начин може доћи до повећане потрошње реактивне снаге, што резултује даљим падом напона мреже. На крају, могу реаговати контактори и поднапонска заштита. Повишења напона (изнад 1,1 р.ј.) су ређа и не представљају проблем за ветроелектране. Хармонијска дисторзија напона узрокује повећане губитке у генераторима ветроелектрана, ремети рад контролних система и уређаја енергетске електронике. Транзијентни прекиди су потенцијално опасни, јер може доћи до спајања супротних фаза система, што може да узрокује оштећење индукционих генератора.

Да би се избегло овакво стање, уобичајено је да се користи заштита од губитка мрежног напона, која одваја ветроелектрану од електричне мреже. Неравнотежа мрежног напона има утицај на индукционе генераторе, јер повећава губитке и узрокује варијације момента машине. Због напонске неравнотеже, напонски конвертори могу да ињектирају вишехармоничне компоненте у мрежу. Ветроелектране променљиве брзине обртања, које користе уређаје енергетске електронике, ињектирају у мрежу вишехармоничне компоненте. Неравномерно оптерећење доводи до неравнотеже напона. Ветроелектране променљиве брзине обртања могу да раде и као потрошачи и као произвођачи реактивне снаге, при испоруци активне снаге у мрежу, што може да доведе до нежељених стационарних варијација напона.



Релејна заштита појединачних ветроелектрана и ветропаркова има више специфичности [22]. Пошто се ветропаркови углавном граде у руралним подручјима и прикључују на мрежу преко дугих водова, њихов утицај на висину струје квара у случају пробоја изолације је релативно мали. Ово је погодно са становишта снижења ризика од оштећења опреме, али не и када је у питању брза детекција квара (због мале вредности струје квар може да остане недетектован). Турбине сталне брзине обртања покрећу индукционе генераторе, а ветроелектране променљиве брзине обртања везују се на мрежу посредством напонских конвертора. Пошто ни индукциони генератори ни напонски конвертори нису поуздани извори струје квара, употребљени релеји (напонски и фреквентни) морају бити способни да детектују све врсте поремећаја који су у овом случају двострано нападају.

Са становишта заштите, ветропарк може бити третиран као велики моторни погон у оквиру индустријског постројења (у свакој ветроелектрани момент се испоручује на погонску осовину турбине која обрће генератор, док се у индустријском погону момент испоручује на осовину мотора). Учесталост и напон на крајевима ветрогенератора одређени су условима у мрежи. Струја квара у дистрибутивној мрежи представља основни параметар за детекцију квара, мада постоји могућност да се то уради и на основу струје која на место квара дотиче из ветроелектране. Ако постоји могућност острвског рада ветроелектране, или било ког дистрибуираног извора релејна заштита мора бити способна да адекватно реагује.

За рад ветроелектрана са турбинама сталне брзине обртања и индукционим генераторима потребна је реактивна снага [1]. Да би се што више смањило узимање реактивне снаге из мреже, уобичајено је да се у ветроелектрани инсталирају батерије кондензатора. Међутим, ако се из било ког разлога ветроелектрана искључи са мреже стварају се услови да наступи резонанса. Ова ситуација је позната као самопобуђивање генератора, при чему долази до повишења напона на крајевима статора. Пошто је генератор неоптерећен он ће повећавати своју брзину обртања, што погодује појави самопобуђивања, које се може избећи адекватним избором капацитивности инсталираних батерија. Избор се врши у опсегу учесталости које се могу јавити у условима прекомерних брзина обртања генератора. Могу се применити и брза пренапонска и надфреквентна заштита, које ће зауставити турбину ако ветроелектрана пређе у острвски погон.

Као и за све техничке системе, одржавање ветроелектрана може се класификовати као корективно и превентивно, што подразумева периодичну замену филтера за уље, система за подмазивање, анализу уља у редуктору, визуелну контролу лопатица, зупчаника у редуктору и четкица генератора. Системи за надзор стања се користе на погонским механизмима великих ветроелектрана, са обавезним системом за континуално мерење вибрација. Процену стања, најчешће, врши произвођач, који прописује учесталост појединих активности у склопу превентивног одржавања, које се спроводи на свака три месеца (током прве године), а затим на сваких шест, или дванаест месеци, зависно од типа ветроелектране.

Типична мерења која се спровode на ветроелектранама су мерења струје, напона, температуре и притиска, и представљају део SCADA-система. Остала мерења која се спровode омогућавају детектовање квара у раној фази и обухватају мерење вибрација и анализе уља, ултразвучну инспекцију, мерења на елисама (оптерећење, вибрације, температура и затегнутост), IC-мерење температуре и снимање преносних карактеристика појединих компоненти. На основу статистике рада ветротурбина у



погонским условима може се закључити да се највећи број кварова догађа на електричним, хидрауличним и контролним системима и сензорима (отклањање кварова најдуже траје на механичким компонентама). Учесталост кварова у великим ветроелектранама је виша него у малим, због сложености употребљених система. Бележи се тренд пораста учесталости кварова у електричним системима новије генерације [1].

Један од кључних разлога за бржу и масовнију употребу обновљивих извора електричне енергије је њихова цена изградње. Међутим, захваљујући технолошком напретку и увођењу подстицајних мера, изградња и експлоатација ветроелектрана се по економичности може упоредити са великим конвенционалним изворима. Током претходних двадесет година, цена електричне енергије добијене из ветроелектрана је снижена за око 80%. Економски аспект експлоатације ветроелектрана није једнозначан, зависи од више чинилаца, при чему утицај истих варира од региона до региона. Ветар који покреће ветроелектране је бесплатан, али су инвестициони трошкови високи. Мада је набавна цена ветроелектрана опала, треба имати у виду да се оне типично инсталирају у подручјима далеко од постојеће мреже, тако да се цена изградње повезних водова и постројења не може занемарити. Процена оправданости изградње ветроелектране се утврђује спровођењем техничко-економске анализе. Утврђује се висина очекиваних трошкова који се имају током планског периода експлоатације и упоређује са очекиваним приходом од продаје произведене електричне енергије.

На економичност рада ветроелектране утичу следећи битни фактори: локација на којој се гради електрана, електрични параметри употребљене опреме, услови на тржишту и важећа законска регулатива. Што је спектар ветра повољнији, у смислу брзине ветра и дужине трајања, то је цена производње електричне енергије нижа. Цена земљишта, трошкови изградње темеља и радне снаге варирају у прилично широком опсегу (приступачност локације, услови допремања опреме до места изградње, врста тла, удаљеност од места прикључења на мрежу). Са порастом инсталисане снаге ветроелектране опада њена јединична цена. Годишњи трошкови одржавања се процењују на 1-3% од укупних трошкова изградње ветроелектране [1].

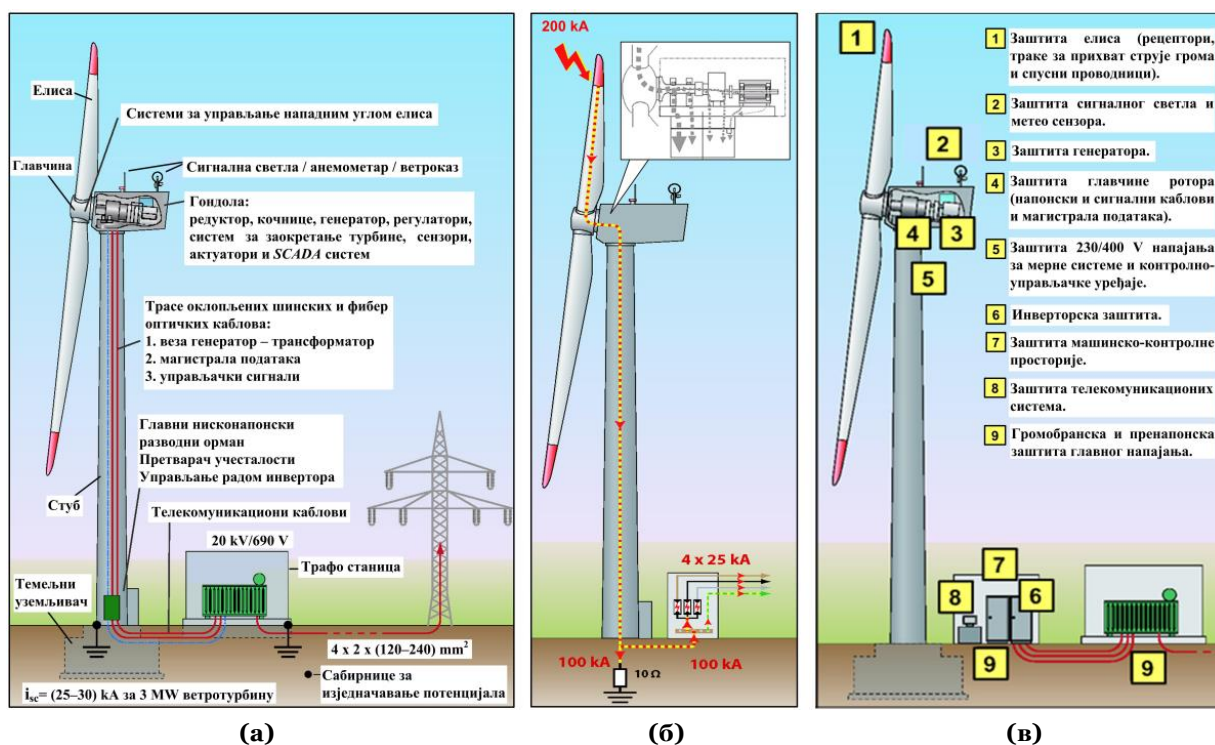
2.2. Главне компоненте ветроелектрана у односу на могућу путању струје директног атмосферског пражњења

Различити модели ветротурбина су усавршавани протеклих година. Укупна тежина типичне савремене ветроелектране (троелисни ротор, генератор, стуб, подножје и др.) номиналне снаге 3 MW је око 200 t, што се сматра изузетним инжењерским подухватом. Ветроелектране могу да раде са сталном или променљивом брзином и опремљене су уређајима за контролу снаге. Ту спада контрола аеродинамичких сила које делују на ротор турбине, да би се ограничила снага при екстремно великим брзинама ветра, ради избегавања оштећења турбине. Ветроелектране са променљивом брзином обртања захтевају употребу уређаја енергетске електронике, ради прилагођавања учесталости и напона генератора вредностима у мрежи. Ветроелектране могу да покрећу било који тип трофазних генератора. Захтеви које треба испунити ради прикључења на мрежу реализују се применом уређаја енергетске електронике, без обзира да ли је у питању мрежа наизменичног или једносмерног напона [1].

Следи кратак опис главних делова типичне савремене ветротурбине - Слика 2.2(а). Скоро све виталне компоненте ветротурбине се налазе на могућој путањи струје директног атмосферског пражњења током њеног спровођења ка земљи.



Троелисни ротор. Склоп од три елисе (ротор) монтира се преко главчине на главну осовину, на мењачку кутију или непосредно на генератор у зависности од појединачног модела. На модерним ветротурбинама ротор и елисе нису просте пасивне компоненте. Елисе се могу, у зависности од брзине ветра и захтева за варијабилном производњом електричне енергије, постављати под различитим угловима. На елисама су инсталирани мерни системи који прате механичко напрезање и притисак због струјања ветра променљивом брзином, а све више су опремљене и сензорима за детекцију вршне струје и специфичне енергије директних атмосферских пражњења. Ове компоненте се напајају електричном енергијом преко одговарајуће спреге између стационарне гондоле и ротирајуће главчине ветротурбине, а њихово управљање се врши хидрауличким путем и на основу дигиталне комуникације.



Слика 2.2. (а) Основни концепт конструкције савремене ветротурбине. (б) Типична расподела струје грома интензитета 200 kA (10/350 μs). Све битне компоненте за нормално функционисање ветротурбине могу бити угрожене услед директног удара грома. Зато је од изузетне важности правилан избор и координација заштитних уређаја за ограничавање превеликих напона и струја. (в) Преглед компоненти које је неопходно заштитити од струје грома и индукваних пренапона.

Пројектовање елиса ветротурбине се много изменило у односу на првобитне конструкције које су примењиване у пољопривреди за извлачење воде из земље или млевење брашна. Када су пре педесет година уведени троелисни ротори, елисе су биле масивне и дрвене. Величина турбина и дужине елиса су непрестано повећаване, те је пројектовање морало све више да се фокусира на проблем тежине. Ово је имало за резултат конструкцију шупљих елиса чија је структура била обложена ламинатом од дрвета, и коначно увођење композитних материјала, као што су стаклена влакна појачана полимерима (GFRP). Од недавно су и композитна угљена влакна (CFC) почела све више да се употребљавају за дугачке елисе, које имају мању специфичну тежину, а крутост им је упоредива са елисама од GFRP влакана. Не само да је остварена примена побољшаних материјала, већ је усавршен и принцип управљања нападним углом елиса (pitch регулација) помоћу хидрауличног система који контролише микропроцесор.



Оптимално пројектована елиса треба да има одличне аеродинамичке карактеристике, да има малу тежину, да буде крута, еластична и прихватљива по цени. Употребљени материјали морају да издрже максимална напрезања без оштећења, и због тога елисе савремених ветротурбина садрже пластичне смеше појачане стакленим и угљеним влакнима, смолу, дрвене уметке, полимерну пену, тегове за динамичко пригушење, разне сензоре итд. Нпр. елиса произвођача LM Wind Power чија је ознака LM 61,5 P је дужа од 60 m, има тежину више од 17 t, благо је савијена ради оптимизације површине коју може да пребрише и конструисана је тако да издржи хабање током 20-25 година животног века. Сила која делује на ротирајућу елису је знатно већа када је она у горњем положају него у доњем (због веће брзине ветра). Када су у питању директна атмосферска пражњења, елисе су најугроженији део ветротурбине (Слика 2.2(б)), али постоји значајан ризик од оштећења и многих других компоненти – Слика 2.2(в).

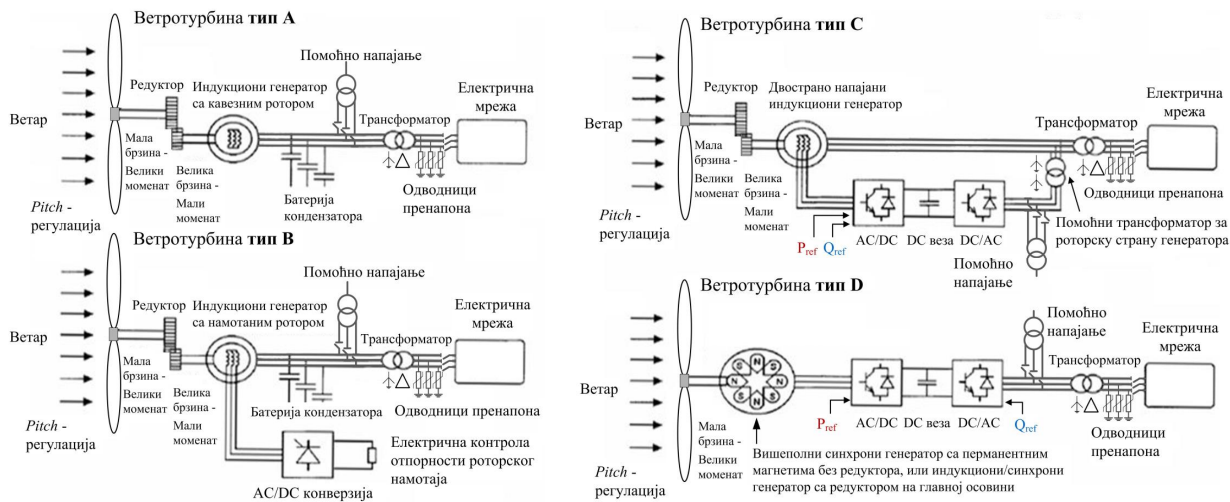
Гондола (кућиште). У гондоли се помоћу електричног генератора врши конверзија ротационе енергије на главној осовини турбине у електричну енергију. Главна осовина је учвршћена типично помоћу централног лежаја и повезана је непосредно или преко спојнице са мењачком кутијом. За заустављање ветротурбине обично се елисе постављају под углом од 90° у односу на правац ветра. У критичним случајевима, при веома великим брзинама ветра, све турбине су такође опремљене са механичком кочницом, обично на генераторској страни преноса где је ротациона брзина велика. Електричну енергију типично производи двоструко напајани индукциони генератор или синхрони генератор са перманентним магнетима на напонском нивоу не већем од 1000 V. Струја се спроводи нисконапонским кабловима до трансформатора који је у подножју стуба (или евентуално у гондоли), где се напон подиже до средњег нивоа од 20 kV. Поред ових основних компоненти, у гондоли се може налазити и мењачка кутија и много електронске опреме за управљање и праћење рада ветротурбине у односу на брзину и правац ветра, температуру, влажност, квалитет електричне енергије итд. Гондола је монтирана на стуб помоћу покретног лежаја тако да константно током рада ветротурбине прати правац најјачег ветра.

Генератор. Врсте коришћених електричних генератора у ветроелектранама су: асинхрони (индукциони) генератори са кавезним ротором, са намотаним ротором, са намотаним ротором и променљивим отпором ротора, и двострано напајани индукциони генератори, као и синхрони генератори са намотаним ротором, или са перманентним магнетима - Слика 2.3 [1] [22]. Типична вредност номиналног напона генератора је 400 V или 690 V. Сваки генератор има свој трансформатор-подизач напона (изузетно, ако је турбина мале снаге, ветроелектрана се прикључује директно на ниско-напонску мрежу, без трансформатора). Због ниског номиналног напона генератора, енергетски трансформатор се типично смешта у подножју стуба или у непосредној близини. Уобичајено је да се примењује концепт једна ветроелектрана-један трансформатор (изузетно, ако су номиналне снаге ветроелектрана мале, може се прикључити више ветроелектрана на један енергетски трансформатор). Са порастом номиналних снага ветроелектрана, из техничких и економских разлога, прикључење на мрежу номиналног напона 10 kV нема оправдање, тако да се, за номиналне снаге изнад 8-10 MW, везивање врши на мрежу 35 kV.

Код турбина са сталном брзином обртања, без обзира на брзину ветра, брзина ротора је константна и зависи од учесталости мреже, преносног односа редуктора и конструкције употребљеног генератора. Овај тип ветротурбина покрећу индукционе генераторе (са кавезним или намотаним ротором), који су директно везани на мрежу, преко адаптивног управљачког уређаја (*soft-starter*), уз обавезну кондензаторску



батерију за компензацију реактивне снаге. Ове турбине су тако пројектоване да имају максимални степен искоришћења при једној, одређеној, брзини. Ради повећања производње, генератори који се прикључују на турбине сталне брзине обртања имају две групе намотаја: једна се користи при малим брзинама ветра (типично, са 8 полова), а друга при средњим и великим брзинама (4-6 полова).



Слика 2.3. Ветроелектране са турбином сталне брзине обртања (Тип А), са делимично управљивим уређајима енергетске електронике и ограниченим опсегом промене брзине обртања (Тип В-С), и са пуноуправљивим уређајима енергетске електронике (Тип D).

Турбине сталне брзине обртања су једноставне, робусне и поуздане, уз релативно ниску цену. Међутим, потрошња реактивне снаге је неуправљива, механичка напрезања су велика и ограничена је контрола квалитета произведене електричне енергије. Због сталне брзине обртања, све промене брзине ветра се преносе као осцилације механичког момента, које се затим, као флукуације произведене снаге, преносе у мрежу. У случају прикључења на слабу мрежу, промене снаге могу довести до великих флукуација напона (напонски фликери), што генерално доводи до повећаних губитака у мрежи. Овај концепт није погодан за локације на којима се јављају ударна оптерећења ветра, јер се због крутости механичке карактеристике генератора обртни момент ветротурбине оштро преноси и може доћи до оштећења преносног механизма, а пре свега зупчаника у редуктору. У случају квара у електричној мрежи, ветрогенератор може релативно лако да изгуби стабилност због повећања брзине обртања турбине изнад оне која одговара превалном моменту.

Турбине са променљивом брзином обртања су доминантна врста турбина у ветроелектранама. Могу да раде са максималном ефикасношћу у широком опсегу брзина. Електрични систем код ових ветротурбина је знатно сложенији него код турбина са сталном брзином обртања. Користе се индукциони или синхрони генератори, а на мрежу се везују преко конвертора, који контролишу брзину генератора. Предности турбина са променљивом брзином обртања су: виши степен искоришћења, бољи квалитет произведене електричне енергије и мања механичка напрезања ветротурбине. Битне мане су: губици у претварачима енергетске електронике, коришћење већег броја уређаја и већа цена. Примена турбина са променљивом брзином обртања повећава број применљивих типова генератора и, такође, пружа више слободе у комбиновању појединих типова генератора и уређаја енергетске електронике.



У ветроелектранама са синхроним генераторима и индукционим генераторима без роторских намотаја, између статора генератора и мреже везује се пуно-управљиви систем енергетске електронике. Дакле, сва произведена снага пролази кроз електронски систем. Ако се користе индукциони генератори са роторским намотајима, статор се директно везује на мрежу, а ротор се прикључује преко електронских уређаја. Овим се остварује предност, јер се само део произведене снаге испоручује кроз електронски систем. Номинална снага конверторског система је око 30% номиналне снаге генератора, што омогућава варијацију брзине ротора у опсегу од 30% у односу на номиналну брзину. Ветроелектране са индукционим генератором са променљивим отпором ротора имају додатни отпорник у колу ротора који се контролише електронски, што омогућава промену брзине у опсегу 2-5%. Конвертор за контролу отпорности отпора ротора је пројектован за низак напон и велике вредности струја. Додатна контрола је омогућена при већим брзинама ветра, ради одржавања сталности снаге одате у ЕЕС. И ова конфигурација захтева уређаје за компензацију реактивне снаге и *soft-starter*.

Системи са двострано напајаним индукционим генератором се најчешће користе код модерних ветроелектрана великих снага. За разлику од претходног решења, омогућава промену радне брзине у широком опсегу, $\pm 30\%$ око синхроне брзине, што обезбеђује ефикасан рад ветротурбине. За прилагођење брзини обртања генератора, као и у претходним случајевима потребан је редуктор високог степена редукције. За разлику од индукционе машине са кавезним ротором, коју можемо посматрати као елемент са једним приступом, двострано напајана индукциона машина је елемент са два приступа (са стране статора и са стране ротора). Статорски намотај је директно прикључен на мрежу, док је роторски намотај прикључен преко клизних прстенова, претварачке групе (*back-to-back PWM интерфејс*) и трансформатора. Управљање генератором (моментом и реактивном снагом) врши се помоћу претварача у роторском колу.

На основу векторског управљања струјама ротора машина може да ради у релативно широком опсегу брзина (и у надсинхроним и у подсинхроним режиму), што омогућава потпуно прилагођавање брзине обртања ветрогенератора условима ветра. Ефикасност рада се додатно повећава контролом угла закретања елиса ветротурбине (*pitch регулација*). Када машина ради у надсинхроним режиму и ротор и статор одају активну снагу у мрежу, док је у подсинхроним режиму ток активне снаге у роторском колу од мреже ка машини. Снага која се преноси кроз претварач је пропорционална одступању радне брзине од природне синхроне брзине (синхрона брзина када је роторски намотај кратко спојен).

С обзиром на опсег промене радне брзине, снага претварача је типично реда 20-30% номиналне снаге ветрогенератора. Двострано напајана индукциона машина може генерисати и реактивну снагу, али је обично ветрогенератор пројектован да ради са фактором снаге $\cos \varphi = 1$, јер производња реактивне снаге додатно струјно оптерећује конвертор у роторском колу. Ипак, ако је потребно стабилизovati напон у дистрибутивној мрежи, ветрогенератор може на рачун смањења активне снаге производити реактивну снагу, односно радити у капацитивном режиму. Овај тип машине се уграђује у ветроелектране највећих снага, како у оне које су пројектоване за рад на копну (*onshore*), тако и у моделима за инсталирање у приобалном морском појасу (*offshore*). Предности овог концепта су боље искоришћење ветротурбине, могућност генерисања реактивне снаге, мања ударна механичка напрезања (јер је механичка карактеристика генератора адаптивна), стабилнији рад и мањи ниво буке. Недостаци су: релативно висока цена због коришћења конвертора, осетљивост на атмосферске



пренапоне због постојања претварачке електронике, повећани губици у генератору и генерисање виших хармоника.

Један од ограничавајућих фактора код ветротурбина највећих снага је редуктор, чији зупчаници, због великог обртног радног момента, трпе огромна механичка напрезања. У односу на претходно поменуте конфигурације, ветроелектране које су на ЕЕС везане преко пуноуправљивих уређаја енергетске електронике имају најбоље техничке перформансе. Највећи број примењених система има редуктор. Код система са генератором са индукционим кавезним ротором ради реализације потпуне контроле активне и реактивне снаге, примењују се *back-to-back* напонски напајани конвертори. Поједине врсте синхроних генератора захтевају конвертор мале снаге, ради обезбеђења поља побуде. Системи са вишеполним синхроним генераторима не користе редуктор. Синхрони генератор са сталним магнетима је веома атрактиван, јер му набавна цена опада. Све описане конфигурације имају скоро идентичне карактеристике када је у питању контролабилност, јер су генератори распрегнути од мреже преко *AC-DC-AC* претварача. Мана ових конфигурација је велика сложеност, са великим бројем осетљивих електронских делова.

Промена брзине обртања се код ветротурбина са променљивом брзином обртања врши управљањем електромагнетним моментом генератора којег покреће ветротурбина. Контрола снаге ветротурбине се обавља на више начина. Најједноставнији и најробуснији начин је пасивна *stall*-регулација, која се постиже самим дизајном елиса ветротурбине. Мана овог начина контроле је што он није у потпуности контролабилан, а карактерише га опадање снаге турбине испод номиналне вредности након појаве *stall* ефекта (овај ефекат се може појавити и при брзинама ветра нижим од номиналне, ако елисе ветротурбине нису чисте или су оштећене). Предност овог начина контроле је једноставност и ниска цена. Користи се углавном код ветротурбина са константном брзином обртања. *Pitch*-регулација је активни систем контроле који се најчешће користи код ветрогенераторских јединица веће снаге са променљивом брзином обртања. Остварује се аксијалним закретањем лопатица ветротурбина помоћу посебног хидрауличног система који контролише микропроцесор. Предност овог система контроле је контролабилност, а мана је релативно сложени механизам и висока цена.

Комбинација претходна два система управљања је активна *stall*-регулација (*Combi Stall*). У овом случају опсег промене угла закретања елисе је релативно мали. Овај систем управљања, као и претходни, има и улогу заштите ветротурбине у случајевима непланираног искључења, или кратког споја ветрогенератора у условима јаког ветра. У таквим случајевима долази до наглог повећања брзине обртања ветротурбине, па услед великих центрифугалних сила може доћи до њене хаварије. Да би се турбина заштитила од превелике брзине обртања (*overspeed control*) потребно је смањити и обртни момент турбине, што се постиже наведеним системима аеродинамичке контроле. При брзинама ветра већим од максималне радне брзине ветротурбина се, из сигурносних разлога, зауставља и одржава у закоченом стању помоћу хидрауличне диск кочнице која је смештена на генераторској осовини.

Редуктор (мењачка кутија). Механичка снага са ротора ветротурбине преноси се на генератор преко везе главна осовина-редуктор (мењачка кутија)-осовина велике брзине обртања. Редуктор омогућава да се мала брзина обртања турбине прилагоди великој брзини обртања генератора. Ако се користе вишеполни генератори редуктор може да се изостави. Преносни однос редуктора је, типично, у опсегу 30-200. Код класичних редуктора кључно питање је грејање, односно хлађење средства за



подмазивање. Током хладног времена треба обезбедити да се лубрикант не смрзне, па се морају користити уређаји за грејање. Када је топло мора се обезбедити хлађење, да температура лубриканта не би била сувише висока. Најновије решење су тзв. хидродинамички редуктори, који су комбинација класичног механичког редуктора и регулатора момента. Ови редуктори за променљиву вредност улазне брзине дају излазну брзину константне подешене вредности.

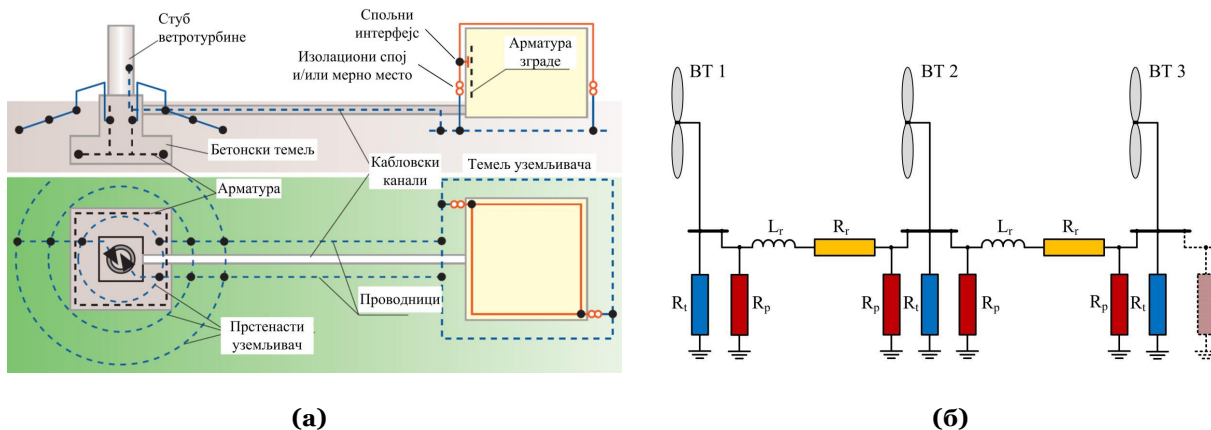
Стуб. Гондолу (кућиште) и елису ротора турбине носи стуб. Монтиран је на основи (темељ) која зависи од услова на месту где се он подиже. Стуб мора да буде димензионисан тако да издржи ударне ветрове и масу инсталиране опреме. Висина стуба зависи од конфигурације околног терена и треба да буде што је могуће већа, јер брзина ветра расте са висином (висина стуба се оптимизује тако што се анализира трошак повећања његове висине и корист која се има због повећања произведене електричне енергије). Стубови за ветротурбине великих снага могу бити цевни, решеткасти или бетонски. Већина великих ветротурбина се испоручује на цевним челичним стубовима, који се производе у секцијама дужине по 20-30 m, са бандажима на сваком крају, које се зашрафљују на месту полагања. Стубови имају облик засечене купе (сужавају се од основе ка врху), ради повећања њихове издржљивости и уштеде материјала у исто време. Употреба бетонских стубова уместо цевних челичних је новијег датума. Користе се за стубове који су виши од 100 m, због ниже цене израде. Осим наведених типова стубова, постоје и хибридне конструкције, код којих се користи више врста материјала. Напојни каблови за пренос електричне енергије из гондоле (као и комуникациони водови) се провлаче кроз покретни лежај који је на највишем наставку стуба, што омогућава да се гондола може окретати у односу на стуб. Прекидачко-разводна опрема и многобројни системи управљања се типично смештају на платформи, која се поставља у подножју стуба, као и трансформатор за случај да из гондоле долазе нисконапонски каблови.

Уземљење. Нарочита пажња у току изградње ветроелектрана посвећује се пројектовању уземљивачког система - Слика 2.4(а). Захтеви за уземљење ветроелектрана се у извесној мери разликују у односу на праксу за уземљењем мрежа одређених напонских нивоа. Ветроелектране су веома често електрично удаљене по неколико километара од тачке прикључења на мрежу, налазе се у подручјима са интензивним атмосферским пражњењима и на земљишту високе специфичне отпорности. У таквим условима није могуће испунити захтеве са становишта безбедности, због чега је потребна нарочита предострожност. Најбољи резултати у смислу ограничења струја земљоспојева и транзијентних пренапона постижу се уземљавањем преко ниско-омске отпорности на страни средњег напона (веома ретко се примењује и уземљавање преко високо-омске отпорности). Резонантно уземљавање се не примењује због цене, сложености и негативних ефеката на мрежу (могућност појаве ферорезонансе). Рад са изолованом неутралном тачком се избегава због високих пренапона који се јављају у случају настанка земљоспојева.

Свака ветроелектрана појединачно се уземљује полагањем прстенастог уземљивача на дубину од око $d=1$ m. По обиму се постављају штапни уземљивачи дужине L [m] и полупречника a [m], ради постизања прописане вредности отпора распрострањања уземљивача (уколико је на основу класе LPS и специфичне отпорности тла прорачуном добијена минимална дужина прстенастог уземљивача, која је већа од полупречника прстена). Уобичајено је спајање челичне арматуре из темеља турбине са постављеним уземљивачем, чиме се постиже добра расподела потенцијала и у случају атмосферских пражњења и током настанка земљоспојева, и на тај начин се добија јединствен уземљивачки систем ветропарка. На Слици 2.4(б) са R_t , је означен отпор



распрострањања прстенастог уземљивача једне ветроелектране. Хоризонтални штапови, постављени по обиму прстена повезују суседне ветротурбине и имају веома сложен утицај (слично као преносни водови). Њихове карактеристике се типично представљају преко еквивалентне π -шеме.



Слика 2.4. (а) 2D пројекција уземљивачког система ветротурбине велике снаге. (б) Шематски приказ уземљивачког система фарме ветрењача. Отпор распрострањања за прстенасти уземљивач

износи: $R_t = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}}$, за n штапних уземљивача дуж обима прстена пречника D [m] је:

$$R_p = \frac{\rho}{2n\pi L} \left[\ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{D} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin(\pi mn^{-1})} \right], \text{ њихова узајамна отпорност је: } R_m = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2Le^{-1}d}}$$

$$\text{отпорност система: } R_u = (R_t R_p - R_m^2) \cdot (R_t + R_p - 2R_m)^{-1}.$$

R_p представља отпор распрострањања штапног уземљивача, а R_t и L_r су параметри импедансе повезних водова који се у великим ветропарковима не могу занемарити. При протицању струја учестаности 50 Hz ова редна импеданса знатно повећава вредност импедансе система уземљења. Ако протиче високофреквентна струја (при атмосферским пражњењима) редна индуктивност L_r , знатно доприноси да се ефекти пражњења, у највећој мери, локализују на ветроелектрани која је погођена, без ширења на суседне. За ветроелектране важи да отпорност распрострањања уземљивача једне електране не би требала да буде већа од 10 Ω , пре прикључења енергетских или било којих других каблова (за уземљавање ветропарка са 20 турбина снаге по 3 MW треба положити укупно око 6 km проводника, а измерена импеданса уземљења је типично (0,85 + j0,9) Ω на стандардној учесталости од 50 Hz).

Ветроелектране великих снага су опремљене бројним уређајима, који доприносе безбедном раду током планираног експлоатационог века [22].

Механизам за закретање турбине. Скоро свака турбина са хоризонталном осовином користи механизам са електромотором који обезбеђује да се раван у којој се окреће ротор постави нормално на правац дувања ветра. Већина произвођача ветротурбина које ротирају уз ветар примењује кочнице у механизму за закретање, када год се механизам не користи. Иначе, сам механизам се активира електронским контролером, који проверава положај показивача смера ветра, на сваких 10-15 s, све док се турбина окреће. Веза између генератора и енергетског трансформатора се изводи енергетским кабловима, који се спуштају низ стуб. Да би се спречиле хаварије, постоји бројач увртања кабла. Када се кабл уврне дозвољени број пута, електрана се искључује и кабл се враћа у почетни положај.



Кочнице. Користи се неколико типова кочница: аеродинамичке, електромагнетне или механичке. Ако се користе аеродинамичке кочнице, елисе ротора се постављају у такав положај да се потисни ефекат (који узрокује ротацију) пригушује. У случају примене електромагнетних кочница енергија из генератора се троши у пригушном отпорнику (претвара се у топлоту). Конвенционалне, механичке кочнице захтевају постојање кочионих дискова, који се смештају у гондолу. Користе се када је потребно потпуно и/или брзо заустављање турбине. У ветроелектранама великих снага користи се комбинација бар два типа кочница, аеродинамичких и механичких. Као допуна деловању кочница, основно је да се ветротурбина аутоматски заустави ако дође до квара или погрешног деловања критичних компоненти у електрани (прегревање генератора, искључење генератора са мреже, недозвољено убрзавање ротора турбине и др.). У таквим случајевима реагује заштита од недозвољене брзине обртања. Већина произвођача уграђује два независна сигурносна кочиона механизма, чија је улога да тада брзо и безбедно зауставе турбину.

Анемометар. Мерење брзине и смера ветра је неопходно на свакој ветроелектрани, што се ради помоћу анемометра. Овај уређај електронски мери број обртаја сопственог ротора у минути и има систем за утврђивање смера дувања ветра. Постоје и анемометри који користе ласере или ултразвучне уређаје. Такође, користе се и анемометри који, осим брзине и смера дувања ветра, мере температурну разлику између тачке уз ветар и тачке на страни која је у заветрини.

Систем за мерење вибрација. Интензивне вибрације су један од најчешћих узрока тешких оштећења ветротурбине и других елемената у ветроелектрани. Додатни ефекат постојања вибрација је стварање буке. Класичан и најједноставнији сигурносни уређај у ветротурбини је сензор вибрација. Савремене ветротурбине имају инсталиране системе за континуални мониторинг вибрација, који се заснивају на микропроцесорским уређајима, а што омогућава да се зависно од интензитета вибрација донесе одлука о потребним активностима.

Систем за подмазивање. Пошто у ветроелектрани има доста покретних компоненти, подмазивање је од кључне важности за исправан погон. Типично постоје два типа система за подмазивање. Код првог типа централна пумпа кроз цеви допрема лубрикант до свих делова предвиђених за подмазивање. Код другог типа се примењује резервоар под притиском уз сваку компоненту која захтева подмазивање током погона.

Темељ (основа). Темељ електране обезбеђује стабилност читаве конструкције. Код ветроелектрана које се граде на копну тип темеља зависи од врсте тла и ту нема већих потешкоћа. Проблем су, темељи за ветроелектране које се граде у приобалном појасу. Њихово пројектовање се, углавном, заснива на технологији која се користи при изградњи нафтних платформи. Данас се користи неколико типова темеља за ветроелектране које су изграђене у приобалном појасу. Темељ са једним стубом (*monopile*) - један челични стуб, дужине 10-12 m, поставља се (фиксира) у морско дно, темељ са три челична стуба (*tripod*) - трокрака звезда, са крацима дужине 10 m, фиксира се у морско дно, темељ као комбинација решеткастог стуба и конусног стуба (*jacked*), који су фиксирани за морско дно и гравитациони темељ - стуб је фиксиран за велику масу, која је комбинација бетона и челика. У фази испитивања су темељи на бази плутајућих платформи.

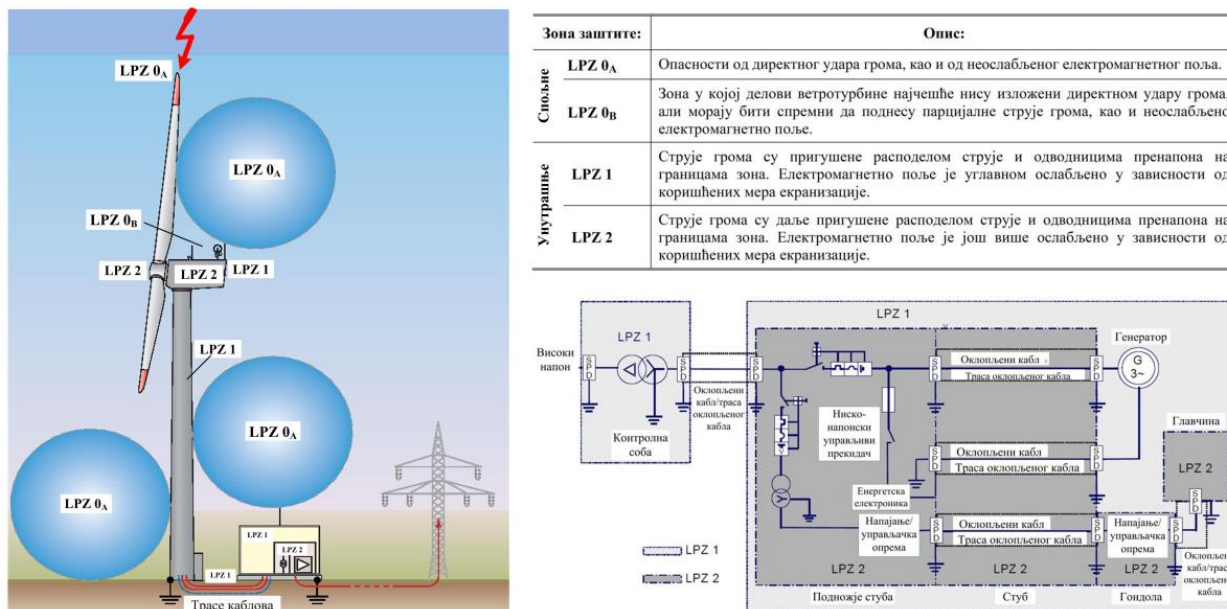
Остали елементи. Постоји велики број сензора у гондоли (кућишту), који мере температуру уља у редуктору и температуру генератора. Од електричних уређаја, користе



се волтметри, фреквенцметри, $\cos \phi$ -метри, сензори за детекцију броја обртаја, уређаји за мерење произведене електричне енергије и снаге, телекомуникациони уређаји, помоћно осветљење и др.

2.3. Зоне громобранске заштите ветроелектрана

У уводном поглављу је напоменуто да се развој ветроелектрана одвијао веома брзо. Један од главних проблема који ни до данас није употпуности решен, је ефикасна заштита ветроелектрана од директних атмосферских пражњења. Типично се спољне површине гондоле и стуба третирају као Фарадејев кавез. Као што ће у наредним поглављима докторске дисертације бити детаљно размотрено, различите компоненте ветротурбине су подељене на громобранске заштитне зоне (*Lightning Protection Zones - LPZ*) у зависности од њихових интерних веза и изложености директним атмосферским ударима [49]-[53]. Приликом сваког удара грома, за различите путање пражњења између појединих заштитних зона, амплитуда и фреквенција струје пражњења и/или пренапона морају бити ограничене на одговарајућем пројектованом нивоу – Слика 2.5.



Слика 2.5. Концепт громобранских заштитних зона и принцип степеновања заштите ветротурбине.

Елисе су најизложенији део ветротурбине, па се због тога сврставају у зону која има најсуровије окружење, LPZ 0. То значи да оне морају да поднесу директне ударе грома без значајнијих оштећења и да на сигуран и ефикасан начин спроведу целокупну струју пражњења ка заштитном уземљењу. При производњи елиса ветротурбина, морају се узети у обзир различити параметри грома (вршна струја, градијент струје, трансфер наелектрисања, специфична енергија итд.). Циљ је да се минимизирају оштећења на ветротурбини која настају услед директних и индиректних атмосферских пражњења и која могу да доведу до испада ветротурбине из погона.

2.4. Примена композитних материјала за громобранску заштиту ветроелектрана

Разлог за коришћење композитних материјала у ветроенергетици у највећој мери је због њихових добрих механичких особина. У зависности од односа смола/влакнасто



појачање у саставу, могуће је конструисати материјал који има многе жељене особине, што генерално значи врло малу тежину у односу на металне структуре исте чврстоће.

Када елиса ветротурбине премаши одређену дужину (типично 25 m), најчешће се користи GFRP композит с обзиром да има добра механичка својства. Избор је првенствено заснован на статичким и динамичким прорачунима, док су неке електричне особине од мањег значаја. Уствари, добре изолационе особине су се сматрале као предност, с обзиром да атмосферска пражњења, у складу са уобичајеним схватањем, привлаче металне структуре, тако да је GFRP композит невидљив за атмосферска пражњења. Ова претпоставка је довела до производње елиса за ветротурбине које нису садржале било какве проводне делове. Међутим, и ове елисе су биле повремено изложене директним ударима грома, што је изазивало фатална оштећења. Досадашња искуства су показала да, упркос томе што композитни материјали за израду нових елиса претежно имају изолационе карактеристике, ситуација може да се промени у току животног века елисе, што често зависи од услова спољног окружења [2], [35].

За елисе ветротурбина од GFRP материјала, као и за радарске куполе на носу авиона, постоји одређена вероватноћа до дође до директног удара грома. У зависности од примењене заштите могу се појавити тачкаста оштећења на спољној површини елисе. У озбиљним случајевима пукотине су праћене великим обимом раслојавања у композитном материјалу, што смањује механичку чврстоћу структуре елисе.

Обе наведене конструкције су шупље структуре унутар којих су проводне компоненте, радарска антена (у носу авиона), односно спусни проводник у унутрашњости елисе. На спољној површини оваквих структура често је присутан и проблем влаге која је загађена разним проводним нечистоћама. Веома брзо у току развоја заштите композитних материјала од удара грома је схваћено да су физичка оштећења минимална када се протицање струје одржава на спољној површини или у највишем слоју композитног материјала. На тај начин је избегнуто варничење, стање које је одговорно за брзи пораст притиска и настанак критичних пукотина по површини.

Што се тиче композита са угљеним влакнима, већи број експеримената у различитим лабораторијама указује да велике густине струја у корену електричног лука у комбинацији са великом отпорношћу материјала доводе до генерисања и расипања значајне количине енергије. Ослобађање ове енергије проузрокује оштећење материјала, а у неким случајевима су чак испарења смоле и влакана очигледна. Обе ситуације могу бити критичне за механичку чврстоћу структуре елисе [58]. Нарочито у авионској индустрији било је више покушаја да се композитни материјали заштите од директног удара грома [42]. Ефекти пражњења су макроскопски (повећава се електрична проводност GFRP композита увођењем проводног слоја преко целе структуре), и микроскопски, јер је сам материјал побољшан прилагођавањем његових особина у различитим деловима композитног материјала.

Општи принцип громобранске заштите ветроелектрана се може поделити у две категорије:

- Редуковање генерисане топлоте у корену електричног лука.
- Безбедно спровођење струје пражњења до уземљења, по могућности кроз металне структуре које су способне за њено ефикасно провођење.



2.4.1. Прихватни систем и спусни проводници

Овај принцип је првобитно био примењен за заштиту стационарних објеката на земљи од директних атмосферских пражњења. Састоји се од система за прихват струје грома и спусних проводника за спровођење струје пражњења до уземљења [49].

Прихватни систем у облику рецептора на елисама ветротурбине мора, због начина на који се инсталира, да у одређеној мери наруши карактеристике спољне површине елисе (долази до продора кроз њену спољну изолациону површину). С обзиром да је елиса дизајнирана да има идеалне аеромеханичке особине, постоји ограничење који је број механички деградирајућих продора по њеној површини прихватљив. У актуелном стандарду предлаже се примена рецептора равномерно распоређених на међусобном растојању од 5 m, почевши од полупречника 20 m у односу на корен елисе ка њеном врху [35]. Иако су рецептори пројектовани да прихвате струју пражњења, после типично неколико година рада видљива су извесна хабања и тачкаста оштећења по њиховој површини.

Када се деси удар грома у рецептор, струја и наелектрисање морају да се спроведу у земљу. Ово се обично остварује повезивањем рецептора са једним или више спусних проводника, постављених у унутрашњости шупље структуре елисе или причвршћених на спољној површини елисе. Један од критеријума за димензионисање спусних проводника је да се мора обезбедити да загревање услед омских губитака буде у дозвољеним границама.

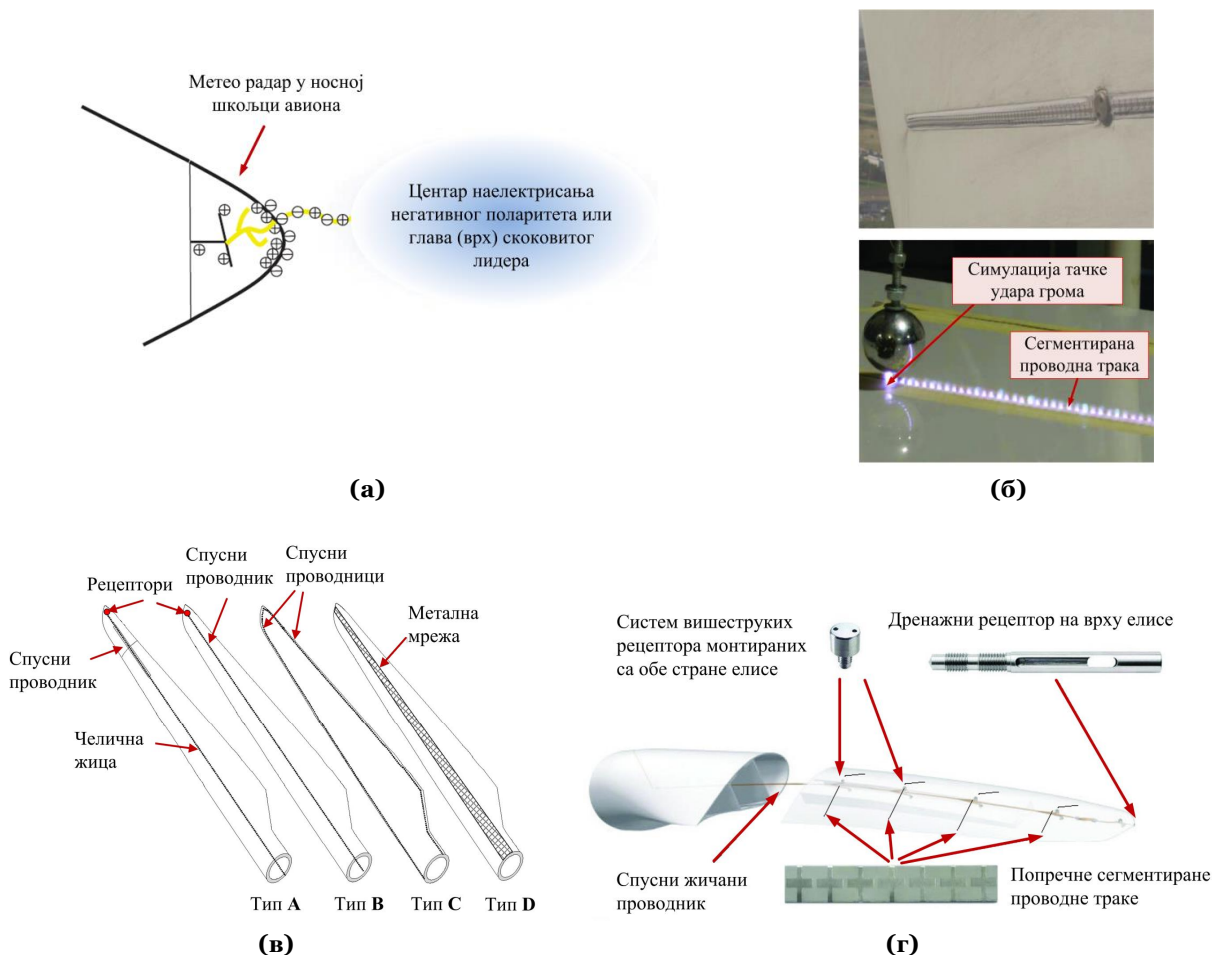
Елисе ветротурбина великих снага су веома савитљиве, што уводи други проблем код оваквог решења. Причвршћење мора бити довољно јако да издржи механичке силе у току нормалног рада елисе и магнетне силе при ударима грома. Очигледно решење овог проблема је употреба уплетених проводника који су причвршћени дуж унутрашње основе елисе. Минимална површина попречног пресека која је прихватљива за спровођење струје пражњења, на основу стандарда је 16 mm^2 за бакарне и 25 mm^2 за алуминијумске спусне проводнике (због интензивних механичких оптерећења препоручује се повећана вредност до 50 mm^2 за уплетене проводнике било бакарне било алуминијумске) [35]. Приликом избора одређеног проводника за ову примену мора се размотрити његова индуктивност по метру дужине, пошто индуктивни падови напона могу проузроковати бочне прескоке дуж путање струје пражњења. Ово захтева допунско еквипотенцијално изједначавање и повезивање паралелних струјних путања (спусни проводник, CFC структурне компоненте, проводници управљачких кола, итд.).

С обзиром да рецептори, као и унутрашњи спусни проводници, иницирају стримере пре него што наступи удар грома, у одређеним имплементацијама система заштите спусни проводници се постављају на спољној површини елисе. На тај начин се умањује иницирање стримера са унутрашњих делова елисе, што понекад доводи до пробоја на спољној површини елисе и фаталних отказа услед удара грома. Међутим, инсталирање спољашњег спусног проводника може да промени аеродинамичко понашање елисе на начин да умањи њену ефикасност и повећа ниво буке.

Добро познати метод за заштиту од удара грома антенске шкољке на носу авиона је примена проводних једноделних трака пуног попречног пресека или сегментираних вишеделних трака за прихват струје пражњења - Слика 2.6(а). Прихватне траке делују као наставак металне шкољке авиона који покрива изложене делове антенске шкољке. Основна идеја је да прихватне траке оклопе проводну радарску антену која је испод



антенске шкољке и да емитују стримере у смеру долазног лидера који се приближава структури [42]. Када дође до формирања канала грома, струја пражњења се спроводи ка металној шкољци. Иако ово решење изгледа сасвим подесно са електричног становишта, причвршћивање проводних трака на глатке површине ремети њене аеродинамичке особине.



Слика 2.6. (а) Формирање стримера унутар радарског оклопа у носу авиона доводи до иницирања лидера из спољашњег окружења, који могу да изазову напрезање структуре оклопа. (б) Сегментиране проводне траке (*diverter strips*) за прихват струје грома у околини рецептора, ради повећања њихове ефикасности. Јако и променљиво електрично поље које настаје као последица пражњења јонизује ваздушне зазоре мале запремине у сегментираним тракама, омогућавајући проводан пут за струју пражњења. (в) Постојећи начини заштите елиса ветротурбина од атмосферског пражњења. (г) Главне компоненте громобранске заштите елиса савремених ветротурбина са дренажним рецептором на врху елисе [35].

Проводне сегментиране прихватне траке се такође често постављају на спољну површину антенске шкољке и састоје се од низа металних кружних сегмената (приближно пречника 1,5-5 mm) који су причвршћени на међусобном растојању од приближно 0,13-0,26 mm. Јако електрично поље у почетној фази удара грома јонизује процепе између кружних сегмената стварајући тако проводну плазму непосредно изнад прихватне траке. Тиме се остварује проводни канал између ударне тачке грома и металне шкољке који омогућава проток струје пражњења непосредно изнад њене површине са циљем да она не буде значајно оштећена.

Различити типови проводних трака за прихват струје пражњења неповољно утичу на аеродинамичке особине конструкције. Оне морају да се причврсте непосредно на



површину и на тај начин, као и у случају пуних прихватних трака, смањују укупну ефикасност структуре. Недавно је предложено могући начин за решавање овог проблема у коме је испитан учинак сегментираних прихватних трака које су прекривене танким изолационим слојем, при чему је очувана задовољавајућа ефикасност прихвата струје грома [2]. Ово омогућава да се прихватна трака угради у процесу пројектовања завршне површине носне шкољке авиона или елиса ветротурбине и да, прекривена завршним слојем или бојом, обезбеди довољно глатку спољну површину.

Један од критеријума који мора да буде испуњен да би прихватне траке биле функционалне је да индивидуални кружни сегменти буду електрично изоловани. Изузетак су неки од типова где су сегменти кратко спојени преко високо отпорне смеше ради отклањања статичких наелектрисања насталих услед таложења, која у одређеној мери утичу на понашање током прелазних електричних поља. Редовно одржавање авиона у смислу прања трупа омогућава одржавање нивоа изолације између суседних кружних сегмената на задовољавајућем нивоу.

Што се тиче ветротурбина, питање је да ли ће прљавштине и нечистоће наталожене током времена услед ротације елиса утицати на карактеристике прихватних трака и у којој мери. Ова технологија је по први пут примењена 2005. године на елисама чија је ознака LM 61,5 P, које су инсталиране на ветротурбинама великих инсталисаних снага (преко 5 MW). Извештаји говоре да су досадашња искуства задовољавајућа – **Слика 2.6(б)**. Специјално развијене сегментираних прихватних трака делују као продужетак рецептора и тиме покривају изложене делове од угљених влакана на елиси и повећавају укупну ефикасност прихватног система [2].

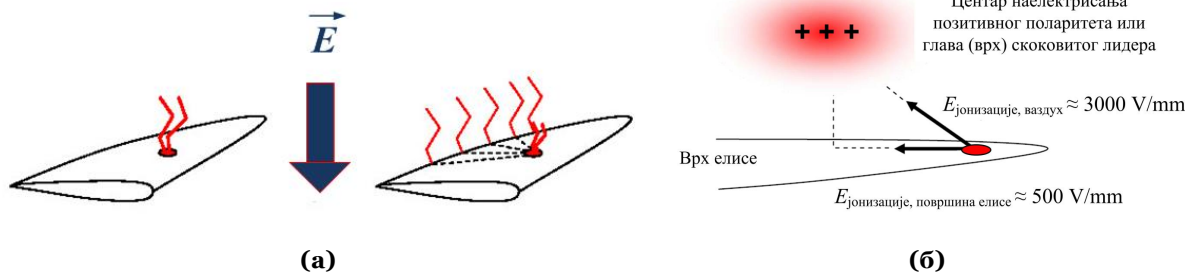
Типичне конфигурације комплетног заштитног прихватног система на елисама савремених ветроелектрана су приказане на **Слици 2.6(в)**. Инсталиран рецепторски прихватни систем у процењеној тачки удара на елиси ветротурбине треба да прихвати струју пражњења и омогући њено одвођење у земљу преко спусних проводника, који се могу инсталирати на неколико различитих начина. Највећи број елиса је опремљен са унутрашњим жичаним или шинским спусним проводником одговарајућег попречног пресека, док се остала решења заснивају на уградњи проводних мрежастих структура унутар површинског слоја елисе.

Кључна разлика између примењених начина заштите је у томе да ли се употребљава ограничен број рецептора који ће прихватити пражњење (Тип А и Тип В) или је направљен покушај да се заштити цела елиса (Тип С и Тип Д). Код заштите Типа А користи се један или више рецептора. Врх елисе је покретан, а као спусни проводник служи челично уже које се користи за контролу положаја врха елисе. Ако врх елисе није покретан мора се поставити спусни проводник, као код заштите Типа В. Код заштите Типа С спусни проводник је постављен по нападним (водећим, предњим) и излазним (задњим) ивицама елисе, при чему постоје тешкоће у практичној реализацији овог решења (монтирање проводника по нападној ивици). Код заштите Типа Д употребљен је мрежаста проводник на свакој страни елисе. У појединим варијантама прихватних система спусни проводник може да има и двоструку функцију (преузима и улогу рецептора), а на елисама које су дуже од 40 m на све већем броју ветротурбина се у околини рецептора инсталирају сегментираних проводне попречне траке за прихват струје грома, које повећавају његову ефикасност.

У употреби су и специјално конструисани дренажни рецептори са прихват и одвођење воде са елиса – **Слика 2.6(г)**. На тај начин се смањује кондензација воде на

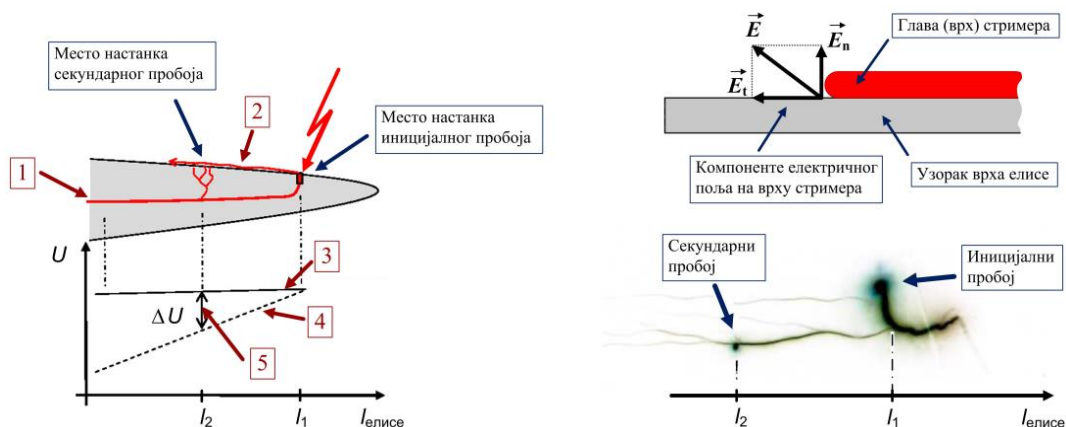


елисама, а у зимским условима накупљање леда у већој мери, који може да деградира аеродинамичке карактеристике елиса [1]. Материјали који се користе за израду прихватног система и спусних проводника, као што су бакар, алуминијум, челик и њихове легуре, морају да имају одличне термичке и електричне карактеристике.



Слика 2.7. (а) Иницирање стримера са чисте и хомогене површине елисе са рецепторском заштитом и са запрљане елисе (нечистоће, влага, лед). **(б)** Ефекат јонизације се јавља много чешће дуж површине елисе ако су присутни влага и проводна запрљања (вредности пробојних електричних поља су типичне у стандардном лабораторијском окружењу).

Важно је напоменути да током грмљавинске активности, ако је елиса чиста и направљена од изолационих материјала са рецепторском громобранском заштитом, до емитовања стримера са спољних површина елиса долази једино са рецептора – Слика 2.7(а)-(б). Међутим, када је елиса запрљана са проводним нечистоћама може доћи до повећаних термичких површинских губитака и локалних прескока по њеној површини. Делимично проводни новостворени канали на спољној површини елисе могу да се прошире са рецептора и доведу да излазна ивица елисе буде у већој мери изложена ударима грома [42].



Слика 2.8. Пад напона дуж спољне површине елисе са рецепторском заштитом због велике импедансе спусних проводника. **1.** Велика импеданса спусног проводника ствара пад напона са рецептора који је на пуном потенцијалу ка уземљеном корену елисе. **2.** Простирање стримера дуж спољне површине елисе који су скоро на максималном потенцијалу (за стабилно простирање стримера за различите врсте изолационих композитних материјала измерене су вредности тангенцијалне компоненте електричног поља на спољној површини елисе у опсегу 200-600 kV/m [2]). **3.** Потенцијал стримера који су иницирани дуж спољне површине елисе. **4.** Потенцијал спусног проводника због пада напона. Наелектрисање које је нагомилано на унутрашњој површини има исти поларитет напона као и спусни проводник. **5.** Разлика потенцијала између нагомиланих наелектрисања у унутрашњости елисе и спољних стримера може бити довољно велика да изазове накнадне пробоје.

Спусни проводник у унутрашњости шупље елисе или метална мрежа инсталирана у горњем композитном слоју елисе треба да имају што је могуће мању импедансу, како би се смањио пад напона дуж спољне површине елисе и онемогућили нежељени

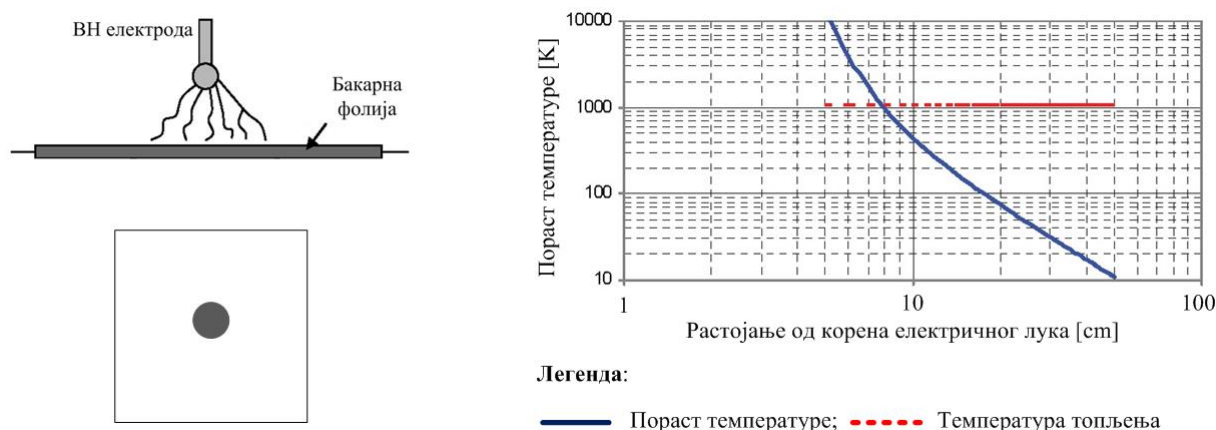


накнадни прескоци унутар елисе – Слика 2.8. Пошто транзијентна струја дуж спусног проводника може да произведе индуктивни пад напона од неколико kV/m, минимизирањем вредности индуктивности ових проводника вероватноћа иницирања бочних прескока и настајање алтернативних струјних путања може бити сведена на најмању могућу меру.

2.4.2. Пораст температуре проводних материјала и површина

Један од начина редукције топлоте која се генерише у близини корена електричног лука је примена проводника пуног попречног пресека за израду прихватног система. У тачки удара грома долази до значајног загревања и топљења материјала, као и до појаве деформисања површине због велике специфичне топлотне енергије струје пражњења и протекле количине наелектрисања. Употребом одговарајућих материјала и начином пројектовања рецептора, ова два проблема се могу умањити. У случају озбиљнијих атмосферских пражњења великог интензитета, одређени број рецептора на елисама може бити трајно уништен, али њихова замена се може брзо обавити и није претерано скупа.

Удари грома могу да се десе мимо прихватног система на изолационим или делимично проводним површинама елисе, тј. ван рецептора. Ова чињеница је најпре примењена у авио индустрији, и наравно да се мора имплементирати и у процесу производње елиса ветротурбина. Пошто рецептори не могу да обезбеде 100% заштиту елиса, очигледан приступ је био да се изврши боља оптимизација материјала за израду спољних површина елиса у смислу повећања њихове проводности, или алтернативно, да се размотре решења за инсталирање проводних танких слојева на спољној површини изолационе структуре [2]. На овај начин процес прихватања струје грома је једноставнији пошто се стримери лако иницирају са целе површине заштићене структуре. После удара грома следи провођење струје пражњења велике густине (неколико kA на проводној површини од неколико cm²).



Слика 2.9. Пораст температуре у бакарној фолији дебљине 0,01 mm као резултат ињектирања струје грома у облику електричног лука са специфичном енергијом од 2 MJ/Ω. Бакарна фолија се може сматрати да је изотропна, са променом температуре у функцији отпорности, а процес адијабатски.

Ради илустрације проблема повећања температуре у близини корена електричног лука, извршен је следећи једноставан прорачун. Слика 2.9 показује како танка бакарна



фолија дебљине 0,01 mm и чије су димензије 1 x 1 m реагује на струју грома специфичне енергије $2\text{MJ}/\Omega$ убризгану у средиште узорка. Сматра се да је бакарна фолија изотропна са температурно зависном отпорношћу и да је процес адијабатски. Температура бакарне фолије премашује температуру топљења у полупречнику од 7,8 cm од корена електричног лука. Ако се аналитички урачуна енталпија процеса, полупречник испаравања се повећава на 11,6 cm [2].

Повећање површинске проводности композитних материјала се у великој мери примењује за заштиту малих авиона од удара грома. Испаравање заштитне мреже у близини тачке удара грома представља саставни део конструкције и на тај начин се утиче на већу површину основне структуре. Деградација површине је очигледна, али с обзиром да се авион лако може повући из саобраћаја ради прегледа и одржавања, овакво оштећење је прихватљиво. Међутим, примена овог принципа на елисама ветротурбина је проблематично. Заустављање елиса ради прегледа и, ако је потребно, због поправке није у складу са рационалном економијом. Према томе, тип заштите од удара грома мора бити такав да се не деградира током времена и да пружа велику поузданост.

2.4.3. Проводни материјали

Проводни материјал заправо представља решење у којој су композитни изолациони материјали учињени делимично проводним применом специјалних влакана, ткања од металних жица и слично.

Преплитање жица као начин заштите од удара грома је првобитно развијено за заштиту композита од угљених влакана. С обзиром на делимичну проводност CFC композита, атмосферско пражњење се обично дешава на површинама које су ограничене на неколико cm^2 . Због велике густине струје може доћи до испаравања смоле и пуцања слојева на већем делу површине. Штавише, дубина оштећења може да захвати и неколико слојева у зависности од интензитета удара. Преплитањем танких металних жица, тако да се периодично појављују по површини, сви истурени делови ће иницирати стримере у присуству електричног поља пре главног пражњења. У случају накнадног удара корен електричног лука ће се распршити по великој површини смањујући тако густину струје и сходно томе оштећења на слојевима од угљених влакана.

Уграђивање ткања од металних жица је укључено у изради највишег слоја композитног материјала, што поступак чини веома флексибилним с обзиром на сложеност геометрије. Ако је питање тежине врло значајно, ово решење је такође погодно с обзиром да овакве типичне конструкције повећавају тежину од само 10-60 g/m^2 уз коришћење алуминијумских жичаних проводника. Међутим, лабораторијска истраживања, као и искуства из авио индустрије, су показали да заштита делује само једнократно, тако да површина у којој је дошло до удара грома мора после тога да се ремонтује. Ово дисквалификује наведено решење што се тиче његове примене у индустрији производње елиса за ветротурбине.

Уместо уградње допунских проводних ткања у изолационом композиту, угљена влакна из највишег слоја могу бити пресвучена проводном легуром алуминијума. Ова врста заштите је комерцијално расположива и мења изразито изолациону природу GFRP композита, тако да он постаје знатно више проводан. Тачка удара атмосферског пражњења може бити подвргнута великом загревању и порасту притиска услед испаравања алуминијума. Ако се превлака или боја нанесе преко слоја са



алуминизираним влакнима, оштећење има тенденцију да се шири ка GFRP слојевима који су испод заштитног слоја. Експерименти су показали да је оштећење више изражено код GFRP композита који су прекривени слојем изолованих влакана у поређењу са решењем које се укратко анализира у наредном одељку, где су GFRP композити заштићени танком проводном фолијом или сличним материјалом. Такође, потреба за честим поправкама дисквалификује ово решење за примену код елиса ветротурбина [2].

2.4.4. Проводне површине

Пошто су многи композитни материјали (GFRP и/или CFC типа) исувише добри изолатори да би могли да прихвате струју грома, један од начина да се избегне њихов пробој и претерано раслојавање је да се струја ограничи на површинском слоју који је израђен тако да буде проводан. Заштита GFRP и CFC композита се може остварити прскањем истопљеног метала по површини њихове структуре. На овај начин се добија непрекидна, добро проводна површина која омогућава релативно лако прихватање удара грома и провођење струје пражњења. Једини недостатак је питање трошкова процеса прскања и тежине структуре с обзиром да су обично потребни слојеви дебљине 0,1-0,2 mm.

Други прилаз је додавање металних честица у превлаку или боју, али је остварена проводност много мања у поређењу са проводношћу површине од истопљеног метала. Проводност се остварује само случајним контактима између суседних честица тако да превлака само усмерава прескок ка путањама већих проводности. Ако су проводне компоненте присутне испод проводне боје, прескоци услед пада напона дуж површине могу да буду довољни да изазову пробој на изолационом слоју. Узимајући у обзир велику дужину елиса савремених ветротурбина, сматра се да је употреба површина од истопљеног метала превише скупо решење, а да је коришћење проводних боја прилично неефикасно.

Чврсте металне фолије примењене на горњем слоју изолационих површина пружају извесну заштиту од директних удара грома. У зависности од дебљине фолије и специфичне енергије струје грома, у већој или мањој мери, фолија испарава у близини корена електричног лука. Као саставни део дизајна, ширење корена електричног лука ублажава термалне ефекте на унутрашњим слојевима GFRP композита. Неки од недостатака укључују тешкоће у обавијању сложених геометријских структура чврстом фолијом тако да је често неопходно њено сечење и преклапање. Штавише, глаткост металне површине отежава њено добро пријањање на изолациону површину. Елисе ветротурбина су врло савитљиве, што отежава њихову интеракцију са чврстом металном фолијом.

Уграђивање fine тканине од металних жица даје проводни слој којим се може лако манипулисати у току процеса производње. Метална тканина даје добру заштиту од удара грома у свим условима (зависно од крутости и димензија жица), али има, као и решење са чврстом металном фолијом, тешкоће у усаглашавању са сложеним геометријама. Што се тиче примена на великим структурама као што су елисе ветротурбина, причвршћивање мреже на површини GFRP слоја би било много лакше него код решења са чврстом фолијом. Развијена фолија је резултат процеса у коме је велики број прореза начињен у чврстој фолији после чега она може да се рашири и образује електрично континуалну структуру. Материјал и финоћа развијене фолије се могу бирати, тако да се проводност и површина попречног пресека у било ком смеру



могу изабрати за одређену примену. Развијене фолије су у широкој примени у авио индустрији за заштиту композитних материјала и генерално имају бољи учинак у односу на плетене мреже и чврсте фолије.

Испаравање у близини корена електричног лука је још увек проблем, али у поређењу са чврстом фолијом, распршавање лука је изразитије са развијеном фолијом. У зависности од дебљине изолационе превлаке или боје примењене на површини развијене фолије, оштећења која се могу очекивати у корену електричног лука варирају. Уопште, што се тиче проводних површина у свим наведеним применама оне треба да су потпуно изложене ради умањења штете услед директних атмосферских удара. Што се тиче ивица проводних фолија, електрично поље коме би била изложена мрежа било би знатно појачано због геометрије са оштрим ивицама. Из тог разлога за очекивати је да ће атмосферска пражњења у мрежу бити проузрокована стримерима који полазе са ивица. Када дође до удара грома на овим местима, у почетку је само половина материјала расположива за провођење струје и топлоте, све док се струја пражњења не распореди по читавом попречном пресеку, што може довести до непредвиђених оштећења.

Иако су ова решења већ дуго примењују у авио индустрији, у ветроенергетици се још увек траже оптималне методе заштите елиса које не захтевају честе интервенције одржавања. Многи истраживачки пројекти су показали да оштећења СФС композита постоје, без обзира на ефективну површину попречног пресека мреже. Овај ефекат делимично настаје због померања електричног лука са дуготрајним струјама пражњења и удара грома у тачкама СФС композита где је површинска мрежа испарила [2]. Као варијанта развијене мреже може се употребити и трака која се нарочито користи за накнадно инсталирање на незаштићеним елисама ради умањивања штетних ефеката од директног удара грома. Дељењем развијене мреже на правоугаоне сегменте (на пример 150 mm ширине и велике дужине) са лепљивим делом на једној страни, добијају се проводне траке које се непосредно лепе по спољној површини елисе. У односу на незаштићене елисе ово решење би могло да пружи заштиту од атмосферских пражњења мањег интензитета, док се очекује да би пражњења већег интензитета захтевала замену траке.

2.5. Актуелно стање громобранске заштите ветроелектрана

У почетном периоду развоја ветроенергетике заштита елиса од удара грома вршена је једноставним постављањем дискретног прихватног система (рецептори) на врховима елиса, њихово повезивање са спусним проводником у унутрашњости шупље елисе ка њеном корену и потом спровођење струје пражњења ка уземљивачком систему. Идеја је инспирисана уобичајеним методама заштите зграда и других структура на земљи и претпостављало се да пражњење скоро увек настаје на рецептору и да може бити спроведено преко спусних проводника сигурно у земљу [49].

Испробано је неколико типова спусних проводника и рецептора и искуство је показало да је принцип заштите применљив на краћим елисама, дужина не већих од 20-30 m. За елисе већих дужина предложено је постављање додатних рецептора, у складу с теоријом котрљајућих сфера о чему ће бити говора у наредним поглављима докторске дисертације. У овим случајевима заштита од атмосферских пражњења је третирана као додатак механичкој структури елиса.

Тек недавно, упоредо са производњом ветротурбина све већих инсталисаних снага, заштита од удара грома је постала саставни део конструкције елисе [1]. Повећан



интерес произвођача и купаца ветротурбина за активним решавањем проблема громобранске заштите је постао евидентан. Погубна оштећења видљива на елисама које су дуже од 30 m објашњена су променама у физичким феноменима удара грома. Процеси удара грома описани су у литератури за статичке структуре на земљи чија укупна висина није већа од 60 m. Мере заштите су усвојене од стране међународних комитета за стандарде, тако да више већ наведених међународних *IEC* стандарда описује начин процене ризика и начине инсталирања громобранске заштите ветроелектрана. За ветроелектране на мору чија је укупна висина већа од 100 m, није до сада објављен било какав званичан докуменат који описује физику атмосферског пражњења и мере громобранске заштите. Услед присуства влаге, прљавштина и делимично проводног CFC композита, елисе се не могу сматрати искључиво као хомогене изолационе структуре.

Када је у питању избор, структура и карактеристике материјала за израду елиса и начин њихове конструкције, на основу најновијих истраживања могу се извести следећи битни закључци [2]:

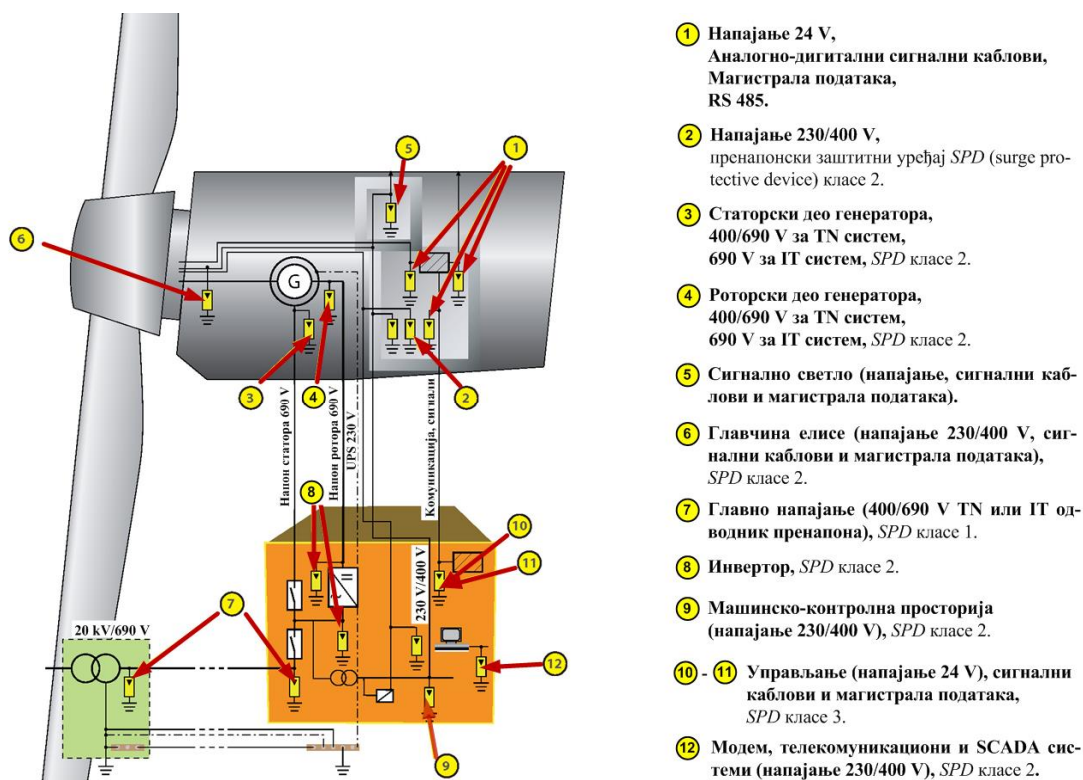
- Композитни материјали за израду елиса су изложени великим статичким и динамичким механичким оптерећењима због стохастичке природе ветра. Све чешће коришћени CFC композити имају супериорне аеродинамичке карактеристике и малу тежину, али пошто су изразито анизотропни и делимично проводни, велики проблем представља извођење ефикасне громобранске заштите (критична температура при којој могу да настану озбиљна оштећења елисе је већ око 300°C). GFPR композити са усавршеним прихватним системима и даље представљају оптимално решење за заштиту елиса од директних атмосферских пражњења;
- У процесу производње је неопходно обезбедити да спољна површина елисе буде хомогена и глатка;
- Уколико је елиса чиста и има добре хидрофобне особине у скоро 100% случајева иницирање стабилних лидера отпочиње са рецептора пре било које друге компоненте на елиси. У случају запрљане елисе, због ефекта прелаза канала грома, може доћи до директних пражњења мимо прихватног система;
- Потребно је избегавати постављање влакана паралелно у односу на смер електричног поља или инсталирање највишег слоја у композиту са произвољно орјентисаним влакнима у случајевима када смер поља није познат. Код GFPR елиса неопходно је прекривање горњег слоја композита са танким слојем смоле (треба избегавати да влакна буду у директном контакту са пражњењима). Препорука је коришћење смоле на бази епоксида уместо полиестера;
- Да би се максимално умањила оштећења на елисама неопходно је побољшати диелектричну чврстину употребљених материјала (јачина пробојног поља композита треба да је што већа). Ваздушни садржај у композитном материјалу у облику шупљина, као и присуство разних примеса и нечистоћа треба свести на најмању могућу меру (због нехомогене структуре композита у унутрашњем слоју елисе пробојни напон се не повећава нужно са повећањем њене дебљине);
- Доказано је да пробојна чврстоћа не зависи од дебљине употребљених изолационих материјала који се користе за прекривање спољних површина елиса, као и од процеса старења композитних материјала у току читавог радног века експлоатације ветротурбине. Показано је да јачина пробојног електричног поља опада са повећањем дебљине композита и да мање зависи од дебљине елисе у случају пражњења позитивног поларитета.



2.6. Приказ комплетног система за заштиту ветроелектрана од атмосферских пражњења и индукованих пренапона

Као што су елисе ветротурбине најосетљивије на директне ударе грома, тако су напојни, мерни и контролно-управљачки системи у великој мери подложни кваровима због утицаја индиректних атмосферских пражњења и индукованих пренапона. Општа шема заштитних пренапонских уређаја ветротурбине дата је на Слици 2.10, и заједно са громобранском заштитом на елисама ветротурбина и уземљењем чини комплетан заштитни систем [49]-[53]. Вероватноћа да дође до кварова и оштећења ветротурбине услед индиректних пражњења је три пута већа у односу на директне ударе грома. Овај вид кварова учествује у преко два пута већем износу када се ради о испаду ветротурбина из нормалног погона у односу на оштећења која настају на елисама, међутим детекција и поправка кварова и евентуална замена елиса је многоструко скупља.

Пошто је предмет докторске дисертације анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног удара грома, у наредним поглављима посебна пажња биће посвећена појавама и физичким феноменима који настају услед директних атмосферских пражњења на елисама ветротурбина које ротирају променљивом брзином.



Слика 2.10. Детаљан преглед типичне пренапонске заштите ветротурбине. Сви напојни водови су оклопљени и у облику шинског развода, а за везу између микропроцесора у гондоли и подножју ветротурбине, као и за трасе водова за мерну и контролну опрему и SCADA конекције користе се фибер оптички каблови без жичаног језгра. Одводници пренапона за заштиту примарне (ниско-напонске стране) трансформатора, генератора и других компоненти ветротурбине су пројектовани за напонски ниво 400/690 V или 230/400 V са карактеристикама да издрже минимум 1500 пренапона (10-20 kA максимум струје типа 8/20 μ s) и бар један пренапон између 180 и 240 kA. Одводници струје грома – SPD Type 1 (испитивани ударном струјом облика 10/350 μ s) се типично инсталирају на граници између зона заштите LPZO_A и LPZ1, а одводници пренапона - SPD Type 2 и/или Type 3 (испитивани ударном струјом облика 8/20 μ s) се инсталирају на граници између зона заштите LPZO_B и LPZ1, или LPZ1 и LPZ2.



ПОГЛАВЉЕ 3

АТМОСФЕРСКА ПРАЖЊЕЊА У ПРИСУСТВУ ВЕТРОЕЛЕКТРАНА

У овом поглављу дат је кратак преглед теорије, битних електричних параметара и међународних стандарда у вези са атмосферским пражњењима у присуству ветроелектрана. Такође, анализирани су актуелни проблеми у вези са громобранском заштитом ветроелектрана и на крају су приказани резултати добијени нумеричким моделовањем.

3.1. Кратак преглед теорије атмосферског пражњења

За предикцију ризика од директног удара грома у ветроелектрану неопходно је анализирати електричне карактеристике и начин атмосферског пражњења у њеној околини за време грмљавинске активности. Појава атмосферског пражњења импресионира је човека још од давнина. У почетку, човек се плашио олуја које су са собом доносиле ватрену муњу која пали, руши и убија и карактерисао их је као натприродне појаве (муња је видљива на растојању до 35 km, а гром се може чути са 15-25 km). Атмосферска пражњења су дуго проучаване појаве и објашњаване су разним, често и супротним теоријама [25].

Међутим, са напретком науке и технике дошло се до спознаје феномена удара грома, па се јавила и потреба за развојем заштите од атмосферског пражњења. Иако механизам настајања наелектрисаних облака није употпуности разјашњен, данас се зна да појаве које прате електрична пражњења имају везе са кретањем и падавинама наелектрисаних честица и формирањем концентрисних области са наелектрисуњима супротног поларитета у облацима. Када нема олујних облака површина земље је негативно наелектрисана, док је позитивно наелектрисуње сконцентрисано у јоносфери.

Типично, при врху облака је сконцентрисано позитивно наелектрисуње, док је на његовом дну негативно. При настанку грмљавинске активности долази до промене смера електричног поља. Негативно наелектрисуње облака индукује позитивно наелектрисуње на површини земље, образујући тако кондензатор (са великим вредностима електричног поља између електрода), који се под одређеним условима празни у виду грома [30]. У следећим одељцима дат је кратак преглед механизма који претходе удару грома и који могу да имају утицај на конструкцију и избор материјала за израду елиса савремених ветротурбина, и извршена је анализа карактеристика електричног пражњења на врховима ротирајућих елиса велике дужине [49]-[55].

3.1.1. Акумулација наелектрисуња

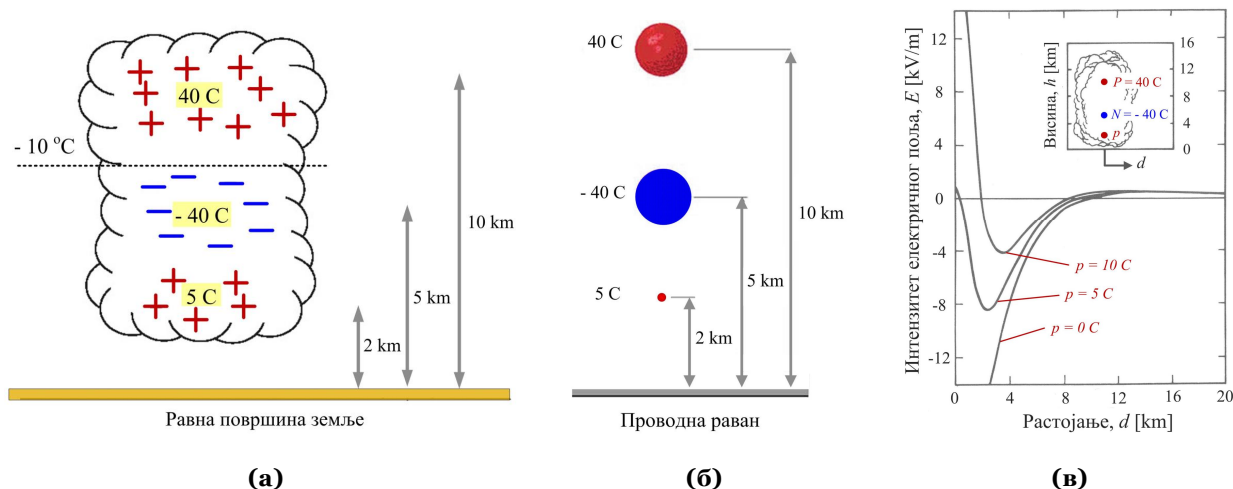
У природи свакодневно долази до појаве атмосферских пражњења и она могу да буду опасна по објекте који им се нађу на путу, а посебно су угрожене високе конструкције као што су ветроелектране. Да би дошло до атмосферског пражњења потребно је да се створе одговарајући услови. Један од услова за настајање грмљавинских облака је постојање узлазне струје топлог ваздуха засићеног воденом паром. До овога



долази најчешће у току пролећа и лета када је средином дана загревање тла, а тиме и ваздуха најјаче. Због велике разлике у температури у доњим слојевима атмосфере и при тлу, долази до интензивног струјања топлог ваздуха навише. Други услов за настанак грмљавинске активности је да у топлој струји ваздуха постоји одређена количина водене паре. Влажан ваздух се креће навише што проузрокује његово хлађење и кондензацију, и доводи до стварања капљица воде.

Дакле, пре него што дође до електричног пражњења у одређеној средини, неопходно је да постоји присуство раздвојених наелектрисања супротног поларитета. Овај услов мора да буде испуњен како током испитивања у лабораторијским условима, када се детектују пражњења мале дужине (реда mm па до неколико метара), тако и код атмосферског пражњења у природи које може да има дужину и неколико km. Раздвајање вертикалног наелектрисања у атмосфери настаје на основу неколико механизма, од којих су најбитнији протицање константне електричне струје из облака ка земљи и локалне појаве у вези са формирањем грмљавинских облака [49] [51].

У сваком тренутку у јоносфери је успостављен континуиран пренос позитивних наелектрисања из приземног слоја атмосфере према земљи. Густина струје која проузрокује овај феномен, као и густина вертикалне струје пражњења, на основу које се формирају грмљавински облаци, је процењена на $2 \cdot 10^{-12}$ A/m², што омогућава укупни трансфер наелектрисања од 1000 C/s [25].



Слика 3.1. (а) Типична расподела наелектрисања у грмљавинском облаку. **(б)** Модел облака за потребе нумеричких симулација (величина наелектрисаних сфера није дата у размери). **(в)** Интензитет електричног поља на земљи у функцији растојања од модела облака за три различите вредности наелектрисања p [25].

Упркос овом глобалном преносу наелектрисања, постоје локални механизми који могу да изазову знатно интензивније раздвајање наелектрисања. Ове појаве се типично догађају током настанка грмљавинских облака, што је детаљно описано у литератури [49]-[55]. Идеални услови за формирање грмљавинских облака су испуњени у приобалним областима, када долази до подизања топлог и влажног ваздуха који је стигао са мора због прекомерног загревања земље дуж обале.

Због смањења температуре при подизању ваздуха ка вишим слојевима атмосфере, влажан ваздух се кондензује и формира капљице воде које су још довољно лагане да наставе кретање према горе. На одређеној висини температура опада испод тачке замрзавања воде, и капљице воде се претварају у кристале леда. Овако формиран



кристали леда у почетку су још лагани и настављају и даље кретање према горе, али када се коначно формирају почињу да расту и отежавају. У једном тренутку кристали леда достижу величину када постају превише тешки да би наставили кретање према горе и почињу да падају у облику града.

Претпоставља се да услед интеракције у којој учествују капљице воде, кристали леда и честице које се крећу према горе и град који пада на доле, долази до раздвајања наелектрисања. Честице које се крећу узлазно постају позитивно поларисане и нагомилавају се у горњим слојевима облака, при чему град који има силазну путању постаје негативно наелектрисан и концентрише се у доњем делу облака. Обично процес формирања грмљавинског облака траје мање од сат времена и доводи до расподеле наелектрисања и електричног поља као што је приказано на Слици 3.1 [2].

3.1.2. Статичко поље и иницирање лидера

Нагомилавање наелектрисања које је дато на Слици 3.1(a) траје све док електрично поље у њиховој околини не порасте до нивоа при коме ефекат јонизације и парцијална пражњења не почну да утичу на стабилност целог процеса. Када се ова парцијална пражњења формирају у стримере и статичко електрично поље које доводи до иницирања лидера постане довољно јако да проузрокује кратак спој између два наелектрисана центра супротног поларитета, долази до електричног пражњења.

Равнотежа приближно константне вертикалне силазне струје, која је дистрибуирана између приземних слојева атмосфере (јоносфера) и земље постаје нарушена због настанка електричног пражњења из облака према земљи. На овај начин формира се спојни пут (затворено електрично коло) између облака и земље, при чему јачина електричног поља током лепог времена износи приближно 100 V/m и одржава се током дужег временског трајања [25].

Различити типови атмосферских пражњења су подељени у категорије на основу њихових карактеристика (пражњење типа облак-облак, облак-земља итд.), поларитета облака и почетног смера лидера – Слика 3.2. Механизми ових пражњења су у основи исти и у оквиру докторске дисертације биће разматрана само пражњења између облака и земље, која се могу груписати у следеће четири категорије:

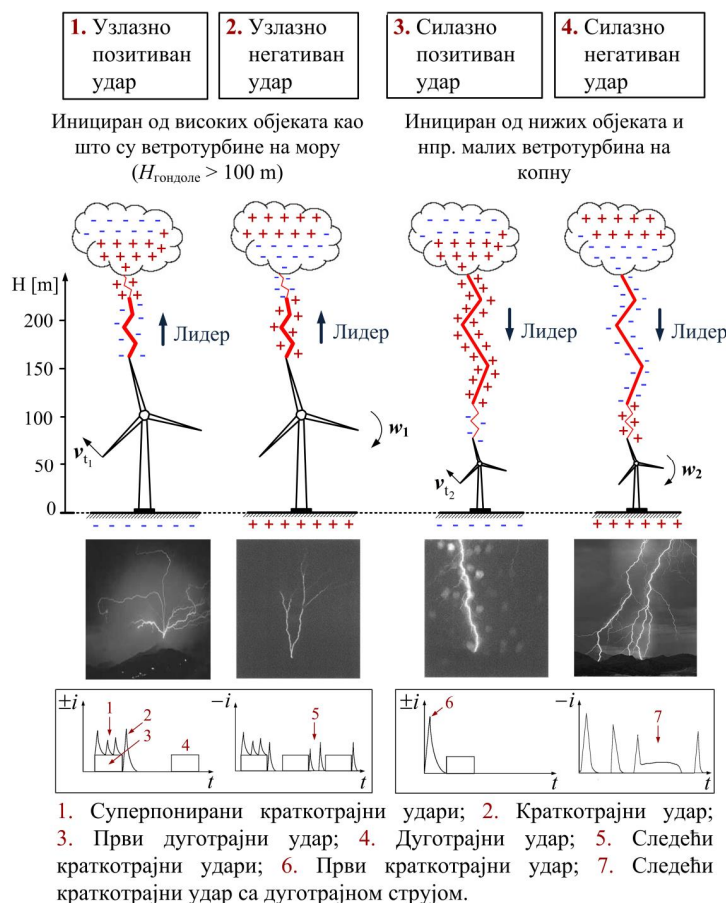
- 1. Узлазно пражњење позитивног поларитета од земље према облаку.** Одређен број пражњења су узлазна типично када су присутни високи објекти (нпр. електрично поље у околини високе ветротурбине на планинском венцу или на мору може имати већу вредност од поља у облаку који је изнад), што доводи до форсиране јонизације и стога до формирања лидера са уземљеног објекта према облаку. Ова ситуација настаје када негативно наелектрисани лидер из уземљеног објекта има интеракцију са позитивно наелектрисаном облашћу у облаку.
- 2. Узлазно пражњење негативног поларитета од земље према облаку.** Наелектрисања до чије неутрализације долази у облаку, још увек одређују да ли ће пражњења бити позитивно или негативно поларисана.
- 3. Силазно пражњење позитивног поларитета од облака према земљи.** Ова пражњења настају формирањем лидера из горњих позитивно наелектрисаних области у облаку према земљи.



4. Силазно пражњење негативног поларитета од облака према земљи. Када се иницијални лидери формирају из доњег дела грмљавинског облака према земљи, пражњење је негативног поларитета (уклања наелектрисања из негативно наелектрисаних области у облаку) и иницирано је на ниже.

Да ли је почетни лидер узлазни или силазни обично зависи од висине разматраног објекта. У равничарским областима већина пражњења је силазног типа, због уједначених вредности електричног поља дуж површина на земљи, док високи објекти доводе до ефекта појачавања поља, што резултира у могућем иницирању узлазних лидера. Наведени високи објекти, као што је наведено у Уводном поглављу, поред савремених ветроелектрана могу бити и стамбено-пословне куле, стубови, водоторњеви, светионици, радарско-антенски торњеви, D/GPS базне станице, итд.

Развој грмљавинске активности у областима где су лоциране ветротурбине узрокује повећање статичког електричног поља до нивоа када настаје формирање стримера на врховима елиса пре иницирања пражњења узлазног типа. Силазно инициран лидер може да се прошири до области близу врхова елиса, док повећање вредности електричног поља не доведе до емисије повратних лидера са одговарајуће елисе ветротурбине.



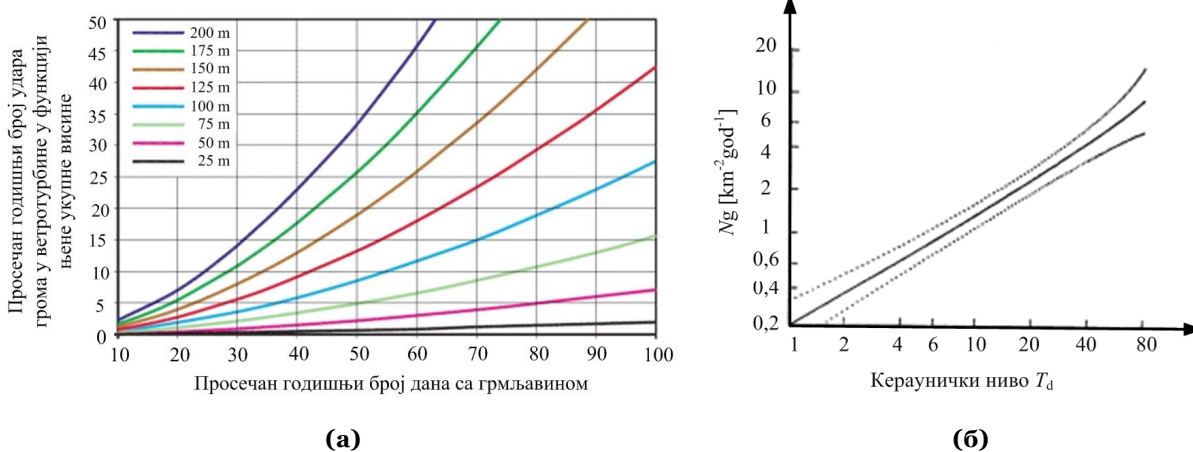
Слика 3.2. Типови пражњења и могуће компоненте узлазних и силазних пражњења у ветротурбине.

И током узлазног и силазног развоја пражњења, формирање узлазно иницираних стримера са ветротурбине је најбитније када је потребно одредити могуће тачке удара



грома у елисе или друге истакнуте делове ветротурбине [54]. За узлазно иницирано пражњење, електрично поље у ваздуху настало због присуства облака (не ствара га скоковити лидер) је скоро униформно, а пражњење је иницирано са елемената ветротурбине. За силазно иницирано пражњење, силазни скоковити лидер ствара неуниформно електрично поље у ваздуху у околини ветротурбине. Елементи громобранског заштитног система на елисама ветротурбине могу интензивирати ово електрично поље, које ће омогућити формирање узлазно иницираних стримера.

Обично се претпоставља да се ризик од удара грома у високе конструкције, као што су ветротурбине, повећава са квадратом њихове висине, при чему доминирају узлазни удари [30]. Узимајући у обзир просечан број од 50 грмљавинских дана по години, повећање укупне висине ветротурбине са 100 m на 200 m учеворостручује број директних удара – Слика 3.3(а).



Слика 3.3. (а) Повећање броја директних удара у ветротурбину у зависности од њене укупне висине и просечног годишњег броја грмљавинских дана. **(б)** Зависност густине атмосферских пражњења од керауничког нивоа.

Учесталост узлазних ($N_{\text{узлазни удари}}$) и силазних ($N_{\text{силазни удари}}$) удара грома на типичној ветроелектрани велике снаге може се израчунати на следећи начин:

$$N_{\text{узлазни удари}} = a \times N_{\text{укупно}} \quad (0,8 \leq a \leq 1) \quad (3.1)$$

$$N_{\text{силазни удари}} = b \times N_{\text{укупно}} = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} = p T_d^q \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (0 \leq b \leq 0,2) \quad (3.2)$$

где су: a и b - коефицијенти релативног броја узлазних и силазних удара респективно (при чему је $a + b = 1$), N_g [$\text{km}^{-2} \cdot \text{година}^{-1}$] - локална просечна годишња густина удара грома по квадратном километру тла, T_d - број грмљавинских дана по години добијен на основу изокерауничких мапа (усвојене вредности коефицијената корелације за савремене ветротурбине су: $p = 0,1$ и $q = 1$ (Слика 3.3(б))), C_d - фактор окружења са вредностима између $1 \leq C_d \leq 5$ како би се добила тачнија процена броја директних удара на локацијама које су генерално веома подложне ударима грома (нарочито за ветротурбине дуж морске обале и за атмосферска пражњења која настају зими), и A_d [m^2] - средња вредност површине атрактивне зоне директних удара и за ветротурбине које се



налазе на равном тлу може се естимирати као површина круга: $A_d = \pi \times (3H_{\text{укупно}})^2 = 9\pi \times (H_{\text{гондоле}} + l_{\text{елисе}})^2$, где је $H_{\text{укупно}}$ [m] - укупна висина ветротурбине изнад нивоа земље - Слика 3.4(а) [35]. Типична 3 MW ветротурбина ($H_{\text{гондоле}} = 120$ m и $L_{\text{елисе}} = 50$ m) има површину атрактивне привлачне зоне дејства пражњења у износу од 80.000 m² и вероватноћа директних удара грома износи до 60% на годишњем нивоу.

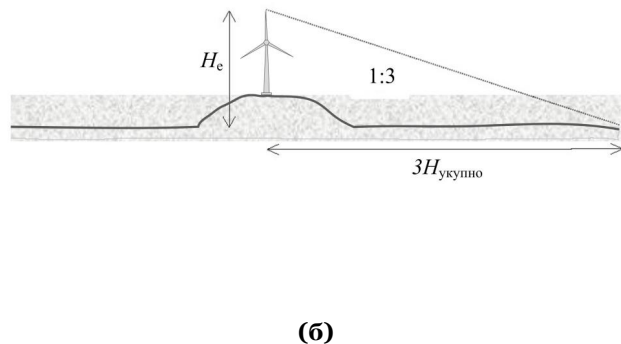
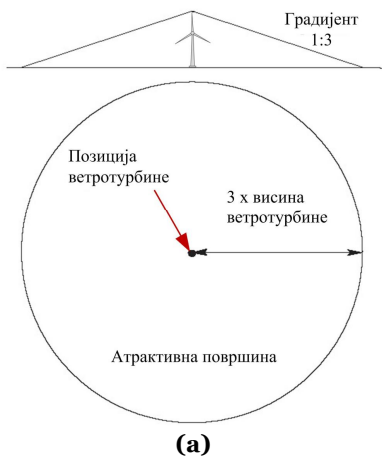
На основу спроведеног истраживања добијена је важна емпиријска формула која даје везу између броја узлазно иницираних пражњења $N_{\text{узлазни удари}}$ на ветротурбинама које су у погону у функцији њихове укупне висине $H_{\text{укупно}}$:

$$N_{\text{узлазни удари}} = 52,8 \times \ln(H_{\text{укупно}}) - 230 \quad (3.3)$$

Укупна годишња учесталост удара грома у оба смера $N_{\text{укупно}}$ одређена је на основу вишегодишњег посматрања удара грома у високе објекте на различитим локацијама, и може се израчунати на основу следеће релације [59]:

$$N_{\text{укупно}} = 2,4 \times 10^{-5} \times N_g \times H_e^{2,05} \quad (3.4)$$

где је H_e [m] - ефективна висина ветротурбине, која узима у обзир повећање атрактивне површине због окружујућег неравног терена и може се израчунати као: $H_e = k \times H_{\text{укупно}}$, при чему је k - коефицијент конфигурације терена ($k \geq 1$) (Слика 3.4(б)). Приликом инсталирања ветротурбина у оквиру ветропарка мора се обратити пажња на њихово међусобно растојање да би се умањиле превелике ваздушне турбуленције - Слика 3.4(в).



Слика 3.4. (а) Атрактивна зона изложености ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења. (б) Ефективна висина ветротурбине која је монтирана на брду. (в) Гледано у смеру најчешћег дувања ветра, растојање између 2 реда ветротурбина треба да буде у опсегу $(5 \div 9) \cdot D$, а растојање између две ветротурбине у једном реду треба да је $(3 \div 5) \cdot D$, где је D пречник ротора.



Важно је напоменути да сваки удар грома у ветротурбину не проузрокује штетне последице, већ то зависи од ефикасности (E) инсталираног громобранског заштитног система (LPS). Ако претпоставимо да је на локацији где је инсталирана разматрана ветротурбина кераунички ниво 30, добија се приближно $N_g = 2,8 \text{ km}^{-2} \cdot \text{година}^{-1}$. На основу једначине (3.4) следи: $N_{\text{укупно}} = 2,5 \text{ година}^{-1}$. Дакле, ветротурбина ће претрпети бар један директан удар грома у периоду од 5 месеци. Ефикасност заштите дате ветротурбине, за дозвољени број „критичних догађаја“ $N_c = 10^{-3} \text{ година}^{-1}$ (отказ LPS) је:

$$E \geq 1 - N_c \times N_{\text{укупно}}^{-1} = 1 - 10^{-3} \times 2,5^{-1} \rightarrow \boxed{E \geq 0,9996} \quad (3.5)$$

Прорачун потенцијалног ризика, да ће елиса ветротурбине са типично инсталираном громобранском заштитом бити погођена директним ударом грома, може се извршити на основу следеће формуле:

$$R = \sum N_{\text{укупно}} \times P_s \times C \quad (3.6)$$

где су: C - процењена вредност трошкова оштећења, и P_s - вероватноћа да ће атмосферско пражњење изазвати оштећење на елиси (тј. вероватноћа да ће струја пражњења имати вредност која је већа од очекиване вршне вредности струје I [kA], и која би зато могла проузроковати оштећења на елиси).

Вероватноћа P_s зависи од конструкционих особина елисе, и може се израчунати на основу следеће релације [47]:

$$P_s = \left[1 + \left(\frac{I}{31} \right)^{2,6} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

Цена годишњих трошкова громобранског заштитног система веротурбине C_{gt} (добијених узимајући у обзир трошкове целокупног система заштите подељених са бројем година произвођачке гаранције за систем) не би смела да буде већа од збира вредности штете која може да настане услед атмосферских пражњења на ветротурбине у току једне године C_{go} и трошкова насталих због немогућности производње електричне енергије док је ветротурбина у квару C_{ge} :

$$C_{gt} = C_{go} + C_{ge} \quad (3.8)$$

$$C_{gt} = (F_u \times C_g) + (F_{go} + F_{gb}) C_e \quad (3.9)$$

где су: F_u - укупна учесталост кварова појединих компоненти ветротурбине због директних и индиректних атмосферских пражњења, C_g - просечна цена штете настале услед кварова и оштећења на компонентама, F_{go} [h] - фреквенција губитака у производњи електричне енергије због кварова и оштећења на компонентама изазваних ударом грома, F_{gb} [h] - фреквенција губитака у производњи електричне енергије због испада ветротурбине из погона изазваних ударом грома који није проузроковао кварове, али доводи до поремећаја у раду мерних и контролних система, и C_e - просечна цена по kWh електричне енергије коју ветротурбина испоручује локалној дистрибуцији.

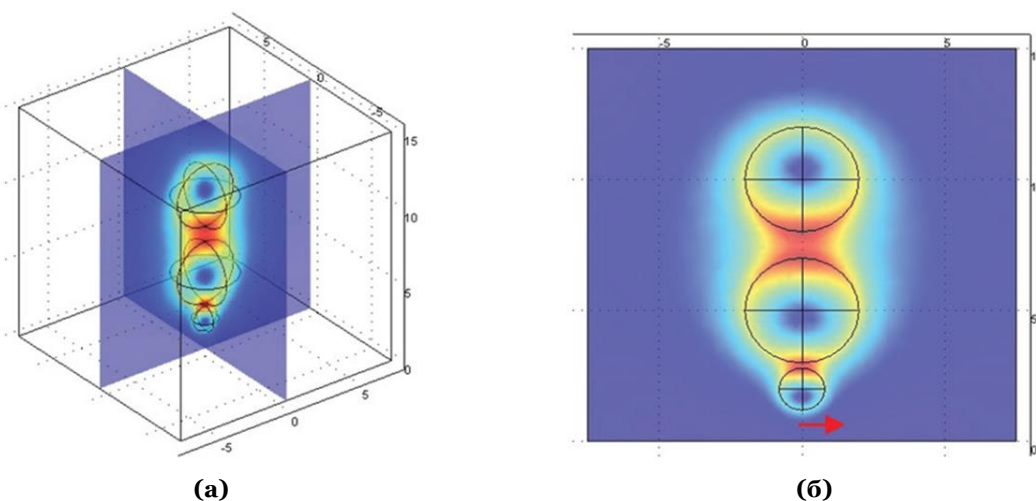


Највећи број нових ветротурбина на елисама има фабрички инсталирану громобранску заштиту и чија цена учествује у оквиру укупне цене коштања ветротурбине. Помоћу формуле (3.9) за типичне вредности наведених параметара може се проценити цена коштања прекострујне и пренапонске заштите ветротурбине са једногодишњом гаранцијом: $[2 \times 1.000 \text{ " } + (266+71) \times 5 \text{ "}] \leq C_{gt} \leq [3 \times 1.500 \text{ " } + (295+99) \times 5 \text{ "}] \rightarrow 3.675 \text{ " } \leq C_{gt} \leq 6.470 \text{ "}$, тј. за громобрански и пренапонски заштитни систем са десетогодишњом гаранцијом између 37.000 " и 65.000 ". Међутим, треба имати у виду да замена оштећене елисе кошта око 30.000 ", а електричног генератора чак 50.000 ".

Ако претпоставимо да оштећење на елиси настаје при вршној вредности струје грома која је већа од 100 kA, на основу укупне нормалне дистрибуције струје пражњења добија се $P_s = 0,04$ р.ј., и за усвојену вредност $C = 10.000 \text{ "}$, може се проценити ризик од директног атмосферског пражњења у ветротурбину:

$$R = \sum 2,5 \times 0,04 \times 10.000 \rightarrow \boxed{R = 1.000 \text{ € / години}} \quad (3.10)$$

Ради визуализације ефекта појачавања електричног поља са високих структура, направљена је симулација упрошћеног 3D модела грмљавинског облака – Сlike 3.1(б) и 3.5. Модел се састоји од концентрације следећа три наелектрисања: 40 C које је позиционирано на висини 10 km изнад земље, -40 C на висини 5 km и 5 C на висини од 2 km. Наелектрисања од 40 C и -40 C дистрибуирана су равномерно у оквиру сфера пречника 2 km, док су мања позитивна наелектрисања од 5 C на дну облака дистрибуирана у оквиру сфере пречника 800 m. Равној површини земље додељен је потенцијал од 0 V [2].



Слика 3.5. (а) 3D симулација FEP (*Finite Element Program*) модела који показује дистрибуцију електричног поља у околини упрошћеног модела грмљавинског облака [2]. (б) Приказ апсолутног електричног поља у равни која пресеца центре три сфере (све осе су у km). Црвене боје представљају области с великим вредностима електричног поља, док плаве боје представљају области са малим вредностима поља. Црвена стрелица показује правац и смер дуж којег се врши прорачун вертикалног електричног поља [2].

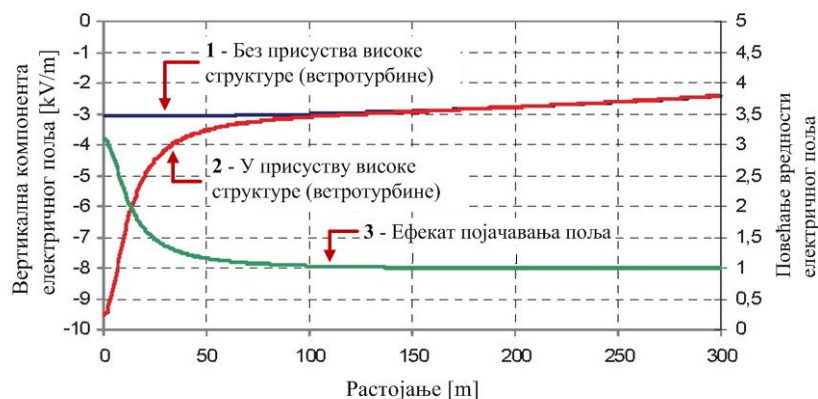
Имплементирањем модела у софтверу који подржава методу коначних елемената и решавањем Поасонових једначина за цео волумен, направљена је 3D мапа са вредностима апсолутног електричног поља и 2D исечак мапе кроз вертикалну осу која повезује три сфере. Црвене нијансе боја одговарају областима у којима електрично поље



има велике вредности, а плаве нијансе боја указују на регионе са ослабљеним пољем. Ради упоређивања два случаја, са и без присутне високе структуре (ветротурбина), израчунато је вертикално електрично поље дуж хоризонталне линије дужине 190 m изнад нивоа земље из тачке директно испод центара наелектрисања до тачке која је на удаљености од 300 m, (црвена стрелица на Слици 3.5(б)). Електрично поље је приказано кривом 1 на Слици 3.6 где негативне вредности одговарају силазно оријентисаним пољима.

Друго израчунавање изведено је тако што је ветротурбина смештена директно испод центара наелектрисања, и моделирана је као уземљени вертикали штап висине 180 m и пречника 2 m. Крајња тачка према центрима наелектрисања је заобљена у виду сфере полупречника 1 m. Израчунавањем вертикалног електричног поља дуж претходно описане линије, може се уочити ефекат појачавања електричног поља, као резултат увођења уземљене структуре. Вертикално електрично поље са уземљеном структуром дато је као крива 2, док је ефекат појачавања поља приказан кривом 3 на Слици 3.6.

Као што се може видети на основу израчунавања са Слике 3.6, висока уземљена структура појачава електрично поље у односу на случај равне површине. Дистрибуција пражњења позитивног и негативног поларитета разликује се дуж тачака на површини земље и такође се мења са променом годишњих доба. Такође је уочена веза између расподеле пражњења и висине објеката на земљи, тако да су више структуре подложније ударима грома позитивног поларитета него што се добија на основу просечне дистрибуције пражњења на глаткој површини земље [2].



Слика 3.6. Вертикално електрично поље дуж хоризонталне линије дужине 190 m изнад нивоа земље, од тачке директно испод центара наелектрисања до тачке која је на удаљености 300 m на основу Слике 3.5(б).

На највећем броју локација у свету 90% свих удара грома типа облак-земља је негативно поларисано, док преосталих 10% представља позитивно поларисане ударе [49]. Међутим, позитивни удари грома изазивају веће последице због великих вредности које имају струја пражњења, ударна количина наелектрисања и топлотни импулс комплетног пражњења, као што ће бити показано у наставку овог поглавља.

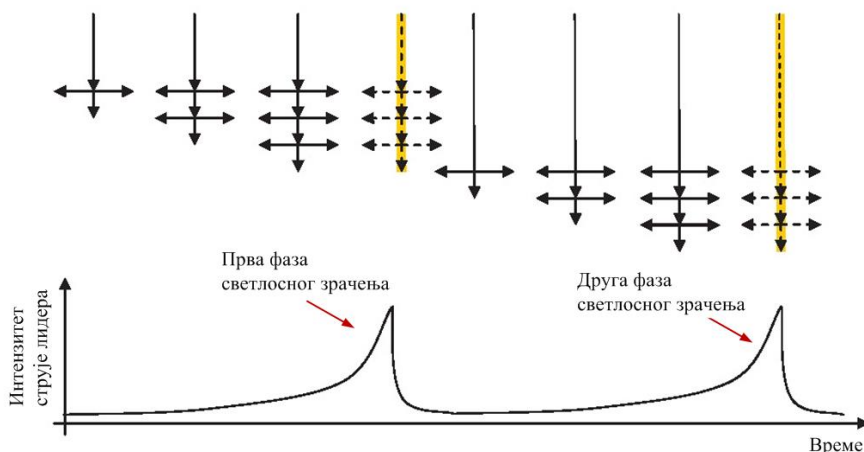
Механизам иницирања стримера и формирања лидера пре настанка главног пражњења је сличан појавама које су објашњене у физици пражњења гасова, осим у једној ствари. Формирање кратких прескока у лабораторијским условима заснива се на ефекту названом „секундарни електрони”. За стримере инициране са катоде ови електрони се стварају на основу механизма који је заснован на повратном процесу, где



позитивни јони или фотони погађају катоду са довољном количином енергије да изазову емисију електрона. Стримери и лидери који иницирају дуге прескоке могу често да настану у ваздушном зазору између електрода (тзв. међу стримери) [49].

Када електрично поље порасте изнад одређене граничне вредности долази до јонизације молекула ваздуха. Ова вредност је приближно 3 kV/mm за хомогена електрична поља у контролисаном лабораторијском окружењу, док су на основу мерења у грмљавинским облацима, помоћу разних техника, добијене вредности око 0,5 kV/mm [25]. Јонизација под овим условима значи да електрони напуштају неутралне молекуле гаса остављајући позитивно наелектрисане јоне за собом. И јони и електрони се убрзавају у електричном пољу, иако делује да су јони непомицни у поређењу са убрзањем електрона. Маса електрона су више од 2.000 пута мање од масе језгра, што значи да ће током кратког периода времена у којем се разматрају описани феномени електрони добити много веће брзине.

На основу опште теорије пражњења гасова, познато је да ће слободни електрони током убрзања добити енергију која је пропорционална маси и зависи од средње слободне путање кретања и електричног поља. Ако електрони добију довољну енергију у електричном пољу, учествоваће у стварању нових електрона. Овај ефекат може настати током јонизације, или побуђивања молекула гаса и доводи до стварања концентрације електрона који се крећу према позитивном центру наелектривања, праћени новонасталом проводном плазмом, која се састоји од јона и електрона. Проводни канал плазме који се шири према центрима наелектривања доводи до даљег повећања електричног поља на његовом врху.



Слика 3.7. Феномен скоковитог лидера, где се у дискретним корацима бљештаво пражњење константне брзине трансформише у више парцијалних светлосних пражњења у облику електричног лука [2].

Теорије о настанку и формирању лидера у каналу грома током атмосферског пражњења доживеле су значајне измене [25]. Сматра се да протицање струје настаје у језгру скоковитог лидера пречника неколико см, које окружује омотач короне од неколико метара. На врху (глави) лидера обично је сконцентрисан највећи део електричног набоја, тако да се корона проширује даље у односу на дужину лидера и чини да врх лидера има већи пречник него остатак канала лидера. Формирање овог прелиминарног пражњења одвија се у дискретним корацима и на тај начин се образује тзв. скоковити лидер.



Феномен скоковитог лидера може се објаснити ако се претпостави да је лидер бљештаво пражњење које се шири силазно константом брзином, Слика 3.7. Струја у лидеру се континуално повећава са дужином лидера и радијалног је карактера. Када ова струја добије вредности које су веће од 1 А бљештаво пражњење се трансформише у пражњење у облику електричног лука. Ово доводи до повећане проводности у каналу грома тако да се наелектрисање у лидеру брзо спроводи до његовог врха и повећава топлотни и светлосни ефекат. Како се лидер приближава земљи, све више је усмерен према истакнутим уземљеним структурама. Завршни корак у којем долази до спајања канала грома са објекта на земљи и наелектрисаних области у облаку (глава скоковитог лидера) представља последњи скок.

3.1.3. Последњи скок

Последњи скок је ситуација у којој врх силазног лидера достиже одређено растојање у односу на уземљени објекат на земљи (ветроелектрана), тако да је тачка удара употпуности одређена - Слика 3.8. Када дође до ове фазе пражњења са објекта се емитује узлазни лидер и коначно долази до њиховог спајања и неутрализације канала грома. Ово практично значи да је тачка удара грома одређена пре него што започне провођење струје пражњења на истакнутој површини ветротурбине и тиме се објашњава да метални проводници на објекту нису једини који могу да емитују повезујуће узлазне лидере. Ова чињеница је јако важна када се, у наредним поглављима докторске тезе, буде анализирао интеракција између електричног пражњења и ротирајућих елиса ветротурбина.

На основу мерења и видео снимака већег броја негативних удара грома у различите високе објекте, добијена је корелација између количине наелектрисања и амплитуде струје грома у току главног пражњења (које је доминантно) и ударног растојања [50]:

$$I = a_1 \times Q^{b_1} \quad (3.11)$$

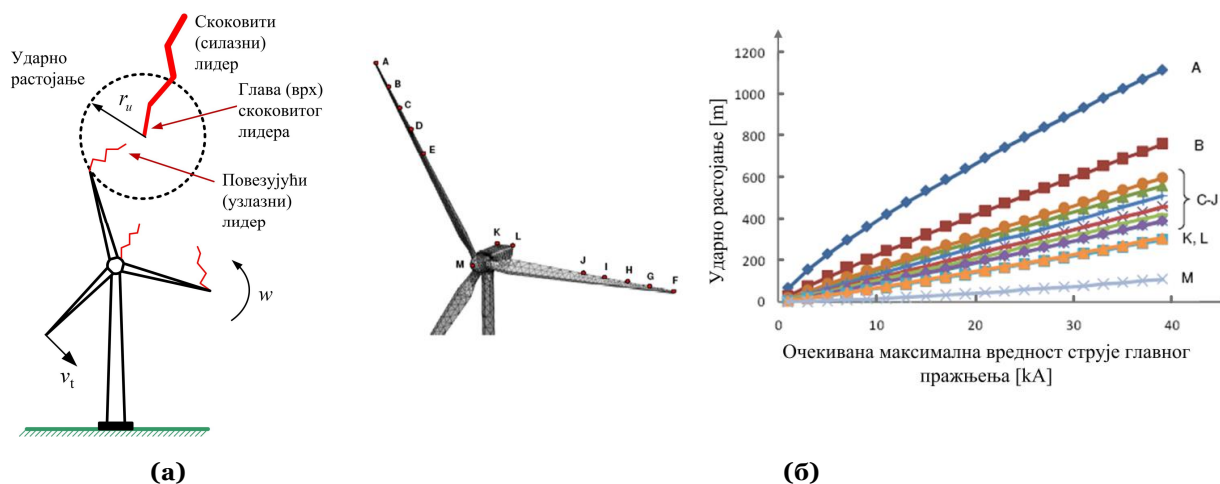
$$r_u = a_2 \times I^{b_2} \quad (3.12)$$

где су: I - вршна струја пражњења изражена у [kA], Q - пренета количина наелектрисања у оквиру главног удара у [C], r_u - ударно растојање измерено у метрима, и a_1 , a_2 , b_1 и b_2 – константе (типичне вредности су: $a_1=10,6$, $a_2=10$, $b_1=0,7$ и $b_2=0,65$, респективно). У литератури се могу пронаћи различите нумеричке методе за естимацију наведених параметара [44].

Горње формуле предвиђају колико близу лидер треба да буде изнад уземљеног објекта (ветроелектрана) пре него што се дефинитивно утврди коначна тачка удара. Овај податак се користи код примене различитих принципа громобранске заштите објекта на земљи (метода котрљајућих сфера, заштитне мреже и заштитног угла), и битан је за оптимално пројектовање громобранске заштите. Код развоја принципа громобранске заштите на објектима који садрже изолационе компоненте и који су лоцирани у загађеним и контаминираним срединама (типично ветропаркови на мору) естимација вредности ударног растојања је од изузетне важности. Дакле, неопходно је размотрити да ли изолационе површине загађене делимично проводним загађивачима (елисе ветротурбина) партиципирају у процесу иницирања повезујућих лидера.



Ако се примени метода котрљајућих сфера, потребан ниво заштите II (*Lightning Protection Level - LPL*) се постиже ако сфера полупречника 30 m може да се котрља око штићеног објекта (ветротурбина), при чему једино додирује прихватни систем, који је тако пројектован да може да издржи директни удар грома. LPL II омогућава ефикасност громобранске заштите од 95%, што значи да ће се 95% свих удара грома догодити у инсталиран прихватни систем. Ово одговара 95%-делу укупне расподеле амплитуде струје удара грома, при чему 95% свих позитивних удара грома има амплитуду струје грома која је већа 4,6 kA [49]. Такође, могу се израчунати и одговарајућа ударна растојања од приближно 25 m. За директна атмосферска пражњења са мањом амплитудом струје грома, ударно растојање је краће. Ниво заштите другог нивоа, другим речима, не може у потпуности да гарантује заштиту од ових пражњења.



Слика 3.8. (а) Ударно растојање и ветротурбине. (б) Ударна растојања добијена нумеричко-софтверским моделовањем за 13 карактеристичних тачака на истакнутим деловима ветротурбине номиналне снаге 3 MW. Због ефекта појачавања поља уочавају се знатно веће вредности ударних растојања у односу на вредности добијене на основу емпиријске формуле (3.12).

3.1.4. Параметри удара грома

Током последњих 60 година сакупљено је пуно података о начину и карактеристикама атмосферског пражњења [35]. Пошто се удари грома на равним површинама дешавају прилично ретко, већина података је добијена помоћу ракетом изазваних пражњења, мерењем на високим стубовима, димњацима и комуникационим торњевима (*Toronto Canadian National (CN) Tower-553 m, Fukui Chimney Japan-200 m, Peissenberg Tower Germany-160 m, Gaisberg Tower Austria-155 m*), а у последњој деценији и детекцијом на савременим ветроелектранама [25]. Постоје одређене недоумице о томе како ове високе структуре утичу на мерења и описане феномене, али су углавном добијене задовољавајуће корелације између података добијених на основу мерних система за детекцију атмосферског пражњења. Ови системи су инсталирани на многим местима у свету и типично мере амплитуду струје грома, поларитет и учесталост пражњења. На све већем броју савремених ветротурбина све чешће се монтира наведена мерна опрема.

Удар грома се састоји од неколико различитих компоненти. Када се повезујући лидер споји са врхом скоковитог лидера долази до главног удара, који садржи највећу специфичну енергију и доводи до наглог пораста температуре у каналу грома, и до формирања муње (бљесак) и чујног ефекта у облику праска. Електрични набој у глави



скоковитог лидера и у остатку канала грома се неутралише за време трајања главног удара.

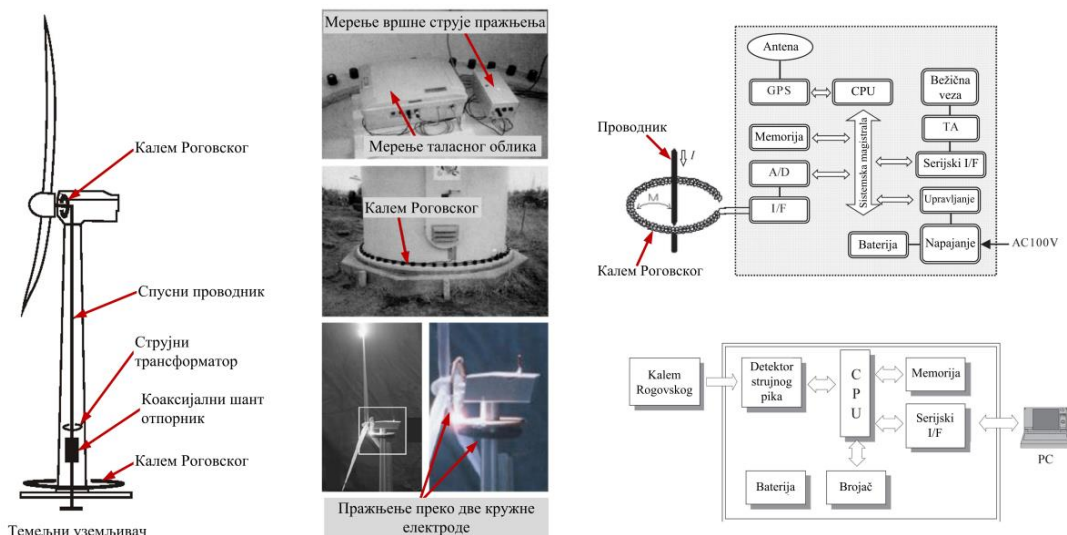
Главни удар код пражњења негативног поларитета обично је праћен са већим бројем накнадних удара који се догађају неколико десетина милесекунди касније. Ови удари су мање амплитуде и специфичне енергије од првог главног удара, али обично имају веће градијенте струје пражњења, што доводи до значајнијег индуктивног пада напона дуж металних проводника који чине прихватни систем и кроз који протиче струја пражњења. Накнадни удари настају када се новонастале области са електричним набојем у облаку повежу са каналом грома и изврши њихова неутрализација, што се типично дешава од 1-20 пута при сваком удару грома. Приликом пражњења, у појединим секвенцама трајања процеса може се уочити дуготрајна струја пражњења. Ова струја са амплитудом од неколико десетина кА може трајати до једне секунде и од ње зависи трансферована количина примарног наелектрисања у земљу. Главни утицај који може да изазове ова компонента струје пражњења је топлеење металних компоненти прихватног система у тачки удара грома.

Различите компоненте заштитног система на објекту (или поједини истурени делови објекта који нису заштићени) после удара грома могу претрпети различита оштећења. Главни удар садржи највећи део специфичне енергије, која доводи до омског загревања на путањи приликом одвођења струје пражњења у земљу (прихватни систем и спусни проводници). Магнетне силе које делују на паралелне спусне проводнике такође зависе од амплитуде струје главног пражњења и њеног времена трајања, тако да су и механичка оштећења учестала током главног удара. Накнадни удари обично имају веома изражене градијенте струје, тако да индуктивни падови напона дуж спусних проводника могу довести до појаве бочних пражњења. Дуготрајна струја пражњења може да доведе до неутрализације електричног набоја од неколико стотина кулона, и на тај начин учинити тачку удара веома критичном. Због тога су материјали који могу да издрже високе температуре топлеења и имају велики специфични топлотни капацитет најпогоднији за израду громобранског заштитног система.

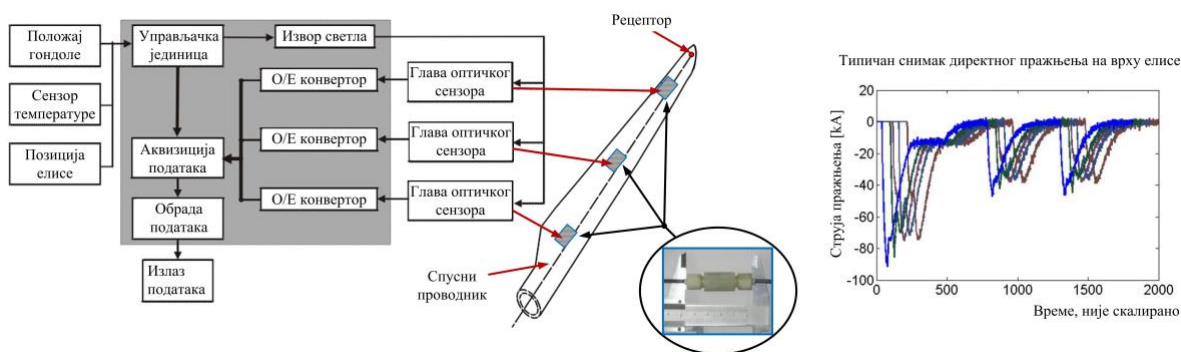
Све што је речено изузетно је важно код анализе и пројектовања различитих принципа заштите савремених ветроелектрана, при чему су амплитуда и стрмина струје грома најважнији параметри за процену њене угрожености. Велика амплитуда струје изазива омски пад напона, нарочито на отпору уземљења ветротурбине, и такође може да доведе до великог термичког загревања спусних проводника унутар елиса и стуба, и да иницира јаке електромагнетне силе које на њих делују. Са друге стране, струја велике стрмине може да проузрокује индуктивни пад напона на проводницима кроз које протиче, као и индуковане напоне у магнетски спрегнутим контурама у гондоли, дуж стуба и у подножју ветротурбине где се налази изузетно осетљива мерна, телекомуникациона и управљачка опрема. Остали параметри грома су од мање важности за координацију изолације ветроелектране.

3.2. Искуства на основу рада ветротурбина у реалним условима

Као што је објашњено, атмосферско пражњење у ветроелектране је опасно због високог напона (услед јаких електричних поља) и велике струје (директни и индиректни ефекти). Директни ефекти су они које проузрокује удар грома и висока температура која при томе настаје. Индиректни ефекти настају услед индукованих напона и струје. Обе врсте ефеката могу да имају веома штетне последице у току рада ветротурбине.



(a)



(b)

Слика 3.9. Осматрање и праћење карактеристика директних удара грома у ветротурбини у реалном времену у широком опсегу, од ниских (ms) до високих фреквенција (μ s). **(a)** Сензори за детекцију таласног облика и вршних вредности струја атмосферског пражњења инсталирани у ветротурбини. **(б)** Мрежа фибер оптичких сензора за праћење утицаја карактеристика атмосферског пражњења на елисама ветротурбине [35].

Учесталост удара грома и главне карактеристике атмосферског пражњења у ветротурбини могу се одредити на следећа два начина:

1. Сакупљањем података удара грома на различитим типовима ветротурбина које су инсталиране на локацијама са различитим вредностима керауничког нивоа. На елисама и у унутрашњости ветротурбина све више се инсталирају савремени сензорско-мерни и антенски системи који детектују таласни облик и максималну струју пражњења, као и број и време настанка директних удара грома, и типично су повезани на SCADA систем – Слика 3.9(а)-(б). Често се на врховима елиса монтирају и повезују на спусни проводник и једноставнији системи у облику магнетних трака (*PCS – Peak Current Sensor*), који бележе највиши струјни максимум између више директних удара (раде у опсегу 3-150 kA). Због велике непрецизности напуштен је приступ за праћење кварова и оштећења на елисама инсталирањем сензора на прикључцима генератора и мерењем спектра густине снаге на основу CWT (*continuous wavelet transform*) технике [38].
2. Тестирањем на умањеним моделима ветротурбина која се изводе у високонапонским лабораторијама, примењујући стандардне таласне облике склопног ударног напона оба поларитета [31]-[32].



Увидом у литературу може се закључити да је на већини локација у свету (посебно у Јапану) интензитет и учесталост директних атмосферских пражњења у ветротурбине много већи зими него лети. Процењује се да типично пражњење зими са вршном вредности струје главног пражњења од 70 kA производи исти укупни ефекат као и пражњење током лета са пиком струје главног удара од 100 kA, због знатно дужег трајања дуготрајне (континуалне) струје са већим трансфером наелектрисања. Укупан ризик услед пражњења неколико десетина пута је већи у зимским месецима, него лети [46].

Истраживања су потврдила да узлазна пражњења учествују у великој мери у укупном броју атмосферских удара у ветроелектране. Интензивна изградња фарми ветрењача на локацијама на мору и мала висина олујних облака у зимским месецима у приобалним областима или у планинским регионима (и на тај начин интензивирање електричног поља већих вредности) повећава ризик од узлазних пражњења у ветротурбине (велики проценат зимских удара грома, до 98% је узлазног типа).

Највећи број директних удара грома погађао је елисе ветротурбина, али забележени су и удари у сигнална светла и уређаје за мерење параметара ветра (анемометар/ветроказ), који су инсталирани на горњем делу гондоле. Уочен је интересантан феномен да је значајан број струја директног пражњења имао мање вршне вредности од очекиваних, вероватно због повећаног броја пражњења узлазног типа и/или услед протицања струје кроз систем спусних проводника током формирања узлазног лидера у присуству силазног пражњења. Типичан лидер садржи око 45 $\mu\text{C}/\text{m}$ и при брзини пропагације од 1,5 $\text{cm}/\mu\text{s}$ производи средњу вредност струје од 0,68 A. Изненадан пропад у лидеру због оближњег удара грома и/или промене вредности поља изазивају проток струја већег интензитета. Да би иницирао струју од 5 kA узлазни лидер дужине 100 m би требао да пропадне у току 1 μs , што одговара 1/3 брзине светлости.

Средња вредност пика струје се налазила у опсегу 6-10 kA, што је значајно мање у односу на просечну максималну вредност струје главног пражњења и накнадних удара (за пражњења силазног типа типичне вредности су 30 kA и 12 kA, респективно). Са друге стране највећи број удара у близини стуба ветротурбине имао је пик струје у опсегу 8-12 kA, што може да доведе до настанка пренапона од 5-7 kV на електронској опреми и поред инсталираних SPD уређаја [47]. Такође, битни параметри атмосферског пражњења, који су дати у IEC стандардима, и о чему ће бити речи у наредним одељцима, се не подударају у потпуности са измереним, када се ради о ветроелектранама велике снаге [35]. Важно је напоменути да је детектован број атмосферских пражњења, на ветроелектранама које су у погону широм света, по правилу увек био многоструко већи од броја удара који се добија на основу наведених емпиријских формула. Дакле, као главни закључак намеће се да су неопходна даља истраживања и усавршавања модела за процену броја пражњења и могућих тачака удара грома у ветротурбине.

3.3. Међународни стандарди за заштиту ветроелектрана од директних и индиректних атмосферских пражњења

3.3.1. IEC стандарди

Основни сет међународних стандарда у вези са заштитом ветроелектрана од атмосферског пражњења дат је у Уводном поглављу. Мере громобранске заштите се примењују на тај начин да буду у складу с једним од четири могућа нивоа заштите I-IV (*Lightning Protection Levels - LPL*), у смислу да пројектован громобрански заштитни



систем може на ефикасан начин да прихвати струју пражњења и да је на сигуран начин спроведе у земљу [49]. Заштита на највишем нивоу LPL I омогућава да објекат буде неоштећен у 98% случајева удара грома. Преосталих 2% удара имају параметре струје грома који премашују максимално дозвољене вредности амплитуде струје пражњења, специфичне енергије, топлотног импулса итд. Ово практично значи да примењени заштитни систем не може да поднесе струју пражњења без штетних последица, или да атмосферски удари имају максималну вредност струје која је мања од одређене вредности. Такође, ударно растојање има мању вредност од потребне, која је дефинисана одређеним нивоом заштите за прихватни систем.

Због велике вероватноће директних атмосферских пражњења у елисе или друге истакнуте делове ветротурбина великих снага, могу настати озбиљна оштећења. На основу важећег стандарда највећи број ветротурбина на копну има LPL II, и оне морају да поднесу струје пражњења до 150 kA (са потребном стрмином струјног таласа од 150 kA/ μ s) за израчунату максималну ефикасност заштите, а за ветротурбине на мору примењује се ниво заштите I, због очекиваних већих струја пражњења до 200 kA (стрмина струјног таласа од 200 kA/ μ s). Такође, све ветротурбине чија је висина стуба мања од 60 m иницијално треба да имају LPL III, а оне са висином стуба већом од 60 m LPL II [35]. Међутим, с обзиром на интензивно повећање инсталисане снаге и димензија ветротурбина, и на све већи број података из праксе о њиховој повећаној угрожености, препорука је да све нове ветротурбине имају максималан ниво заштите I.

Максималне вредности параметара атмосферског пражњења, које морају да буду задовољене од стране прихватног система, спусних проводника, уземљења и других заштитних компоненти, за различите нивое громобранске заштите, дате су у Табели 3.1. Код избора оптималног метода за верификацију ефикасности громобранске заштите, такође је предложена употреба вредности појединих параметара из наведене табеле у зависности од одабраног нивоа заштите.

Табела 3.1. Максималне вредности битних параметара атмосферског пражњења према IEC 62305-1 за различите нивое громобранске заштите [35].

Први кратки удар			Ниво громобранске заштите			
Параметри струје пражњења	Ознака	Јединица	I	II	III	IV
Максимална вредност струје	I	[kA]	200	150	100	
Наелектрисање кратког удара	$Q_{\text{кратко}}$	[C]	100	75	50	
Специфична енергија	W/R	[MJ/ Ω]	10	5,6	2,5	
Временски параметри	T_1/T_2	[μ s/ μ s]	10/350			
Следећи кратки удар			Ниво громобранске заштите			
Параметри струје пражњења	Ознака	Јединица	I	II	III	IV
Максимална вредност струје	I	[kA]	50	37,5	25	
Просечна стрмина струје	di/dt	[kA/ μ s]	200	150	100	
Временски параметри	T_1/T_2	[μ s/ μ s]	0,25/100			
Дуготрајни удар			Ниво громобранске заштите			
Параметри струје пражњења	Ознака	Јединица	I	II	III	IV
Наелектрисање дугог удара	$Q_{\text{дуго}}$	[C]	200	150	100	
Временски параметри	$T_{\text{дуго}}$	[s]	0,5			
Пражњење			Ниво громобранске заштите			
Параметри струје пражњења	Ознака	Јединица	I	II	III	IV
Наелектрисање пражњења	$Q_{\text{пражњења}}$	[C]	300	225	150	



3.3.2. SEA и EUROCAE стандарди

Недавно је објављена ревизија скупа међународних стандарда који описују мере и принципе громобранске заштите у авио индустрији [31]-[32]. Састоје се од четири дела где први (*SAE ARP 5412, Eurocae Ed 84*) описује карактеристике окружења у коме настају атмосферска пражњења и одговарајуће таласне облике, други (*SAE ARP 5413*) разматра процесе сертификације, трећи (*SAE ARP 5414*) показује начин дефинисања зона громобранске заштите на авионима, а четврти (*SAE ARP 5416, Eurocae Ed 105*) описује индиректне и директне методе тестирања авиона у односу на атмосферска пражњења.

Одређивање карактеристика удара грома, као и тестирање могућности појединих материјала, да ли могу и у којој мери, да проводе струју грома је од велике важности у авио индустрији. У стандарду су зато дати таласни облици напона и струје који се користе приликом испитивања, и наглашено је да се не односе на неки конкретан случај пражњења, али омогућавају да се изврши темељна анализа и лабораторијско испитивање, које има сличан ефекат који се може видети на авионима који су изложени директним пражњењима у реалним условима [35]. Важно је рећи да се велики број испитивања која се заснивају на примени наведених стандарда користи и приликом пројектовања и провере ефикасности громобранске заштите ветроелектрана.

1. Таласни облици напона користе се за одређивање могућих тачака удара грома, као и за дефинисање пробојне чврстоће изолационих материјала у присуству јаких електричних поља. Атмосферска пражњења која се дешавају у природи настају при различитим вредностима и карактеристикама променљивог електричног поља, и типично се користе четири специфична напонска таласна облика.
 - I. **Таласни облик напона А** симулира услове електричног поља који се имају приликом поновних удара грома у авион. Талас има велику стрмину од $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ и одсецање таласа настаје када дође до пробоја или прескока, пре него што се достигне вршна вредност.
 - II. **Таласни облик напона В** је стандардни таласни облик ударног напона, који се нашироко користи приликом високонапонског испитивања пробојне диелектричне чврстоће. Има време раста од $1,2 \mu\text{s}$ и време опадања од $50 \mu\text{s}$, а тестирања се комплетирају без прекида услед пробоја или прескока. Пошто одсецање таласа није дозвољено, овај таласни облик је погодан за тестирање развоја стримера на различитим структурама.
 - III. **Таласни облик напона С** се користи у испитивањима када је потребно да чело таласа веома кратко траје, и до његовог одсецања долази услед пробоја или прескока који настаје после $2 \mu\text{s}$.
 - IV. **Таласни облик напона D** представља удар дугог трајања, којим се симулира електрично поље пре првог удара. На основу искуства из лабораторијских испитивања може се уочити да разни објекти који су подвргнути овим спорим таласним облицима иницирају више стримера из нижих области поља, него у случају напонских таласа који имају кратко трајање чела таласа. Таласни облик има време раста од $50\text{-}250 \mu\text{s}$, а време опадања приближно $2000 \mu\text{s}$. Пробој или прескок по правилу настају на зачељу таласа.
2. Таласни облици струја су подељени у две групе, на оне за тестирање директних ефеката (штета проузрокована протицањем струје или услед трансфера наелектрисања), и за тестирање индиректних ефеката (индуковани напони и



магнетне спреге). Овде су споменуте само компоненте струје које су релевантне за директне ефекте.

- I. **Компонента струје А** треба да симулира нежељене ефекте који могу настати услед негативне или позитивне струје главног пражњења. За индиректна испитивања типично се користи униполарни таласни облик двоструке експоненцијалне функције, док се директни ефектни симулирају дуплим експоненцијалним или осцилаторним таласним обликом. Вршна вредност струје је 200 kA а специфична енергија приближно $2 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$. Трајање таласа не сме да прекорачи 500 μs .
- II. **Компонента струје В** симулира краткотрајну струју која може да настане након појединих удара грома негативног поларитета. За тестирање директног ефекта ова компонента струје треба да буде униполарна са двоструко-експоненцијалним, правоугаоним или линеарно опадајућим обликом. Просечна амплитуда струје за време трајања од 5 ms треба да буде 2000 A, што је еквивалентно трансферу наелектрисања од 10 C.
- III. **Компонента струје С** представља окружење са дуготрајном струјом пражњења, која најчешће следи након главног удара позитивног поларитета типа облак-земља, или после поновног удара негативног поларитета типа облак-земља. Циљ је да се изврши пренос наелектрисања од 200 C у оквиру времена трајања од 0,25-1 s. Користи се двострука експоненцијална, правоугаона или линеарно опадајућа компонента струје. Употребљава се и модификована варијанта компоненте струје С - (чија је ознака C_m), за симулацију топлеења на спољним металним слојевима током временског трајања од 5 ms (компонента струје В). У овим случајевима очекивано време трајања за феномен прелаза грома дефинише укупно трајање таласа. Време трајања удара грома у току прелаза преко проводне површине обично је око 5 ms, а ако је инсталиран танак изолациони слој (у облику разних композита или премаза) време трајања је између 20-50 ms. Средња вредност струје не би требало да буде мања од 400 A.
- IV. **Компонента струје D** симулира накнадни удар негативног пражњења типа облак-земља. За директно тестирање може се користити униполарни или двоструко-експоненцијални таласни облик, са максималном вредности струје од 100 kA, при чему трајање таласа не би требало да прекорачи 500 μs . Специфична енергија је $0,25 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$.

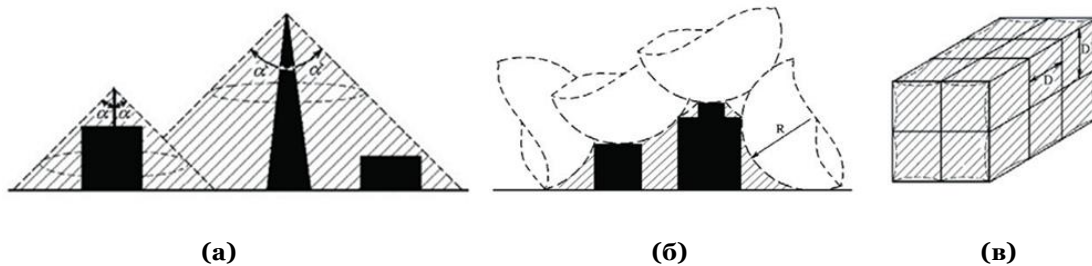
За испитивање директних и индиректних ефеката пражњења користе се појединачни или комбинација представљених таласних облика ударних напона и струја.

3.4. Актуелни проблеми заштите ветроелектрана од атмосферских пражњења

Иако је громобранска заштита највећег броја савремених ветроелектрана изведена на основу актуелних стандарда и даље су присутна озбиљна оштећења изазвана превасходно директним ударом грома. Методе и принципи на којима се заснива заштита ветроелектрана су епириске природе, нису у основи никада били развијани типично за веома сложене конструкције са ротирајућим елементима, као што су ветротурбине, нити су били поуздано тестирани на њима – Слика 3.10(а)-(в) [54]. Дакле, неопходан је развој прецизнијих метода које ће омогућити већи степен и ефикасност заштите.



Употреба громобрана са раним стартовањем била би идеална за заштиту високих конструкција, као што су ветроелектране великих снага, међутим пракса је показала да долази до супротног ефекта, тј. до деградација перформанси целокупне заштите, па је и овај приступ напуштен [60]. Такође, до сада у свету није проучавано да ли због ротације елиса долази до појачавања атрактивног ефекта код ветротурбина, а као што је у докторској дисертацији показано, утицај обртања елиса на учесталост и карактеристике пражњења је значајан и мора се узети у обзир приликом пројектовања громобранског заштитног система.



Слика 3.10. Методе које се користе приликом пројектовања спољашње громобранске заштите. **(а)** Метода заштитног угла. **(б)** Метода котрљајућих сфера. **(в)** Метода заштитне проводне мреже. Шрафиране линије одговарају громобранским заштитним зонама.

Параметри атмосферског пражњења за максимални ниво заштите LPL I су предимензионирани, нису засновани на научним чињеницама, и били су и настављају да буду оспоравани широм света. Параметри електричног пражњења који су дати у Табели 3.1 усвојени су 70-их година прошлог века на основу испитивања позитивних силазних пражњења типа облак-земља, од стране швајцарског професора Бергера (у најновијој ревизији ова пражњења су без икаквих објашњења преименована у узлазна) [49]. На основу актуелних истраживања је показано да, ако би у природи постојала атмосферска пражњења чије су карактеристике дате на основу параметара за максимални ниво заштите LPL I, она се не би појављивала више од једном на сваких два милиона година [61].

Метода котрљајућих сфера, која се највише користи приликом пројектовања громобранске заштите ветроелектрана, је веома груба метода, заснива се на прорачуну ударног растојања фиксне вредности (типично 45 m) и не уважава у довољној мери геометрију и променљиву висину ветротурбине због ротација елиса. Дакле, на основу ове, као и других наведених метода, се не може са великом сигурношћу утврдити где ће доћи до тачке удара грома у ветротурбину. На основу једначине (3.12) за струју пражњења од 200 kA и за типичне вредности коефицијената a_2 и b_2 добија се ударно растојање од 313 m. Мало је вероватно да се силазно иницирани удари са овако великом амплитудом струје могу појавити у реалним условима у присуству ветроелектрана [61]. Због ефекта појачавања поља у околини високих и шиластих структура, настанак узлазних лидера се дешава пре него што се силазни лидер приближи ветротурбини, и удар грома који следи настаје као узлазно иницирано пражњење.

На основу класификација громобранских заштитних зона (LPZ I-IV), добијених применом методе котрљајућих сфера и које су описане у претходним одељцима докторске дисертације, може се закључити да би током олујног невремена особа која се затекне унутар стуба ветротурбине или чак ако виси на анемометру била потпуно безбедна, што је далеко од тачног (по најновијим препорукама сво особље се мора



удаљити на безбедну удаљеност од ветротурбине док грмљавинска активност не прође) [35]. Дакле, тешко је оправдати примену заштитних громобранских зона на ветроелектранама, јер оне нису никада биле развијане за овакав тип високих констукција са ротирајућим елементима. Систем LPZ I-IV је базиран на верзијама IEC стандарда, које су користиле 10/350 μ s таласни облик као модел пражњења. Међутим, најновије студије су показале да трајање атмосферског пражњења у ветротурбине износи између 25-30 μ s, што је далеко краће, па је таласни облик 10/350 μ s доста оспораван, када су у питању експериментална истраживања [61].

Може се закључити да развој и примена оптималног громобранског заштитног система на основу актуелних стандарда, прописа и техничких препорука не може још увек на задовољавајућем нивоу да заштити ветроелектрану од директних и индиректних атмосферских пражњења. Потребна су даља истраживања, а у оквиру докторске дисертације у наредним поглављима, као један од битних доприноса, биће предложен унапређен принцип заштите ветроелектрана од атмосферских удара и биће дато детаљно објашњење како ротација елисе утиче на карактеристике пражњења.

3.5. Нумеричке методе

3.5.1. Анализа електростатичког поља

Као што је већ дискутовано електрично пражњење настаје када дође до спајања силазног скоковитог лидера из облака и узлазног лидера са истуреног дела уземљене ветротурбине. Прилазећи ка ветротурбини скоковити лидер доводи до појачавања електричног поља и иницира настајање узлазног лидера. Електромагнетни импулс директног атмосферског пражњења у тачки удара грома састоји се од импулса електричног и магнетног поља. **Електрично поље** се може разложити на три компоненте: **електростатичко** (блиско) поље (на растојању до 1 km од тачке удара, које је пропорционално трансферу наелектрисања у тачки удара $Q = \int i_0(t) dt$), **индукционо** (прелазно) поље (на средњем растојању од 1-10 km, које зависи од струје у тачки удара $i_0(t)$), и **диференцијално** (далеко) поље (на растојањима ≥ 10 km, које је у функцији првог извода струје у тачки удара $di_0(t)/dt$). **Магнетно поље** се састоји од **индукционог** и **диференцијалног** поља. У сваком тренутку функција струје $i_0(t)$ и њен први извод у времену морају бити 2 пута диференцијабилни. Компоненте струје у тачки удара су: струја импулсног пробоја, струја короне и континуална струја [55].

Анализа електричног поља у околини ветротурбине за време развоја електричног пражњења је веома важна за одређивање могућих тачака удара грома. У циљу симулације понашања лидера, најбоље би било применити електромагнетну транзијентну анализу, међутим због веома комплексне 3D геометрије ветротурбине, овакав приступ је прилично компликован. Зато је први корак да се изврши једноставнија електростатичка анализа понашања истурених делова ветротурбине, са и без инсталиране громобранске заштите, за време грмљавинске активности [62]. Атмосферско пражњење је симулирано помоћу комерцијалних софтвера на бази методе коначних елемената (*Finite Element Method*) и програма који подржавају 3D моделовање (*преглед и лиценце коришћеног софтвера су дати на крају списка литературе*).

За потребе рачунарских симулација моделован је узорак елисе од GFRP изолационог материјала (проводност $1,0 \cdot 10^{-14}$ S/m и релативна пермитивност 4,2), а

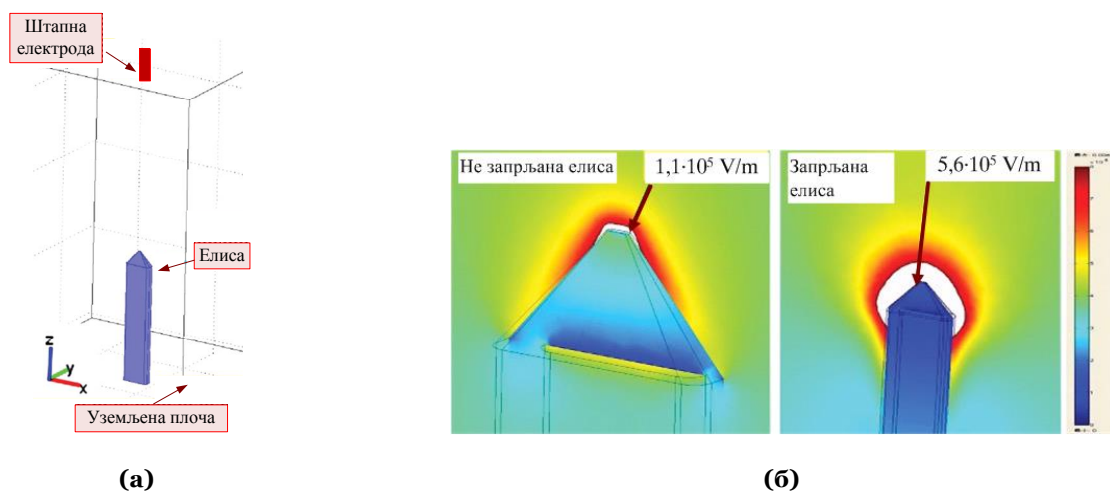


елементи заштитног система за прихват струје грома (рецептор и спусни проводник), као и штапна електрода су од бакра чија је проводност $6,0 \cdot 10^7$ S/m. Интензитет електричног поља у околини елисе је израчунат за ударни напон од 1 MV примењен на штапној електроди, која је постављена на висини од неколико метара изнад земље [46].

3.5.2. Елиса од непроводних композитних материјала

На Слици 3.11(a) приказан је геометријски модел и димензије битних елемената који су коришћени у симулацијама. Просечна вредност интензитета електричног поља у околини узорка елисе је $0,37 \cdot 10^5$ V/m, док је максимална вредност поља процењена на $1,1 \cdot 10^5$ V/m на врху елисе. Међутим, опсег анализираних вредности електричног поља је ограничен унутар растојања од 1 m у околини врха елисе.

У примеру симулације на запрљаном узорку елисе, анализа је спроведена када је њена проводност 0,9 S/m и релативна пермитивност 80, што одговара вредностима за слану воду. Слика 3.11(б) показује разлику у расподели електричног поља у околини врха елисе, када је она незагађена и у другом случају када је запрљана. Закључује се да долази до интензивирања електричног поља у условима загађења елисе проводним супстанцама и максимални интензитет електричног поља на врху елисе је приближно 5 пута већи него у случају незагађене елисе. Области на елиси на којима се јавља ефекат појачавања поља су преовлађујуће у случају запрљане елисе.



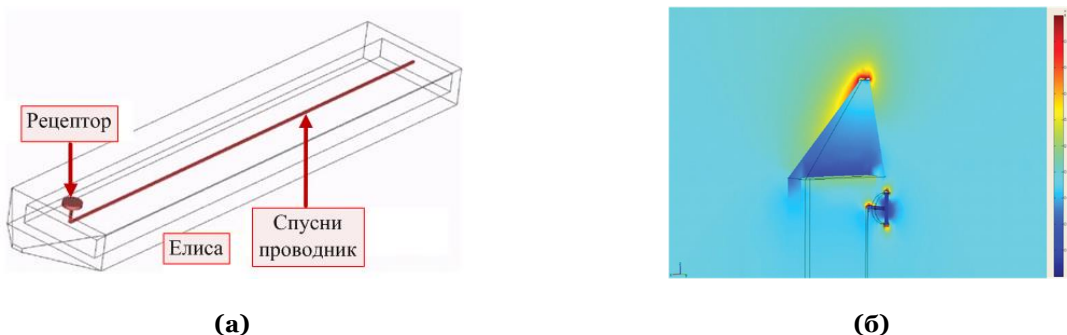
Слика 3.11. (а) Геометријски модел и димензије непроводне чисте елисе за потребе симулација. **Елиса** – висина: 3 m (правоугаони део 2,7 m), дебљина: 100 mm (нападна ивица), 50 mm (излазна ивица), попречни пресек: 0,2×0,6 m (P 50 профил). **Штапна електрода** – полупречник: 0,06 m, висина: 0,5 m. **Прорачунат опсег:** 6×6×8 m. **(б)** Расподела електричног поља у околини врха незагађене и запрљане елисе.

3.5.3. Елиса са рецептором

Слика 3.12(a) показује геометријски модел и димензије елисе са рецептором, које су идентичне као у претходном случају за изолациону елису пуног правоугаоног попречног пресека, а једина разлика је у томе што је модел узорка елисе шупаљ. Позиција елисе у односу на штапну электроду је такође слична као у претходном случају. На Слици 3.12(б) је дата расподела електричног поља у околини врха елисе. Може се уочити да је електрично поље појачано у близини врха елисе, рецептора и закривљеног дела спусног проводника. Максимална вредност интензитета електричног поља у

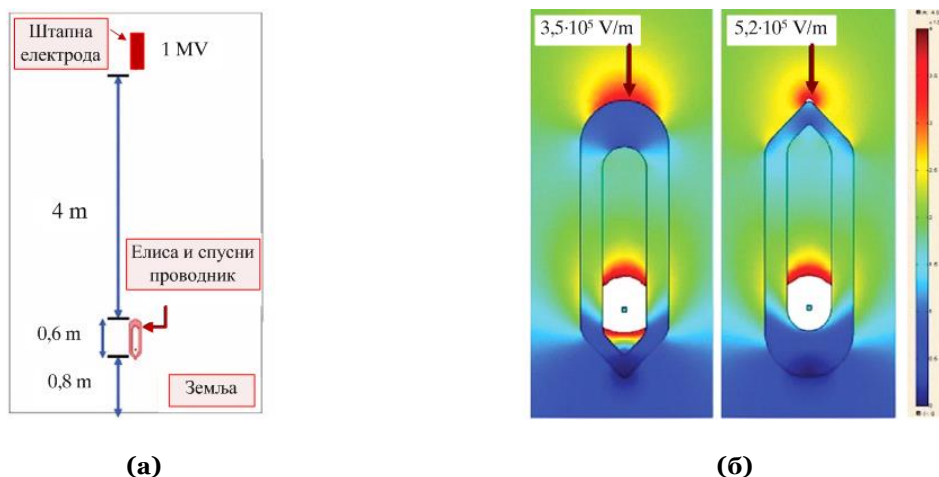


њиховој околини је приближно иста као на самом врху елисе, око $1,1 \cdot 10^5$ V/m. Расподела електричног поља у областима које су удаљене од рецептора показује сличну тенденцију као у случају потпуно изолационе елисе.



Слика 3.12. (а) Геометријски модел и димензије елисе са рецептором на њеном врху за потребе симулација. **Рецептор** – полупречник: 50 mm, дебљина: 20 mm. **Спусни проводник** – попречни пресек: 10×10 mm. (б) Расподела електричног поља у околини врха елисе са рецептором.

У циљу испитивања ефеката геометријског облика ивице елисе, обављене је нова симулација на 2D моделу. На Слици 3.13(а) приказан је 2D геометријски модел. Доња ивица попречног пресека елисе је постављена на растојању 0,8 m изнад земље, а на штапну электроду, која је на висини 4 m изнад врха елисе, доведен је ударни напон од 1 MV. Уземљени спусни проводник је инсталиран у унутрашњости шупље елисе (рецептор је изостављен). На Слици 3.13(б) је дата расподела електричног поља за два случаја и то прво када је нападна ивица елисе, а потом излазна ивица ближе према електроди.



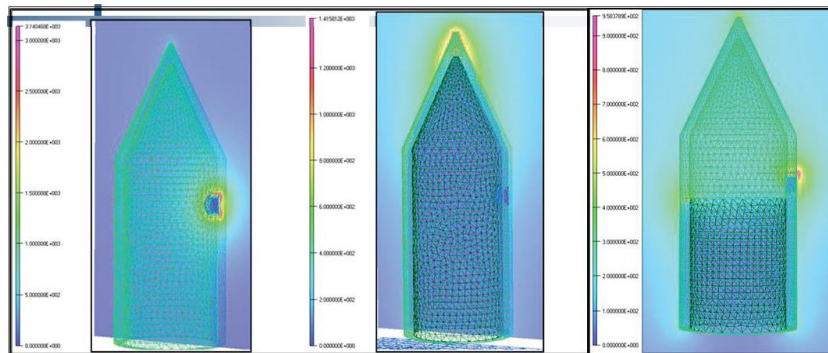
Слика 3.13. Симулација за 2D попречни пресек елисе са спусним проводником. (а) Геометријски модел. (б) Расподела електричног поља.

Поново је уочен ефекат појачавања поља у околини спусног проводника и горње ивице елисе. Максимална вредност електричног поља у околини горње ивице елисе је $3,5 \cdot 10^5$ V/m у случају када је нападна ивица ближе ка електроди и $5,2 \cdot 10^5$ V/m када је излазна ивица усмерена према електроди. Концентрација електричног поља је знатно израженија на оштрој излазној ивици.

На елиси која не садржи проводне елементе, осим стандардног система за прихват струје грома, увек долази до значајног интензивирања електричног поља у



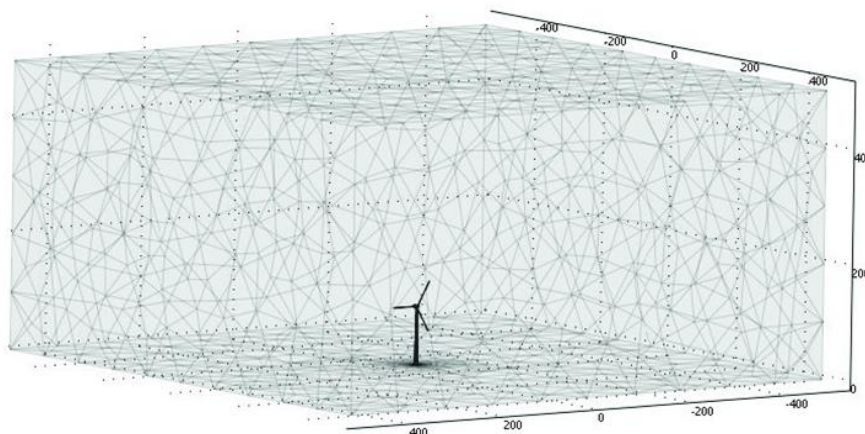
околини рецептора и спусног проводника. Међутим, током симулација запажен је и следећи важан ефекат. Инсталирањем проводног слоја у унутрашњости GFRP композитног материјала (типично метална или бакарна мрежа) долази до смањења електричног поља у околини рецептора, што умањује његову ефикасност – Слика 3.14. Такође, повећано електрично поље у унутрашњости елисе у овом случају може да изазове повећан ризик од унутрашњих прескока, а ефекат интензивирања поља дуж оштрих ивица металне мреже доводи до веће вероватноће удара грома у тим областима на елиси.



Слика 3.14. Утицај проводног слоја у композитном материјалу на перформансе заштитног громобранског система на елисама ветротурбине.

3.5.4. Симулације на комплетном моделу ветротурбине

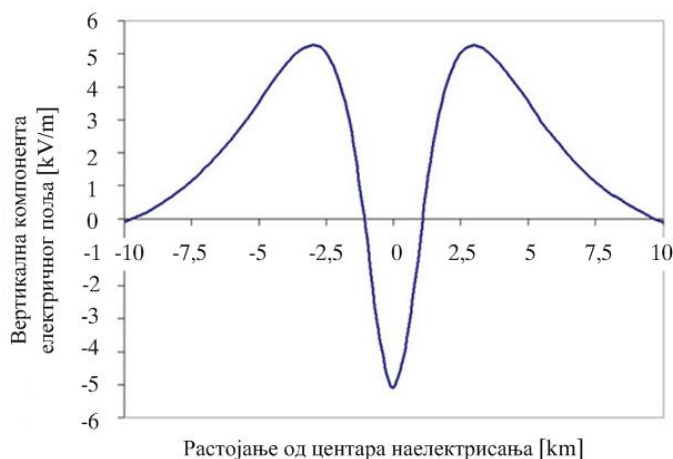
Нумеричке методе су прецизније и заснивају су на анализи већег броја физичких појава, у односу на методу котрљајућих сфера, која је као што је већ објашњено, веома једноставна и стриктно геометријска. Примењено је 3D математичко-софтверско моделовање (на основу методе коначних елемената) за типичну ветротурбину номиналне снаге 3 MW са инсталираном громобранском заштитом у облику рецептора и спусних проводника. Ветроурбина се састоји од конусног стуба висине 100 m, на чијем врху је гондола у облику квадрата димензија 12×4×4 m и три елисе свака дужине 50 m. Окружујући домен за потребе електростатичких прорачунавања има димензије 1×1×0,5 km – Слика 3.15. Извршено је скалирање свих потребних величина [2].



Слика 3.15. Модел јединичне ветротурбине (заснован на методи коначних елемената) за одређивање нормализованог стабилизационог поља (минимално пробојно поље за стабилно иницирање и простирање лидера) на различитим локацијама у оквиру разматраног домена. Ветроурбина је на потенцијалу 0 V. Све димензије су дате у [m].



На основу усвојеног модела облака са Сликe 3.1(б) и за добијену расподелу електричног поља у околини ветротурбине (Слика 3.16) симулирано је понашање ветроелектране током олујног невремена са грмљавином. Наелектрисања од ± 40 С су моделована сферама пречника 900 m, а наелектрисање од 5 С сфером пречника 150 m. Примећено је да се смањивањем растојања мање позитивно наелектрисане сфере у односу на земљу у значајној мери повећава број узлазно иницираних пражњења са модела ветротурбине.



Слика 3.16. Расподела електричног поља (E_y) изнад земље у околини модела облака.

Код оба типа пражњења формирање узлазно иницираног лидера са ветротурбине је критично у смислу дефинисања тачака удара на њеној спољној површини. Код силазно иницираног пражњења скоковити лидер ствара неуниформно електрично поље у ваздуху у околини ветротурбине. Ово јако поље, када се додатно интензивира од металних компоненти громобранског заштитног система, омогућава формирање узлазно иницираних стримера.

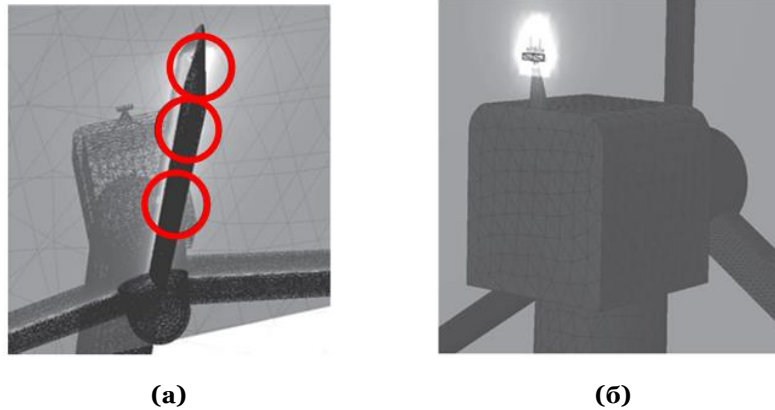
За узлазно иницирано пражњење механизам настајања узлазно иницираног лидера је скоро идентичан, али у овом случају електрично поље у ваздуху је приближно униформно и генерисано је из облака, а не са скоковитог лидера. Због тога је изражен утицај позиције скоковитог лидера уклоњен из модела, приликом разматрања настајања узлазног лидера и вероватноћа његовог настајања претежно зависи од геометрије ветротурбине и положаја ротирајућих елиса.

Типично два услова треба да буду испуњена за успешно одвијање целокупног процеса атмосферског пражњења и за детекцију тачака удара. Настанак пражњења у виду стримера са истакнутих делова ветротурбине треба да обезбеди електрично поље од 3 kV/m. Такође, неопходно је да се постигне потребна вредност критичног пробојног поља (које зависи од висине ветротурбине) да би се омогућила транзиција стримера у одговарајуће лидере и њихова стабилна пропaгација. Електрично поље примењено у моделу је униформно и генерисано помоћу равне електроде која је на растојању 200 m изнад земље.

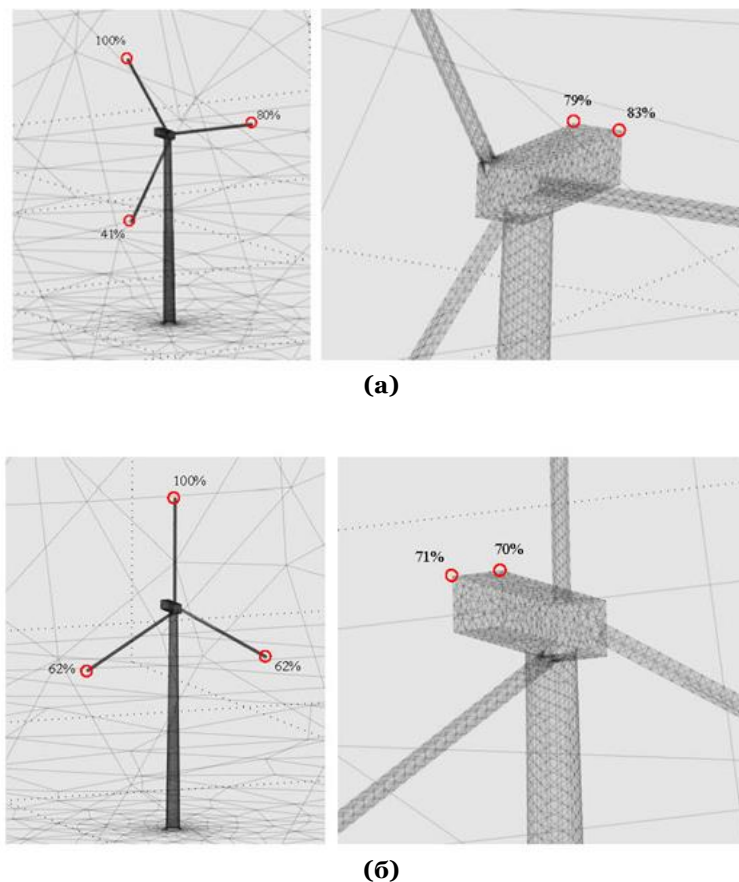
Добијене симулације потврђују теоријске тврдње да су елисе ветротурбине, метео сензори (анемометар и ветроказ) и сигнално светло на врху гондоле најугроженије компоненте, када су у питању директна атмосферска пражњења – Слика 3.17(а)-(б).



Интензивирање електричног поља је нарочито изражено у околини заштитног громобранског система у облику рецептора на врховима елиса и на метео инструментима. Такође, добијена је повећана вероватноћа иницирања узлазно орјентисаних стримера са елиса и метео инструмената, која зависи од нивоа повећања електричног поља и позиције елиса.



Слика 3.17. (а) Ефекат појачавања поља у околини рецептора на врху елисе. Области са рецепторима су заокружене. У зонама које су обележене светлијом бојом електрично поље има веће вредности. (б) Повећање вредности поља у околини метео сензора на врху гондоле.

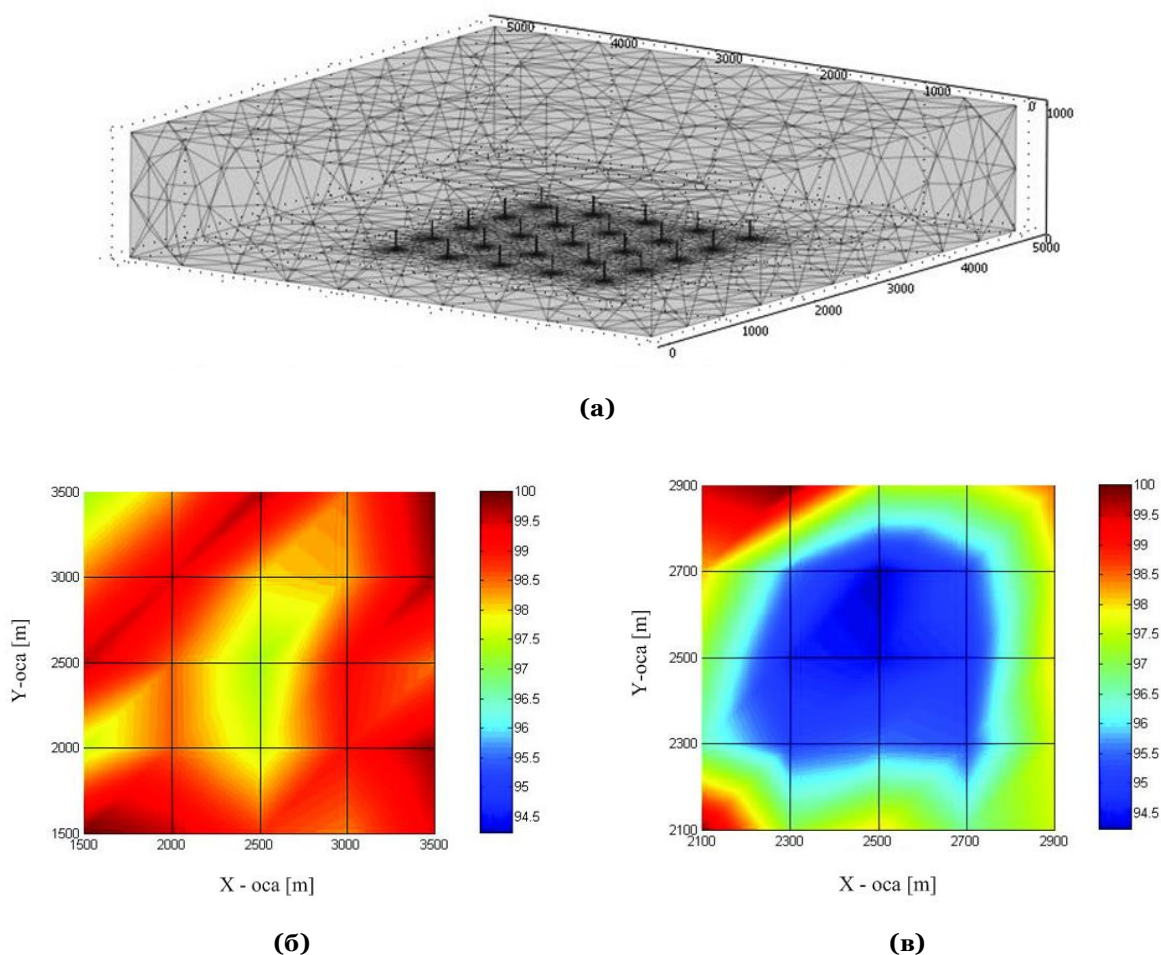


Слика 3.18. Вредности нормализованог стабилизационог поља за ветротурбину чија је једна елиса: (а) у хоризонталном положају, (б) у вертикалном положају.



Нормализоване минималне вредности електричног поља потребног за успешно иницирање и стабилну пропацију лидера (стабилизационо поље) за поједине истакнуте делове модела ветротурбине су дате на Слици 3.18(а)-(б). Иако је на симулацијама добијен скоро занемарљив број удара на бочним рецепторима дуж дугачких елиса, њихова инсталација на свим савременим ветротурбинама великих снага је обавезна, јер се принципи заштите заснивају на примени методе котрљајућих сфера.

На крају је извршена и симулација понашања фарме ветротурбина у односу на атмосферска пражњења и показано је да не постоји битна разлика да одређена ветротурбина у оквиру фарме буде у већој мери изложена дејству удара грома – Слика 3.19(а)-(в). Са смањивањем међусобног растојања између ветротурбина ефекат изложености се повећава. Међутим, у реалним условима се често дешава да су ветротурбине које су највише изложене налетима ветра током грмљавинске активности у већој мери погођене директним ударима грома. Ово се лако објашњава несавршеношћу постојећих нумеричких метода.



Слика 3.19. (а) Модел фарме ветротурбина (заснован на методи коначних елемената) која се састоји од 25 турбина у квадратном низу на међусобном растојању од 500 m између сваког реда и колоне, и који је употребљен за испитивање утицаја изложености директним атмосферским пражњењима. Све димензије су дате у [m]. (б) Нормализоване вредности стабилизационог поља у [%] за растојање између ветротурбина од 500 m. (в) Нормализоване вредности стабилизационог поља у [%] за растојање између ветротурбина од 200 m [2].



ПОГЛАВЉЕ 4

ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА УТИЦАЈА РОТАЦИЈЕ ЕЛИСА ВЕТРОЕЛЕКТРАНА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА

Увидом у постојећу литературу може се закључити да утицај ротације ротора ветротурбине на број удара и начин атмосферског пражњења на елисама није систематски проучаван. Због тога је у овом поглављу извршена детаљна анализа ефеката директног атмосферског пражњења на ротирајућим елисама ветротурбине које су израђене од изолационих GFRP и/или делимично проводних CFC композитних материјала.

4.1. Ефекти електричног пражњења на елисама ветроелектрана

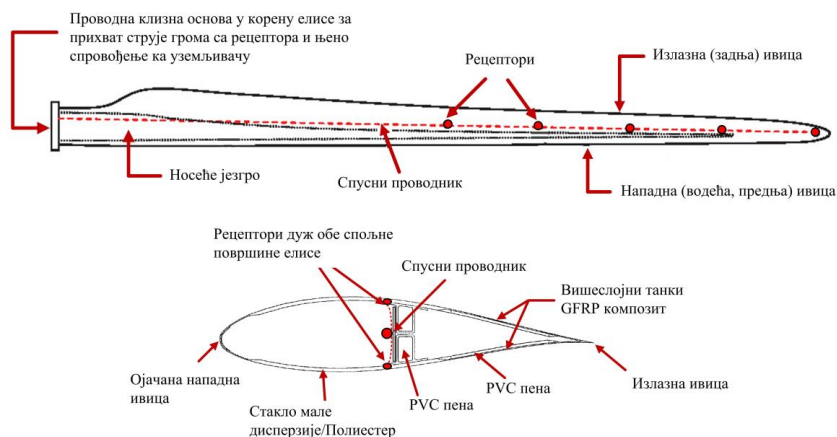
4.1.1. Конструкција елиса савремених ветроелектрана и карактеристике система за прихват струје грома

Елисе савремених ветротурбина су веома сложене конструкције и већ дужи низ година унапређују се њихове укупне перформансе, како би се повећала њихова издржљивост и трајност у односу на директна атмосферска пражњења. Разноврсни материјали који се употребљавају за њихову израду нису употпуности ни електрично проводни, нити су типични изолатори, а њихове поједине електричне карактеристике су прилично променљиве током трајања радног века ветротурбине (20–25 година до првог генералног ремонта). Да би се боље разумео механизам који доводи до интеракције између атмосферских пражњења и елиса које су израђене од изолационих и/или делимично проводних композитних материјала, разматраће се савремена ветротурбина номиналне снаге 3 MW са елисама типичне конструкције дужине 50 m и њено понашање у односу на директне ударе грома када је ветротурбина у погону у реалним условима.

Две прилично танке шкољке од GFRP и/или CFC композитног материјала, посебно израђене и монтиране око носећег језгра, које мора да поднесе велико механичко оптерећење, представљају две стране укупне површине елисе – Слика 4.1(а). Горња и доња површина сваке елисе мора да има одлична аеродинамичка својства и треба да буде тако пројектована да омогући да елисе добију што више кинетичке енергије од ветра. Да би се елиса успешно заштитила од директних атмосферских пражњења, као што је објашњено у Уводном поглављу, мора имати прихватни систем у облику рецептора и спусних проводника. Бакарни рецептори се инсталирају дуж спољних површина на свакој страни елисе, на растојању од 20 m од њеног врха, са међусобним размаком од 5 m. На овај начин је уграђено по 5 рецептора на обе стране елисе. Рецептори су прикључени на изоловани унутрашњи бакарни спусни проводник попречног пресека 50 mm², који је због великих механичких напрезања фиксиран за носеће језгро [35]. Спусни проводник је у корену сваке елисе причвршћен за проводну основу, која има улогу електричног интерфејса ка остатку ветротурбине, тј. треба на сигуран начин да спроведе струју грома кроз стуб ветротурбине ка уземљивачу.



Нова фабрички произведена елиса се у основи састоји само од изолационих компоненти, осим заштитног громобранског система - Сликe 4.1(б)-(в). Због тога је сасвим реално претпоставити да ће иницирање лидера са елиса управо бити са једног или више рецептора, тако да провођење струје атмосферског пражњења ка земљи може сигурно да се изврши преко спусних проводника. Приказана конструкција елисе за рецепторским заштитним системима усвојена је од стране више независних произвођача и представља најчешћи тип заштите дугачких елиса код савремених ветротурбина. Међутим, важно је напоменути да су на основу искуства из праксе и на описаном типу елиса примећена оштећења због удара грома [63].



(а)



(б)



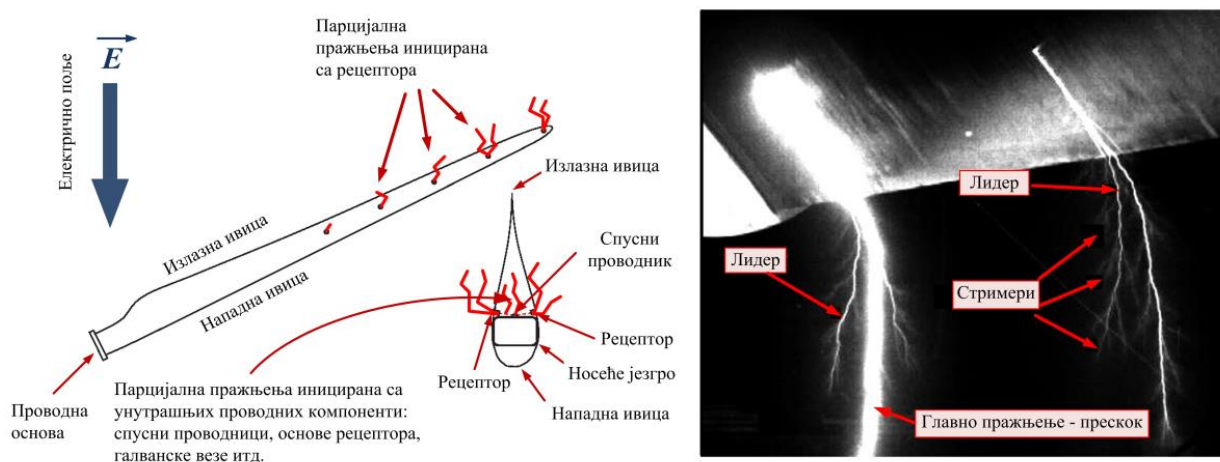
(в)

Слика 4.1. Типична конструкција елисе ветротурбине са дискретно инсталираним рецепторима за прихват струје грома дуж обе спољне површине елисе и са спусним проводником. (а) Шема попречног пресека елисе. (б)-(в) Испитивање елиса пуне величине у високонапонској лабораторији [43].

Када се оваква елиса изложи довољно јаком електричном пољу, стримери ће бити емитовани са свих проводних компоненти на елисама. Оваква ситуација се дешава током узлазних пражњења где долази до иницирања стримера и лидера са елиса ветротурбине ка облаку, или као резултат долазног лидера код пражњења силазног типа. Када се врх (глава) скоковитог лидера нађе на одређеном ударном растојању у односу на уземљену ветротурбину, у зависности од акумулације наелектрисања на врху лидера, ветротурбина ће углавном са врхова елиса и других истакнутих делова да емитује повезујуће лидере. Као што је приказано на Слици 4.2, на новој и незапрљаној елиси пражњења ће углавном бити иницирана са прихватног система у облику рецептора, који су повезани за систем спусних проводника.



Изложене металне површине, као што су рецептори, због начина самог пражњења емитују стримере веома рано, али пошто је спусни проводник изложен истом електричном пољу, парцијална пражњења ће се такође појавити и у унутрашњости елисе [2]. Унутрашња електрична пражњења нагомилавају наелектрисања у унутрашњости шупље елисе где су због активности стримера потиснута, при чему добијају поларитет истоветан као што има спусни проводник (Слика 4.3). Овакво сузбијање унутрашњих пражњења омогућава да се спољашња пражњења са рецептора у току дужег временског периода развијају и проширују даље ка концентрацији наелектрисања у облаку, или ка врху долазног лидера. Најчешће се повезујући лидери са рецептора први сусрећу са долазним лидером, тако да се тачке удара успостављају на местима која су погодна за следеће фазе процеса пражњења: провођење струје грома, трансфер наелектрисања и друго.



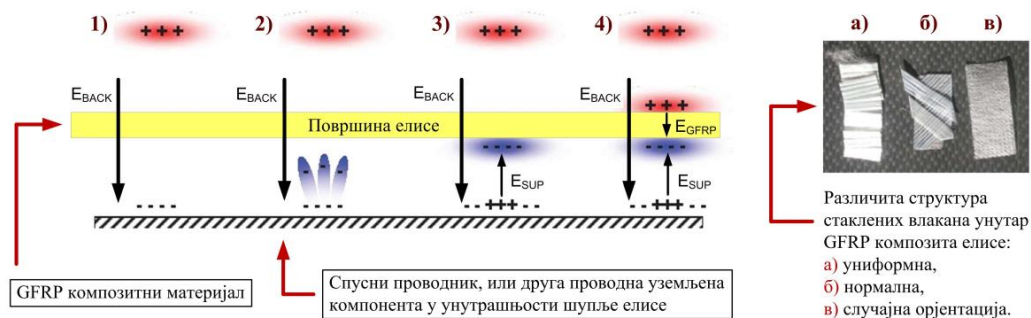
ФАЗЕ У РАЗВОЈУ ПРАЖЊЕЊА НА ЕЛИСИ ВЕТРОТУРБИНЕ:

1. Формирање иницијалне короне; 2. Образовање разгранате мреже од танких канала из короне у облику стримера; 3. Постепени развој лидера; 4. Финални удар постаје видљив као главно пражњење у виду прескока.

Слика 4.2. Електрична пражњења са нове и незапрљане елисе иницирана углавном са металних компоненти.

Ефекат интерних пражњења се може умањити избегавањем коришћења металних површина у унутрашњости елисе. У пракси се ово може постићи облагањем свих металних прикључака и делова изолационим материјалима, коришћењем заштићених шинских високонапонских каблова у функцији спусних проводника итд.

Описана ситуација је веома слична као код разматрања општих принципа парцијалних пражњења код чврстих високонапонских изолатора. Код пројектовања високонапонске опреме користећи чврсте изолаторе од полимера, уобичајене захтеване вредности јачине пробојног поља се налазе у опсегу 10-30 kV/mm [2]. Ово се једноставно може остварити коришћењем веома чистих материјала и елиминисањем ваздушних шупљина мале дебљине у њиховој структури. У таквим шупљинама могу настати парцијална пражњења, која такође могу да изазову смањење интерног електричног поља унутар шупљина. У структури од полимера која окружује шупљину поље ће се повећати као и у случају GFRP композита, којим је прекривена спољна површина елисе ветротурбине. У зависности од места удара грома у ветротурбину, оштећења појединих компоненти могу бити различитог интензитета.



Напомена: Разматрана је хомогена и чиста елиса (без ваздушних шупљина у унутрашњем слоју композита).

Слика 4.3. Интерна пражњења у унутрашњости елисе због утицаја електричног поља које потиче од концентрације позитивног наелектрисања на врху лидера. **(1)** Електрично поље E_{BACK} индукује негативна наелектрисања са уземљених компоненти. **(2)** Електрично поље проузрокује јонизацију и иницијацију стримера са уземљених компоненти. **(3)** Унутрашњи стримери нагомилавају негативно наелектрисање на унутрашњој површини GFRP композита, и оно потом индукује позитивно наелектрисање са уземљених компоненти. Поље E_{SUP} настало услед новоформиране концентрације наелектрисања сузбија интерна пражњења. **(4)** Електрично поље изван елисе може достићи вредност која је потребна за настанак спољашње јонизације, омогућавајући да спољна површина елисе постане позитивно наелектрисана, што изазива напрезање GFRP композита елисе, чак и у већој мери од пробојног електричног поља.

4.1.2. Удари у прихватни систем на елисама

Када се утврди тачка удара грома на одговарајућем типу прихватног система на елисама, конструкција система спусних проводника је од велике важности, како би се струја грома, која има велики интензитет, сигурно спровела у земљу. Као што је објашњено у претходном поглављу, поједине компоненте атмосферског пражњења имају различите карактеристике. Струја главног пражњења садржи највећи део специфичне енергије, тако да импеданса система спусних проводника треба да буде тако пројектована да поднесе велико омско загревање. После главног удара следи обично више краткотрајних удара са већим вредностима градијента струје.

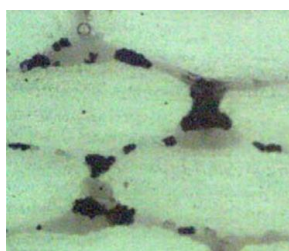
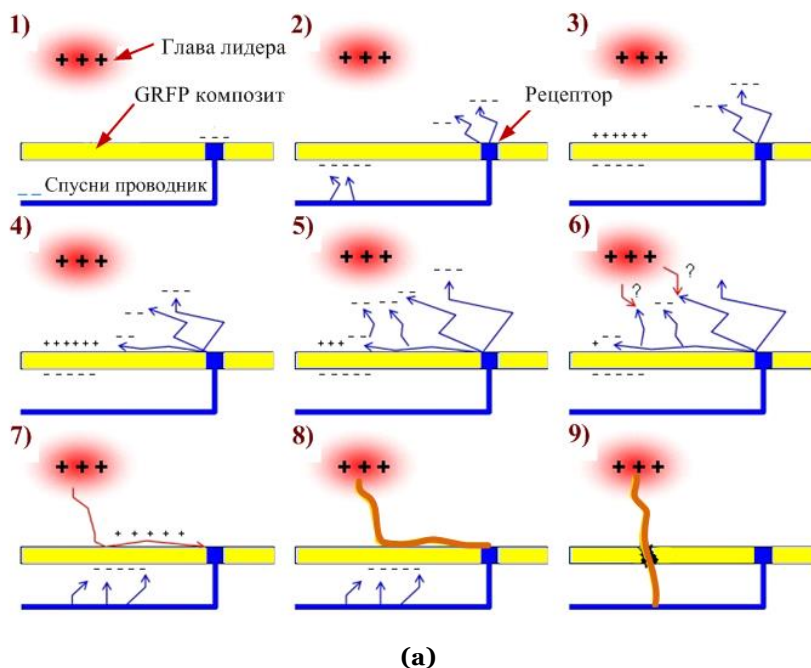
Ако индуктивност система спусних проводника има јако велику вредност, индуктивни пад напона може довести до појаве бочних прескока унутар елисе. Овај тип прескока се јавља дуж путања са мањим вредностима импедансе у односу на спусни проводник, најчешће дуж влажних и задрљаних унутрашњих површина елисе. У зависности од актуелне путање и начина ширења бочних прескока, може доћи до оштећења многобројних сензора на елисама и кварова рачунарских система за праћење, контролу и управљање радом ветротурбине - SCADA систем. Облик, конструкција и начин израде рецепторских прихватних система на врховима елиса је веома важан, када се ради о главном трансферу наелектрисања у оквиру удара са дуготрајном струјом пражњења. На основу специфичне енергије у тачки удара, вредности енталпије процеса и одговарајуће обухваћене запремине структуре, може доћи до ерозије или топљења површина рецепторског прихватног система. У случају удара грома слабијег интензитета, и за добро пројектован и подешен громобрански систем, ефекти оваквих удара су обично у облику малих удубљења на површини рецептора и могуће је незнатно повећање температуре спусног проводника.

4.1.3. Удари мимо прихватног система на елисама

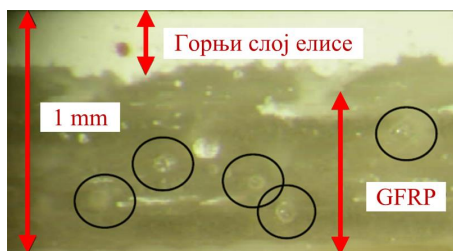
Удари на изолационим површинама елиса се могу појавити ако постоје носиоци наелектрисања, у облику индукованог наелектрисања, које потиче од интерних



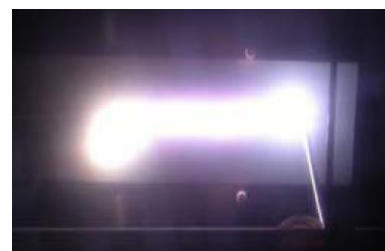
парцијалних пражњења, или због провођења наелектрисања са спољашњих рецептора због коначне површинске проводности – Слика 4.4(а). Следеће објашњење произилази на основу теоријских разматрања и лако се може спровести у лабораторијским условима.



(б)



(в)



(г)

Слика 4.4. (а) Формирање стримера на спољној површини хомогене и чисте елисе (без ваздушних шупљина у унутрашњем слоју композита), који могу да иницирају ударе на изолационим површинама. (1) Позитивно наелектрисана глава (врх) лидера индукује негативно наелектрисање на површини уземљених компоненти. (2) Ако дође до пораста интензитета електричног поља изнад критичне вредности, услед ефекта јонизације долази до нагомилавања негативног наелектрисања на унутрашњој страни површине елисе. (3) Унутрашња пражњења бивају потиснута, док су позитивна наелектрисања на спољној површини елисе индукована од негативних наелектрисања унутар шупље елисе. (4) Настаје формирање стримера на спољној површини елисе са рецептора ка позитивним наелектрисањима, са циљем да се она неутралишу. (5) Интензивно емитовање и ширење негативно поларисаних стримера дуж путање у смеру ка позитивно наелектрисаној глави лидера. (6) Ако током развоја стримера, чије су путање дуж спољне површине елисе, дође до спајања са долазним лидером, успостављају се тачке удара на изолационој површини елисе. (7) Позитивна наелектрисања са врха лидера имају путању близу спољне површине иницирајући даља унутрашња пражњења. (8) Површинска пузајућа струја пражњења може да изазове термичка оштећења на спољној површини елисе. (9) Пробој често доводи до озбиљних оштећења елисе због појаве интерног електричног лука и пуцања композитних слојева елисе, што може да доведе до дуготрајног испада ветроелектране из погона. (б) Ваздушни садржај унутар GFRP композита. Попречни пресек елисе добијен помоћу дигиталног микроскопа, при чему су ваздушне шупљине приказане црном бојом. (в) Ваздушне шупљине различитих величина, које су распоређене у појединим унутрашњим слојевима елисе. (г) Пробој у унутрашњем композитном слоју елисе, који доводи до разарања њене спољне површине [2].

Као што је претходно размотрено, наелектрисања која су истог поларитета као и силазни лидер могу бити индукована на спољној површини елисе, због развоја интерних



пражњења. Може се уочити настанак спољашњих површинских пражњења са рецептора ка индукованим наелектрисицањима, с обзиром да ова пражњења имају поларитет супротног знака у односу на систем спусних проводника, покушавајући да изврше неутрализацију области са индукованим наелектрисицањем. Ова чињеница доводи до тога да ће спољна површина елисе бити прекривена стримерима супротног поларитета у односу на долазни лидер, при чему ови стримери током своје путање ка индукованим наелектрисицањима, такође могу да емитују нове стримере напуштајући површину елисе у процесу спајања са центром наелектрисицања на врху долазног лидера.

Ако овакав стример, који је инициран са рецептора, али који следи путању дуж површине узорка елисе, дође у контакт са долазним лидером, целокупно наелектрисицање са врха лидера ће бити спроведено у близини површине узорка елисе. Ово може да резултује у даљим интерним пражњењима, која доводе до јаког напрзања GFRP омотача елисе. Два сценарија су могућа:

- Трансфер наелектрисицања дуж јонизованих путања на спољној површини елисе, тако да се главни удар, струја дуготрајног пражњења, накнадни краткотрајни удари и друге појаве које прате пражњење дешавају на рецептору, али дуж површине – Слика 4.4(а)-8. Ова појава се манифестује у облику тзв. тихог прескока (не изазива деформитет елисе), али може да доведе до термичког оштећења спољашње површине елисе у областима испод електричног лука, а у озбиљнијим случајевима и до формирања канала ерозије.
- Повећано електрично напрезање GFRP омотача елисе изазива стварање пробојног канала. Ако дође до пробоја композитног материјала, ова нова путања може имати мању вредност импедансе у односу на путању дуж површине елисе, тако да се пражњење одвија кроз композитни омотач елисе ка систему спусних проводника – Слика 4.4(а)-9. Појава унутрашњег електричног лука је најчешће критична, зато што нагли пораст притиска изазива пуцање слојева композитног омотача и слабење целокупне механичке конструкције елисе. Последица овог ефекта је неминовна замена елисе, што је јако скупа интервенција (посебно за ветроелектране на мору), као и због набавне цене нове елисе и немогућности рада ветротурбине док траје отклањање квара.

Када у унутрашњем слоју композита елисе постоје нехомогености може доћи до поларизације ваздушних шупљина (због нижих вредности пробојног поља) и парцијалних пражњења, која такође често доводе до разарања спољне површине елисе (Слика 4.4(б)-(г)).

4.2. Утицај обртања елиса ветроелектрана на карактеристике атмосферског пражњења

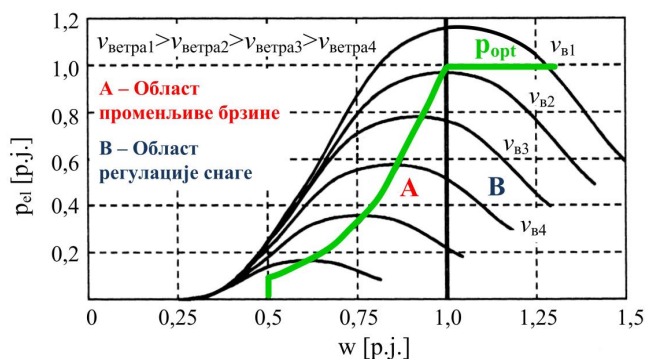
4.2.1. Временски период трајања удара

На основу теорије управљања радом ветротурбине добро је познато да је за оптимално искоришћење енергије ветра неопходна континуална регулација брзине ротације елиса ветротурбине према тренутној брзини ветра (електромеханичка конверзија са променљивом брзином обртања електричног генератора) [64]-[68]. На Слици 4.5 приказана је зависност приноса електричне снаге ветротурбине p_{el} у функцији



ротационе брзине елиса w као фамилија кривих, при чему свака крива одговара одређеној брзини ветра $v_{\text{ветра}}$. Да би се осигурао максимални прилив електричне снаге при било којој брзини ветра $v_{\text{ветра}}$, управљачки систем обезбеђује да ветротурбина континуално прати криву оптималне снаге $p_{\text{опт}}=f(w)$.

Могу се уочити две области управљања радом ветротурбине, **област променљиве брзине** (део криве *A* – за брзине ветра које су мање од номиналних вредности), где се брзина ротације ветротурбине регулише ради добијања максималне механичке снаге која зависи од брзине ветра, и **област управљања снагом** (део криве *B* – за брзине ветра које су веће од номиналних вредности, за време јаких ветрова), при чему је излазна снага ветротурбине инваријантна и има номиналну вредност. С обзиром да се снага ветра може приказати следећом релацијом: $p_{\text{ветра}} = k \cdot v_{\text{ветра}}^3$, очигледно је да улазна механичка снага p_m има вредности које су једнаке снази ветра за брзине ветра које су мање од номиналних. Такође, снага p_m се редукује на номиналну вредност при брзинама ветра које су веће од номиналних, што се постиже комбинацијом активног (*pitch*) и/или пасивног (*stall*) управљања радом елиса.



Слика 4.5. Карактеристике ветротурбине у областима променљиве брзине (*област A*) и регулације снаге (*област B*) и крива оптималног управљања $p_{\text{опт}}$.

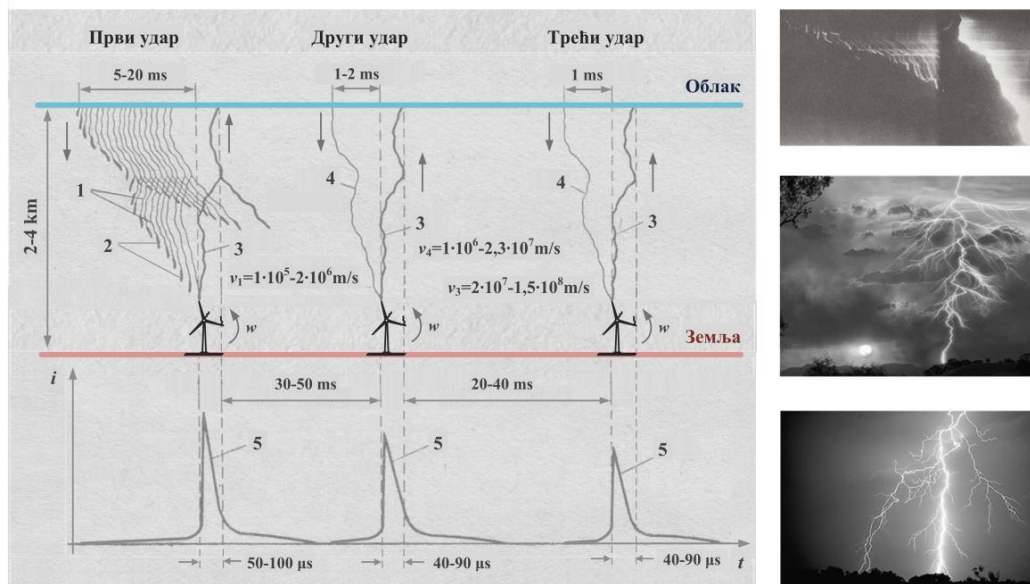
На основу малог броја истраживања која су била претежно теоријског карактера, до сада је било претпостављено да ротација елиса ветротурбина нема доминантан утицај на учесталост и карактеристике атмосферског пражњења. Нумеричке методе за предикцију могућих тачака удара грома у елисе ветротурбина такође су полазиле од претпоставке да се ветротурбина третира као статички објекат (без покретних делова), због тога што процес пражњења траје веома кратко - **Слика 4.6**. Као што ће бити показано у наредним поглављима, наведене претпоставке нису у потпуности тачне, што представља један од важних доприноса докторске дисертације.

Теорија површинских пражњења која је приказана на **Слици 4.4(a)** показује генерисање наелектрисања и формирање стримера за време статичких услова (брзина ротације елиса $w = 0$ о/мин). Међутим, пражњења обично настају током олуја са грмљавином, када да се ротор ветротурбине углавном обрће максималном брзином. До сада се сматрало да периферна брзина врха елисе v_e , која код савремених ветротурбина износи између 60-85 m/s, не утиче на карактер пражњења, због веома кратког трајања временског интервала у оквиру кога скоковити лидер у финалној етапи пражњења треба да начини последњи скок, приближавајући се атрактивној зони ветротурбине.

Због повећаних вредности електричног поља у области изнад ветротурбине долази до прерасподеле наелектрисања у металним деловима елисе, при чему се



најчешће позитивна наелектрисања индукују на врху елисе, а негативна наелектрисања се спровode у земљу преко спусних проводника. Типична брзина кретања индукованих наелектрисања ($\sim 2 \cdot 10^8$ m/s) је веома велика у односу на брзину образовања стримера ($\sim 1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ m/s). С обзиром да је максимална периферна брзина врха елисе током ротације $v_{t1} = 85$ m/s за ветротурбине на копну, и $v_{t2} = 80$ m/s за ветротурбине на мору, по неким ауторима утицај ротације елиса се може занемарити за време трајања процеса спајања силазног и узлазног лидера [2]. Међутим, када у фази главног пражњења дође до протичања струје због постепене неутрализације у каналу грома, и за временски интервал реда секунде, ситуација је сасвим другачија.



Слика 4.6. Карактеристичне фазе развоја атмосферског пражњења (**временска скала није дата у размери**): **1.** Скоковити лидер. **2.** Стримери. **а)** Иницирање стримера са врха елисе уземљене ветротурбине - стварање прве короне. **б)** Транзиција стримера у лидер - настанак нестабилног лидера. **в)** Почетак простирања лидера дуж канала главног пражњења - започињање стабилног лидера. **3.** Главно пражњење (повратни удар). **4.** Стреловити лидер. **5.** Струја главног пражњења, и струје другог и трећег узастопног пражњења, које су мањег интензитета. За време једног комплетног пражњења детектовано је до 50 појединачних удара грома. До 40% пражњења има вишеструку природу, са типично 3-4 појединачна удара. Више од 50% струја пражњења има интензитет до 20 kA, а мање од 1% преко 200 kA [49].

На основу анализе фотографских снимака добијене су вредности брзине лидера v_l , које се налазе у опсегу између $1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ m/s [25]. Ако се усвоји да интензитет струје пражњења има вредност 200 kA, на основу једначине (3.12) добија се да ударно растојање износи $r_u = 313$ m. Ово растојање долазни лидер пређе за 3 ms узимајући у обзир конзервативну брзину од $1 \cdot 10^5$ m/s, при чему се врх елисе помери за релативно мало растојање од 27 cm при брзини од 85 m/s на основу следеће формуле:

$$l_{e1} = v_t \times t_l = v_t \times \frac{r_u}{v_l} = v_t \times \frac{10 \times I^{0,65}}{v_l} = 85 \times \frac{10 \times 200^{0,65}}{1 \times 10^5} = 0,27 \text{ m} \quad (4.1)$$

Узимајући оптимистичке вредности за брзину долазног лидера и периферну брзину врха елисе, и ако се за интензитет струје пражњења усвоји вредност од 10 kA, померај врха елисе је релативно мали, и износи 1,9 mm током процеса пражњења:

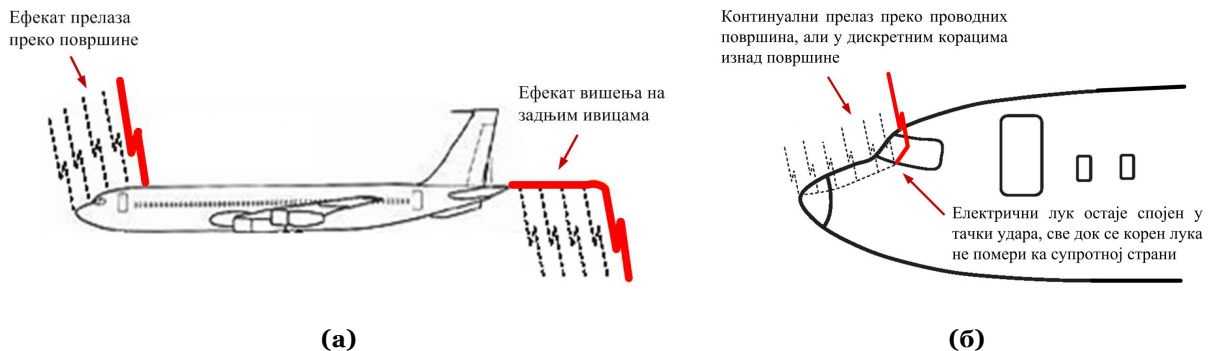


$$l_{e2} = 85 \times \frac{10 \times 10^{0,65}}{2 \times 10^6} = 0,0019 \text{ m} \quad (4.2)$$

Када се ветротурбина изложи јаком статичком електричном пољу, иницирана корона и парцијална пражњења у облику стримера ће довести до нагомилавања просторног наелектрисања у ваздуху у околини рецептора и осталих изложених области. Пошто су олује са грмљавинским активностима увек праћене и јаким ветровима, сматрало се да ће ова наелектрисања бити одувана са површине елиса и да учествују у процесу пражњења у јако лимитираном износу. Ова појава, због компликоване физике процеса, до данас није била у потпуности разјашњена и испитана. Међутим, у докторској дисертацији је показано да ротирајућа геометрија има утицај на начин атмосферског пражњења и селекцију тачака удара грома, што представља један од главних доприноса.

4.2.2. Ефекат прелаза удара грома

У авионској индустрији, феномен који је назван „прелажење” удара грома је веома честа појава [42]. Када се одреди тачка удара грома на авиону, или на неком другом високом објекту, накнадни удари и дуготрајна струја пражњења могу да трају до једне секунде. У току овог временског периода канал електричног лука се одржава на истој позицији, у односу на околни ваздух. Путнички (комерцијални) авиони лете просечном брзином од приближно 800 km/h, што одговара брзини нешто већој од 220 m/s. Ово практично значи да када се детектује иницијална улазна тачка удара грома у авион на његовом носу (у коме су смештени и заштићени радарски и радио системи), а иницијална излазна тачка на задњој ивици елеватора (кормило дубине), тачке удара грома неће бити исте за време трајања целокупног процеса пражњења.



Слика 4.7. Феномен прелаза удара грома. **(а)** Улазна тачка удара пражњења прелази преко трупа авиона од носа (где су смештени радарски системи) ка репу, при чему излазна тачка остаје спојена на излазним ивицама елеватора (кормило дубине). **(б)** Прелаз удара грома преко изолационих површина на предњем делу трупа авиона.

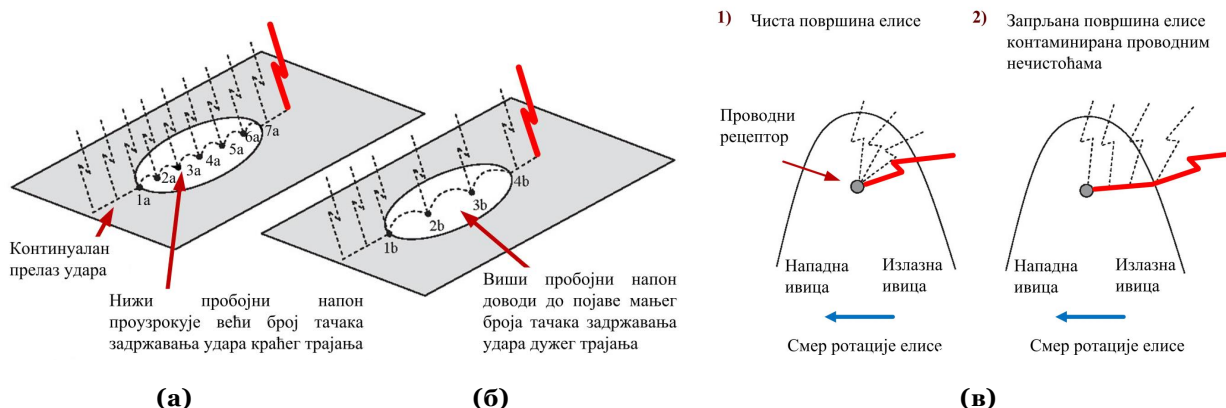
Улазна тачка удара грома може прећи одређено растојање дуж трупа авиона, док авион лети, а излазна тачка остаје фиксирана на задњим ивицама авиона - Слика 4.7(а). Колики ће тачно бити прелаз електричног лука преко површине зависи од њене проводности, и такође да ли је површина трупа авиона прекривена са изолационим слојем или не. Када су у питању нпр. путнички авиони, њихов труп се најчешће прави од легуре алуминијума која је проводна (у последње време се све више користе проводни композитни материјали). Ако путања прелаза електричног лука пролази преко



изолационих површина, као што је нпр. предње пилотско ветробранско стакло, лук ће остати спојен у последњој тачки проводне средине на трупу авиона, све док основа лука не дође до супротне стране изолационе површине, што је приказано на Слици 4.7(б).

Прелажење електричног лука преко изолационе површине може на неколико различитих начина да утиче на укупну конструкцију авиона. Због ефекта задржавања лука, тачке где лук напушта проводну структуру морају да издрже интензивно загревање, и такође долази до деградације особина материјала датих структура, у односу на случај када лук има континуалан прелаз преко одређене површине. Поред тога, изолационе структуре морају да поднесу топлотно зрачење из канала лука и пораст притиска због термичког ширења ваздуха. Пошто канал лука има веома висок потенцијал у односу на проводне површине, које су постављене испод изолационих структура, стримери могу бити иницирани са тих неутралних структура, што доводи до јаких електричних напрезања у изолационом слоју [2]. Као што је раније речено, пробој и оштећење елиса могу настати ако електрично поље постане веће од пробојног поља одређене изолационе структуре.

У зависности од јачине пробојног поља изолационог слоја, може настати већи број пробоја. То би могао бити случај ако су изолационе структуре у облику танког слоја премаза или боје на површини трупа авиона од алуминијума, где би више плитких удубљења или тачака задржавања услед присуства електричног лука постале видљиве после удара.



Слика 4.8. Прелаз удара грома преко изолационих слојева који су постављени на спољној страни композитне површине. **(а)** Танак изолациони слој резултује у великом броју тачака задржавања удара краћег трајања. **(б)** За веће вредности пробојног поља изолационог слоја уочава се мањи број тачака задржавања удара дужег трајања. **(в)** Ефекат прелаз удара грома на врховима ротирајућих елиса ветротурбине [2].

Као што се види на Слици 4.8(а) број ситних удубљења и трајање задржавања канала електричног лука у великој мери зависи од пробојног напона изолационог слоја. Када са тачке која је маркирана као $1b$ на Слици 4.8(б) канал лука отпочне прелаз, долази до интензивног пада напона дуж изолационог слоја, због опадања напона дуж канала лука. Пад напона је у функцији дужине канала лука, односно у овом случају зависи од удаљености до тачке $1b$. Када у тачкама где лук додирује површину изолационе структуре (у односу на проводну површину испод) напон корена лука постане већи од пробојног напона изолационог слоја, може доћи до напруснућа и оштећења. Затим се тачка спајања између електричног лука и проводне површине помера ка тачки која је обележена као $2b$, и процес развоја пражњења и прелаз удара преко површине се



наставља све до тренутка док не настане продор у тачки $3b$. Када лук достигне супротну страну изолационог слоја у тачки $4b$, ефекат прелаза се наставља континуално.

Слична ситуација се може уочити када се описани феномен примени на елисе ветротурбине – Слика 4.8(в). Прихватни систем на елисама ветротурбине треба да буде тако пројектован да тачка удара грома буде на површини одговарајућег рецептора дуж елисе. Процес спајања канала пражњења и одговарајуће тачке прихватног система на елисама ветротурбине је претходно објашњен и показано је да не зависи од особине рецептора да емитује повезујуће лидере у односу на карактеристике околне површине.

Ако је елиса нова и са потпуно чистом спољном површином, која је израђена од изолационог композита, корен електричног лука може остати спојен са површином рецептора, тако да се канал лука одржава у ваздуху изнад изолационе површине елисе. У супротном, ако су елисе задржане са делимично проводним честицама (влага, со, нечистоће) њена површина постаје проводна, тако да континуални прелаз удара постаје евидентан [42]. Прелазак удара се наставља све док се не достигне излазна ивица елисе, где канал електричног лука остаје спојен све време трајања укупног процеса пражњења.

У току временског периода у коме канал електричног лука достигне излазну ивицу елисе, па до тренутка када се заврши процес пражњења, може се јавити интензивно загревање у тачкама удара. Велико напрезање материјала и развијена топлота доводе до испаравања унутрашњости изолационог материјала, стварајући велики притисак у околини корена лука, који може да изазове механичка оштећења веома танког површинског слоја на врху елисе или експлозију. Типична шупља структура врха елисе повећава могућност појаве унутрашњих пражњења супротстављајући се појави електричног пробоја на изолационој површини елисе, који може да има фаталне последице. Ако дође до удара у преостале рецепторе према корену елисе такође могу да настану слични ефекти, иако су површински делови елиса који су удаљенији од врха мање осетљиви на механичка оштећења.

4.2.3. Преостали начини атмосферског пражњења на елисама ветроелектрана

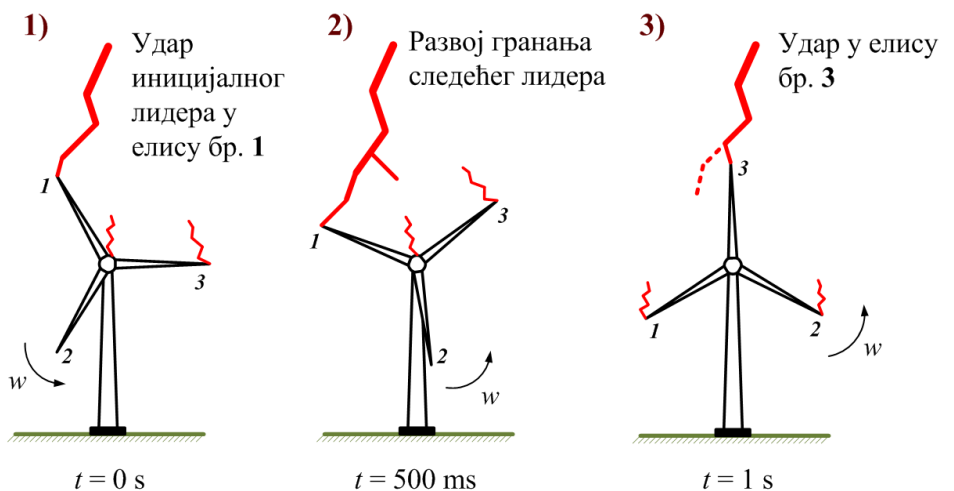
Узимајући у обзир феномен прелаза удара грома и трајање комплетног процеса пражњења, досадашње малобројне нумеричке анализе (без експерименталне верификације) су показале да учесталост директног атмосферског пражњења у врхове ротирајућих елиса савремених ветротурбина статистички треба да буде већа у односу на случај када су елисе непомицне. Такође, ротирање елиса могло би да има приметан утицај на број удара и то нарочито код ветротурбина веће снаге са елисама велике дужине, зато што оне могу да иницирају сопствено пражњење [69].

Међутим, више је вероватно да описане појаве на ротирајућим елисама настају због геометрије саме ветротурбине и као последица узлазно иницираних пражњења са елиса и других истакнутих делова ветротурбине. Из теорије је познато да је за настанак наелектрисања у олујном облаку потребно од 20 min до 1 h [25]. С обзиром да је просечна брзина обртања ротора ветротурбине 15–20 о/мин, што одговара угаоном померају приликом ротације од 90° у току дужег временског периода трајања удара грома, неки аутори претпостављају да ротација елиса сама по себи нема утицај на карактеристике пражњења, већ да наведени феномени настају због повећаних вредности електричног поља између олујних облака и уземљене ветротурбине на земљи [2]. Ако временски

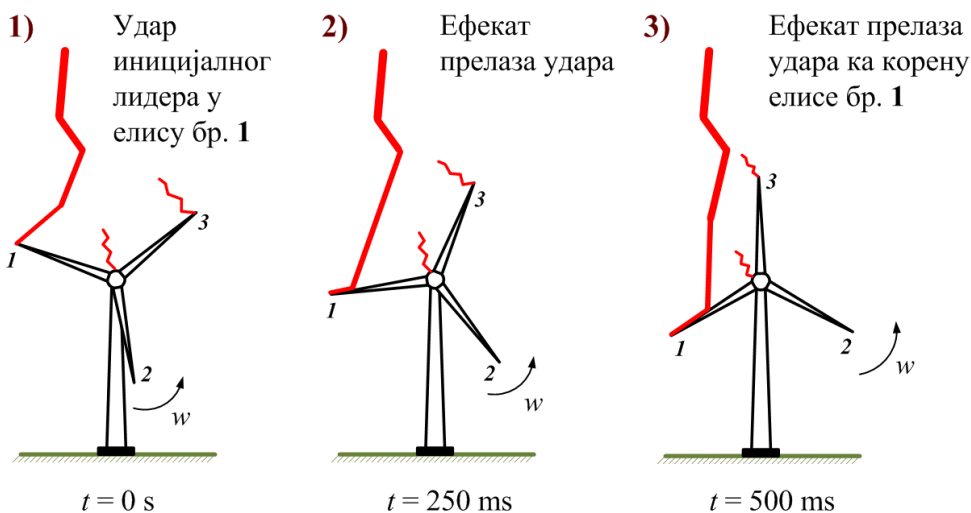


интервал између два удара Δt довољно дуго траје, различити атмосферски удари у оквиру истог пражњења могу да погоде различите елисе. Такође, тачка удара грома у једну елису може бити померена ка другој елиси због ефекта ротације, Слика 4.9(а).

Највећа количина специфичне енергије се ослободи за време главног удара, тако да је првобитно погођена елиса најугроженија. До сада је утицај ротације елиса био примарно анализиран само у циљу детекције ситних удубљења на рецепторима на елисама које нису иницијално биле погођене. Због интензивног усавршавања технологије и константне производње ветротурбина све већих инсталисаних снага, дужина елиса се константно повећава. Пошто је максимална периферна брзина врха елисе обично димензиони критеријум за избор одговарајуће ротационе брзине, присутна је тенденција смањења брзине ротације елиса. Зато неки аутори сматрају да ће утицај ротације елиса на број и начин атмосферског пражњења бити све мање фреквентан [2].



(а)



(б)

Слика 4.9. (а) Угаона позиција елисе за два различита удара у оквиру истог пражњења може да се промени за неколико десетина степени и због тога долази до помераја тачке удара грома са једне елисе на другу. **(б)** Ефекат прелаза удара грома према корену елисе.



Комбинација стандардног феномена прелаза удара који је приказан на Слици 4.8(в) и ефекта померања тачке удара са Слике 4.9(а) настаје када удар грома погоди рецептор на одговарајућој елиси, при чему је њена могућа позиција за $t = 0$ s приказана на Слици 4.9(б). У овом случају, канал пражњења прелази преко површине елисе са одговарајућег рецептора ка корену елисе, смањујући на тај начин ризик од електричног пробоја. Ефекат континуалног прелаза удара је последица делимично проводних површина елисе, и овај проблем се може умањити побољшањем хидрофобних особина елисе. Зато је приликом пројектовања елисе изузетно важно размотрити описане површинске аспекте, као и разлоге који доводе до побољшања електричне пробојне чврстине композитних материјала који се користе за израду елисе.

Из теорије је познато да електрично поље на земљи испод олујних грмљавинских облака може да достигне вредности у следећем опсегу: $5 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1} \leq E_g \leq 15 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ [25]. Елиса ветротурбине је изложена променљивом електричном пољу чије вредности варирају у току ротације од E_g (када је врх елисе близу површине тла) па до $k \cdot E_g$ ($1,5 \leq k \leq 3$), када је врх елисе на највишој тачки, због ефекта јачања поља. На основу [70], користећи методу коначних елемената за нумеричко моделовање, закључено је да је ветротурбина изложена јачем електричном пољу и да формирање лидера настаје са више тачака када елисе ротирају. Међутим, ефекат генерисања наелектрисања и појачавања поља се такође јавља и када ветрови јако малог интензитета пролазе преко површине елисе, чак и када елисе не ротирају (интервали без ветра). Новонастала наелектрисања утичу на континуалан пораст потенцијала на елиси, све док не дође до спајања прескока мале дужине на површини елисе са површинским наелектрисањем на прихватном систему елисе, или са пражњењима из короне ка околном ваздуху превазилазећи струју пражњења, у току временског трајања док се наелектрисања не одведу ка уземљивачком систему.

4.2.4. Анализа феномена утицаја ротације елиса ветроелектрана

Поређење броја удара у стационарне ветротурбине (са укоченим ротором) у односу на ветротурбине које су у нормалном погонском режиму, у оквиру истог ветропарка, током дужег временског периода (10–15 година), је могући начин да се у реалним условима одреди утицај ротације елиса ветротурбине на учесталост атмосферског пражњења. Међутим, ово је јако тешко извести у пракси. Такође, испитивања у лабораторијским условима са ротирајућим елисама пуне величине је практично немогуће извести.

Због наведених разлога одлучено је да се конструише модел ветротурбине умањених димензија који је веран оригиналу, тј. употпуности сличан са савременом ветротурбином велике снаге. Овај модел је употребљен за анализу утицаја ротације елиса на карактеристике директног атмосферског пражњења. Поједине битне фазе у току израде докторске дисертације, као и веома сложено и изазовно експериментално истраживање, обављени су у: Румунији (Craiova) – ICMET, Research, Development and Testing National Institute for Electrical Engineering, Немачкој (Neumarkt) - Dehn+Söhne Company, Србији - ЕЛБИ компанија, Ваљево и АБС Минел Електроопрема, Рипањ, као и на Електротехничком факултету у Београду, током 2010. и 2011. године [56]-[57].



ПОГЛАВЉЕ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

У овом поглављу приказани су резултати експерименталног истраживања. Тестови су извршени у сертификованој високонапонској (ВН) лабораторији, на основу методе горе-доле за одређивање 50% прескочних склопних напона (ПН) оба поларитета. Таласни облици ударног напона су примењени између специјално конструисане лучне електроде и елиса умањеног модела ветротурбине (без електричног генератора), који је погођен помоћу фреквентно управљаног индукционог мотора. Разматрана су два карактеристична типа громобранске заштите на елисама ветротурбине, као и случај елиса без инсталираних заштитних система за прихват струје грома. Извршена је детаљна анализа карактеристика директног атмосферског пражњења за неколико типичних брзина ротације елиса модела ветротурбине. Овакав начин испитивања ветротурбине је потпуна новина у свету.

5.1. Модел ветротурбине умањених димензија

Током ударних напонских тестова коришћен је модел ветротурбине умањених димензија, који је модификована верзија комерцијалне ветротурбине мале снаге 1 kW са хоризонталном осом, фирме Елби из Ваљева (Србија), и такође је 1:40 умањен модел савремене ветротурбине инсталисане снаге 3 MW. Детаљна структура експерименталног модела са лучном електродом изнад ветротурбине у високонапонској лабораторији је шематски приказана на Слици 5.1(а), а фотографија је дата на Слици 5.1(б).

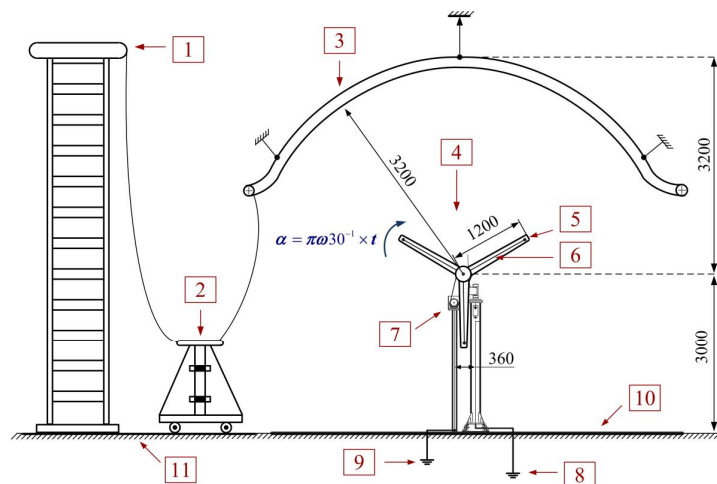
Модел ветротурбине се састоји од следећих главних делова:

- 1) Троелисни ротор који је направљен од изолационог GFRP и/или делимично проводног CFC материјала (непроводни композити су најповољнији избор за испитивање анализираних феномена). Први сет тестова је обављен на елисама са проводним капама дужине 25 cm које су постављене на њиховим врховима - Слика 5.2(а). Следећи сет тестова је извршен користећи проводне рецепторе типа дугме пречника 2,5 cm, који су били зашрафљени са обе стране сваке елисе, 5 cm од њеног врха - Слика 5.2(б). Капе/рецептори су израђени од легуре бакра и месинга, која има одличне електричне и термичке карактеристике. Последњи сет тестова је изведен на елисама без инсталиране громобранске заштите.

Свака капа/рецептор су прикључени на главни лабораторијски уземљивачки систем помоћу бакарних спусних проводника кружног попречног пресека 50 mm² у унутрашњости сваке шупље елисе. У одређеном броју тестова, ради веће стабилности целокупне конструкције ветротурбине (због великих брзина ротације) коришћене су танке елисе пуног попречног пресека и спусни проводник је био инсталиран преко задње спољне површине сваке елисе - Слика 5.2(в). Дакле, када пражњење погоди капу/рецептор на одговарајућој елиси, струја пражњења се спроводи дуж спусног проводника преко површине елисе, затим преко специјално конструисане главне осовине са кугличним лежајевима, који прихватају струју са ротирајућих елиса и преко земљоводне



траке, која је причвршћена унутар стуба ветротурбине, се сигурно одводи ка главном уземљивачком систему лабораторије.



Поглед спреда:

1. Ударни генератор; 2. Капацитивни делитељ напона; 3. Високонапонска лучна електрода; 4. Трокрилни модел ветротурбине; 5. Проводна капа/рецептор; 6. Систем спусних проводника; 7. Фреквентно-управљани индукциони мотор; 8. Главни уземљивачки систем; 9. Помоћни уземљивачки систем; 10. Проводна плоча; 11. Под лабораторије.

Напомена: Све линеарне димензије су дате у милиметрима.

(а)



(б)

Слика 5.1. Испитна шема за експериментално испитивање модела ветротурбине. (а) CAD цртеж. (б) Фотографија из контролне собе када је негативни ударни напон примењен на лучној електроди.

- 2) Главни стуб који је конструисан у облику конусног челичног цилиндра висине 3 m. Гондола ветротурбине је такође челични цилиндар, при чему је иницијално инсталиран електрични генератор уклоњен, јер нема битну улогу приликом експеримената. Трофазни индукциони мотор је смештен у Фарадејев кавез који је причвршћен за главни стуб конструкције, близу његовог врха, и употребљен је за погон ротора ветротурбине помоћу каишног (ременог) преноса, кога чине нерастегљиви трапезоидни ремен дужине 2 m и ширине 2 cm и две ременице пречника 20 cm и 10 cm, респективно (Слика 5.2(г)). Брзина ротације елиса може се континуално подешавати помоћу фреквентног регулатора у опсегу 0–1000 о/мин. Стандардна расклопна



опрема и пренапонска заштита са комерцијално доступним одводницима пренапона и варисторима фирме Dehn+Söhne, Neumarkt (Немачка) за заштиту електричног мотора, фреквентног регулатора и других битних елемената конструкције ветротурбине је била инсталирана и подешена [30], [71].

- 3) Масивно крстасто постоље са апсорберима против вибрација, на које су причвршћени главни и помоћни стуб ветротурбине - Слика 5.2(д).



(а)



(б)



(в)



(г)



(д)

Слика 5.2. (а) Троелисни модел ветротурбине умањених димензија са проводним капама на врховима елиса. (б) Проводни рецептори у близини врхова елиса. (в) Спусни проводници на полеђини елиса. (г) Фреквентно управљан индукциони мотор са каишним (ременим) преносом. (д) Масивно крстасто постоље које је постављено на проводној плочи на поду лабораторије.

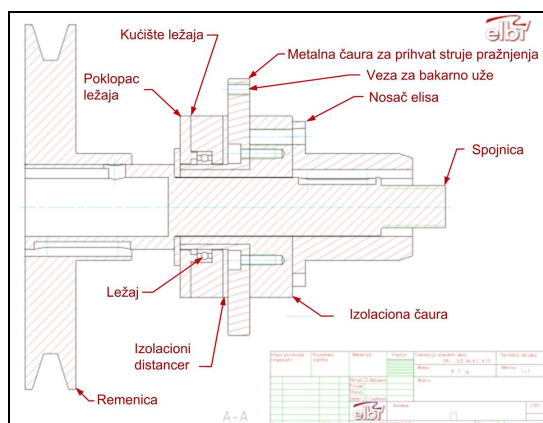
Искуство из праксе показује да су поред елиса и куглични лежајеви који се користе у појединим склоповима ветротурбине (мењачка кутија, систем за заокретање гондоле, главна осовина и редуктори) најугроженија компонента када су у питању директна атмосферска пражњења. Кроз главне кугличне лежајеве већег пречника, који су у компонентама близу троелисног ротора, типично протиче више од 80% струје пражњења приликом њеног спровођења у земљу. Ово је путања са најмањом вредности импедансе, па било какво шантирање није од велике користи. Део струје услед директног удара грома протиче и кроз помоћне лежајеве мањег пречника, али који константно ротирају великом брзином. Експериментална истраживања су показала да су оштећења



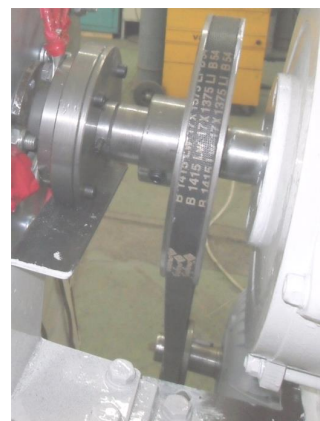
на лежајевима значајнија уколико имају мање димензије и већу брзину ротације [48]. Употреба одводника пренапона који су прилично спори и непрецизни уређаји, засновани на 80-година старом патенту је такође дискутабилна, јер не могу на потребном нивоу да заштите осетљиве и специфичне компоненте ветротурбине.

Заштита ротирајућих кугличних лежајева од директног удара грома је велики изазов, и до данас није пронађено потпуно задовољавајуће решење. Предлог да се ветротурбина брзо и на кратко успори до нулте брзине обртања током интензивне грмљавинске активности, слично као када се фиксирају елисе при ветровима олујне јачине, не може у потпуности да реши проблем и доста је непрактичан. У последње време све чешћа је употреба клизних контакта у различитим варијантама израде за спровођење струје пражњења са ротирајућих елиса у земљу.

У току пројектовања и израде модела ветротурбине умањених димензија, управо због наведених проблема, уложен је велики напор и конструисан је специјално дизајниран цилиндрични куглични лежај, који је монтиран на главној осовини ветротурбине, и који је у скоро 100% случајева после директних удара грома у врхове елиса, успешно одводио струју пражњења ка уземљивачу лабораторије - Слика 5.3(а)-(б).



(а)



(б)

Слика 5.3. (а) CAD цртеж специјално конструисаног наменског дела са кугличним лежајевима за прихват струје пражњења са спусних проводника и њено одвођење у земљу. **(б)** Фотографија током монтаже оригиналног цилиндричног кугличног лежаја на главној осовини модела ветротурбине.

Важно је напоменути да је због начина испитивања и примењене методе горе-доле, целокупна конструкција ветротурбине била изложена великим механичким и термичким напрезањима, због примене великог броја удара у релативно кратком временском периоду и константне ротације елиса у опсегу 0-400 о/мин. Зато је посебна пажња била посвећена избору и подешавању испитне, мерне и разводне опреме, координацији заштитних система и нарочито одабиру типа и карактеристика уземљења [72]-[73].

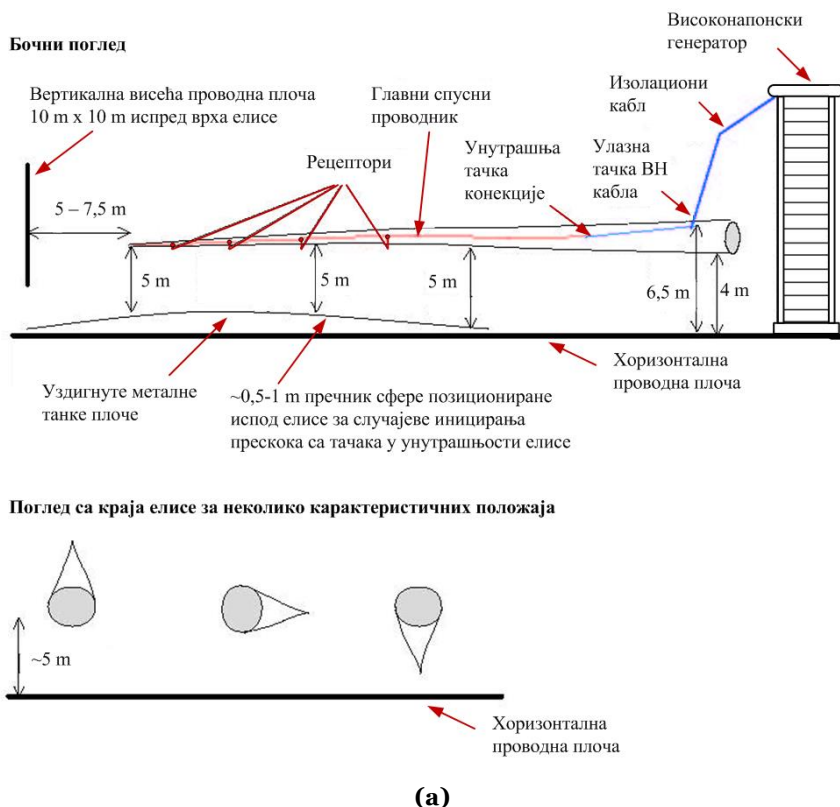
5.2. Високонапонска електрода

Избор високонапонске електроде је од изузетне важности током истраживања утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике атмосферског пражњења у зони прихватног система на елисама. Постоји више различитих конструкција ВН електроде.



5.2.1. Планарна (равна) електрода

Планарна електрода се веома често користи приликом извођења тестова одређивање тачака удара иницијалног лидера [35]. На основу актуелног стандарда примењују се два типа процедура, тип А и тип В. Оне су најадекватније за испитивање, проверу и унапређење ефикасности громобранске заштите комплетних елиса ветротурбина (Слика 5.4(а)-(г)), или исечка врха елисе дужине неколико метара - Слика 5.5(а)-(б).



(б)

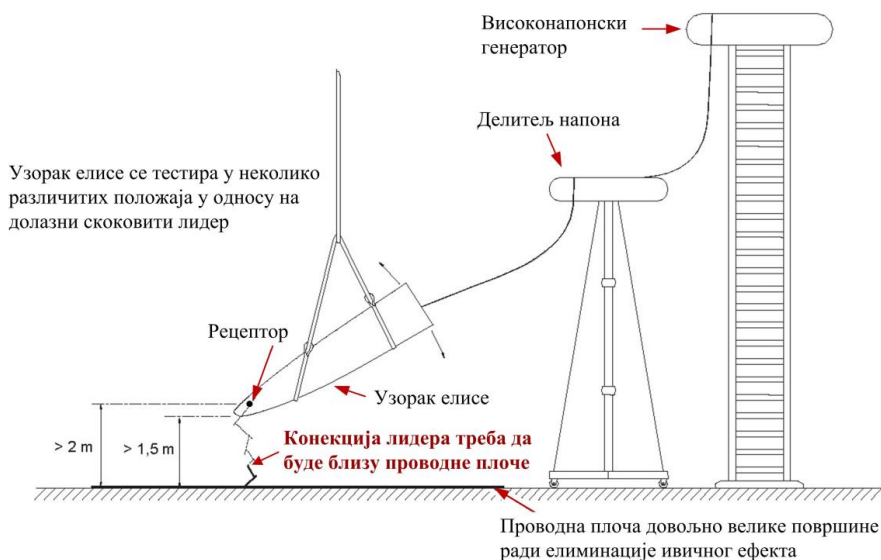


(в)

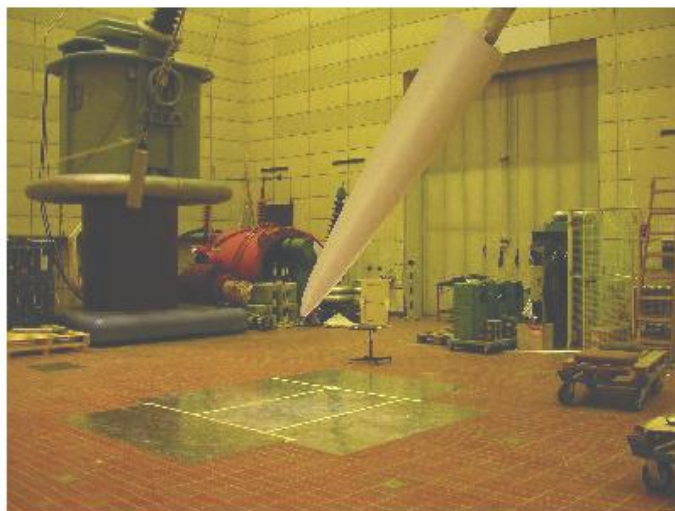


(г)

Слика 5.4. Одређивање тачака удара иницијалног лидера дуж елисе пуне величине за тест процедуру А. **(а)** Испитна шема. **(б)** Фотографија тестирања елисе дужине 40 m у ВН лабораторији. **(в)** Интензивни ВН тестови показују да су елисе од делимично проводних угљених влакана изложене директним атмосферским пражњењима у готово истом односу као и заштитни рецептори. Због тога је релативно тешко одредити тачке удара грома у CFC елисе, а чак и удари средње јачине доводе до значајних оштећења. **(г)** Елисе са проводним попречним тракама у околини рецептора за ефикаснији прихват струје пражњења и њено спровођење до одговарајућег рецептора [43].



(а)

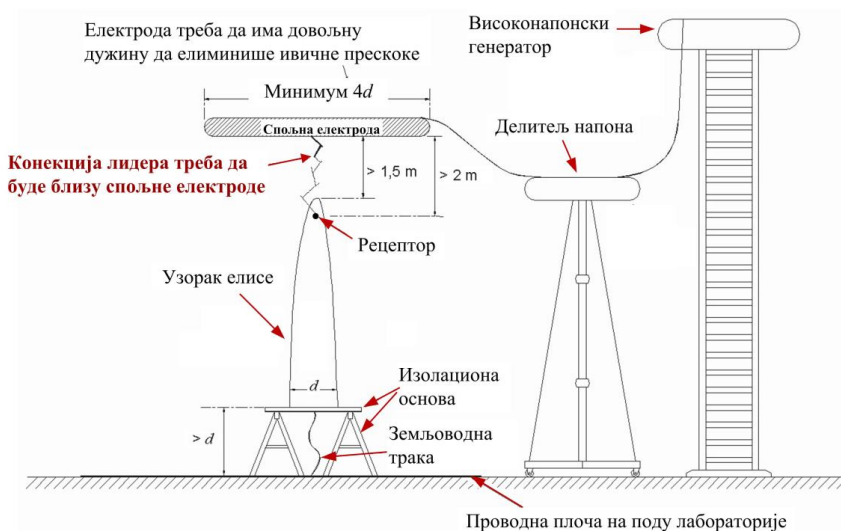


(б)

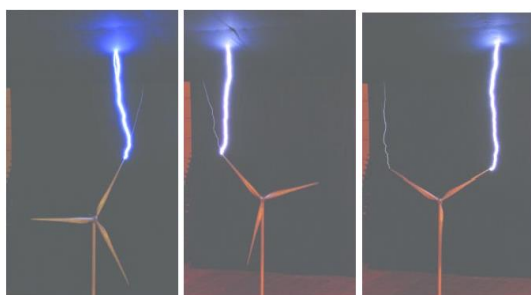
Слика 5.5. Одређивање тачака удара иницијалног лидера на исечку врха елисе за тест процедуру А. (а) Испитна шема. (б) Фотографија тестирања врха елисе дужине 4 m у ВН лабораторији.

Тест процедура А се најчешће користи, јер омогућава да се употреби спољна електрода већих димензија (нпр. проводна плоча на поду лабораторије), и такође се обезбеђује реалистичнија расподела веома нехомогеног електричног поља у околини испитиване елисе.

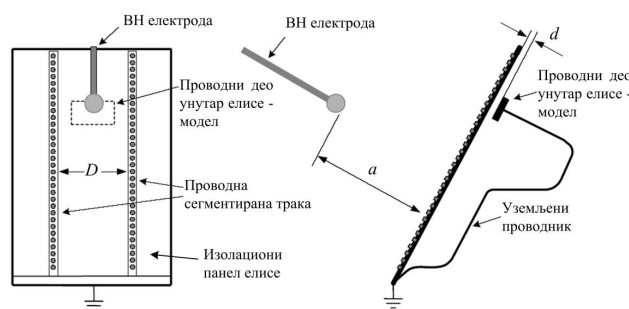
Тест процедура В се често користи да би се добила што реалнија расподела поља у околини елисе. У овом случају могу се употребити дужи и тежи узорци елисе, који се помоћу изолационих подметача постављају на под лабораторије - Слика 5.6(а)-(б). Приликом реализације ове процедуре планарна кружна електрода обично има пречник већих димензија и поставља се изнад узорка елисе. Ово је неопходно како би се избегло интензивирање електричног поља због ивичног ефекта који електрода може да проузрокује.



(а)



(б)



(в)

Слика 5.6. Одређивање тачака удара иницијалног лидера за тест процедуру **В**. **(а)** Испитна шема. **(б)** Фотографије тестирања модела ветротурбине умањених димензија у ВН лабораторији. **(в)** Често се користи и тест процедура **С** за испитивање оптималног растојања између проводних сегментираних трака (или других локалних заштитних компоненти) које се инсталирају на спољној површини елисе и/или гондоле (растојање D се одређује у функцији близине d унутрашњег проводног дела елисе; растојање a је краћа димензија ширине или висине панела) [35].

5.2.2. Штапна електрода

Пражњење типа штапна електрода–земља на незапљаној елиси.



Пузајуће пражњење по површини доњег дела незапљане елисе.



Пузајућа пражњења преко целе површине елисе загађених проводним агенсима. Пражњења типа штапна електрода–земља више нису детектована.

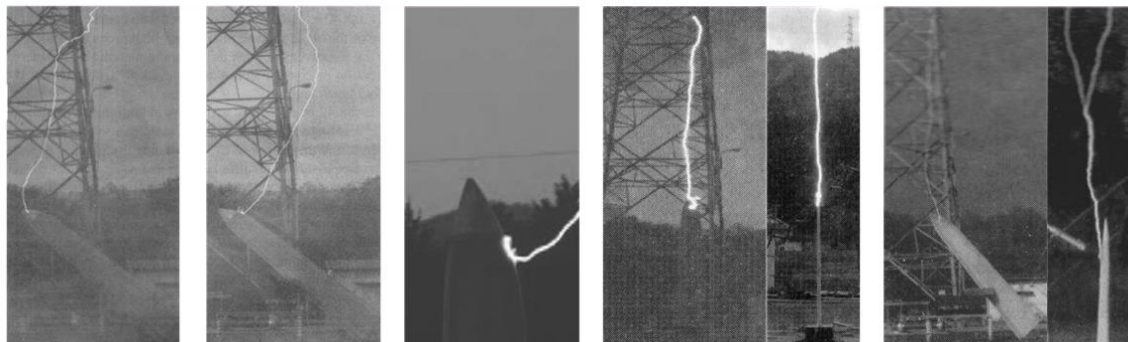


(а)

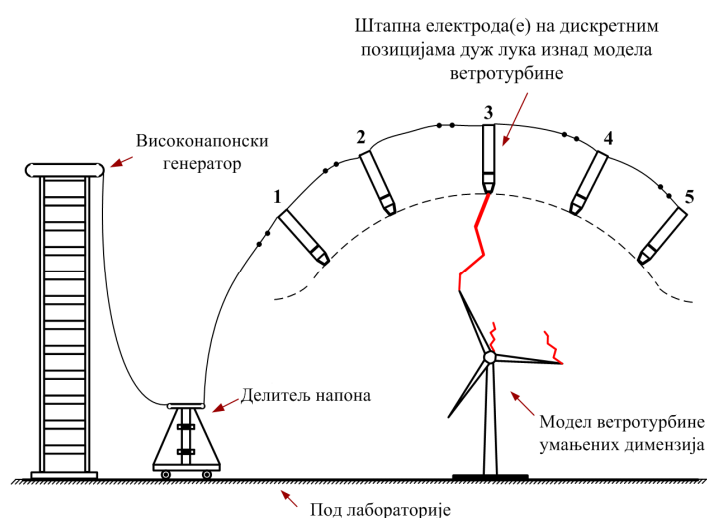


Чисте елисе са инсталираним заштитним громобранским прихватним системом у облику проводних капа на врховима елиса. У највећем броју случајева забележена су директна пражњења у капе.

Чисте елисе са инсталираним заштитним громобранским прихватним системом у облику проводних рецептора на врховима елиса. У највећем броју случајева забележена су директна пражњења у рецепторе.



(б)



(в)

Слика 5.7. (а) Употреба појединачне штапне електроде за иницирање лидера приликом испитивања стационарних GFRP елиса дужине 4 m, без заштитних система. **(б)** Примена штапне електроде за иницирање лидера приликом испитивања перформанси прихватног система у облику проводних капа/рецептора на врховима стационарних GFRP елиса дужине 4 m [46]. **(в)** Употреба више штапних високонапонских електрода на дискретним позицијама дуж замишљеног лука изнад модела ветротурбине.

Ради добијања реалније слике испитиваних феномена и појава, уместо планарне електроде може се употребити појединачна штапна електрода (која репрезентује силазни скоковити лидер на претпостављеном ударном растојању) - Слика 5.7(а)-(б). Штапна електрода би за сваки сет тестова била фиксирана на дискретним позицијама дуж замишљеног лука изнад модела ветротурбине. Као алтернативно решење може се употребити више штапних електрода дуж лука изнад ветротурбине (нпр. по 3 штапне електроде дуж левог и десног сегмента лука) - Слика 5.7(в).

5.2.3. Лучна електрода

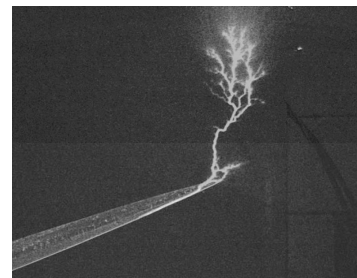
Пошто је главни циљ докторске дисертације истраживање утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења, за потребе испитивања направљена је специјална лучна електрода са циљем да иницирање развоја пражњења ка елисама модела ветротурбине буде независно од позиције елиса – Слика



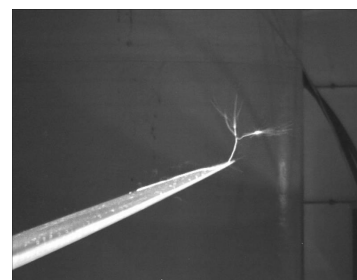
5.8(a). Лучна електрода је конструисана тако да у сваком тренутку током ротације ветротурбине растојање од електроде до врхова елиса буде константно.



(a)



(б)



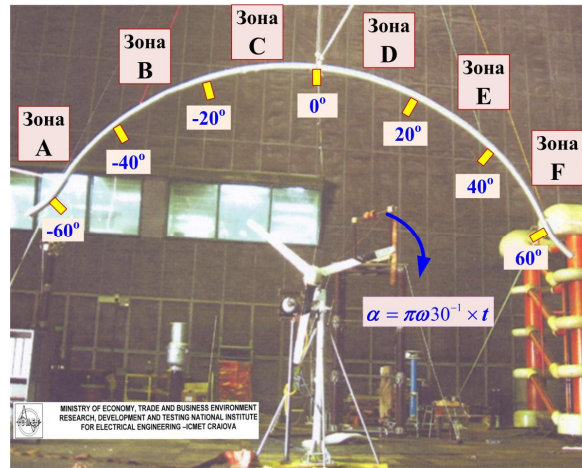
(в)

Слика 5.8. (а) Лучна електрода позиционирана изнад модела ветротурбине у ВН лабораторији. (б)-(в) УВ фотографије иницирања стримера са елисе која је на позитивном потенцијалу (негативно пражњење) и на негативном потенцијалу (позитивно пражњење).

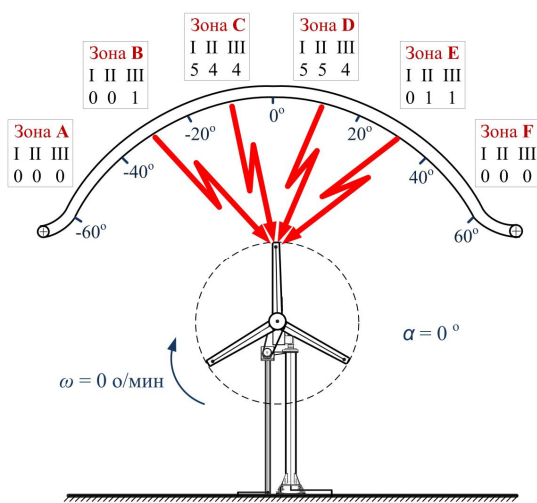
Електрода је направљена од танког алуминијумског цилиндра пречника 15 cm који је ојачан помоћу челичне шупље цеви у облику лука чија је дужина 10 m. Да би се спречило померање лучне електроде извршено је њено причвршћивање помоћу неколико изолационих ужади, при чему је омогућено да елисе приликом ротације и електрода увек буду у истој равни.

Приказана конструкција лучне електроде представља потпуно ново решење за високонапонска испитивања и један је од битних доприноса докторске дисертације. Мерењем интензитета електричног поља у опсегу $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ у неколико карактеристичних тачака изнад елиса, добијене су приближно униформне вредности. На основу Сlike 5.9(а)-(д) и Табеле 5.1 може се закључити да је у свим анализираним случајевима приликом ротације елиса добијена приближно униформна расподела прескока у датом опсегу α дуж лука. Лучна електрода може да створи квази униформно поље изнад елиса, које је мање проводно, и на тај начин да редукује настанак пражњења са електроде ка елисама. Исто тако, може да дође до форсираног приближавања врха (главе) скоковитог лидера изнад ветротурбине, али претежно са крајева електроде. Ради минимизирања наведених ефеката и елиминисања прескока који могу да настану због ивичног ефекта, укупна дужина лучне електроде је продужена на 10,5 m (дужина лука је нешто већа од 120 степени) и њени крајеви су благо закривљени.

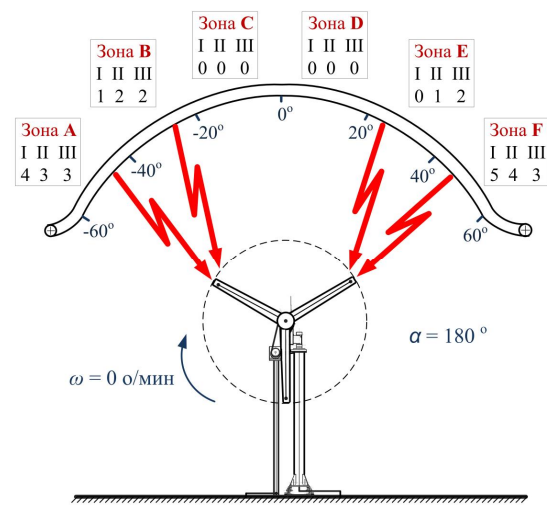
Оптимално растојање између лучне електроде и врхова елиса је подешено на 2 m за ударне напоне оба поларитета. На основу теорије сличности скалирање карактеристичних величина је веома компликовано. Такође, веома тешко је проценити колика треба да буде дужина прескока у лабораторијским условима да би се верно приказала атмосферска пражњења у природном окружењу. Поред тога, потребно је извршити скалирање брзине ротације врха елисе и брзине стримера у каналу грома.



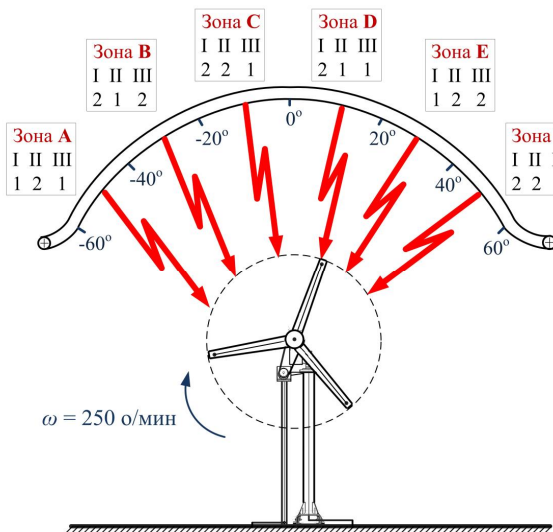
(а)



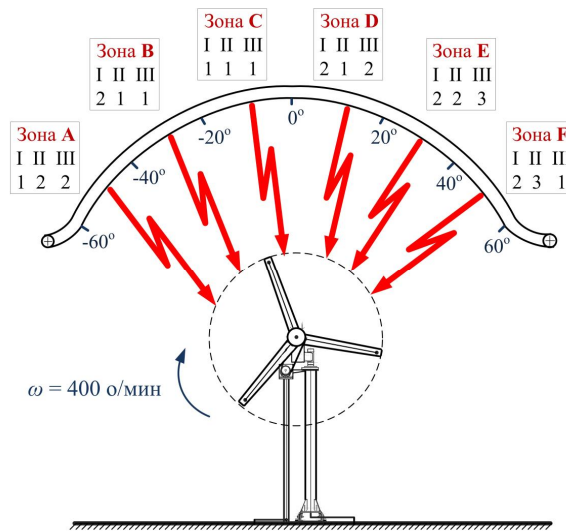
(б)



(в)



(г)



(д)

Слика 5.9. Распдела прескока дуж лучне електроде у ВН лабораторији за негативне ударне напоне. **(а)** Карактеристичне зоне иницирања удара на лучној електроди. **(б)-(д)** Број прескока у појединим зонама за 3 типичне брзине ротације елиса и за следеће разматране случајеве: **СЛУЧАЈ I**—проводне капе су инсталиране на врховима елиса; **СЛУЧАЈ II**—проводни рецептори су монтирани у близини врхова елиса; **СЛУЧАЈ III**—елисе од композитних материјала без заштитних система.



С обзиром на начин настајања силазно иницираних лидера, растојање од 2 m одговара минималном ударном растојању од 80 m у реалним условима, при чему лучна електрода репрезентује врх скоковитог лидера пре последњег скока. За време тестирања стримери су могли веома лако да се развијају са модела ветротурбине - Слика 5.8(б)-(в). Може се закључити да је избор лучне електроде веома подесан за обављање експеримената у лабораторијским условима.

Табела 5.1. Број прескока дуж лучне електроде за негативне ударне напоне.

Брзина ротације елиса ветротурбине w [о/мин]	Позиција дуж лучне електроде α [°]																	
	Зона А [-60°, -40°]			Зона В [-40°, -20°]			Зона С [-20°, 0°]			Зона Д [0°, 20°]			Зона Е [20°, 40°]			Зона F [40°, 60°]		
	Број прескока (П) за анализиране случајеве СЛУЧАЈ I - Проводне капе на врховима елиса СЛУЧАЈ II - Проводни рецептори на врховима елиса СЛУЧАЈ III - Изаолационе елисе без заштитних система																	
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0 Једна елиса је вертикално на горе	0	0	0	0	0	1	5	4	4	5	5	4	0	1	1	0	0	0
0 Једна елиса је вертикално на доле	4	3	3	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	4	3
250	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	3
400	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	3	2	3	1

5.3. Тестирања са ударним струјама

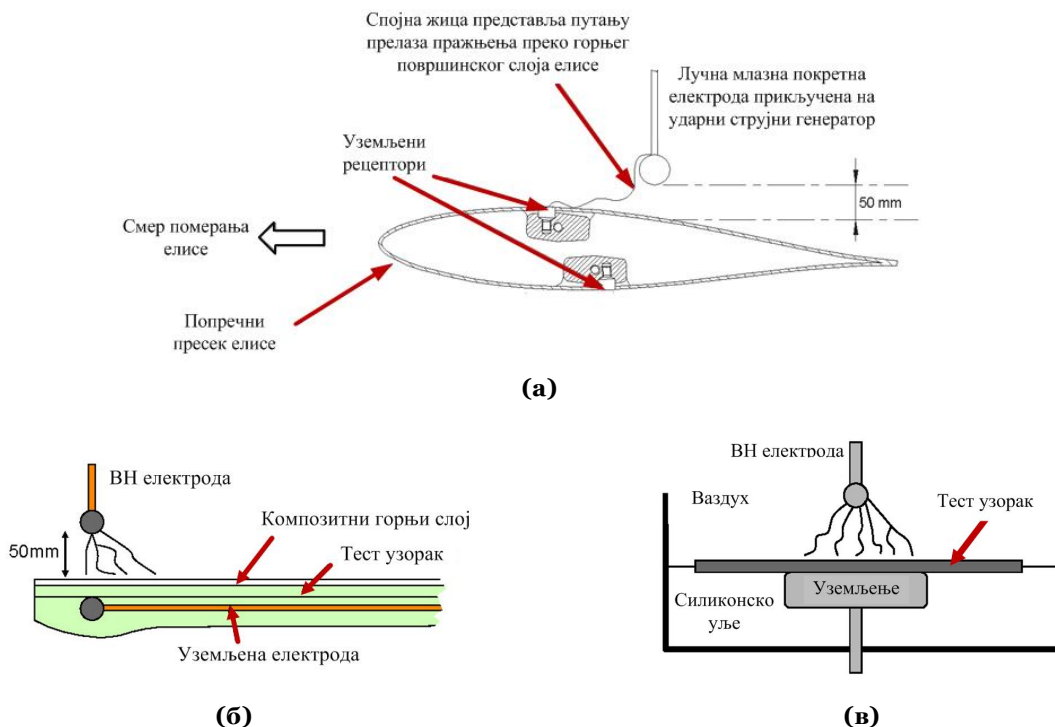
Претходно описани високонапонски тестови се користе ради утврђивања ефикасности прихватног громобранског система на елисама ветротурбине. Такође, испитује се и колика је вероватноћа успешног прихватања струје пражњења у претпостављеним тачкама удара грома на врховима елиса (типично рецептори), као и начин оптималног позиционирања компонената громобранске заштите. Уколико је број оштећења на елисама већи од очекиваног, неопходно је извршити побољшање примењеног заштитног система.

Ефекти напона и струје се испитују одвојено да би се ограничила потребна енергија захтеване испитне опреме [53]. Тестови са ударним струјама се примењују да би се утврдило да ли композитни материјали, који се користе за израду елиса, могу да издрже краткотрајни високи пораст температуре, трансфер наелектрисања и јаке механичке силе које настају за време директног удара грома у елису ветротурбине. Испитивања се обављају на исечцима врхова елиса пуне величине, са инсталираним заштитним системом за прихват струје грома (Слика 5.10(а)), а за одређивање критичних вредности пробојног електричног поља користе се узорци од композитних материјала различитих облика и величина - Слика 5.10(б)-(в).

За ветротурбине се примењује највиша категорија заштите (LPL I) и препоручује се тестирање компоненти са ударним струјама до 200 kA [35]. Сувише мале вредности испитних ударних струја резултују у повећаном нивоу оштећења услед удара грома, а превелике изабране вредности ударних струја доводе до тога да дизајн заштитног



система буде неекономичан. Таласни облик ударне струје, специфична енергија и трансфер наелектрисања су у складу са стандардом [35]. Ударна струја се ињектује у свим детектованим тачкама удара грома (на основу високонапонских тестова), и ако не дође до озбиљнијих оштећења у овим тачкама значи да су елисе добро пројектоване.



Слика 5.10. (а) Тестови са ударним струјама на GFRP елисама пуне величине. (б) Тестови за одређивање јачине пробојног поља на правоугаоним узорцима. (в) На квадратним узорцима.

5.4. Испитивани случајеви, тест процедура, примењена метода и експериментални услови

Сви тестови су извршени на основу важећих стандарда [31]-[35]. Експериментална анализа је обављена користећи описани модел ветротурбине умањених димензија за следећа три разматрана случаја:

- **СЛУЧАЈ I** – проводне капе су инсталиране на врховима елиса.
- **СЛУЧАЈ II** – проводни рецептори су монтирани у близини врхова елиса.
- **СЛУЧАЈ III** – елисе од композитних материјала без заштитних система.

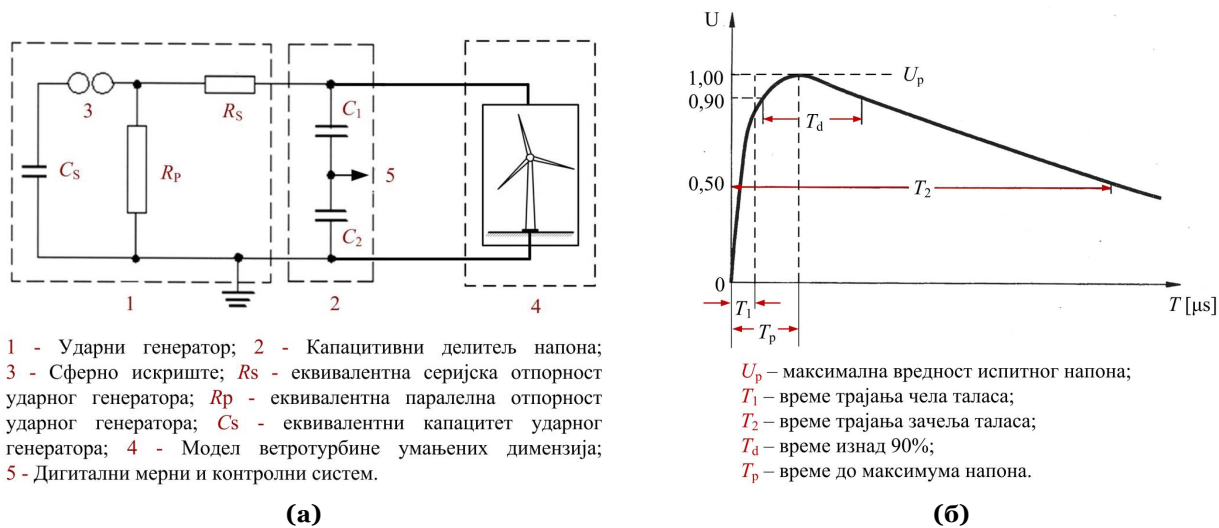
У свим анализираним случајевима експерименти су обављени за три типичне брзине ротације елиса ветротурбине: (1) $w = 0$ о/мин, када су елисе у мировању и при чему су разматрана два подслучаја, када је једна елиса усмерена вертикално на горе и потом вертикално на доле, (2) $w = 250$ о/мин, што у реалним условима одговара ветровима умерене јачине, и (3) $w = 400$ о/мин, при номиналној брзини обртања ротора. Усвојени опсег ротационих брзина елиса модела ветротурбине w одговара брзинама обртања елиса савремене ветротурбине која је у погону у распону од 0-25 о/мин, на основу физичке законитости: $v_t = \pi w l_e \times 30^{-1}$, где је v_t [m/s] периферна брзина врха елисе, w [о/мин] је брзина ротације елиса, и l_e [m] је дужина елисе.

Савремене ветротурбине су углавном пројектоване да могу да раде до 25 година са минималним одржавањем (после овог периода врши се генерални ремонт). На основу разматрања из Поглавља 3, закључује се да ће типична ветротурбина инсталисане снаге



3 MW за $N_g = 2,8 \text{ km}^2\text{година}^{-1}$ и $k = 1$, бити у просеку погођена једним ударом грома у току временског периода од 5 месеци. Али на одређеним локацијама широм света, и током веома лоших временских услова (олује са грмљавином), детектовано је и до 10 удара грома дневно у ветротурбину. Зато је веома важно да број пражњења у лабораторијским условима буде компатибилан са очекиваним атмосферским условима на локацијама где се инсталирају актуелне ветротурбине. У сваком од анализираних случајева примењено је по $n = 20$ пражњења негативног и позитивног поларитета. На овај начин добијене су важне информације о томе који сегменти на површини елиса модела ветротурбине могу да иницирају узлазни лидер на основу пражњења са високонапонске лучне електроде.

Атмосферски ударни напони $1,2/50 \mu\text{s}$ нису сасвим погодни за описане експерименте због кратког трајања чела таласа и облика напонске карактеристике. Зато је стандардни склопни таласни облик ударног напона $250/2500 \mu\text{s}$ примењен на лучној електроди, који пружа довољно времена за развој иницијалног лидера и одговарајућих стримера. Такође, процењена је и неопходна вредност амплитуде таласа да би дошло до прескока (Слике 5.1(б) и 5.11(а)-(б)). Склопни ударни напон се обично користи као најрепрезентативнији за симулирање електричног поља у близини ветротурбине, када је потребно одредити место удара иницијалног скоковитог лидера [35]. Таласни облик ударног напона је био тако подешен да се прескок догоди на растућем делу напонске карактеристике и близу максималне вредности ударног напона. Време протекло од тренутка успостављања одговарајућег таласног облика напона па до иницирања прескока ка ветротурбини било је у интервалу $50\text{--}200 \mu\text{s}$.



Слика 5.11. (а) Мерни и контролни системи у високонапонској лабораторији. **(б)** Таласни облик примењеног склопног ударног напона.

За одређивање 50% прескочног склопног ударног напона у свим разматраним случајевима примењена је метода горе-доле. Када су прескочни напони нормално дистрибуирани (сагласно Гаусовој расподели) метода горе-доле обезбеђује сасвим задовољавајућу процену 50% прескочних напона [74]. Пре почетка сваког сета мерења, одабран је почетни напонски ниво U_{00} на коме се са великом сигурношћу не појављује прескок. Напон се затим иницијално повећава у корацима приближно константне амплитуде Δu све до тренутка док се не деси први прескок при вредности напона U_H (Слике 5.13, 5.16 и 5.18). Затим се напон смањује за вредност Δu . Ако се на напонском



нивоу $U_{l2} = U_{l1} - \Delta u$ не појави прескок, испитни напон се поново повећава за Δu , а у супротном смањује за Δu .

Описани процес се понавља све док се не добије унапред дефинисан број n вредности напона $U_{l1}, U_{l2}, \dots, U_{ln}$. Узимањем већег броја узорака n , аритметичка средина ових напона омогућава добијање прелиминарне процене потребног 50% ПН. Ако је број удара дефинисан као n_l на одређеном напонском нивоу U_l , 50% ПН се може израчунати на следећи начин:

$$U_{50\%ПН} = \frac{\sum_{l=1}^{n=20} n_l U_l}{\sum_{l=1}^{n=20} n_l} \quad (5.1)$$

Први напонски ниво који је претходно био усвојен је онај на коме је било два или више удара, како би се избегле грешке у случају да је изабран сувише низак или висок почетни напон. 10 % ПН је такође одређен на бази Гаусове расподеле. Мерна несигурност за добијене вршне вредности напона оба поларитета је 1,6%. Множењем стандардне мерне несигурности са фактором прекривања израчунава се установљена несигурност мерења. Вредности добијених резултата се налазе унутар прописаног опсега вредности са вероватноћом од 95%.

Атмосферски корекциони фактори за добијање тачних вредности 50% ПН за сва три анализирана случаја су дати у Табели 5.2. Референтне вредности температуре, притиска и релативне влажности ваздуха су: $t = 20^\circ \text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$, и $h = 50\%$ респективно [33].

Табела 5.2. Атмосферски корекциони фактори.

	СЛУЧАЈ I	СЛУЧАЈ II	СЛУЧАЈ III
Температура ваздуха	$t = 26^\circ \text{C}$	$t = 26,6^\circ \text{C}$	$t = 27,3^\circ \text{C}$
Ваздушни притисак	$p = 1001 \text{ mbar}$	$p = 999 \text{ mbar}$	$p = 1000 \text{ mbar}$
Релативна влажност ваздуха	$h = 61,5\%$	$h = 59,4\%$	$h = 61,0\%$
Корекциони фактор густине ваздуха	$k_1 = 0,969$	$k_1 = 0,964$	$k_1 = 0,963$
Корекциони фактор влажности ваздуха	$k_2 = 1,045$	$k_2 = 1,046$	$k_2 = 1,046$
Укупан корекциони фактор	$k_t = k_1 \times k_2 = 1,0126$	$k_t = k_1 \times k_2 = 1,0083$	$k_t = k_1 \times k_2 = 1,0075$
Коригован прескочни напон	$U_{50\% ПН} = U_{50\% \text{ измерено}} \times k_t^{-1}$; $U_{10\% ПН} = U_{10\% \text{ измерено}} \times k_t^{-1}$		

5.5. Експериментални резултати

5.5.1. Компарација примењених заштитних громобранских система

Иако модел ветротурбине умањених димензија није употпуности погодан за испитивање ефикасности громобранске заштите елиса које су израђене од композитних материјала (потпуна истраживања се врше на елисама пуне величине), у првом делу обављеног експерименталног истраживања извршено је поређење примењених заштитних громобранских система на елисама, за неколико типичних брзина ротације (Табела 5.3).

Помоћу обављених високонапонских тестова извршено је предвиђање могућих тачака удара на елисама, и нарочито процена вероватноће успешног прихвата струје



грома у претпостављеним тачкама удара грома, као и одређивање путања пробоја преко и/или кроз елису. Елисе на чијим врховима су биле инсталиране проводне капе имале су релативно већу ефикасност заштите у односу на елисе са рецепторима. Када је негативни ударни склопни напон био примењен на лучној електроди (елисе на позитивном потенцијалу) електрично пражњење је иницирано на основу позитивно индукованог наелектрисања на врховима елиса и у највећем броју случајева удари су забележени директно у капе/рецепторе са вредностима 50% ПН између -1110 kV и -1710 kV (Табела 5.4).

Табела 5.3. Начини пражњења за анализиране случајеве.

Поларитет склопног прескочног напона	СЛУЧАЈ I Проводне капе на врховима елиса		СЛУЧАЈ II Проводни рецептори на врховима елиса		СЛУЧАЈ III Изолационе елисе без заштитних система	
	Начин пражњења	Број пута	Начин пражњења	Број пута	Начин пражњења	Број пута
Брзина ротације елиса: $\omega = 0$ о/мин						
Негативан	Електрода - ка-земљи	0	Електрода - ка-земљи	0	Електрода - ка-земљи	6
Негативан	Капа	10	Рецептор	9	Пузеће	4
Негативан	Продор/ оштећење	0	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	0
Позитиван	Електрода - ка-земљи	0	Електрода - ка-земљи	0	Електрода - ка-земљи	7
Позитиван	Капа	9	Рецептор	8	Пузеће	2
Позитиван	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	2	Продор/ оштећење	1
Брзина ротације елиса: $\omega = 250$ о/мин						
Негативан	Електрода - ка-земљи	1	Електрода - ка-земљи	1	Електрода - ка-земљи	7
Негативан	Капа	9	Рецептор	8	Пузеће	3
Негативан	Продор/ оштећење	0	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	0
Позитиван	Електрода - ка-земљи	1	Електрода - ка-земљи	2	Електрода - ка-земљи	8
Позитиван	Капа	8	Рецептор	6	Пузеће	1
Позитиван	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	2	Продор/ оштећење	1
Брзина ротације елиса: $\omega = 400$ о/мин						
Негативан	Електрода - ка-земљи	2	Електрода - ка-земљи	2	Електрода - ка-земљи	8
Негативан	Капа	8	Рецептор	7	Пузеће	2
Негативан	Продор/ оштећење	0	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	0
Позитиван	Електрода - ка-земљи	2	Електрода - ка-земљи	2	Електрода - ка-земљи	9
Позитиван	Капа	7	Рецептор	5	Пузеће	0
Позитиван	Продор/ оштећење	1	Продор/ оштећење	3	Продор/ оштећење	1

Са друге стране, када је позитивни ударни напон био примењен на лучној електроди (елисе на негативном потенцијалу), пражњење је било иницирано директно са електроде и позитивно просторно наелектрисање је настављало да протиче целокупном путањом до елисе, где је због шиљате геометрије ротора и индукованог негативног наелектрисања на елисама, проузроковало да одређен број удара буде мимо заштитног прихватног система на елисама. Последице су оштећења на елисама (пробој, пукотине, рупе), такође веома честа код ветротурбина које су у погону у реалним условима – Слика 5.12. У овом случају забележени су случајеви пражњења по изолационој површини елиса са 50% ПН између 2119–3325 kV (Табела 5.4). Разлика у амплитуди напона се може објаснити због велике нехомогености електричног поља и изражене покретљивости електрона у односу на позитивне јоне.

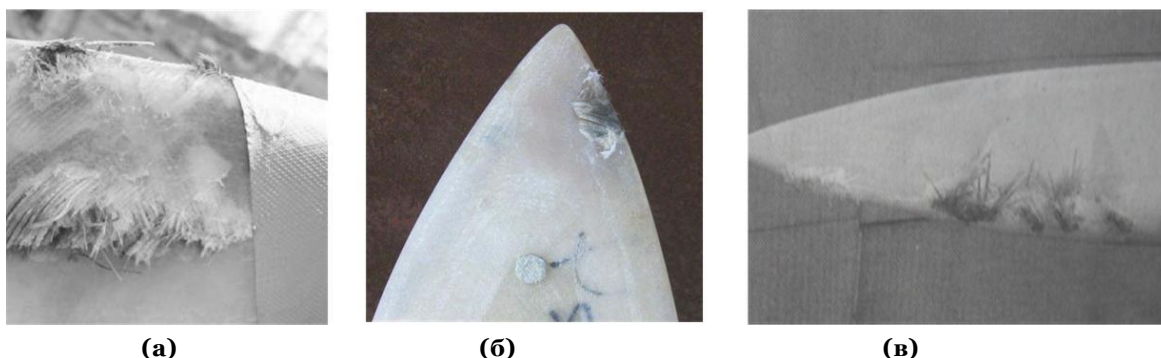


У већини случајева удари су били детектовани директно у капе/рецепторе, као што је нпр. приказано на Слици 5.1(б). Понекад се пражњење преносило преко спољне површине при врху елисе, да би потом место удара био одговарајући рецептор. У оба случаја струја пражњења је преко спусних проводника сигурно била спроведена до лабораторијског уземљивача.

Табела 5.4. 50% и 10% прескочни напони за анализирани случајеви.

50% и 10% склопни прескочни напон [kV]	Брзина ротације $\omega = 0$ о/мин		Брзина ротације $\omega = 250$ о/мин		Брзина ротације $\omega = 400$ о/мин	
	Поларитет напона					
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
СЛУЧАЈ I						
Проводне капе на врховима елиса						
$U_{50\%}$	-1109,3	2118,8	-1144,7	2231,1	-1223,8	2459,9
$U_{10\%}$	-1020,6	1949,3	-1053,1	2052,6	-1125,9	2263,1
СЛУЧАЈ II						
Проводни рецептори на врховима елиса						
$U_{50\%}$	-1143,8	2164,2	-1176,5	2270,2	-1246,5	2488,7
$U_{10\%}$	-1047,9	1991,0	-1077,8	2088,6	-1146,5	2289,7
СЛУЧАЈ III						
Изолационе елисе без заштитних система						
$U_{50\%}$	-1608,4	3039,8	-1637,6	3121,8	-1708,2	3325,5
$U_{10\%}$	-1479,7	2796,6	-1506,6	2872,0	-1571,6	3059,5

У случају позитивних склопних прескочних напона (елисе на негативном потенцијалу) запажена су значајнија оштећења на елисама, првенствено због повећаног ПН. Уочене су тачке удара на ивицама елиса непосредно испод проводних капа. Веће вредности електричног поља су неопходне како би се пребродила позитивна просторна наелектрисања која окружују рецепторе на негативно наелектрисаним елисама, и на тај начин их чине мање ефикасним током иницирања узлазних лидера. Што се тиче изолационих елиса без громобранских заштитних система, пражњење типа лучна електрода–земља је било веома учестало. Површинско (пузајуће) пражњење дуж ивица на доњој половини елиса, ближе њеном корену и разарања елиса у виду пробоја и напрснућа су такође уочена неколико пута (Слика 5.12).



Слика 5.12. Детектована типична оштећења на површини изолационих композитних елиса са и без громобранских заштитних система ($4,3 \leq \epsilon_r \leq 4,7$). **(а)** Продор непосредно испод проводне капе. **(б)** Пукотина и рупе на ивици елисе са рецепторском заштитом непосредно испод врха елисе. **(в)** Напрснуће и удубљење елисе без громобранске заштите. **Напомена:** Израчунате вредности специфичне енергије развијене на спољној површини елисе биле су у опсегу 3,1-3,3 MJ/Ω.



На основу снимљеног видео материјала током испитивања, у свим анализираним случајевима, добијени су следећи важни закључци, који се поклапају са општим теоријским хипотезама на основу ИЕС стандарда. Када је лучна електрода била негативно поларисана, тачке спајања лидера са модела ветротурбине и са електроде су биле ближе електроди. У случају позитивно поларисане лучне електроде, тачке спајања лидера су биле померене нешто ближе ка врховима ротирајућих елиса, због повећаног ударног напона, који је потребан да би се формирао канал грома, као и због специфичне расподеле просторног наелектрисања (детаљно објашњење је дато у следећем поглављу). На овај начин је још једном потврђена оригинална тврдња, да због ротације елиса долази до нешто отежаног директног пражњења у зони прихватног система на елисама.

5.5.2. Утицај ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења

Главни циљ другог дела експерименталног истраживања је анализа утицаја ротације елиса ветротурбине на учесталост и начин директних атмосферских удара, што представља један од најважнијих доприноса докторске дисертације.

5.5.2.1. Тестови са негативним склопним прескочним напонима (елисе на позитивном потенцијалу)

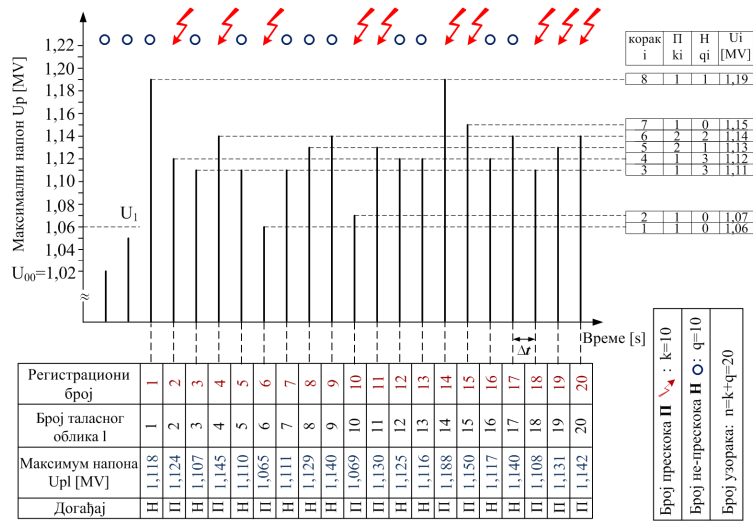
На основу Табеле 5.4 за СЛУЧАЈ I може се уочити повећање ПН при брзини $w = 250$ о/мин у односу на ПН за брзину $w = 0$ о/мин за 3,2%, и такође пораст ПН при брзини $w = 400$ о/мин у односу на случај када је брзина $w = 0$ о/мин за око 10,3%. Карактеристични таласни облици напона са вредностима битних параметара, при чему је негативни ударни напон примењен на лучној електроди и коришћена методе горе-доле, за неколико типичних брзина обртања ротора, и за наведени случај су дати у Табели 5.5 и на Сликама 5.13-5.14.

Табела 5.5. Карактеристичне вредности параметара таласних облика негативних прескочних напона за СЛУЧАЈ I.

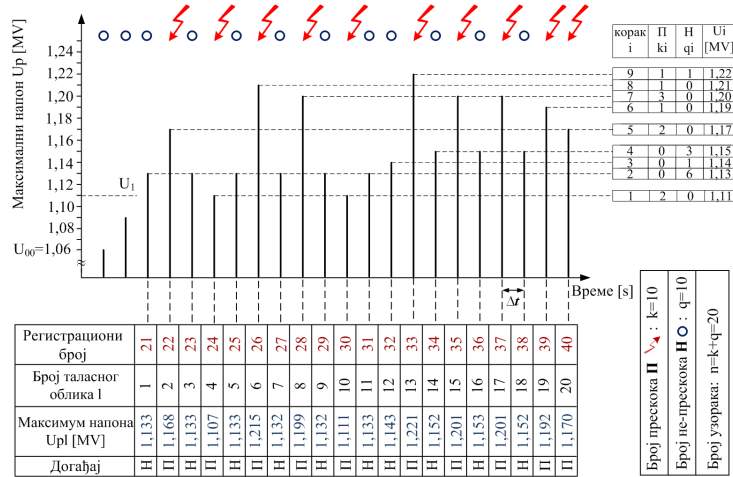
СЛУЧАЈ I																	
Проводне капе на врховима елиса																	
$w = 0$ о/мин.						$w = 250$ о/мин.						$w = 400$ о/мин.					
Бр.	U _p [kV]	T1 [μs]	T _p [μs]	T _d [μs]	T2 [μs]	Бр.	U _p [kV]	T1 [μs]	T _p [μs]	T _d [μs]	T2 [μs]	Бр.	U _p [kV]	T1 [μs]	T _p [μs]	T _d [μs]	T2 [μs]
1	-1118	191	289	583	2728	21	-1132	191	291	590	2730	41	-1121	172	264	567	2672
2	-1124	121	130	37,6		22	-1168	131	141	45,2		42	-1230	121	131	42,8	
3	-1107	190	290	584	2730	23	-1133	190	290	591	2731	43	-1251	126	141	47,2	
4	-1145	128	138	42,8		24	-1107	114	120	34,4		44	-1206	114	122	37,6	
5	-1110	191	291	588	2736	25	-1134	191	291	592	2735	45	-1112	171	262	570	2668
6	-1065	110	115	30,4		26	-1215	150	168	57,2		46	-1266	154	199	94,1	
7	-1111	190	290	583	2731	27	-1132	191	292	593	2733	47	-1145	175	265	565	2671
8	-1129	190	288	582	2732	28	-1199	143	158	54,4		48	-1279	161	241	535	2537
9	-1140	191	289	586	2735	29	-1132	191	290	585	2730	49	-1299	162	229	135	
10	-1069	103	108	27,6		30	-1111	115	120	32,4		50	-1281	163	254	540	2546
11	-1130	184	232	105		31	-1133	193	293	589	2735	51	-1260	160	246	534	2530
12	-1125	192	288	585	2734	32	-1143	191	290	588	2739	52	-1291	162	246	537	2538
13	-1116	191	290	583	2733	33	-1221	142	157	55,2		53	-1251	137	158	59,1	
14	-1188	138	149	48,4		34	-1152	191	292	585	2734	54	-1276	163	222	113	
15	-1150	130	138	42,4		35	-1201	137	148	48,0		55	-1275	160	245	533	2535
16	-1117	190	288	593	2738	36	-1153	192	291	588	2736	56	-1300	162	252	539	2547
17	-1140	192	289	587	2732	37	-1200	136	151	49,6		57	-1316	159	243	531	2533
18	-1108	112	118	32,0		38	-1152	192	291	589	2735	58	-1151	97	103	28,3	
19	-1131	123	131	38,4		39	-1192	133	145	46,4		59	-1249	128	142	49	
20	-1142	129	138	43,2		40	-1171	129	139	44,4		60	-1225	129	143	51,1	

U_p – максимална вредност испитног напона;

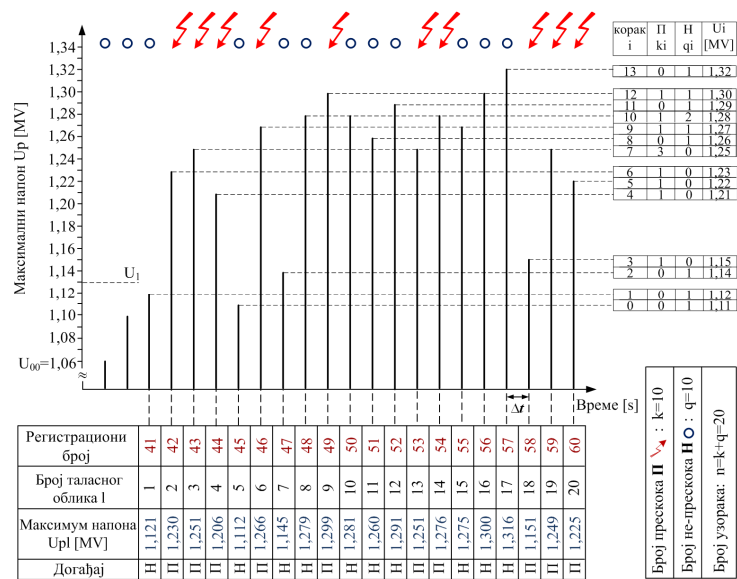
T1 – време трајања чела таласа; T2 – време трајања зачеља таласа; T_d – време изнад 90%; T_p – време до максимума напона.



(а)

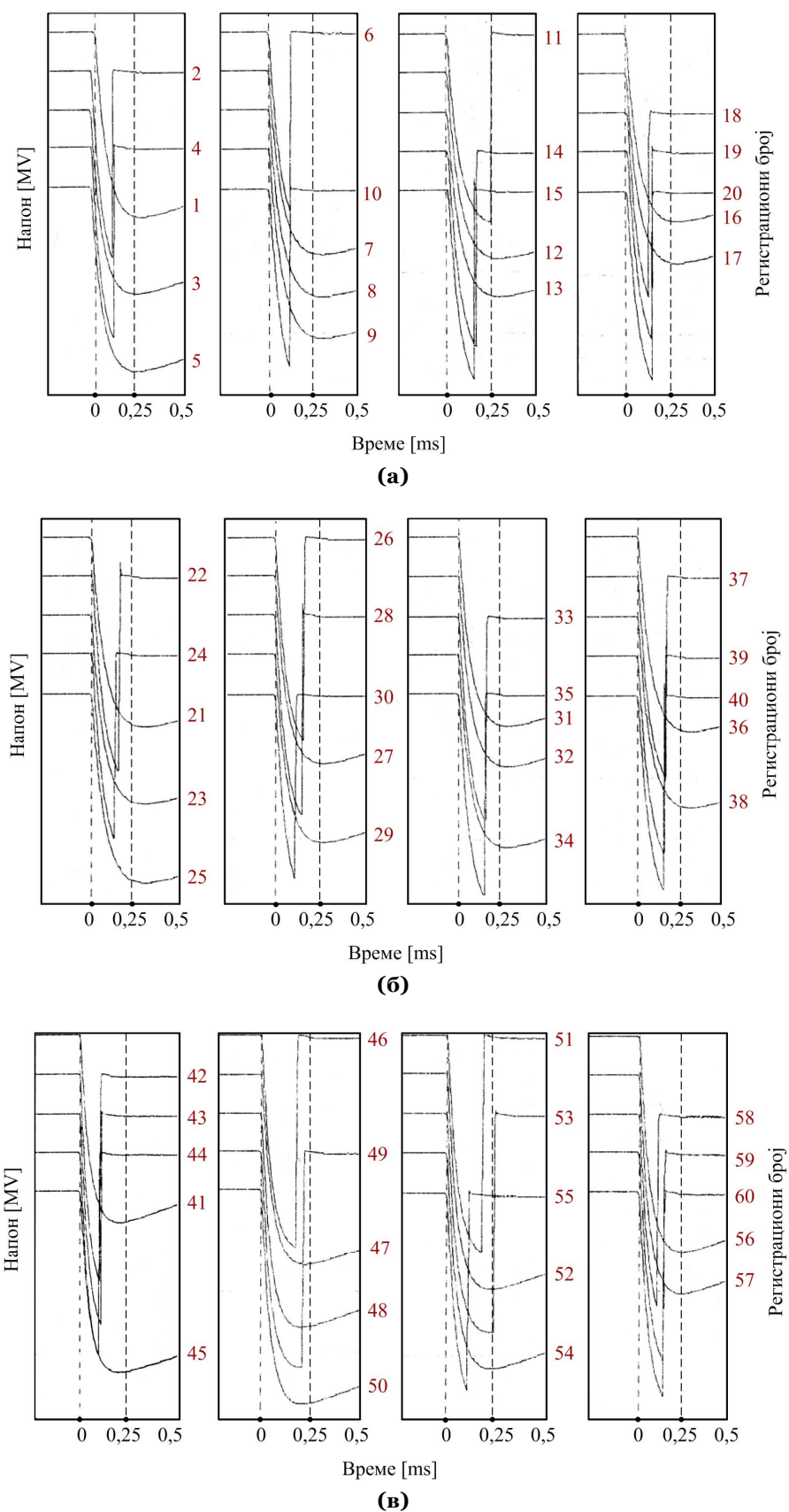


(б)



(в)

Слика 5.13. Метода горе-доле за СЛУЧАЈ I, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $\omega = 0$ о/мин. (б) $\omega = 250$ о/мин. (в) $\omega = 400$ о/мин.

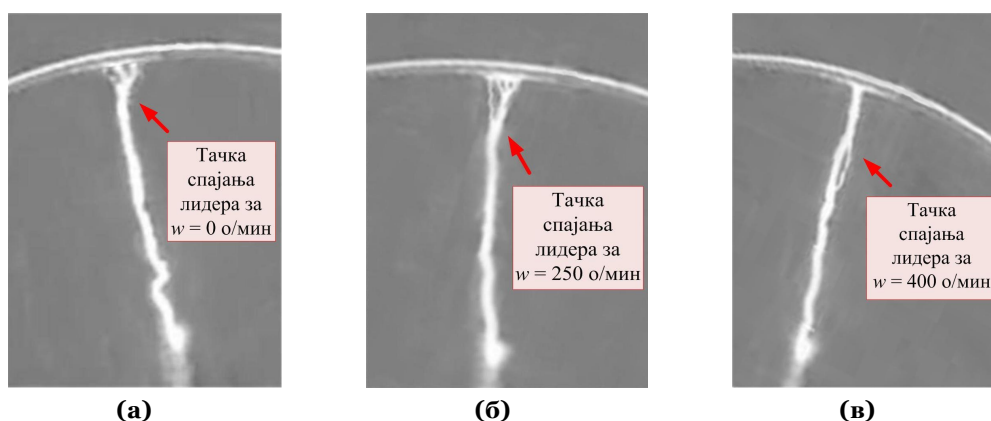


Слика 5.14. Карактеристични таласни облици за СЛУЧАЈ I, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. **(а)** $\omega = 0$ о/мин. **(б)** $\omega = 250$ о/мин. **(в)** $\omega = 400$ о/мин.



Добро је познато да је више од 90% атмосферског пражњења које се дешава у природи негативног поларитета. Као што је напоменуто у Поглављу 3, ветротурбине су у реалним условима углавном изложене узлазном пражњењу са ротирајућих елиса. Већина савремених ветротурбина има инсталиран прихватни систем у форми рецептора на врховима елиса. Због тога је посебна пажња посвећена овим случајевима.

Детаљна анализа за СЛУЧАЈ II када је негативан ударни склопни напон примењен на лучној електроди је дата у Табели 5.6 и на Сликама 5.15–5.17. На основу Сlike 5.15 може се уочити веома важна чињеница: тачке спајања лидера са лучне електроде и са одговарајуће елисе су лоциране ближе ка електроди. Такође, истовремено са повећањем брзине ротације елиса уочене тачке спајања се померају нешто ближе ка врху елиса и пражњење са лучне електроде се простире дубље у ваздушном зазору. Дакле, повећање брзине ротација елиса утиче на смањење електричног поља у ваздушном зазору типа електрода-врх елисе, ПН благо расте, и долази до смањења вероватноће директних пражњења у елисе.



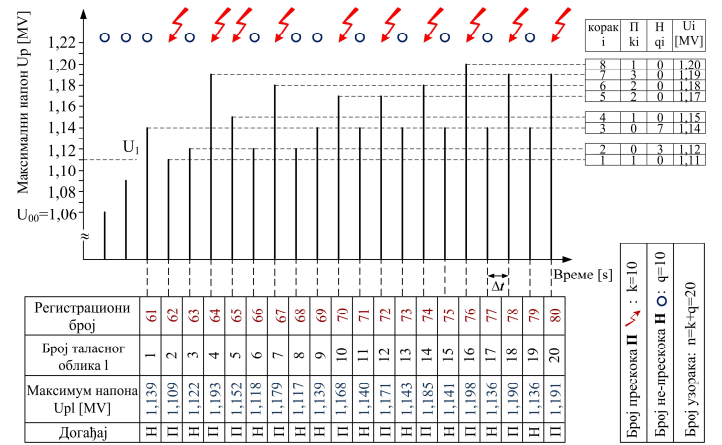
Слика 5.15. (а)-(в) Увећане фотографије спајања силазног и узлазног лидера за неколико карактеристичних брзина обртања ротора.

Табела 5.6. Карактеристичне вредности параметара таласних облика негативних прескочних напона за СЛУЧАЈ II.

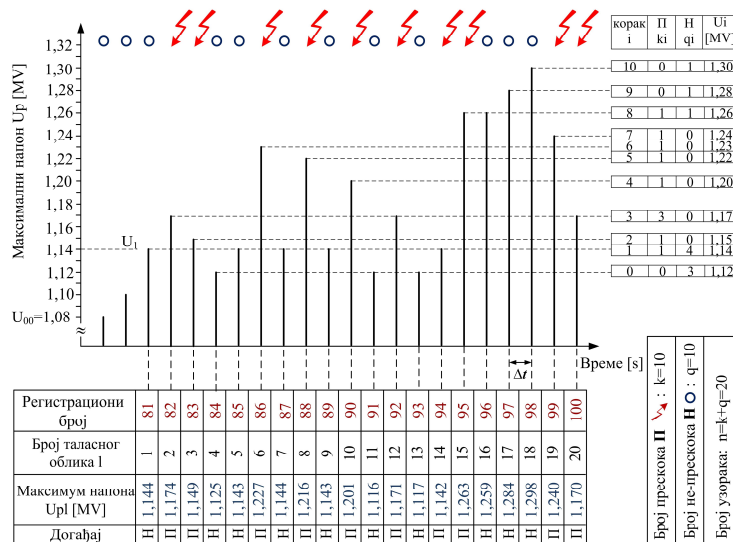
СЛУЧАЈ II																	
Проводни рецептори на врховима елиса																	
$\omega = 0$ о/мин.						$\omega = 250$ о/мин.						$\omega = 400$ о/мин.					
Бр.	U _p [kV]	T ₁ [μ s]	T _p [μ s]	T _d [μ s]	T ₂ [μ s]	Бр.	U _p [kV]	T ₁ [μ s]	T _p [μ s]	T _d [μ s]	T ₂ [μ s]	Бр.	U _p [kV]	T ₁ [μ s]	T _p [μ s]	T _d [μ s]	T ₂ [μ s]
61	-1139	172	268	564	2694	81	-1144	172	264	572	2689	101	-1261	161	248	535	2532
62	-1109	101	106	29.6		82	-1174	115	125	39.6		102	-1285	161	245	535	2537
63	-1122	173	267	558	2676	83	-1149	115	124	38.8		103	-1247	136	156	58.0	
64	-1193	123	136	44.4		84	-1125	173	265	565	2688	104	-1275	161	219	111	
65	-1152	116	127	38.4		85	-1143	174	263	568	2689	105	-1278	161	247	534	2537
66	-1118	173	267	561	2688	86	-1227	144	169	65.6		106	-1283	152	192	86.0	
67	-1179	126	140	48.4		87	-1144	173	266	566	2694	107	-1276	161	248	537	2538
68	-1117	173	267	559	2675	88	-1216	130	146	52.4		108	-1298	162	244	146	
69	-1139	172	262	566	2684	89	-1143	173	264	569	2678	109	-1277	161	248	539	2540
70	-1168	116	126	38.4		90	-1201	125	138	45.2		110	-1165	111	118	34.8	
71	-1140	172	264	564	2676	91	-1116	171	268	565	2670	111	-1268	155	200	95.2	
72	-1171	117	126	40.0		92	-1171	116	126	38.8		112	-1140	173	264	563	2670
73	-1143	173	261	564	2684	93	-1117	174	264	567	2690	113	-1278	161	240	534	2536
74	-1185	121	132	42.4		94	-1142	106	114	32.8		114	-1297	161	228	133	
75	-1141	172	260	568	2680	95	-1263	152	191	83.2		115	-1277	162	252	539	2544
76	-1198	125	138	46.0		96	-1259	163	248	534	2543	116	-1298	161	250	536	2544
77	-1136	172	268	566	2683	97	-1284	161	248	534	2546	117	-1320	161	247	534	2536
78	-1190	124	136	44.4		98	-1298	161	247	534	2530	118	-1155	98.7	105	29.6	
79	-1136	173	263	562	2680	99	-1240	129	144	48.8		119	-1242	126	141	47.6	
80	-1191	125	138	44.8		100	-1170	111	120	34.8		120	-1218	126	141	48.4	

U_p – максимална вредност испитног напона;

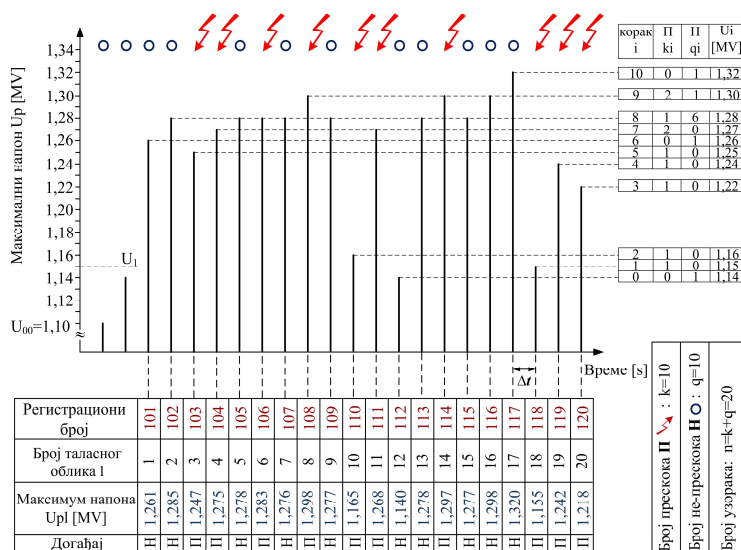
T₁ – време трајања чела таласа; T₂ – време трајања зачела таласа; T_d – време изнад 90%; T_p – време до максимума напона.



(a)

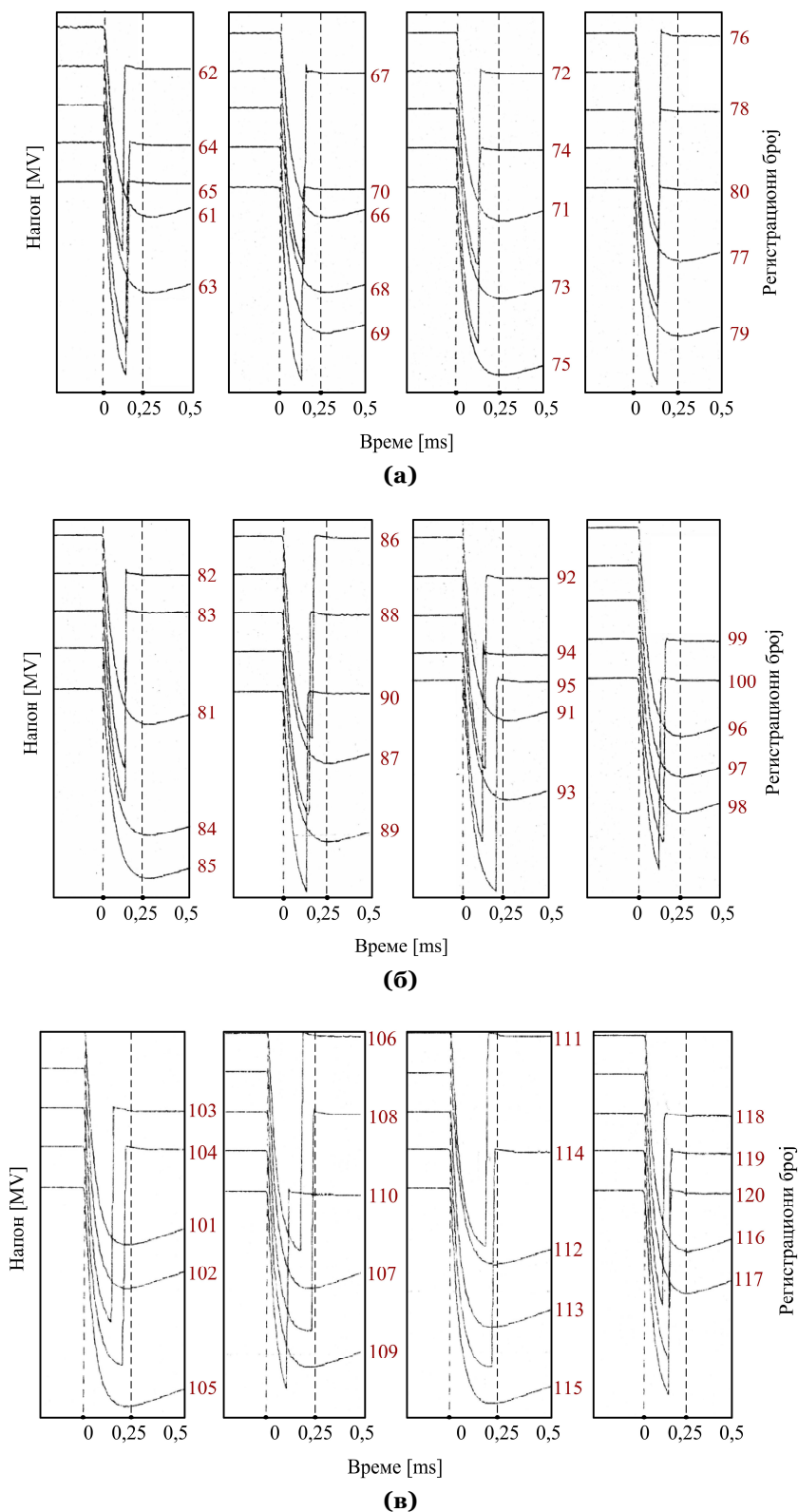


(b)



(v)

Слика 5.16. Метода горе-доле за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (a) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.



Слика 5.17. Карактеристични таласни облици за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. **(а)** $\omega = 0$ о/мин. **(б)** $\omega = 250$ о/мин. **(в)** $\omega = 400$ о/мин.

У СЛУЧАЈУ II уочен је пораст ПН при брзини ротирања елиса $\omega = 250$ о/мин у односу на ПН за брзину $\omega = 0$ о/мин од 2,9%, и такође пораст ПН при брзини $\omega = 400$ о/мин у односу на ПН за брзину $\omega = 0$ о/мин од 9% (Табела 5.4).

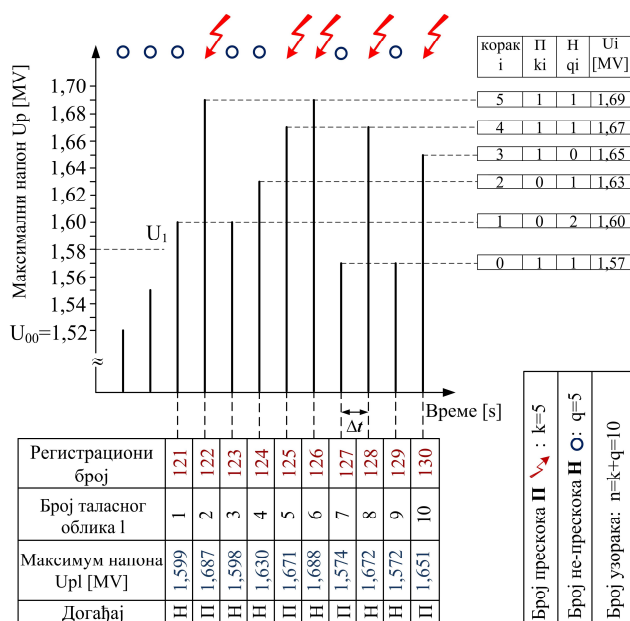


У СЛУЧАЈУ III, нешто блажи пораст ПН при брзини $\omega = 250$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин, као и пораст ПН за $\omega = 400$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин (чије су вредности 1,8% и 6,2% респективно) је детектован, за разлику од претходних случајева (Табела 5.4). У сва три случаја, благи пораст броја пражњења типа лучна електрода–земља је такође уочен. Овај ефект постаје више изражен како се повећава брзина ротације елиса ветротурбине (Табела 5.3).

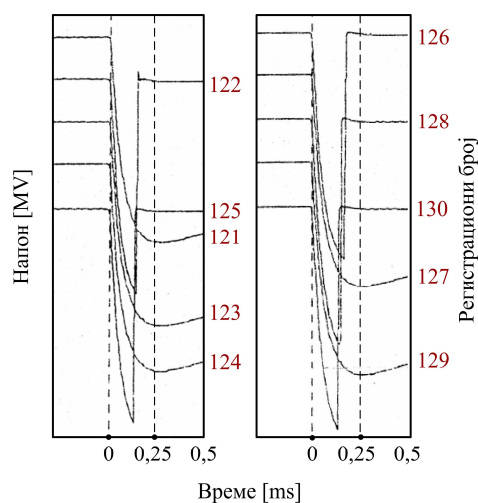
Табела 5.7. Карактеристичне вредности параметара таласних облика ударних напона за специјални СЛУЧАЈ III за $\omega = 50$ о/мин.

СЛУЧАЈ III					
Изолационе елисе без заштитних система					
МАЛА БРЗИНА ОБРТАЊА					
$\omega = 50$ о/мин.					
Бр.	Ur [kV]	T1 [μs]	Tr [μs]	Td [μs]	T2 [μs]
121	-1599	163	263	545	2670
122	-1687	127	141	49,2	
123	-1598	163	259	537	2640
124	-1630	160	244	532	2531
125	-1671	121	134	41,1	
126	-1688	127	140	45,1	
127	-1574	172	265	548	2677
128	-1672	121	135	42,0	
129	-1572	173	267	549	2679
130	-1651	111	129	39,7	

Ur – максимална вредност испитног напона;
 T1 – време трајања чеља таласа;
 T2 – време трајања зачеља таласа;
 Td – време изнад 90%;
 Tr – време до максимума напона.



Слика 5.18. Метода горе-доле када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди за специјалан СЛУЧАЈ III при малој брзини обртања елиса ветротурбине ($\omega = 50$ о/мин).



Слика 5.19. Карактеристични таласни облици када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди за специјалан СЛУЧАЈ III ($\omega = 50$ о/мин).

У току истраживања извршени су експерименти и за специјални СЛУЧАЈ III када се ротор ветротурбине обртао малом брзином ($\omega = 50$ о/мин), како би се обавила додатна провера утицаја угаоне брзине на теорију скалирања, а у вези са анализом ефекта ротирања елиса на карактеристике пражњења. Добијени резултати испитивања, који су у складу са закључцима за претходна два случаја, дати су у Табели 5.7 и на Сликама 5.18–5.19.

5.5.2.2. Тестови са позитивним склопним прескочним напонима (елисе на негативном потенцијалу)

Приликом обављања лабораторијских тестова са позитивним прескочним напонима на моделу ветротурбине, добијени су резултати који се поклапају са случајевима испитивања са негативним прескочним напонима, при чему су укупни ефекти били нешто израженији. На основу Табеле 5.4 може се уочити пораст ПН при брзини ротације елиса $\omega = 250$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин од 5,3% у СЛУЧАЈУ I и 4,9% у СЛУЧАЈУ II. Пораст ПН при брзини $\omega = 400$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин је око 16,1% у СЛУЧАЈУ I и 15% за СЛУЧАЈ II.

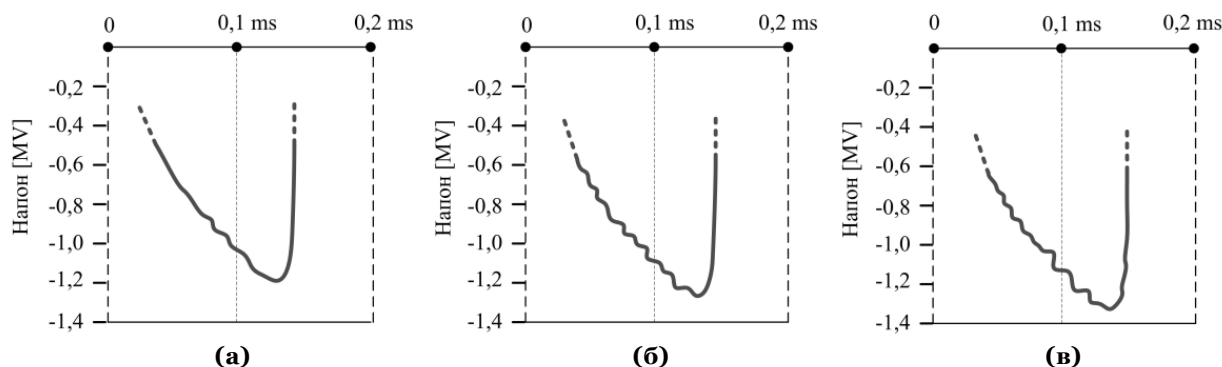
За разлику од претходна два случаја, у СЛУЧАЈУ III забележен је нешто блажи пораст ПН при брзини $\omega = 250$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин, као и пораст ПН при брзини $\omega = 400$ о/мин у односу на ПН за $\omega = 0$ о/мин (вредности су 2,7% и 9,4% респективно).

Као и у случајевима када су испитивања обављена са негативним прескочним напонима, уочен је благи пораст у броју пражњења типа лучна електрода-земља, када се ротор обртао (Табела 5.3). Расподела броја удара дуж лучне електроде за анализиране случајеве била је слична као у Табели 5.1, и примећена је нешто израженија неуниформност у односу на испитивања са негативним прескочним напонима. Такође, у случајевима позитивног пражњења ефекат обртања елиса ротора генерално је имао већи утицај на разматране појаве и феномене.



5.5.3. Таласни облици напона

Анализирајући увећане слике таласних облика напона, може се закључити да се благо повећање осцилаторности таласног облика појављује истовремено са повећањем ротационе брзине елиса, и то нарочито у зони близу максималних вредности прескочних напона. Када је заштитни громобрански систем у виду рецептора био примењен на врховима елиса (СЛУЧАЈ II) наведени ефекат је приказан на Слици 5.20.



Слика 5.20. Осцилаторност увећаних таласних облика за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. **(а)** $w = 0$ о/мин. **(б)** $w = 250$ о/мин. **(в)** $w = 400$ о/мин.

Током истраживања детектовано је повећање дисперзије σ прескочних напона истовремено са порастом брзине ротације елиса (Табела 5.8). Такође, на основу упоређивања напонских карактеристика уочено је да се средња вредност временског интервала до прескока повећава истовремено са порастом брзине обртања.

Табела 5.8. Релативни пораст 50% ПН и дисперзија σ ПН за анализираних случајеве (у релативним јединицама).

Поларитет склопног прескочног напона	$\frac{U_{50\% 250\text{о/мин}}}{U_{50\% 0\text{о/мин}}}$	$\frac{\sigma_{250\text{о/мин}}}{\sigma_{0\text{о/мин}}}$	$\frac{U_{50\% 400\text{о/мин}}}{U_{50\% 0\text{о/мин}}}$	$\frac{\sigma_{400\text{о/мин}}}{\sigma_{0\text{о/мин}}}$	$\frac{U_{50\% 400\text{о/мин}}}{U_{50\% 250\text{о/мин}}}$	$\frac{\sigma_{400\text{о/мин}}}{\sigma_{250\text{о/мин}}}$
	[р.ј.]	[р.ј.]	[р.ј.]	[р.ј.]	[р.ј.]	[р.ј.]
СЛУЧАЈ I						
Проводне капе на врховима елиса						
(-)	1,032	1,078	1,103	1,117	1,069	1,080
(+)	1,053	1,081	1,161	1,119	1,102	1,084
СЛУЧАЈ II						
Проводни рецептори на врховима елиса						
(-)	1,028	1,081	1,094	1,122	1,064	1,087
(+)	1,049	1,086	1,150	1,126	1,096	1,090
СЛУЧАЈ III						
Изолационе елисе без заштитних система						
(-)	1,018	1,098	1,062	1,246	1,043	1,134
(+)	1,027	1,100	1,094	1,250	1,065	1,137

Напомена:

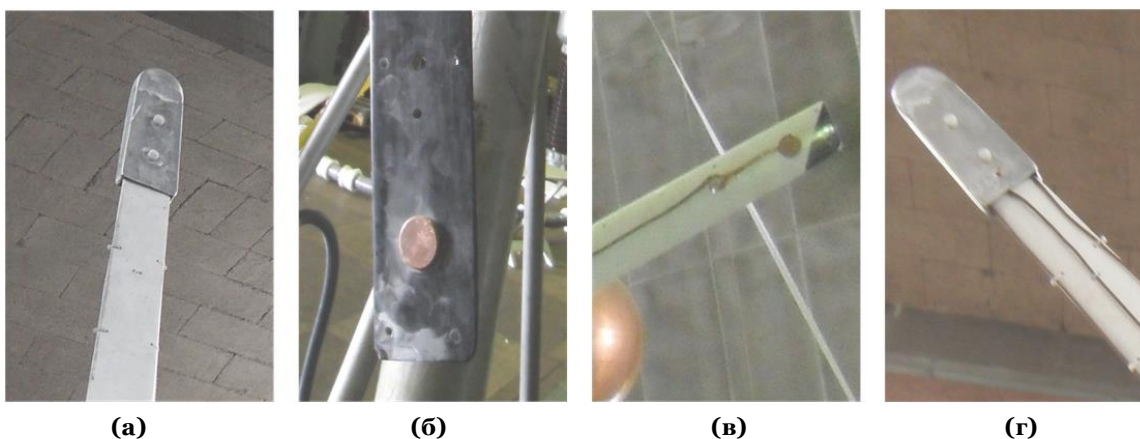
Наредни сет лабораторијских тестова обављен је са елисама од делимично проводног (CFC) композитног материјала. За ударне напоне оба поларитета ефекти анализираних појава у зони прихватног система на врховима елиса су били израженији, и такође је било теже дефинисати тачке директних удара на елисама модела ветротурбине. Зато је



неопходно наставити истраживања и обавити додатне високонапонске тестове за случај када елисе нису израђене од потпуно изолационог материјала.

5.6. Предлог унапређеног модела заштите елиса ветроелектрана

На основу резултата експерименталног испитивања и понашања ветроелектрана у реалним погонским условима, може се дати следећа компаративна анализа принципа громобранске заштите елиса. Проводне капе инсталисане на врховима елиса омогућавају највећу ефикасност заштите, али лоше утичу на аеродинамичке особине елиса - Слика 5.21(а). Монтирање проводних електрода у виду рецептора типа дугме, у дискретним корацима од врха према корену елисе, је решење које се најчешће примењује, али са нижим нивоом ефикасности заштите у односу на претходни случај - Слика 5.21(б).



Слика 5.21. Фотографије из ВН лабораторије у вези са имплементацијом различитих типова громобранске заштите на елисама ветротурбине. **(а)** Проводна капа на врху шупље елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости. **(б)** Проводна електрода у облику дугме рецептора на врху шупље елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости. **(в)** Спусни проводник преко задње спољне површине елисе. **(г)** Спусни проводници дуж нападне и излазне ивице елисе и преко задње спољне површине елисе.

Употреба челичне, бакарне или алуминијумске жице одговарајућег попречног пресека у виду спусног проводника у унутрашњости елисе је типично решење, међутим често се дешава да се због струја пражњења успостави лук у ваздуху у унутрашњости елисе, што уједно представља и основни механизам њеног оштећења. Услед великих механичких и термичких напрезања, којима је елиса тада изложена, може доћи до напруснућа композитне конструкције и њене експлозије.

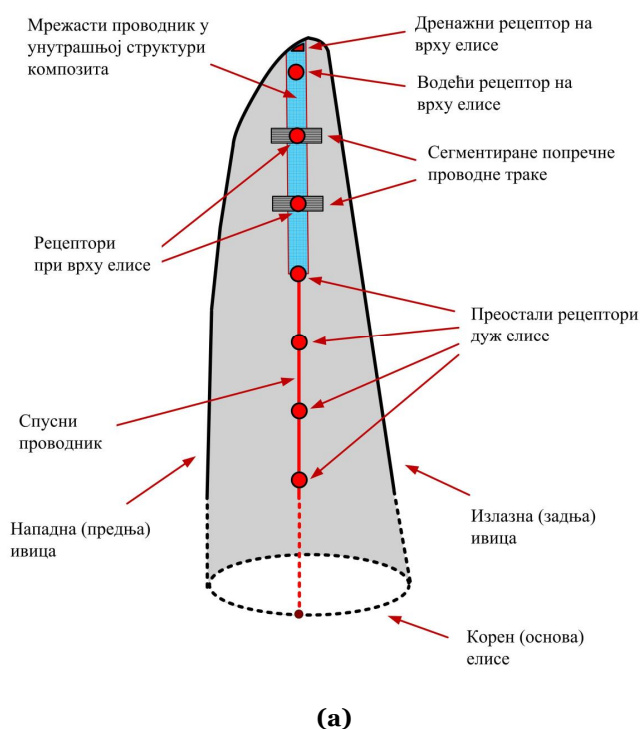
Да би се умањили наведени нежељени ефекти, примењује се решење где спусни проводник има путању по спољној површини задње стране елисе, при чему је галвански спојен са рецептором на врху и преосталим рецепторима према корену елисе – Слика 5.21(в). Могућа је имплементација спусног проводника по нападним и излазним ивицама елисе, међутим практична реализација овог решења је компликована и то посебно код монтаже проводника по нападној ивици - Слика 5.21(г).

Код постављања спуслних проводника на спољној страни елисе може доћи до погоршавања њених аеродинамичких перформанси, али и до ефекта повећане кондензације влаге, а често и до задржавања воде на површинама елисе (у зимским условима долази и до појачаног стварања леда). Наведени ефекти су јако неповољни и



одражавају се на рад целокупне ветротурбине. Употреба мрежастог проводника на обе укупне спољне површине елисе, у унутрашњем горњем слоју композита, је такође једно од решења за заштиту елиса од директног удара грома, међутим доста поскупљује цену елиса и захтева усавршавање постојећег производног процеса.

На основу теорије скалирања и целокупног обављеног истраживања, предложен је оптималан принцип заштите ветротурбина од директног атмосферског пражњења, које се може применити и на ветроелектранама највеће снаге - Слика 5.22 (а)-(б). Приказано решење је могуће реализовати на основу постојећег производног процеса, није значајно скупље од постојећих решења, и може се тестирати у великом броју високонапонских лабораторија у свету.



(б)



(в)

Слика 5.22. (а)-(б) Приказ унапређеног заштитног система елиса ветротурбине. **(в)** Заштита метео инструмената на врху гондоле.

Унапређени принцип заштите елиса, што представља један од битних доприноса докторске дисертације, у значајној мери повећава ефикасност заштите елиса од директног удара грома, у односу на постојеће методе заштите. Предложено решење је усавршена варијанта постојећих метода заштите и иницијално се састоји од инсталирања рецептора на обе стране елисе у дискретним корацима од 5 m од њеног врха према корену.

С обзиром да се највећи број атмосферских удара дешава на врховима елиса, где су оне најтање и најуже, на 2 рецептора при врху елисе (који су инсталирани одмах иза дренажног и водећег рецептора) потребно је монтирати проводне сегментиране попречне траке, ради повећања њихове укупне ефикасности (на веома дугачким елисама, преко 60 m, може се поставити проводна трака и на трећем рецептору). Рецепторе при врху елисе, дуж растојања које износи 25% од њене укупне дужине, треба електрично повезати са мрежастим проводником унутар горњег композитног слоја елисе. Преостали рецептори су преко спусног проводника од бакарног кабла кружног



пресека 50 mm², или челично-потцинковане траке St/tZn 30 mm x 3,5 mm у унутрашњости елисе галвански повезани за главчину. Унутар стуба треба поставити спусни проводник од кружне St/tZn Ø 8-10 mm, или тракасте St/tZn 30 mm x 3,5 mm жице. За заштиту гондоле и мерних инструмената на њеном врху употребио би се штапни и/или кавезни громобран - Слика 5.22 (в).

Дакле, проводне сегментиране траке и мрежасте проводник се инсталирају само на врховима елиса где су оне и најосетљивије на атмосферске ударе. На описани начин имао би се оптималан утрошак материјала, не би се у већој мери нарушавале аеродинамичке перформансе елиса, а њена укупна цена (са инсталираним заштитним системом у облику мрежастог проводника у унутрашњем слоју елисе близу њеног врха), била би само незнатно већа у односу на решења која су данас у употреби. Овакав оригинално развијен принцип заштите елиса се може применити и на изолационим елисама мањих дужина од GFRP композита, као и на делимично проводним CFC елисама код ветроелектрана највећих инсталисаних снага. На крају, потребно је описано решење испитати и на актуелним ветроелектранама у реалним условима, како би се верификовала његова ефикасност заштите.

5.7. Процена очекиваног броја година рада ветроелектране без оштећења елиса приликом директних атмосферских пражњења

У уводним поглављима докторске дисертације је објашњено да се локације на којима се обично инсталирају ветроелектране типично налазе у областима са израженим атмосферским пражњењима, и са просечним вредностима од 30 и више грмљавинских дана годишње. Досадашње статистике показују да 8 од 100 ветротурбина бива погођено директним ударом грома сваке године [35]. Наравно, да ли ће елиса или неки други истакнути део ветротурбине претрпети оштећење превасходно зависи од типа и начина на који је изведена громобранска и пренапонска заштита и од њене укупне ефикасности.

На основу извршене процене годишњег броја удара у типичну ветротурбину инсталисане снаге 3 MW у погонским условима (на локацијама са просечним вредностима керауничког нивоа), користећи добијене резултате приликом експерименталног испитивања на моделу ветротурбине и исечцима елиса пуне величине, и применом наведених комерцијалних софтверских алата (узимајући у обзир да је максимални радни век савремене ветротурбине 20–25 година), процењено је укупно време рада ветротурбине без значајнијих кварова изазваних директним атмосферским ударима, за различите примењене методе громобранске заштите.

У обзир су узете стандардне вредности параметара атмосферског пражњења, расподела и учесталост узлазних и силазних удара грома, карактеристике околне средине на потенцијалним локацијама погодним за изградњу ветроелектрана, типичне димензије ветротурбине инсталисане снаге 3 MW, и оптимална вредност брзине ротације елиса од 15-20 о/мин. Добијена је следећа оригинална емпиријска формула, на основу које се може извршити естимација колико дуго ветроелектрана може да ради без озбиљнијих оштећења на елисама, приликом директних удара грома:

$$B(t) = k_z \cdot T(t)^{n_R} \quad (5.2)$$

где су: $B(t)$ - очекивани број година рада ветротурбине без значајних оштећења елиса приликом директног удара грома, $T(t)$ [год.] - пројектовано време рада ветротурбине у



нормалним експлоатационим условима ($T(t)_{\max} \leq 25$ год.), k_z - константа којом су обухваћени начин пражњења, као и тип и ефикасност примењеног заштитног громобранског система на елисама, и n_R - параметар који узима у обзир променљиву брзину обртања елиса у функцији броја директних атмосферских пражњења у зони прихватног система на врховима елиса.

Процењене вредности параметара k_z и n_R , за типичне примењене методе громобранске заштите елиса ветротурбина су систематизоване у Табели 5.9. Када су на врховима елиса проводне капе, ефикасност заштите износи скоро 100%, утицај ротације елиса на смањење броја директних атмосферских удара је највише изражен, али долази до нарушавања аеродинамичких особина елиса. У најчешће коришћеној варијанти громобранске заштите, са инсталираним рецепторима дуж спољних површина елисе, ефикасност заштите је смањена, обртање елиса у нешто мањој мери утиче на учесталост пражњења, а такође је извршен минималан утицај на аеродинамичке карактеристике спољних површина елиса. У случају када су само спусни проводници инсталирани дуж обе ивице елисе, ефикасност заштите је најслабија, утицај ротације елиса је најмање изражен, а због погоршавања аеродинамичких перформанси елиса и компликоване монтаже овај начин заштите елиса од атмосферског пражњења је све мање у употреби.

Табела 5.9. Утицај брзине ротације елиса са инсталираним различитим типовима громобранских заштитних система на очекиван број година рада ветротурбине без значајнијих оштећења на елисама, која могу да настану због директног удара грома.

Тип примењене громобранске заштите на елисама ветротурбине		k_z	n_R
1.	Проводна капа на врху елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости.	$0,85 \leq k_z \leq 0,88$	$1 \leq n_R \leq 1,1$
2.	Систем рецептора на обе спољне стране елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости.	$0,82 \leq k_z \leq 0,84$	$1 \leq n_R \leq 1,07$
3.	GFRP елиса без инсталиране громобранске заштите, са системом спусних проводника дуж водеће и излазне ивице елисе.	$0,66 \leq k_z \leq 0,69$	$1 \leq n_R \leq 1,05$
4.	Систем рецептора на обе спољне стране елисе, проводне сегментиране траке у околини рецептора при врху елисе, мрежаста проводник у горњем слоју композита и спусни проводник у унутрашњости елисе.	$0,92 \leq k_z \leq 0,96$	$1 \leq n_R \leq 1,09$

На основу Табеле 5.9 и једначине (5.2) може се закључити да предложени оригинални унапређени систем заштите елиса ветроелектрана има укупно гледано најбоље перформансе у односу на остала решења. Ефикасност заштите је висока, утицај ротације елиса на смањење броја директних удара грома је приметан, аеродинамичке особине елисе су у великој мери очуване, а присуство мрежастог проводника у горњем композитном слоју конструкције елисе повећава њену издржљивост, без значајнијег утицаја на укупну дебљину елисе. Такође, омогућено је боље каналисање струје пражњења дуж спољних површина елиса и смањење настајања продора и пукотина на њеним врховима.



ПОГЛАВЉЕ 6

ФИЗИЧКО ТУМАЧЕЊЕ АНАЛИЗИРАНИХ ФЕНОМЕНА И ПРИМЕНА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА НА ВЕТРОЕЛЕКТРАНАМА ПУНЕ ВЕЛИЧИНЕ

Разматрањем карактеристика пражњења у дугачким ваздушним зазорима (теорија дугих прескока) може се дати физичко објашњење описаних феномена на врховима елиса ветротурбине за два карактеристична случаја: када су елисе стационарне ($w = 0$ о/мин) и када ротирају променљивом брзином ($w > 0$ о/мин). У овом поглављу извршена је анализа сложених физичких појава у асиметричном ваздушном зазору типа лучна електрода - ротирајуће елисе ветротурбине. Коментарисани су резултати високонапонских (ВН) испитивања добијени у лабораторијским условима, извршена је дискусија изведених закључака, и показано је да се главни резултати истраживања могу применити и на ветроелектранама великих снага које су у погону у реалним условима.

6.1. Стационарни режим рада ветротурбине ($w = 0$ о/мин)

У претходним поглављима докторске дисертације показано је на који начин се иницирају стримери и лидери са разних делова елиса ветротурбине и њихово спајање ради формирања узлазног лидера и настанка главног пражњења. Међутим, овакав начин успостављања канала грома углавном потиче са проводних и изложених делова ветротурбине који су добро уземљени, што значи да првенствено настају пражњења спољашњег типа. Анализирана пражњења са елиса ветротурбине на основу којих је успешно формиран узлазни лидер потичу директно са рецептора, или следе путању дуж спољне површине елисе. У случају директног удара грома у рецептор, конструкција и начин изведене громобранске заштите у виду система рецептора и спусних проводника одређују да ли ће елиса бити оштећена. Уколико канал пражњења има могућу путању дуж површине елисе у смеру ка рецептору, топлотни утицај на спољној површини елисе може бити критичан. У зависности од начина и карактеристика атмосферског пражњења и типа елисе развијена специфична енергија на спољној површини елисе била је у опсегу 3,1-3,3 MJ/Ω.

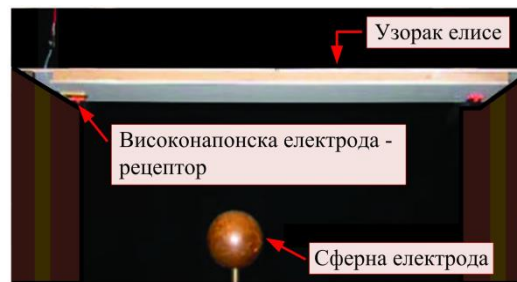
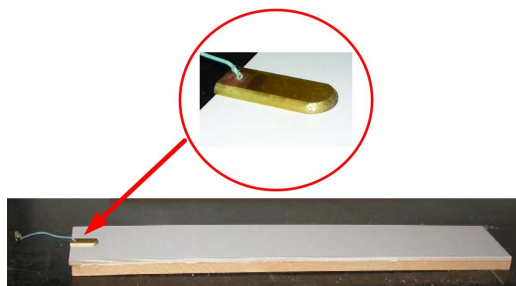
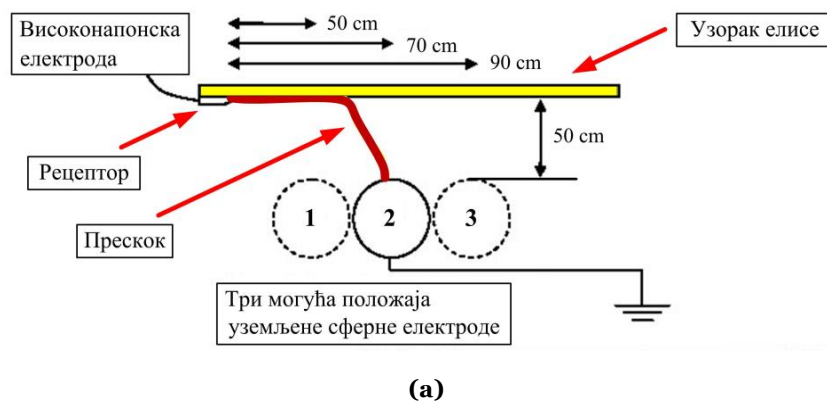
Ради додатног разматрања анализираних феномена обављени су допунски експерименти у високонапонској лабораторији са ударним генератором и испитном опремом која је описана у претходном поглављу. Потребно је прво детаљније разјаснити да ли површинске особине елиса ветротурбине од GFRP композитног материјала имају приметне ефекте на изабрану путању пражњења са рецептора према силазном лидеру. Тест процедура подразумева формирање и испитивање карактеристика дугих прескока који су иницирани са релативно једноставне конфигурације, коју чини хоризонтално постављен узорак испитиване елисе са високонапонском електродом у виду рецептора на њеном левом крају, према уземљеној сферној електроди – Слика 6.1(а)-(в).

Ситуација у којој силазни лидер, приближавајући се врху елисе ветротурбине иницира настајање узлазних лидера са рецептора, симулирана је примењујући таласни облик напона типа D на импровизованом рецептору [2]. Избором амплитуде напона који има довољно велику вредност да омогући настанак прескока са рецептора према уземљеној сфери, може се утврдити путања пражњења коришћењем видео камере и/или брзог фотоапарата. Када се иницира стример са ВН електроде (у овом случају са



рецептора) дуж површине испитиваног узорка елисе, долази до наношења и акумулације наелектрисања које је истог поларитета као и електрода. Већи део наелектрисања бива неутралисан у каналу пражњења, међутим пошто стримери могу да се простиру даље у односу на тачку одвајања канала пражњења са површине узорка, један део наелектрисања се може задржати на површини узорка елисе након искључивања напона – Слика 6.2(а). На описани начин извршено је испитивање већег броја узорка елиса са различитим површинским карактеристикама.

Ако дође до ефекта задржавања површинског наелектрисања на узорку елисе након првог пражњења у тренутку иницирања новог пражњења, може доћи до значајног утицаја на путању пражњења. Због тога се наелектрисања морају уклонити, што је учињено постављањем вентилатора на одређеној удаљености од испитиваног узорка, који је у стању да одува наелектрисања са површине. Након инсталирања вентилатора више није уочено заостало наелектрисање на површини узорка елиса.



Слика 6.1. (а) Испитна шема за тестирање прескока дуж површине узорка елисе и настанак пробоја у ваздушном зазору типа узорак елисе-сферна електрода у случају стационарне елисе. (б) Бакарно-месингана високонапонска електрода (рецептор) која је монтирана на једном крају испитиваног узорка. (в) Фотографија испитивања у високонапонској лабораторији [2].

Након монтирања узорка елисе и повезивања шеме веза, тест процедура се састојала од следећих корака:

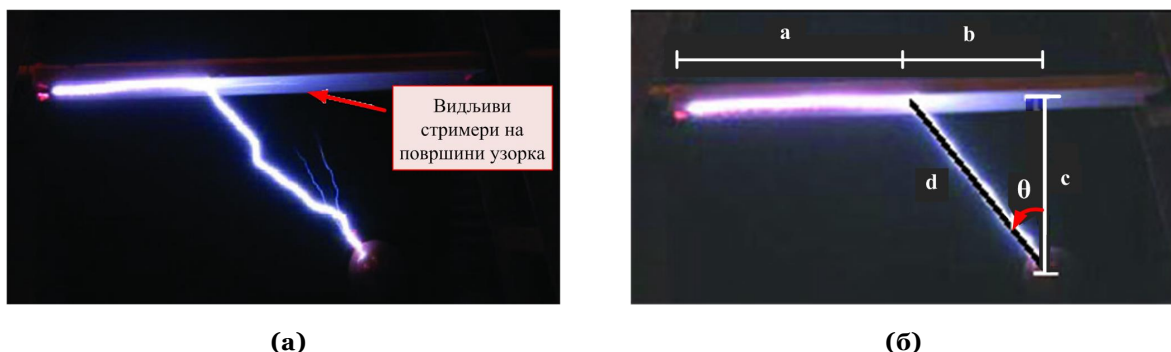
- 1) Подешавање ударног генератора да генерише пражњење позитивног поларитета са таласним облицима напона D типа до 250 kV.
- 2) Подешавање уземљене сферне електроде на удаљености 50 cm од рецептора.
- 3) Примена пет удара са рецептора који омогућавају прескок ка уземљеној сферној електроди.
- 4) Померање уземљене сферне електроде на удаљености 70 cm од рецептора.



- 5) Поновна примена пет удара са рецептора који омогућавају прескок ка уземљеној сферној електроди.
- 6) Померање уземљене сферне електроде на удаљености 90 cm од рецептора.
- 7) Поновна примена пет удара са рецептора који омогућавају прескок ка уземљеној сферној електроди.
- 8) Промена поларитета ударног генератора да произведе пражњење негативног поларитета са таласним облицима напона D типа до 500 kV и понављање корака 2-7.

Растојање сферне електроде у свим положајима у односу на узорак елисе било је подешено на 50 cm.

Свако пражњење је фотографисано како би се одредила вредност угла θ између дужи d (која полази од центра уземљене сфере до тачке где наелектрисање напушта површину узорка) и дужи c (од центра уземљене сфере нормално на површину узорка) - Слика 6.2(б). Може се закључити да скок позитивног наелектрисања настаје директно са високонапонске електроде према уземљеној сфери, без додира са површином узорка елисе, и да не зависи од удаљености између електрода. Негативно поларисана наелектрисања се простиру дуж површине узорка на одређеном растојању, које зависи од позиције уземљене сфере, и потом долази до њиховог скока ка сфери. Рачунајући однос дужине путање пражњења које следи површину узорка елисе и укупне дужине узорка $t = a/(a+b)$, добијају се приближно константне вредности – Слика 6.2(б).



Слика 6.2. (а) Стримери се простиру у продужетку тачке одвајања канала негативног поларисаног пражњења са површине узорка елисе. (б) Дефиниција угла θ и осталих битних параметара коришћених у тестовима прескока дуж површине узорка елисе.

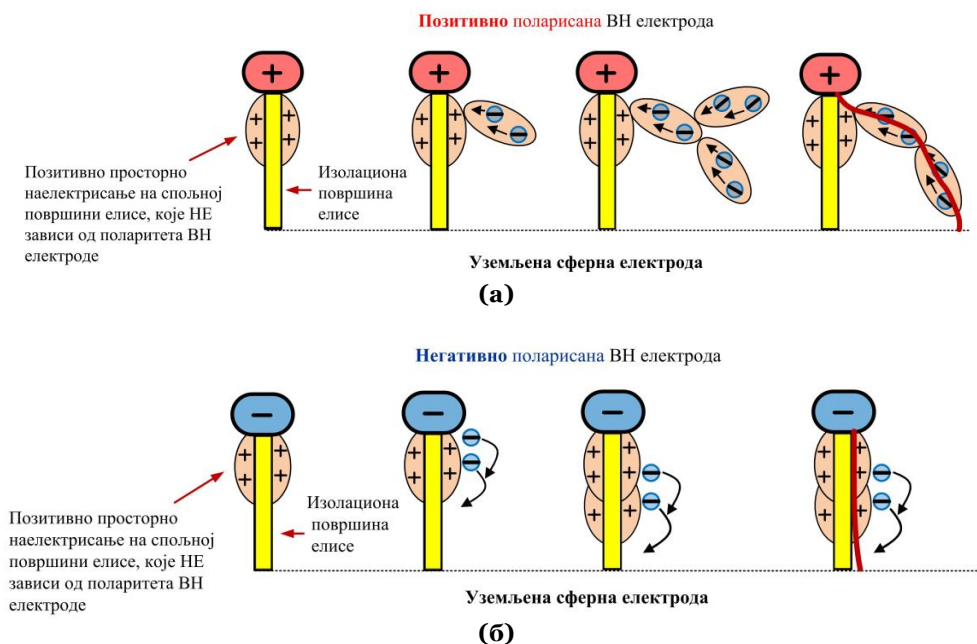
Могуће објашњење анализираних појава може се наћи у литератури на основу разматрања теорије пражњења у дугим ваздушним зазорима [75]-[76]. Познато је да у зазорима типа побуђена електрода–уземљена равна проводна плоча заостало просторно наелектрисање након појаве прве короне у близини електроде омогућава да се следећа корона простире ка спољним крајевима. С обзиром да наредно формирање лидера настаје из те друге короне, пражњење у виду прескока скоро никада не следи праву линију између електрода.

Када се помоћу изолационе штапне електроде премости ваздушни зазор између побуђене штапне електроде (која има улогу ВН електроде) и уземљене плоче, просторно наелектрисање са прве короне, које има исти поларитет као и ВН електрода, нагомилава се на изолационој површини електроде. Ово ће довести до одбијања друге короне од површине, формирајући прескок даље од изолационе електроде, за напоне оба поларитета. Међутим, парцијална пражњења дуж површине ће образовати слободне електроне због ефекта фото-јонизације, остављајући по површини позитивно



наелектрисање које није условљено поларитетом ВН електроде. Ово позитивно просторно наелектрисање на површини ће бити увећано као последица учешћа новонасталих електрона у лавинским процесима. Због тога, при позитивном поларитету напона, друга корона и самим тим и прескок ће бити одбијени од површине, док ће за негативан поларитет напона, пражњење бити привучено од стране позитивног наелектрисања на површини [77].

Наведена разматрања су примењена и приликом анализе резултата добијених на основу физичког модела који је предмет докторске дисертације. На Слици 6.3 приказана је разлика између позитивно и негативно поларисаног пражњења дуж спољног површинског слоја елисе, који је израђен од изолационог композитног материјала. У случају када је ВН електрода побуђена позитивним напонам, електрично поље у близини позитивно наелектрисаног просторног наелектрисања на површини елисе јонизује околни ваздух и привлачи електроне ка аноди, остављајући просторно наелектрисање које је позитивно поларисано на површини елисе у близини ВН електроде. Овакве путање са наелектрисањима у облику танке разгранате мреже формиране у областима са позитивним просторним наелектрисањем премашавају ваздушни зазор и коначно доводе до пражњења. Дакле, позитивна наелектрисања бивају одбијена од позитивног просторног наелектрисања на површини узорка елисе и због тога се не простиру по његовој површини.



Слика 6.3. Разлике између позитивно и негативно поларисаног пражњења дуж изолационе површине елисе. **(а)** Позитивна наелектрисања се одбијају од позитивног просторног наелектрисања на површини елисе и директно скачу са ВН електроде ка уземљеној сфери не додирујући спољну површину елисе. **(б)** Негативна наелектрисања су привучена од стране позитивног просторног наелектрисања, и простиру се дуж површине елисе на одређеном растојању пре него што дође до скока према уземљеној сфери.

Разматрајући негативно поларисано пражњење, електрони настали у току процеса јонизације у околини ВН електроде су привучени према позитивном просторном наелектрисању на површини. Ови електрони изазивају јонизацију молекула ваздуха у близини површине елисе, што доводи до ширења позитивног просторног



наелектрисања ка уземљеној електроди. Новонастали електрони се стварају у близини изолационе површине због ефекта фото-јонизације, што доводи до финалног премошћавања ваздушног зазора дуж површине елисе.

Поређењем резултата који су добијени у ВН лабораторији испитивањем узорак елиса на чијем је површинском слоју примењено вештачко загађење сувог типа, у односу на случајеве када су елисе биле потпуно чисте, могу се проценити ефекти присуства сувог проводног слоја на површини елисе. Уочено је да присуство површинских проводних нечистоћа на елисама не представља повећан ризик у односу на случај незапрљаних елиса. Начини пражњења позитивног и негативног поларитета су били веома слични у оба анализирана случаја. Када се ради о влажним површинама елиса, присуство релативно високо проводног слоја у случају влажног вештачког загађења, које је примењено на површинском слоју елиса, доводи до тога да се у случајевима позитивног пражњења, добијају мање вредности угла θ , који је дефинисан на Слици 6.2(б).

Поређењем случајева када је спољна површина елисе сува и/или влажна може се закључити да су вредности угла θ које су добијене при напону негативног поларитета на електроди и за суву површину елисе (чиста површина и суво вештачко загађење) скоро 70% веће у односу на вредности које су израчунате за влажне површине елиса (вештачка киша и влажно вештачко загађење) за исти поларитет напона. Овај ефекат је приказан у Табели 6.1, где су средње вредности угла θ добијене при негативном напону електроди и за оба начина загађења површине елисе. Важно је напоменути да су вредности угла θ у случају пражњења позитивног поларитета приближно константне, и да не зависе од присуства влаге на површини елиса.

Табела 6.1. Компарација површинских карактеристика елиса за суву и влажну средину, приликом пражњења негативног поларитета.

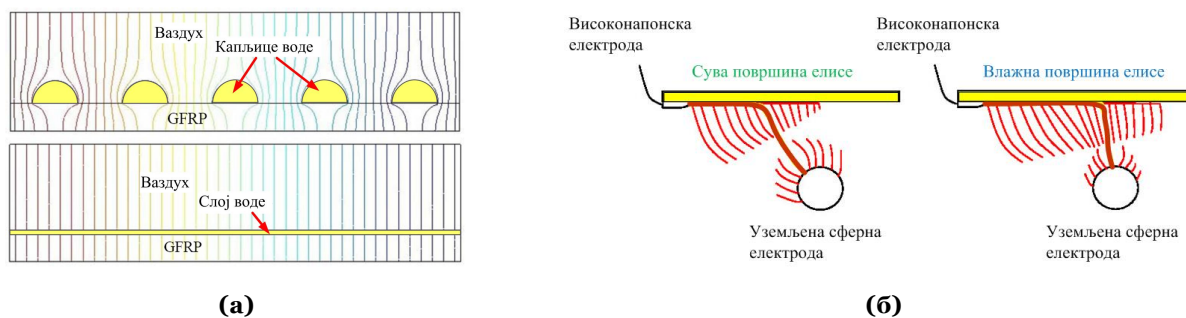
Површинске особине елисе	Средња вредност угла θ [°]
Сува површина елисе (Чиста површина и суво вештачко загађење)	24
Влажна површина елисе (Вештачка киша и влажно вештачко загађење)	13

Присуство проводне влаге у облику капљица на површини елисе у одређеној мери повећава брзину пропагације стримера дуж њене површине – Слика 6.4(а) [2]. Овај ефекат значи да се стримери дуж целе влажне површине одвајају готово истовремено, и потом се сусрећу са узлазним стримерима са уземљене сферне електроди на најкраћем могућем растојању. Пропагација стримера дуж суве површине је много спорија, омогућавајући њихово емитовање ближе ка ВН електроди. Такође, простиру се дуже у ваздушном зазору у поређењу са стримерима чије иницирање је ближе ка уземљеној сфери (Слика 6.4(б)).

Примењујући резултате који су добијени на основу анализе понашања узорак елиса у стационарном режиму на елисе ветроелектрана које су у реалним погонским условима, може се закључити да је од велике важности извршити оптимизацију хидрофобних својстава елиса када су у питању негативна површинска наелектрисања



(позитивни удари) [2]. На влажним хидрофобним узорцима пражњење има тенденцију да следи површину елисе дуж растојања које има већу дужину, и на тај начин се спречава ризик од термичких оштећења. Међутим, пошто се провођење струје пражњења најчешће јавља у проводној плазми изнад површине елисе, као што је то случај са проводним сегментираним прихватним тракама у продужетцима рецептора (чиме се повећава укупна ефективна површина за прихват струје грома), топлотни утицај на спољној површини елисе је обично минималан.



Слика 6.4. (а) 2D симулација расподеле тангенцијалне компоненте електричног поља дуж спољне површине елисе. Када су на површини формиране капљице воде јако електрично поље је сконцентрисано у њиховој околини, где долази до јонизације ваздуха и стварања проводне плазме за проток наелектрисања (на сличан начин функционишу и проводне попречне траке у околини рецептора - *diverter strips*). Значајно смањен прескочни напон омогућава распрострањавање наелектрисања дуж површине елисе на најкраћем могућем (ортогоналном) растојању у односу на уземљену сферу. Равномерни слој воде на површини елисе не утиче на расподелу поља (ситуација је слична као у случају чисте елисе). Такође, када је површина елисе задрљана сувим вештачким загађењем показује исте особине као и чиста елиса. (б) Поређење начина пражњења за стримере негативног поларитета на сувој и влажној површини елисе. Коначна брзина пропације стримера дуж суве површине елисе омогућава њихово одвајање од површине ближе у односу на ВН електроду. Стримери се простиру дубље у ваздушном зазору, у поређењу са стримерима који напуштају површину елисе нешто даље од ВН електроде. На влажним површинама елисе брзина пропације стримера је већа, што доводи до тога да разлика у дужини стримера који су иницирани са различитих тачака дуж површине елисе није толико значајна.

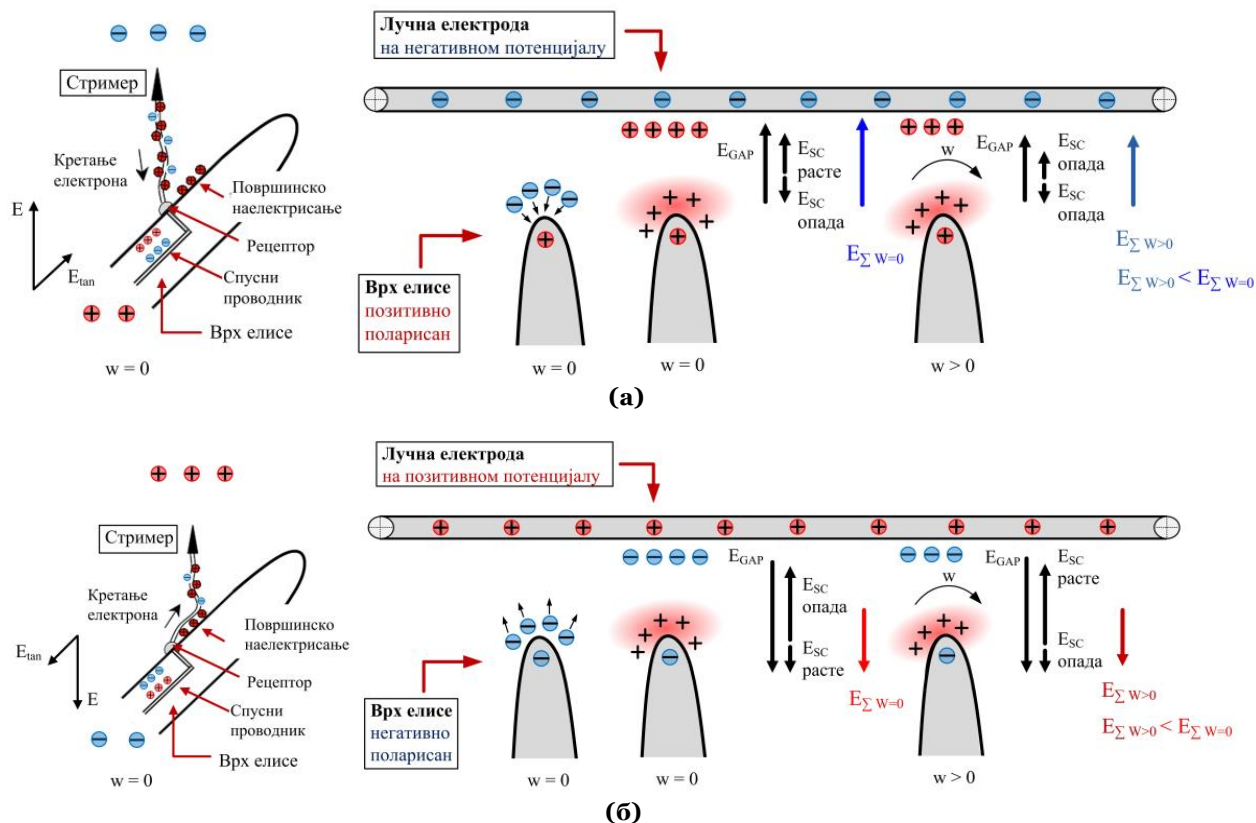
6.2. Режим ротирања елиса ветротурбине ($w > 0$ о/мин)

Како би се додатно размотрили резултати експерименталног истраживања, који су приказани у претходном поглављу, извршиће се анализа расподеле просторног наелектрисања и електричног поља између лучне електроде и ротирајућих елиса модела ветротурбине. Као што се може видети из Табеле 5.4, у којој су представљени резултати добијени на основу мерења, позитивно поларисано пражњење се иницира са рецептора ка електроди са негативним 50% прескочним напонима (ПН) чије су вредности између: -1109,3 и -1223,8 kV, -1143,8 и -1246,5 kV, и -1608,4 и -1708,2 kV за СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно. Такође, негативно поларисано пражњење захтева приближно двоструко већи 50% ПН (чије вредности износе између: 2118,8–2459,9 kV, 2164,2–2488,7 kV, и 3039,8–3325,5 kV за СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно), и има путању ближе површини елисе. Разлог за различите путање пражњења се може објаснити на основу расподеле позитивног просторног наелектрисања на спољној површини елисе ветротурбине за пражњења оба поларитета. Разлика у амплитуди ПН настаје због веома нехомогеног електричног поља и изражене покретљивости електрона у односу на позитивне јоне [56].

Када је врх елисе позитивно поларисан (лучна електрода на негативном потенцијалу) и када елисе мирују (брзина обртања $w = 0$ о/мин), јонизовани електрони у околини врха елисе ће бити привучени ка аноди (рецептор) – Слика 6.5(а). Преостала



позитивна просторна наелектрисања доводе до смањења јачине електричног поља у околини врха елисе, али такође повећавају поље у осталом делу ваздушног зазора. Пошто електрично поље у централном делу зазора има релативно велике вредности, због присуства просторног наелектрисања, иницирање стримера са врха разматране елисе доводи до пробоја, при чему су одговарајуће вредности 50% ПН: -1109,3 kV, -1143,8 kV и -1608,4 kV за СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно.



Слика 6.5. Карактеристике просторног наелектрисања које се генерише у околини врхова елиса и резултујуће електрично поље у асиметричним ваздушним зазорима, при променљивим брзинама ротирања елиса: $w = 0$ о/мин, и $w > 0$ о/мин. **(а)** Врх елисе је на позитивном потенцијалу. **(б)** Врх елисе је на негативном потенцијалу. Када су врхови елиса на позитивном потенцијалу пропација стримера се одвија у ваздуху изнад рецептора, а у случају негативно поларисаних врхова елиса претежно дуж њихове спољне површине. На ваздушном притиску од око 1 бар и при усвојеној вредности електричног поља непосредно у околини иницирања пражњења од 1 kV/mm, средња вредност брзине електрона је око 0,1 m/ μ s, а позитивних јона 10^{-4} m/ μ s, и због примене склопних прескочних напона D типа 250/2500 μ s електрично поље након формирања стримера углавном зависи од споро покретљивих јона. **Напомена:** E_{GAP} – јачина електричног поља у ваздушном зазору, E_{sc} – јачина поља услед присуства просторног наелектрисања, E – укупна јачина примењеног поља.

Међутим, резултујуће електрично поље има нешто ниже вредности када елисе ротирају ($w > 0$ о/мин) у односу на случај када су непомичне. Дакле, примењени ударни напон на ВН електроди мора имати веће вредности са циљем да се постигне пробојно електрично поље које ће омогућити прескок према лучној електроди (детектоване вредности 50% ПН су: за СЛУЧАЈ I -1144,7 kV за $w = 250$ о/мин, и -1223,8 kV за $w = 400$ о/мин; за СЛУЧАЈ II -1176,5 kV за $w = 250$ о/мин, и -1246,5 kV за $w = 400$ о/мин; за СЛУЧАЈ III -1637,6 kV за $w = 250$ о/мин, и -1708,2 kV за $w = 400$ о/мин).

Разматрајући врхове елиса када су негативно поларисане (лучна електрода на позитивном потенцијалу), и у случају када су елисе непомичне ($w = 0$ о/мин), може се закључити да ће електрони настали у процесу јонизације на врху елисе бити одбијени



према областима мањих вредности електричног поља, и такође ће бити апсорбовани од стране молекула гаса, или на лучној електроди (Слика 6.5(б)). Позитивно просторно наелектрисање које је заостало у ваздушном зазору значајно повећава електрично поље у околини врха елисе, што доводи до тога да се стримери иницирају на нижем потенцијалу у односу на случај када су елисе позитивно поларисане.

Пошто је електрично поље, које потиче од слободних електрона који су лоцирани у близини лучне електроде, као и од позитивног просторног наелектрисања у околини врха елисе, орјентисано у супротном смеру у односу на електрично поље настало без присуства просторног наелектрисања, резултујуће поље је значајно мање када су врхови елиса негативно наелектрисани, у односу на случај када су на позитивном потенцијалу. 50% ПН у случају стационарних елиса (брзина ротације $\omega = 0$ о/мин) има следеће вредности: 2118,8 kV, 2164,2 kV и 3039,8 kV за СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно. Када се ротор испитиваног модела ветротурбине обрће ($\omega > 0$ о/мин), резултујуће електрично поље има нешто мање вредности у односу на случај када је ротор непомичан, и примењени ударни склопни напон негативног поларитета има веће вредности (50% ПН је: за СЛУЧАЈ I 2231,1 kV за $\omega = 250$ о/мин, и 2459,9 kV за $\omega = 400$ о/мин; за СЛУЧАЈ II 2270,2 kV за $\omega = 250$ о/мин, и 2488,7 kV за $\omega = 400$ о/мин; за СЛУЧАЈ III 3121,8 kV за $\omega = 250$ о/мин, и 3325,5 kV за $\omega = 400$ о/мин).

6.3. Дискусија

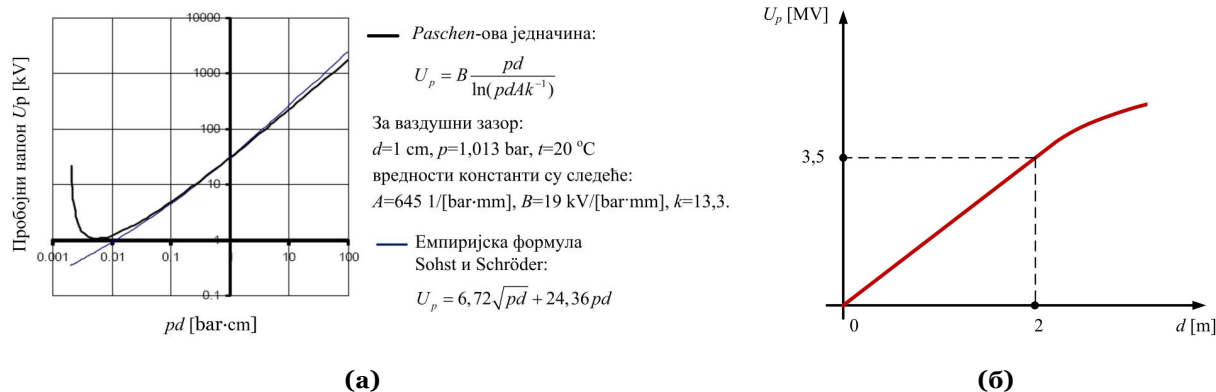
До сада је у литератури, са теоријске тачке гледишта, веома мало третиран пробој у неуниформном и нестационарном електричном пољу које настаје кретањем лидера. Електрично поље које ствара атмосферско пражњење је веома неуниформно. Оно је јако у бази облака и слабо на површини земље. С обзиром да пробој настаје у подручју јачег поља, атмосферско пражњење се мора простирати од подручја јаког поља ка областима слабијег поља, да би достигло површину земље.

За описивање комплетног пражњења у ваздушном зазору типа лучна електрода – врх ротирајуће елисе (који симулира супотно поларисану электроду) присуство просторног наелектрисања у виду генерисаних електрона и јона има веома важну улогу. Приликом моделовања електричног пражњења у ваздушном зазору у лабораторијским условима кренуло се од *Paschen*-овог закона, који описује зависност пробојног напона U_P од производа pd (p [bar]-притисак у ваздушном зазору, d [cm]-међуелектродно растојање). Међутим, *Paschen*-ова крива (у облику слова U са минималним пробојним напонам на одређеној вредности производа pd) важи у ваздушним зазорима малих дужина између паралелних електрода, у којима је електрично поље униформно, при чему преовлађује *Townsend*-ов механизам иницирања прескока – Слика 6.6(а) [25] [77].

Пошто су високонапонски тестови на моделу ветротурбине извршени у дугачком зазору ($d \geq 1$ m), као и због очекиваних прескочних напона већих вредности ($U_P \geq 1$ MV) и немогућности варирања притиска у високонапонској лабораторији, због њене величине и огромне запремине ваздуха у зазору, моделовање је урађено на основу оригиналне емпиријске криве са Сlike 6.6(б), која је добијена експерименталним путем у току израде докторске дисертације, узимајући у обзир податке о прескочним напонима за одређене вредности међуелектродног растојања, и при притисцима у ваздушном зазору који су били нешто нижи од нормалног атмосферског притиска (1,013 bar = 1013,25 mbar = 101325 Pa = 760 mm Hg).



Иницирање стримера са врха ротирајуће елисе и симулација врха скоковитог лидера у претпоследњем скоку са лучне електроде одвијало се при 50% прескочним склопним позитивним напонима до 3,5 MV (до 1,8 MV за негативне прескочне напоне) у функцији готово линеарне промене међуелектродног растојања до 2 m, а са даљим повећањем растојања између електрода долазило је до благог засићења пробојног напона.



Слика 6.6. (а) Иницирање прескока у кратким ваздушним зазорима у функцији производа притиска и дужине зазора. **(б)** Пораст позитивних склопних прескочних напона у функцији међуелектродног растојања у дугим зазорима у ВН лабораторији.

Прва чињеница коју је потребно истаћи је, да се резултати који су добијени приликом анализе и компарације примењених заштитних громобранских система на елисама умањеног модела ветротурбине, у великој мери поклапају са лабораторијским тестовима на елисама пуне величине, које су израђене од GFRP композита и са прихватним системом у облику рецептора и спусних проводника.

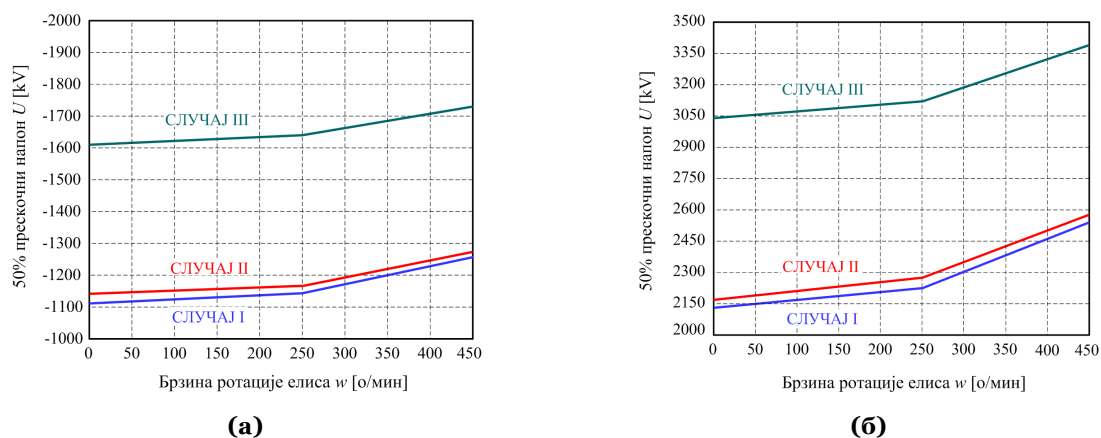
Експериментални резултати другог дела истраживања показују следеће: истовремено са повећањем брзине ротације елиса модела ветротурбине, број директних удара у врхове елиса се смањује, када пражњење погоди капу/рецептор директно, или настане продор/оштећење у околини прихватног система. Утицај ротације елиса на особине пражњења постаје доминантнији са повећањем брзине ротације и више је приметан у случајевима позитивних пражњења – Слика 6.7. Такође, метода горе–доле, која је примењена за одређивање 50% прескочних склопних напона у лабораторијским условима, је поуздана метода на основу које се у великој мери могу симулирати директна атмосферска пражњења, са великим бројем удара током дужег временског трајања у реалним условима.

У претходном Поглављу је објашњено, да константно повећање прескочних напона настаје због специфичне расподеле просторног наелектрисања у околини врхова елиса, када оне ротирају променљивом брзином, у односу на случај када су стационарне. При брзини ротације $\omega = 250 \text{ o/мин}$ врх елисе се помери за 6,3 mm током временског периода од 200 μs , док ударни напон не достигне потребну вредност на којој се дешава прескок. У појединим случајевима пражњења, врхови елиса се помере врло мало у току периода у коме примењено електрично поље постаје довољно интензивно да иницира појаву короне на елиси. Пораст 50% ПН при брзини ротације елиса $\omega = 250 \text{ o/мин}$ (што одговара ветровима умерене јачине) у поређењу са случајем када су елисе непомичне је релативно мали (око 3%).



Важно је нагласити да се при брзини ротације $\omega = 400$ о/мин (номинална брзина ротора) врх елисе помери за око 1 cm у току временског периода од 200 μ s и повећање 50% ПН у односу на брзину $\omega = 0$ о/мин је значајно (реда величине око 10%). У овом случају долази до помераја иницијалног лидера дуж површине елисе за одређено кратко растојање (ефекат прелаза муње), пре него што се деси први удар. Првобитно јонизовани канал пражњења може да се помери, због удаљавања врха ротирајуће елисе од почетка канала, и на тај начин да доведе до повећања његове укупне дужине.

Ради што већег искоришћења снаге ветра, управљачки системи управљају радом ветротурбине тако да она ради са номиналном брзином обртања у што дужем временском периоду током године, и самим тим ће утицај ротације елиса на особине пражњења бити израженији. Укупни ефекат повећане дисперзије просторног наелектрисања у зони прихватног система на елисама ветротурбине, који је проузрокован израженом циркулацијом и струјањем ваздуха у околини врхова елиса, је израженији у овом случају.



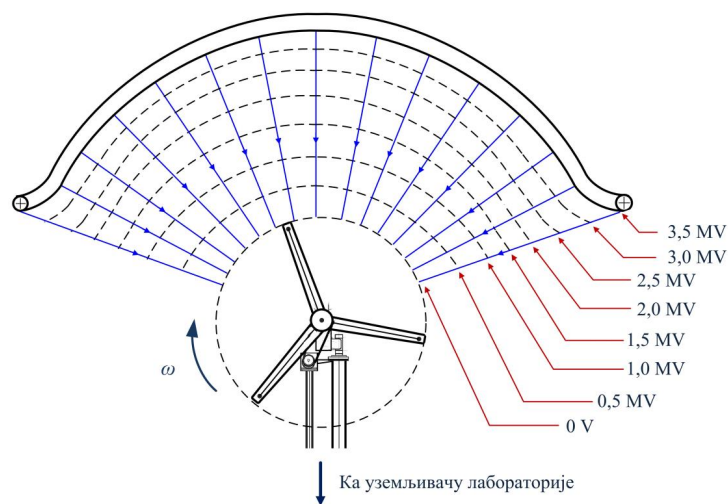
Слика 6.7. Утицај ротације елиса на 50% прескочне напоне. **(а)** За ударне напоне негативног поларитета. **(б)** За ударне напоне позитивног поларитета.

У претходним поглављима је детаљно образложено да избор оригинално пројектоване лучне електроде представља оптимално решење за проучавање феномена пражњења на врховима ротирајућих елиса у лабораторијским условима. Електрично поље у ваздушном зазору је приближно униформно током обртања елиса (Слика 6.8), а у стационарном стању очекивано се повећава степен неуниформности поља у зазору у зависности од позиције елиса. Међутим, када се ротор ветротурбине обрће већом брзином, статистички постоји већа могућност да једна од елиса током ротације буде позиционирана у близини краја лучне електроде, у тренутку тригерована ударног генератора, у односу на случај када се елисе врте малом брзином, или када су укочене.

Интензитет електричног поља у околини врхова елиса, због нешто веће густине просторног наелектрисања на крајевима лучне електроде, има најмање вредности када је једна елиса позиционирана вертикално на горе ($\alpha = 0^\circ$), и нешто веће вредности када једна елиса има положај вертикално на доле ($\alpha = 180^\circ$). Да би се описани ефекти минимизирали лучна електрода је тако конструисана да има укупну лучну дужину која је нешто већа од 120° и њени крајеви су благо закривљени. Такође, када елисе ротирају уочена је скоро равномерна расподела прескочних напона оба поларитета дуж лука електроде, што потврђује да је електрично поље у ваздушном зазору између лучне електроде и врхова ротирајућих елиса прилично униформно.



Закључак да постоји мања вероватноћа да ротирајуће елисе буду погођене директним пражњењем у односу на елисе које мирују је добијен на основу испитивања карактеристичних снимака прескока. Уочене су позиције иницирања пражњења дуж лучне електроде и детектована су места тачака спајања узлазног и силазног лидера у ваздушном зазору дужине 2 m између лучне електроде и ротирајућих елиса. Свака тест процедура током дуготрајног испитивања је снимана помоћу две дигиталне камере, али одређен број снимака прескока није могао да буде добијен са задовољавајућим квалитетом, због тога што су елисе углавном ротирале прилично великом ротационом брзином у опсегу 200–400 о/мин.

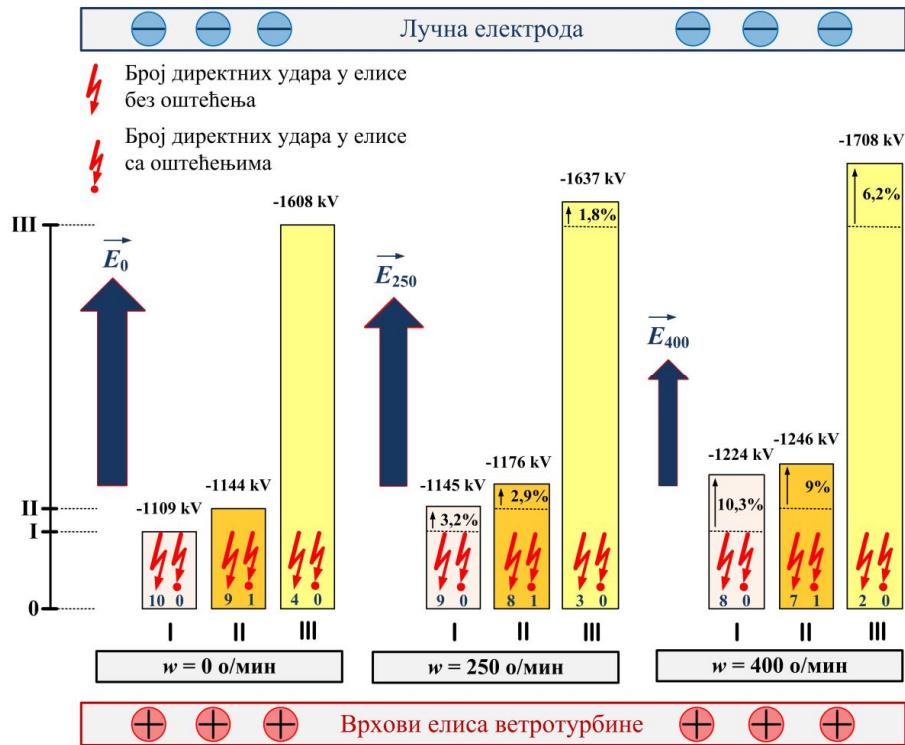


Слика 6.8. 2D симулација еквипотенцијалних линија и линија електричног поља у ваздушном зазору типа позитивно поларисана лучна електрода – врхови ротирајућих елиса.

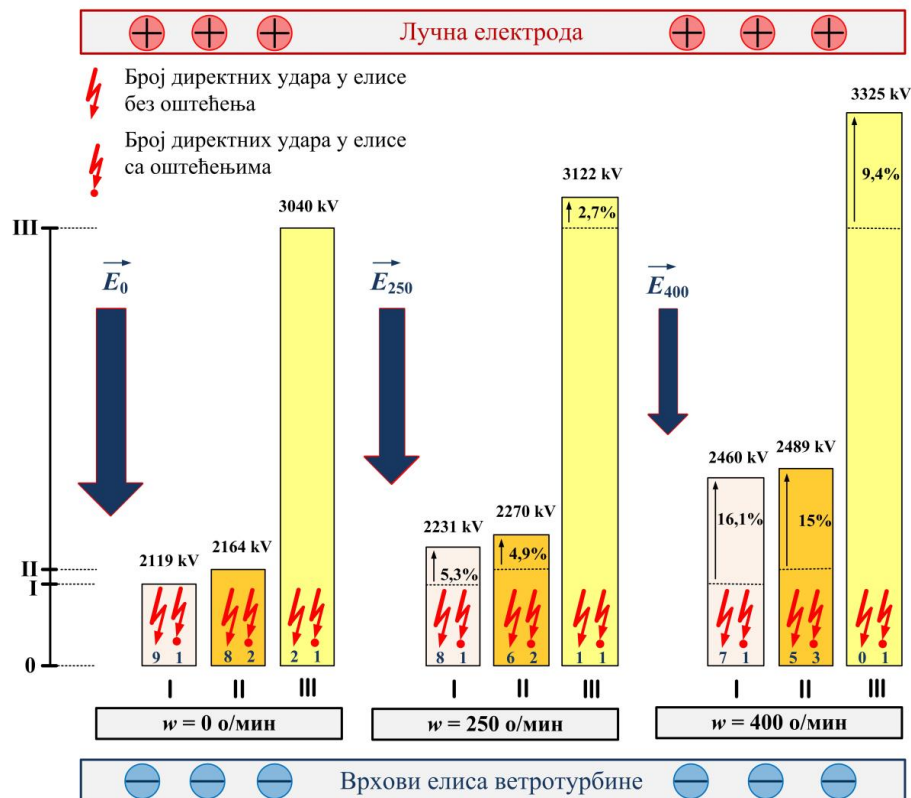
Уочена је тенденција да се истовремено са повећањем брзине ротације елиса, тачке спајања лидера са лучне електроде и одговарајуће елисе, померају нешто ближе ка врху елисе. На овај начин је потврђено да приликом повећавања ротационе брзине елиса, а због специфичне расподеле просторног наелектрисања на њеним врховима, долази до смањења укупног електричног поља у ваздушном зазору типа лучна електрода–врх ротирајуће елисе, што резултује већим потребним вредностима прескочних напона да би се омогућио прескок.

На основу спроведеног целокупног теоријског и експерименталног истраживања, може се закључити да су укупни ефекти анализираних феномена пражњења, при брзинама ротације елиса $\omega = 250$ о/мин и 400 о/мин, и за оба поларитета ударног напона, скоро идентични (Слика 6.9). Због приличне сложености примењене теорије скалирања, а ради додатне потврде, извршени су и експерименти на моделу ветротурбине при малој брзини обртања елиса ($\omega = 50$ о/мин). Такође су добијени резултати који су у складу са наведеним. Добијени крајњи резултати потврђују генерални закључак о различитој осетљивости ротирајућих елиса на број и особине пражњења, у односу на случај када ротор мирује, и могу се применити и на актуелним ветроелектранама са хоризонталном осом које су у погону у реалним условима.

Напомена - препорука: На основу целокупног истраживања у току израде докторске дисертације произилази коначна препорука да током невремена са грмљавином и појачаним ветром не треба смањивати брзину ротације елиса ветротурбине (до критичне брзине), јер се на тај начин умањује број директних удара у зони прихватног система на елисама и редукују се штетни ефекти који могу да настану.



(a)



(б)

Слика 6.9. Пораст вредности прескочних напона, смањење електричног поља у ваздушном зазору типа лучна електрода–врхови елиса ветротурбине, и смањење броја директних удара на елисама, упоредо са повећањем брзине ротације елиса за анализиране СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно. **(a)** За ударне напоне негативног поларитета. **(б)** За ударне напоне позитивног поларитета.



ЗАКЉУЧЦИ, НАУЧНИ ДОПРИНОСИ И БУДУЋИ РАД

Оригинална теоријска разматрања, обављено ново и веома сложено, изазовно и финансијски захтевно експериментално истраживање, развој нумеричких поступака, и примена софтверских алата, омогућили су да се у докторској дисертацији на квалитетан начин изврши анализа метода за заштиту ветроелектрана од директних атмосферских удара. Истраживања која су спроведена у току израде докторске дисертације су мултидисциплинарна, јер обухватају добро познавање следећих области: техника високог напона, ветроенергетика, физика атмосферских пражњења и громобранска заштита.

Утицај ротације елиса ветротурбине на атрактивну зону се до сада није систематски проучавао. Зато је посебан акценат стављен на оригиналном испитивању да ли ротирање елиса ветротурбине променљивом брзином утиче на број и особине директних атмосферских пражњења у зони прихватног система на врховима изолационих и/или делимично проводних елиса, што је потпуна новина у стручној литератури. Извршене анализе и добијени закључци треба да допринесу бољем разумевању одређивања могућих тачака удара грома на врховима елиса ветротурбина и пројектовању ефикаснијих заштитних громобранских система елиса. Велики број специфичности атмосферског пражњења у присуству ветроелектрана које су први пут у свету истражене током израде докторске дисертације олакшаће даљи развој метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.

7.1. Главни закључци и научни доприноси докторске дисертације

Докторска дисертација представља оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблема громобранске заштите ветроелектрана. Такође, у току израде докторске дисертације дошло се до оригиналних, проверљивих, поновљивих и у пракси применљивих резултата. Резултати истраживања аутора у иностранству и земљи су од великог значаја, како са научне тачке гледишта, тако и са становишта њихове практичне примене.

Главни закључци и научни доприноси који су дати у докторској дисертацији, која је настала као резултат вишегодишњег рада аутора, могу се класификовати на следећи начин.

- 1) Спроведено је оригинално експериментално истраживање анализе утицаја ротације елиса ветротурбине на карактеристике директног атмосферског пражњења.
- 2) За потребе истраживања конструисан је оригиналан физички модел са лучном електродом која симулира врх скоковитог лидера у претпоследњем скоку. Овом методом је постигнуто да ударно растојање између врха (главе) скоковитог лидера и елисе буде независно од њеног положаја. Иницирање развоја пражњења ка елисама описаног модела ветротурбине је независно од позиције елиса. Анализа и провера веродостојности коначних резултата, које су извршене током истраживања, потврдиле су да избор лучне електроде представља оптимално решење за испитивање модела ветротурбина.



- 3) Користећи модел ветротурбине мале снаге са хоризонталном осом и са инсталираним различитим варијантама громобранских заштитних система на елисама (умањена верзија савремене ветротурбине) у лабораторијским условима детектовано је смањење броја директних удара у зони прихватног система на елисама ветротурбине када се ротор обртао, у односу на случај када су елисе биле стационарне.
- 4) Током експерименталних истраживања запажени су одређени важни ефекти:
 - У ваздушном зазору између лучне електроде и ротирајућих елиса ветротурбине истовремено са повећањем брзине обртања елиса забележено је смањење вредности резултујућег електричног поља и пораст 50% прескочних напона оба поларитета добијених на основу методе горе-доле.
 - Прегледом снимљеног видео материјала и на основу фотографија прескока примећено је да, упоредо са повећањем ротационе брзине елиса, долази до померања тачака спајања лидера са врхова одговарајућих елиса и лучне електроде нешто ближе ка врховима елиса.
 - Уочена је повећана дисперзија прескочних напона и приметно изражена транзијентност ударних напона током ротирања елиса ветротурбине. Наведени ефекти постајали су доминантнији са повећањем ротационе брзине и били су израженији код тестова са позитивним пражњењима.
 - Показано је да на влажним хидрофобним узорцима елиса негативно пражњење има тенденцију да следи површину елисе дуж растојања које има већу дужину, и на тај начин се спречава ризик од термичких оштећења.
- 5) Лабораторијско истраживање је показало да се добијени резултати на моделу ветротурбине у стационарном стању (када елисе мирују) у потпуности поклапају са резултатима истраживања која су извршена на елисама пуне величине. Ово је изузетно битна чињеница, јер потврђује тачност добијених резултата и приликом експеримената са ротирајућим елисама модела ветротурбине. Такође, извршени експерименти се могу обављати и у мањим високонапонским лабораторијама, што је од велике важности.
- 6) Извршена је компарација различитих заштитних система од директног удара грома на врховима елиса умањеног модела ветротурбине. Ефикасност примењених громобранских заштитних система је била релативно висока и добијени резултати су у великој мери у складу са заштитом ветроелектрана од директног атмосферског пражњења у реалним условима. Показано је да прихватни систем у облику проводних капа на врховима елиса има већу ефикасност заштите у односу на рецепторски заштитни прихватни систем. Електрично пражњење негативног поларитета са лучне електроде је погађало проводне капе/рецепторе у скоро 100% случајева и при свим разматраним брзинама ротације елиса. Са друге стране, позитивна пражњења у више наврата су изазивала оштећења/напрснућа на изолационој површини елиса, јер су се удари дешавали мимо заштитних система у облику капа/рецептора.



- 7) На основу симулације рада ветроелектрана у реалним условима, обављеног испитивања на физичком моделу у лабораторијским условима и анализе различитих концепата заштите ветротурбина од удара грома, предложен је унапређен принцип заштите ветроелектрана од директног атмосферског пражњења.
- 8) Предложен је оригиналан начин естимације очекиваног броја година рада ветроелектране без значајнијих оштећења елиса за различите примењене методе заштите од директног удара грома, узимајући у обзир стохастичку природу ветра, карактеристике атмосферског пражњења и кераунички ниво потенцијално погодних локација за изградњу ветроелектрана, при чему су анализе извршене за неколико карактеристичних брзина обртања елиса.
- 9) Добијени општи резултати и закључци се могу применити на актуелним ветроелектранама које су у погону, јер на основу теорије сличности и применом описане нове методологије све анализе које су спроведене на умањеном моделу ветротурбине, који је веран оригиналу, одговарају реалним условима приликом рада савремених ветроелектрана. Због изузетне сложености истраживања и мултидисциплинарног приступа потребно је додатно проверити и потврдити добијене резултате у пракси. Такође, важно је да се изврше и допунска испитивања у оквиру будућег рада. Предложене методе за процену угрожености елиса ветротурбине од удара грома и развијени принципи испитивања до сада нису постојали, па се може очекивати да буду шире коришћени приликом даљег развоја громобранске заштите ветроелектрана.
- 10) Оригинална анализа метода за заштиту ветроелектрана од директног атмосферског пражњења, која је спроведена у току израде докторске дисертације, представља важан корак у истраживању у области даљег развоја громобранске заштите елиса ветроелектрана, јер јасно указује да ротација елиса има приметан утицај на учесталост и карактеристике атмосферског пражњења у зони прихватног система на врховима елиса. Зато је неопходно извршити корекције постојећих нумеричко-софтверских метода за предикцију могућих тачака удара грома на врховима елиса, како би се узело у обзир да се током процеса атмосферског пражњења ветроелектрана не може третирати као потпуно статички објекат, што је до сада био случај. Примењене оригинално развијене процедуре високонапонског испитивања показале су већу тачност и поузданост од постојећих симулационих метода на виртуелним моделима ветротурбина. Чињеница да се резултати предложених процедура могу успешно применити у потпуно реалним условима је потврда оправданости и квалитета изложене идеје.

7.2. Будући рад и додатна истраживања

Прилика да се обављају истраживања на ротирајућим моделима ветротурбина у вези са њиховом заштитом од директног атмосферског пражњења је веома атрактивна. Аутор докторске дисертације планира да у оквиру будућег рада прошири описана и обави додатна експериментална испитивања, како би се узели у обзир и бројни други аспекти који су важни за будућа истраживања из ове веома актуелне и значајне области.



План будућег рада састојао би се од следећих активности.

- 1) Последњих година почело је интензивно коришћење елиса савремених ветротурбина од делимично електрично проводних CFC композитних материјала, због одличних аеродинамичких карактеристика које имају и мале тежине. Међутим, овај тип елиса има лошије перформансе када је у питању заштита од директног атмосферског пражњења у односу на потпуно изолационе елисе од GFRP композита, које су биле главни предмет анализе докторске дисертације. Први корак у оквиру додатних истраживања био би наставак извођења описаних експеримената и испитних процедура на умањеном моделу ветротурбине са трокрилним ротором од CFC композитних материјала, и испитивање учесталости и начина пражњења у зависности од промене брзине ротирања елиса.
- 2) Ради верификације добијених резултата извршиће се компаративна анализа на тај начин што би се уместо лучне електроде употребила појединачна штапна електрода (која би иницирала силазни лидер на подразумеваном ударном растојању), и која би била позиционирана на неколико дискретних позиција дуж замишљеног лука, чији је просторни угао 120° , и који би одговарао положају на коме је фиксирана описана лучна електрода. На свакој позицији штапне електроде обавио би се сет мерења користећи ударне склопне прескочне напоне оба поларитета. Потом би се извршило упоређивање резултата за све позиције дуж лука.
- 3) Као алтернативно и треће решење, аутор ће размотрити и могућност инсталирања више штапних електрода дуж лука (нпр. по 3 електроде дуж левог и десног сегмента лука), и истовремену симулацију пражњења када су елисе умањеног модела ветротурбине непомичне и када ротирају.
- 4) Размотриће се тестирање у ваздушном тунелу, када је елиса непомична и успостављено струјање ваздуха различитим брзинама по њеној спољној површини. У овим експериментима користили би се узорци врхова елиса пуне величине, дужине неколико метара, са инсталираним заштитним рецепторима и уземљеним спусним проводником, како би се детаљније проучили ефекти директног удара грома (иницираног са оближње ВН електроде) на врховима елиса, при чему би се и симулирале брзине ветра из природног окружења.
- 5) Коначно, у будућем раду за време постдокторског усавршавања, аутор ће настојати да направи изузетно сложен и захтеван нумеричко–софтверски модел за предикцију тачака удара и начина пражњења на елисама ветротурбине узимајући у обзир ефекат ротације, с обзиром да су до сада развијани углавном једноставни модели за стационарне објекте без покретних делова.



ЛИТЕРАТУРА, ПОПИС СЛИКА И ТАБЕЛА И БИОГРАФИЈА АУТОРА

8.1. Списак коришћене литературе у току израде докторске дисертације

- [1] B. M. Radičević, "Procena globalnog i lokalnog vetroenergetskog potencijala i savremena rešenja za dobijanje električne energije od energije vetra", magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, decembar 2005.
- [2] S. F. Madsen, "Interaction between electrical discharges and materials for wind turbine blades-particularly related to lightning protection", Ph.D. dissertation, Kgs. Lyngby (Denmark): Ørsted•DTU, Electric Power Engineering, The Technical University of Denmark, 2006.
- [3] D. Mikičić, Ž. Đurišić, B. M. Radičević, "Vetrogeneratori - perspektivni izvori električne energije", Elektroprivreda, broj 4, pp.46-58, Beograd, 2002.
- [4] B. M. Radičević, D. Mikičić, Ž. Đurišić, "Estimation of wind energy potential", Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, Vol. 19, No. 1, pp. 47-61, 2006.
- [5] B. M. Radičević, D. Mikičić, "Comparison of Methods for the Estimation of Wind Energy Potential and Conversion of Wind Energy Into Electric Energy", Renewable energy and future of its application, međunarodna konferencija, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Republika Crna Gora, Budva, 4-5. oktobar 2007., Zbornik u vidu knjige, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene, Naučni skupovi, knjiga 84, Odeljenje prirodnih nauka, knjiga 11, 157-173, 2008.
- [6] N. Rajaković, D. Tasić, "Distributivne i industrijske mreže", Akademska misao, Beograd, p. 493, 2008.
- [7] T. Ackermann, "Wind power in power systems", 1st ed. Chichester (U.K.), John Wiley & Sons, Ltd., p. 290., 2005.
- [8] P. S. Georgilakis, "Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 3, pp. 852-863, 2008.
- [9] M. C. Mabel, R. E. Raj, E. Fernandez, "Adequacy evaluation of wind power generation systems", Energy, Vol. 35, No. 12, pp. 5217-5222, 2010.
- [10] L. Hocine, M. Mounira, "Effect of nonlinear energy on wind farm generators connected to a distribution grid", Energy, Vol. 36, No. 5, pp. 3255-3261, 2011.
- [11] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen, N. K. Poulsen, "Modelling and transient stability of large wind farms", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 123-144, 2003.
- [12] R. Haas, G. Resch, C. Panzer, S. Busch, M. Ragwitz, A. Held, "Efficiency and effectiveness of promotion systems for electricity generation from renewable energy sources – Lessons from EU countries", Energy, Vol. 36, No. 4, pp. 2186-2193, 2011.
- [13] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, "The wind energy (r)evolution: A short review of a long history", Renewable Energy, Vol. 36, No. 7, pp. 1887-1901, 2011.
- [14] R. Melício, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão, "Comparative study of power converter topologies and control strategies for the harmonic performance of variable-speed wind turbine generator systems", Energy, Vol. 36, No. 1, pp. 520-529, 2011.
- [15] L. Dambrosio, B. Fortunato, "One-step-ahead adaptive control of a wind-driven, synchronous generator system", Energy, Vol. 24, No. 1, pp. 9-20, 1999.
- [16] L. M. Fernandez, C. A. Garcia, F. Jurado, "Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation", Energy, Vol. 33, No. 9, pp. 1438-1452, 2008.
- [17] R. Melício, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão, "Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation", Renewable Energy, Vol. 35, No. 10, pp. 2165-2174, 2010.
- [18] A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Iov, F. Blaabjerg, "Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators", Renewable Energy, Vol. 31, No. 7, pp. 935-951, 2006.
- [19] J. A. Sánchez, C. Vezanzones, S. Martínez, F. Blázquez, N. Herrero, J. R. Wilhelmi, "Dynamic model of wind energy conversion systems with variable speed synchronous generator and full-size power converter for large-scale power system stability studies", Renewable Energy, Vol. 33, No. 6, pp. 1186-1198, 2008.
- [20] B. M. Radičević, D. Mikičić, "Savremena rešenja za dobijanje električne energije u vetroelektranama male i velike snage", Poljoprivredna tehnika, godina XXXI, broj 3, pp.103-111, Beograd, decembar 2006.
- [21] Đ. Vukić, B. M. Radičević, "Osobine asinhrono mašine sa dvostranim napajanjem i primena u vetrogeneratorskim postrojenjima", 27. savetovanje JUKO CIGRE, međunarodna konferencija, Jugoslovenski komitet Međunarodnog saveta za velike električne mreže (JUKO CIGRE), Republika Srbija, Zlatibor, 29.5-3.6.2005., Zbornik radova sa 27. savetovanja JUKO CIGRE, Knjiga I, R A1-05-1-R A1-05-8, 2005.
- [22] V. Mijailović, "Distribuirani izvori električne energije-principi rada i eksploatacioni aspekti", Akademska misao, Beograd, 2011.
- [23] "Wind Energy-The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power", 1st ed., European Wind Energy Association, Earthscan Ltd., Oxford, U.K., p. 590., 2009.



- [24] D. Mikičić, B. M. Radičević, "Aktuelno stanje vetroenergetike u Evropi u 2006. godini i budući trendovi", ENERGETIKA 2006, međunarodna konferencija, Savez energetičara Srbije, Republika Srbija, Zlatibor, 19.3-21.3.2006., Publikacija: Energija-ekonomija-ekologija, Časopis Saveza energetičara, Energetika 2006, Broj 1-2, godina V, 192-198, 2006.
- [25] V. A. Rakov, M. A. Uman, "Lightning: Physics and Effects (Encyclopedia of Lightning)", Cambridge University Press, U.K., p. 687, 2003.
- [26] Z. Chen, F. Blaabjerg, "Wind farm-A power source in future power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. (6-7), pp.1288-1300, 2009.
- [27] R. Thresher, S. Schreck, M. Robinson, P. Veers, "Wind Energy Status and Future Wind Engineering Challenges", Proceedings of the 1st American Association for Wind Engineering Workshop, Vail, Colorado (USA), 2008.
- [28] B. M. Radičević, Đ. Vukić, N. Rajaković, "Stanje i perspektive obnovljivih izvora energije u Srbiji", Naučni časopis Poljoprivredna tehnika, godina XXXIII, broj 3, Beograd, 89-98, decembar 2008.
- [29] B. M. Radičević, D. Mikičić: "Wind Generators-Promising Sources of the Ecologically Clear Electric Power in Serbia and Montenegro", Renewable energy and future of its application, međunarodna konferencija, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Republika Crna Gora, Budva, 6-7. oktobar 2005., Zbornik u vidu knjige, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primjene, Naučni skupovi, knjiga 77, Odeljenje prirodnih nauka, knjiga 10, 125-144, 2006.
- [30] Dehn+Soehne, "Lightning Protection Guide", 2nd edition, Neumarkt, Germany, 2007.
- [31] (US) SAE ARP 5416, (EU) EUROCAE ED-105, "Aircraft Lightning Test Methods", Section 5: Direct Effects Test Methods, 2005-3.
- [32] (US) SAE ARP 5412, (EU) EUROCAE ED-84, "Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms", February 2005.
- [33] IEC 60060-1 (Ed. 3.0), IEC 60060-2 (Ed. 3.0), IEC 60060-3 (Ed. 1.0), International Standard, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, Part 2: Measuring Systems, Part 3: Definitions and requirements for on-site testing", International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, September 2010.
- [34] IEC 62305-1 (Ed. 2.0), IEC 62305-2 (Ed. 2.0), IEC 62305-3 (Ed. 2.0), IEC 62305-4 (Ed. 2.0), International Standard, Ed. 2.0, "Protection against lightning – Part 1: General principles, Part 2: Risk management, Part 3: Physical damage to structures and life hazard, Part 4: Electrical and electronic systems within structures", International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, Sep. 2010.
- [35] IEC 61400-24, International Standard, Ed. 1.0, "Wind turbines-Part 24: Lightning protection", International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, June 2010.
- [36] A. Kusiak, W. Li, "The prediction and diagnosis of wind turbine faults", Renewable Energy, Vol. 36, No. 1, pp. 16-23, 2011.
- [37] C. Kong, J. Bang, Y. Sugiyama, "Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life", Energy, Vol. 30, No. (11-12), pp. 2101-2114, 2005.
- [38] Y. Amirat, M. E. H. Benbouzid, E. Al-Ahmar, B. Bensaker, S. Turri, "A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13. No. 9, pp. 2629-2636, 2009.
- [39] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, C. K. Song, "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 1, pp. 1-39, 2009.
- [40] K. Kishinami, H. Taniguchi, J. Suzuki, H. Ibano, T. Kazunou, M. Turuhami, "Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine", Energy, Vol. 30, No. (11-12), pp. 2089-2100, 2005.
- [41] R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão, "Protection of wind energy systems against the indirect effects of lightning", Renewable Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 2888-2896, 2011.
- [42] F. A. Fisher, J. A. Plumer, R. A. Perala, "Lightning Protection of Aircraft", 2nd ed., Pittsfield, Massachusetts, USA, Lightning Technologies Inc., 2004.
- [43] S. F. Madsen, J. Holboll, M. Henriksen, K. Bertelsen, H. V. Erichsen, "New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades", Proceedings of the 28th International Conference of Lightning Protection, Kanazawa (Japan), 2006.
- [44] S. F. Madsen, H.V. Erichsen, "Numerical model to determine lightning attachment point distributions on wind turbines according to the revised IEC 61400-24", Proc. of the International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE), Pittsfield, Massachusetts, USA, 15-17 September 2009.
- [45] V. Peesapati, I. Cotton, "Lightning protection of wind turbines—A comparison of lightning data & IEC 61400-24", Proc. 1st Int. Conf. Sustainable Power Generation Supply, Nanjing, China, Apr. 6-7, 2009, pp. 1-7.
- [46] T. Naka, N. J. Vasa, S. Yokoyama, A. Wada, A. Asakawa, H. Honda, K. Tsutsumi, S. Arinaga, "Study on lightning protection methods for wind turbine blades", IEEJ Trans. PE, Vol. 125, No. 10, pp. 1-8, 2005.
- [47] V. Peesapati, I. Cotton, "Lightning protection of wind turbines-A comparison of real lightning strike data and finite element lightning attachment analysis", Proceedings of the 1st International Conference of Sustainable Power Generation Supply (SUPERGEN), Nanjing (China), 2009.
- [48] I. Cotton, N. Jenkins, K. Pandiaraj, "Lightning protection for wind turbine blades and bearings", Wind Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 23-37, 2001.
- [49] M. S. Savić, Z. Stojković, "High-Voltage Technics, Lightning Impulses", Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, p. 506, 1997.
- [50] V. G. Cooray, "Lightning Protection", The Institution of Engineering and Technology, U.K., p. 574, 2009.
- [51] T. Horvath, "Understanding Lightning and Lightning Protection-A Multimedia Teaching Guide", Chichester, U. K., John Wiley & Sons, Ltd.-Research Studies Press Limited, p. 220, 2006.



- [52] Lj. Milanković, "Tehnika visokog napona", Elektrotehnički fakultet, Beograd, p. 506, 1987.
- [53] N. Arsić, P. Osmokrović, "Tehnika visokog napona – visokonaponska ispitna oprema", Zavod za fiziku tehničkih fakulteta u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini, Kosovska Mitrovica, p. 263, 2007.
- [54] M. Becerra, "On the attachment of lightning flashes to grounded structures", Ph.D. dissertation, Uppsala (Sweden), Department of Engineering Science, Faculty of Science and Technology, Uppsala University, 2008.
- [55] J. Cvetić, "Model povratnog udara atmosferskog pražnjenja sa specificiranom strujom u tački udara i raspodjelom naelektrisanja duž kanala", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, p. 198, 1996.
- [56] B. M. Radičević, M. S. Savić, "Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 4, pp. 1181–1190, December 2011.
- [57] B. M. Radičević, M. S. Savić, "The Impact of Wind Turbine Blade Rotation on the Lightning Strike Incidence", Proc. 31st International Conference on Lightning Protection, Beč, Austrija, Septembar 2–7, 2012, pp. 1–6.
- [58] F. M. Larsen, T. Sorensen, "New lightning qualification test procedure for large wind turbine blades", Proceedings of International Conference on Lightning and Static Electricity, Blackpool, U.K., 2003.
- [59] A. J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to power lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 1, no. 3, pp. 859–870, Jul. 1987.
- [60] M. Kostić, "Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija", drugo, prošireno izdanje, Akademski misao, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005.
- [61] B. Glushakow, "Effective lightning protection for wind turbine generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 214–222, 2007.
- [62] Z. Stojković, "Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici: primena programskih alata", Akademski misao, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2009.
- [63] J. Holbøll, S. F. Madsen, M. Henriksen, K. Bertelsen, H.V. Erichsen, "Lightning discharge phenomena in the tip area of wind turbine blades and their dependency on material and environmental parameters", Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 18–22 September 2006.
- [64] A. Kusiak, Z. Song, "Design of wind farm layout for maximum wind energy capture", Renewable Energy, Vol. 35, No. 3, pp. 685–694, 2010.
- [65] W. M. Lin, C. M. Hong, "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system", Energy, Vol. 35, No. 6, pp. 2440–2447, 2010.
- [66] M. Kesraoui, N. Korichi, A. Belkadi, "Maximum power point tracker of wind energy conversion system", Renewable Energy, Vol. 36, No. 10, pp. 2655–2662, 2011.
- [67] A. Kusiak, H. Zheng, "Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm", Energy, Vol. 35, No. 3, pp. 1324–1332, 2010.
- [68] A. Bouscayrol, Ph. Delarue, X. Guillaud, "Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine", Renewable Energy, Vol. 30, No. 15, pp. 2273–2288, 2005.
- [69] F. Rachidi, M. Rubinstein, J. Montanya, J. L. Bermudez, R. R. Sola, Gloria Sola, N. Korovkin, "A review of current issues in lightning protection of new-generation wind turbine blades", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 6, pp. 2489–2496, June 2008.
- [70] M. A. Alonso, D. C. Irastorza, "Dynamic Wind Turbine Lightning Protection Behaviour Under Storm Conditions", Proc. of the 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 23–26 June 2008.
- [71] M. S. Savić, "Visokonaponski rasklopni aparati", Akademski misao, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2004.
- [72] Lj. Gerić, "Analiza uticaja vertikalnih elemenata na karakteristike uzemljivača elektroenergetskih postrojenja", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, p. 141, 1983.
- [73] Z. Stojković, "Modelovanje impulsne impedanse uzemljivača u analizi zaštite razvodnih postrojenja od atmosferskih prenapona", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, p. 163, 1995.
- [74] W. Hauschild, W. Mosch, "Statistical techniques for high-voltage engineering", P. Peregrinus Ltd., London, U.K., p. 324, 1992.
- [75] L. Gao, "Characteristics of Streamer Discharges in Air and along Insulating Surfaces", Institute of High Voltage Research, Uppsala University, Sweden, PhD thesis 2000.
- [76] M. Abdel-Salam, P. Weiss, B. Lieske, "Discharges in Air from Point Electrodes in the Presence of Dielectric Plates – Experimental Results", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 2, April 1992.
- [77] P. Osmokrović, "Elektrotehnički materijali", Akademski misao, Elektrotehnički fakultet, Beograd, p. 418, 2003.

U toku izrade doktorske disertacije korišćene su probne (30 dana), demo i akademske verzije sledećeg komercijalnog softvera:

- COMSOL Multiphysics v. 4.2, <http://www.comsol.com/products/4.2a/>
- MathWorks MATLAB r2011a, <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>
- MathWorks Simulink r2011a, <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- National Instruments LabVIEW 2011, System Design Software, <http://www.ni.com/labview/buy/learn/?base>
- ATP-Alternative Transients Program 2010, <http://www.emtp.org/>
- CYME, CYMSTAB-Transient Stability with WECS (Wind Energy Conversion Systems) 2011, <http://www.cyme.com/software/cymstab/>
- DIGSILENT PowerFactory 14, <http://www.digsilent.de/index.php/products-powerfactory.html>
- POWERSYS Solutions EMTP-RV 2.1, <http://www.emtp.com/?q=category/rubrique/software-description>



8.2. Попис слика и табела по поглављима

ПОГЛАВЉЕ 1:

Слика 1.1 – стр. 2. Различите конструкције ветротурбина. (а) Ветропарк турбина са хоризонталном осом на копну, данас преовлађујући (б) Ветропарк турбина са хоризонталном осом на мору и дуж морске обале, све присутнији концепт развоја ветроенергетике. (в) Ветроурбина са вертикалном осом на Балтичком мору снаге 2,3 MW у оквиру ветропарка на мору. (г) Маглев ветротурбина.

Слика 1.2 – стр. 3. Повећање номиналне снаге и величине ветротурбина.

Слика 1.3 – стр. 6. (а) Укупно инсталирани ветрогенераторски капацитети у свету у протеклих 10 година. (б) Првих 10 земаља у свету на основу укупно инсталисане снаге ветроелектрана до почетка 2011. године. (в) Прогноза развоја тржишта ветроенергетике до 2015. године.

Слика 1.4 – стр. 7. (а) Просечна годишња брзина ветра у свету на висини 60 m од равнотла. (б) Глобална изокерауничка карта (дистрибуција просечног годишњег броја директних удара грома по квадратном километру равнотла у периоду 1995 – 2005. године у свету). Извор НАСА.

Слика 1.5 – стр. 8. Сличности између громобранске заштите високих објеката и ветротурбина.

Слика 1.6 – стр. 10. (а) Развој технологије за инсталирање ветротурбина на мору. (б) Локације у северној Европи за 22 од 25 највећих ветропаркова на мору.

Слика 1.7 – стр. 13. (а) Типична дистрибуција кварова по компонентама ветротурбине. (б) Најчешћа детектована расподела тачака удара грома дуж елисе ветротурбина већих димензија.

Слика 1.8 – стр. 14. Повећање ризика од удара грома са струјама мањих амплитуда по спољној површини гондоле и стуба. Могуће тачке удара грома за 2000 најјачих удара и за: (а) $I_{\max} \leq 100$ kA. (б) $I_{\max} \leq 50$ kA. (в) $I_{\max} \leq 20$ kA. Иницирање узлазног лидера настаје са већег растојања у односу на врх силазног лидера при већим очекиваним максималним вредностима струја главног пражњења, при чему ниже максималне вредности ових струја омогућавају да се силазни лидер приближи више ветротурбини пре него што започне пропација узлазног лидера.

Слика 1.9 – стр. 15. Константан развој громобранских заштитних система на елисама ветротурбина.

Слика 1.10 – стр. 16. (а) Приказ типичног заштитног громобранског система на елисама ветротурбине. (б) Директан удар грома у елису ветротурбине мимо рецептора на њеном врху и могуће путање струје пражњења: 1. Путања пражњења дуж површинског слоја елисе ка њеном врху (ка рецептору); 2. Путања пражњења дуж површинског слоја елисе ка њеном корену; 3. Пражњење кроз композитни материјал елисе ка спусном проводнику у њеној унутрашњости – бочни удар.

Слика 1.11 – стр. 17. Типична тешка оштећења која могу да настану у зони привлачног дејства на елисама, гондоли и другим истакнутим компонентама ветротурбине услед директног удара грома.

Табела 1.1 – стр. 10. Упоредни преглед 25 највећих ветропаркова на мору у свету у 2011. години.

Табела 1.2 – стр. 14. Статистички подаци о директним атмосферским пражњењима у истакнуте делове ветротурбина [35].

ПОГЛАВЉЕ 2:

Слика 2.1 – стр. 22. (а) Принципијелна шема прикључења неколико фарми ветроелектрана на преносну мрежу. (б) Типична шема везивања дистрибуираних генератора са ветротурбином.

Слика 2.2 – стр. 26. (а) Основни концепт конструкције савремене ветротурбине. (б) Типична расподела струје грома. (в) Преглед компоненти које је неопходно заштитити од струје грома и индукваних пренапона.

Слика 2.3 – стр. 28. Ветроелектране са турбином сталне брзине обртања (Тип А), са делимично управљивим уређајима енергетске електронике и ограниченим опсегом промене брзине обртања (Тип В-С), и са пуноуправљивим уређајима енергетске електронике (Тип Д).

Слика 2.4 – стр. 32. (а) 2D пројекција уземљивачког система ветротурбине велике снаге. (б) Шематски приказ

уземљивачког система фарме ветрењача. Отпор распрострањања за прстенасти уземљивач износи: $R_t = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}}$, за n

штапних уземљивача дуж обима прстена пречника D [m] је: $R_p = \frac{\rho}{2n\pi L} \left[\ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{D} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin(\pi m^{-1})} \right]$, њихова узајамна

отпорност је: $R_m = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2Le^{-1}d}}$, а укупна отпорност система: $R_u = (R_t R_p - R_m^2) \cdot (R_t + R_p - 2R_m)^{-1}$.

Слика 2.5 – стр. 34. Концепт громобранских заштитних зона и принцип степеновања заштите ветротурбине.



Слика 2.6 – стр. 37. (а) Формирање стримера унутар радарског оклопа у носу авиона доводи до иницирања лидера из спољашњег окружења, који могу да изазову напрезање структуре оклопа. (б) Сегментирани проводне траке (*diverter strips*) за прихват струје грома у околини рецептора, ради повећања њихове ефикасности. Јако и променљиво електрично поље које настаје као последица пражњења јонизује ваздушне зазоре мале запремине у сегментираним тракама, омогућавајући проводан пут за струју пражњења. (в) Постојећи начини заштите елиса ветротурбина од атмосферског пражњења. (г) Главне компоненте громобранске заштите елиса савремених ветротурбина са дренажним рецептором на врху елисе [35].

Слика 2.7 – Стр. 39. (а) Иницирање стримера са чисте и хомогене површине елисе са рецепторском заштитом и са задржане елисе (нечистоће, влага, лед). (б) Ефекат јонизације се јавља много чешће дуж површине елисе ако су присутни влага и проводна задржања (вредности пробојних електричних поља су типичне у стандардном лабораторијском окружењу).

Слика 2.8 – Стр. 39. Пад напона дуж спољне површине елисе са рецепторском заштитом због велике импедансе спусних проводника. 1. Велика импеданса спусног проводника ствара пад напона са рецептора који је на пуном потенцијалу ка уземљеном корену елисе. 2. Простирање стримера дуж спољне површине елисе који су скоро на максималном потенцијалу (за стабилно простирање стримера за различите врсте изолационих композитних материјала измерене су вредности тангенцијалне компоненте електричног поља на спољној површини елисе у опсегу 200-600 kV/m) [2]. 3. Потенцијал стримера који су иницирани дуж спољне површине елисе. 4. Потенцијал спусног проводника због пада напона. Наелектрисање које је нагомилано на унутрашњој површини има исти поларитет напона као и спусни проводник. 5. Разлика потенцијала између нагомиланих наелектрисања у унутрашњости елисе и спољних стримера може бити довољно велика да изазове накнадне пробоје.

Слика 2.9 – Стр. 40. Пораст температуре у бакарној фолији дебљине 0,01 mm као резултат ињектирања струје грома у облику електричног лука са специфичном енергијом од 2 MJ/Ω. Бакарна фолија се може сматрати да је изотропна, са променом температуре у функцији отпорности, а процес адијабатски.

Слика 2.10 – Стр. 45. Детаљан преглед типичне пренапонске заштите ветротурбина. Сви напојни водови су оклопљени и у облику шинског развода, а за везу између микропроцесора у гондולי и подножју ветротурбине, као и за трасе водова за мерну и контролну опрему и SCADA конекције користе се фибер оптички каблови без жичаног језгра. Одводници пренапона за заштиту примарне (ниско-напонске стране) трансформатора, генератора и других компоненти ветротурбине су пројектовани за напонски ниво 400/690 V или 230/400 V са карактеристикама да издрже минимум 1500 пренапона (10-20 kA максимум струје типа 8/20 μs) и бар један пренапон између 180 и 240 kA. Одводници струје грома – SPD Type 1 (испитивани ударном струјом облика 10/350 μs) се типично инсталирају на граници између зона заштите LPZO_A и LPZ1, а одводници пренапона - SPD Type 2 и/или Type 3 (испитивани ударном струјом облика 8/20 μs) се инсталирају на граници између зона заштите LPZO_B и LPZ1, или LPZ1 и LPZ2.

ПОГЛАВЉЕ 3:

Слика 3.1 – стр. 47. (а) Типична расподела наелектрисања у грмљавинском облаку. (б) Модел облака за потребе нумеричких симулација (величина наелектрисаних сфера није дата у размери). (в) Интензитет електричног поља на земљи у функцији растојања од модела облака за три различите вредности наелектрисања p [25].

Слика 3.2 – стр. 49. Типови пражњења и могуће компоненте узлазних и силазних пражњења у ветротурбини.

Слика 3.3 – стр. 50. (а) Повећање броја директних удара у ветротурбину у зависности од њене укупне висине и просечног годишњег броја грмљавинских дана. (б) Зависност густине атмосферских пражњења од керауничког нивоа.

Слика 3.4 – стр. 51. (а) Атрактивна зона изложености ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења. (б) Ефективна висина ветротурбине која је монтирана на брду. (в) Гледано у смеру најчешћег дувања ветра, растојање између 2 реда ветротурбина треба да буде у опсегу $(5-9) \cdot D$, а растојање између две ветротурбине у једном реду треба да је $(3-5) \cdot D$, где је D пречник ротора.

Слика 3.5 – стр. 53. (а) 3D симулација FEM (*Finite Element Program*) модела који показује дистрибуцију електричног поља у околини упрошћеног модела грмљавинског облака [2]. (б) Приказ апсолутног електричног поља у равни која пресеца центре три сфере (све осе су у km). Црвене боје представљају области с великим вредностима електричног поља, док плаве боје представљају области са малим вредностима поља. Црвена стрелица показује правац и смер дуж којег се врши прорачун вертикалног електричног поља [2].

Слика 3.6 – стр. 54. Вертикално електрично поље дуж хоризонталне линије дужине 190 m изнад нивоа земље, од тачке директно испод центара наелектрисања до тачке која је на удаљености 300 m на основу Сlike 3.5(б).

Слика 3.7 – стр. 55. Феномен скоковитог лидера, где се у дискретним корацима сјајно пражњење константне брзине трансформише у више парцијалних осветљених пражњења у облику електричног лука [2].

Слика 3.8 – стр. 57. (а) Ударно растојање и ветротурбине. (б) Ударна растојања добијена нумеричко-софтверским моделовањем за 13 карактеристичних тачака на истакнутим деловима ветротурбине номиналне снаге 3 MW. Због ефекта појачавања поља уочавају се знатно веће вредности ударних растојања у односу на вредности добијене на основу емпиријске формуле (3.12).

Слика 3.9 – стр. 59. Осматрање и праћење карактеристика директних удара грома у ветротурбине у реалном времену у широком опсегу, од ниских (ms) до високих фреквенција (μs). (а) Сензори за детекцију таласног облика и вршних вредности струја атмосферског пражњења инсталирани у ветротурбини. (б) Мрежа фибер оптичких сензора за праћење утицаја карактеристика атмосферског пражњења на елисама ветротурбине [35].

Слика 3.10 – стр. 64. Методе које се користе за пројектовање спољашње громобранске заштите. (а) Метода заштитног угла. (б) Метода котрљајућих сфера. (в) Метода заштитне проводне мреже. Шрафирани линије одговарају громобранским заштитним зонама.



Слика 3.11 – стр. 66. (а) Геометријски модел и димензије непроводне чисте елисе за потребе симулација. Елиса – висина: 3 m (правоугаони део 2,7 m), дебљина: 100 mm (водећа ивица), 50 mm (излазна ивица), попречни пресек: 0,2×0,6 m (P 50 профил). Штапна електрода – полупречник: 0,06 m, висина: 0,5 m. Прорачунат опсег: 6×6×8 m. (б) Расподела електричног поља у околини врха незагађене и задрљане елисе.

Слика 3.12 – стр. 67. (а) Геометријски модел и димензије елисе са рецептором на њеном врху за потребе симулација. Рецептор – полупречник: 50 mm, дебљина: 20 mm. Спусни проводник – попречни пресек: 10×10 mm. (б) Расподела електричног поља у околини врха елисе са рецептором.

Слика 3.13 – стр. 67. Симулација за 2D попречни пресек елисе са спусним проводником. (а) Геометријски модел. (б) Расподела електричног поља.

Слика 3.14 – стр. 68. Утицај проводног слоја у композитном материјалу на перформансе заштитног громобранског система на елисама ветротурбине.

Слика 3.15 – стр. 68. Модел јединичне ветротурбине (заснован на методи коначних елемената) за одређивање нормализованог стабилизационог поља (минимално пробојно поље за стабилно иницирање лидера) на различитим локацијама у оквиру разматраног домена. Ветроурбина је на потенцијалу 0 V. Све димензије су дате у [m].

Слика 3.16 – стр. 69. Расподела електричног поља (E_v) изнад земље у околини модела облака.

Слика 3.17 – стр. 70. (а) Ефекат појачања поља у околини рецептора на врху елисе. Области са рецепторима су заокружене. У зонама које су обележене светлијом бојом електрично поље има веће вредности. (б) Повећање вредности поља у околини метео сензора на врху гондоле.

Слика 3.18 – стр. 70. Вредности нормализованог стабилизационог поља за ветротурбину са једном елисом: (а) у хоризонталном положају, (б) у вертикалном положају.

Слика 3.19 – стр. 71. (а) Модел фарме ветротурбина (заснован на методи коначних елемената) која се састоји од 25 турбина у квадратном низу на међусобном растојању од 500 m између сваког реда и колоне, и који је употребљен за испитивање утицаја изложености директним атмосферским пражњењима. Све димензије су дате у [m]. (б) Нормализоване вредности стабилизационог поља у [%] за растојање између ветротурбина од 500 m. (в) Нормализоване вредности стабилизационог поља у [%] за растојање између ветротурбина од 200 m [2].

Табела 3.1 – стр. 61. Максималне вредности битних параметара атмосферског пражњења према IEC 62305-1 за различите нивое громобранске заштите [35].

ПОГЛАВЉЕ 4:

Слика 4.1 – стр. 73. Типична конструкција елисе ветротурбине са дискретно инсталираним рецепторима за прихват струје грома дуж обе спољне површине елисе и са спусним проводником. (а) Шема попречног пресека елисе. (б)-(в) Испитивање елисе пуне величине у високонапонској лабораторији [43].

Слика 4.2 – стр. 74. Електрична пражњења са нове и незадрљане елисе иницирана углавном са металних компоненти.

Слика 4.3 – стр. 75. Интерна пражњења у унутрашњости елисе због утицаја електричног поља које потиче од концентрације позитивног наелектрисања на врху лидера. (1) Електрично поље E_{BACK} индукује негативна наелектрисања са уземљених компоненти. (2) Електрично поље проузрокује јонизацију и иницијацију стримера са уземљених компоненти. (3) Унутрашњи стримери нагомилавају негативно наелектрисање на унутрашњој површини GFRP композита, и оно потом индукује позитивно наелектрисање са уземљених компоненти. Поље E_{SUP} настало услед новоформиране концентрације наелектрисања сузбија интерна пражњења. (4) Електрично поље изван елисе може достићи вредност која је потребна за настанак спољашње јонизације, омогућавајући да спољна површина елисе постане позитивно наелектрисана, што изазива напрезање GFRP композита елисе, чак и у већој мери од пробојног електричног поља.

Слика 4.4 – стр. 76. (а) Формирање стримера на спољној површини хомогене и чисте елисе (без ваздушних шупљина у унутрашњем слоју композита), који могу да иницирају ударе на изолационим површинама. (1) Позитивно наелектрисана глава (врх) лидера индукује негативно наелектрисање на површини уземљених компоненти. (2) Ако дође до пораста интензитета електричног поља изнад критичне вредности, услед ефекта јонизације долази до нагомилавања негативног наелектрисања на унутрашњој страни површине елисе. (3) Унутрашња пражњења бивају потиснута, док су позитивна наелектрисања на спољној површини елисе индукована од негативних наелектрисања унутар шупље елисе. (4) Настаје формирање стримера на спољној површини елисе са рецептора ка позитивним наелектрисањима, са циљем да се она неутралишу. (5) Интензивно емитовање и ширење негативно поларисаних стримера дуж путање у смеру ка позитивно наелектрисаној глави лидера. (6) Ако током развоја стримера, чије су путање дуж спољне површине елисе, дође до спајања са долазним лидером, успостављају се тачке удара на изолационој површини елисе. (7) Позитивна наелектрисања са врха лидера имају путању близу спољне површине иницирајући даља унутрашња пражњења. (8) Површинска пузајућа струја пражњења може да изазове термичка оштећења на спољној површини елисе. (9) Пробој често доводи до озбиљних оштећења елисе због појаве интерног електричног лука и пуцања композитних слојева елисе, што може да доведе до дуготрајног испада ветроелектране из погона. (б) Ваздушни садржај унутар GFRP композита. Попречни пресек елисе добијен помоћу дигиталног микроскопа, при чему су ваздушне шупљине приказане црном бојом. (в) Ваздушне шупљине различитих величина, које су распоређене у појединим унутрашњим слојевима елисе. (г) Пробој у унутрашњем композитном слоју елисе, који доводи до разарања њене спољне површине [2].

Слика 4.5 – стр. 78. Карактеристике ветротурбине у областима променљиве брзине (област А) и регулације снаге (област В) и крива оптималног управљања P_{opt} .



Слика 4.6 – стр. 79. Карактеристичне фазе развоја атмосферског пражњења (временска скала није дата у размери): 1. Скоковити лидер. 2. Стримери. а) Иницирање стримера са врха елисе уземљене ветротурбине - стварање прве короне. б) Транзиција стримера у лидер - настанак нестабилног лидера. в) Почетак простирања лидера дуж канала главног пражњења - започињање стабилног лидера. 3. Главно пражњење (повратни удар). 4. Стреловити лидер. 5. Струја главног пражњења, и струје другог и трећег узастопног пражњења, које су мањег интензитета. За време једног комплетног пражњења детектовано је до 50 појединачних удара грома. До 40% пражњења има вишеструку природу, са типично 3-4 појединачна удара. Више од 50% струја пражњења има интензитет до 20 kA, а мање од 1% преко 200 kA [49].

Слика 4.7 – стр. 80. Феномен прелаза удара грома. (а) Улазна тачка удара пражњења прелази преко трупа авиона од носа (где су смештени радарски системи) ка репу, при чему излазна тачка остаје спојена на излазним ивицама елеватора (кормило дубине). (б) Прелаз удара грома преко изолационих површина на предњем делу трупа авиона.

Слика 4.8 – стр. 81. Прелаз удара грома преко изолационих слојева који су постављени на спољној страни композитне површине. (а) Танак изолациони слој резултује у великом броју тачака задржавања удара краћег трајања. (б) За веће вредности пробног поља изолационог слоја уочава се мањи број тачака задржавања удара дужег трајања. (в) Ефекат прелаза удара грома на врховима ротирајућих елиса ветротурбине [2].

Слика 4.9 – стр. 83. (а) Угаона позиција елисе за два различита удара у оквиру истог пражњења може да се промени за неколико десетина степени и због тога долази до помераја тачке удара грома са једне елисе на другу. (б) Ефекат прелаза удара грома према корену елисе.

ПОГЛАВЉЕ 5:

Слика 5.1 – стр. 86. Испитна шема за експериментално тестирање модела ветротурбине. (а) CAD шема. (б) Фотографија из контролне собе када је негативни ударни напон примењен на лучној електроди.

Слика 5.2 – стр. 87. (а) Троелисни модел ветротурбине умањених димензија са проводним капама на врховима елиса. (б) Проводни рецептори у близини врхова елиса. (в) Спусни проводници на полеђини елиса. (г) Фреквентно управљан индукциони мотор са каишним (ременим) преносом. (д) Масивно крстасто постоље које је постављено на проводној плочи на поду лабораторије.

Слика 5.3 – стр. 88. (а) CAD цртеж специјално конструисаног наменског дела са кугличним лежајевима за прихват струје пражњења са спусних проводника и њено спровођење у земљу. (б) Фотографија током монтаже оригиналног цилиндричног кугличног лежаја на главној осовини модела ветротурбине.

Слика 5.4 – стр. 89. Одређивање тачака удара иницијалног лидера дуж елисе пуне величине за тест процедуру А. (а) Испитна шема. (б) Фотографија тестирања елисе дужине 40 m у ВН лабораторији. (в) Интензивни ВН тестови показују да су елисе од делимично проводних угљених влакана изложене директним атмосферским пражњењима у готово истом односу као и заштитни рецептори. Због тога је релативно тешко одредити тачке удара грома у CFC елисе, а чак и удари средње јачине доводе до значајних оштећења. (г) Елисе са проводним попречним тракама у околини рецептора за ефикаснији прихват струје пражњења и њено спровођење до одговарајућег рецептора [43].

Слика 5.5 – стр. 90. Одређивање тачака удара иницијалног лидера на исечку врха елисе за тест процедуру А. (а) Испитна шема. (б) Фотографија тестирања врха елисе дужине 4 m у ВН лабораторији.

Слика 5.6 – стр. 91. Одређивање тачака удара иницијалног лидера за тест процедуру В. (а) Испитна шема. (б) Фотографије тестирања модела ветротурбине умањених димензија у ВН лабораторији. (в) Често се користи и тест процедура С за испитивање оптималног растојања између проводних сегментираних трака (или других локалних заштитних компоненти) које се инсталирају на спољној површини елиса и/или гондоле (растојање D се одређује у функцији близине d унутрашњег проводног дела елисе; растојање a је краћа димензија ширине или висине панела) [35].

Слика 5.7 – стр. 92. (а) Употреба појединачне штапне електроде за иницирање лидера приликом испитивања стационарних GFRP елиса дужине 4 m, без заштитних система. (б) Примена штапне електроде за иницирање лидера приликом испитивања перформанси прихватног система у облику проводних капа/рецептора на врховима стационарних GFRP елиса дужине 4 m [46]. (в) Употреба више штапних високонапонских електрода на дискретним позицијама дуж замишљеног лука изнад модела ветротурбине.

Слика 5.8 – стр. 93. (а) Лучна електрода позиционирана изнад модела ветротурбине у ВН лабораторији. (б)-(в) UV фотографије иницирања стримера са елисе која је на позитивном потенцијалу (негативно пражњење) и на негативном потенцијалу (позитивно пражњење).

Слика 5.9 – стр. 94. Расподела прескока дуж лучне електроде у ВН лабораторији за негативне ударне напоне. (а) Карактеристичне зоне иницирања удара на лучној електроди. (б)-(д) Број прескока у појединим зонама за 3 типичне брзине ротације елиса и за следеће разматране случајеве: СЛУЧАЈ I – проводне капе су инсталиране на врховима елиса; СЛУЧАЈ II – проводни рецептори су монтирани у близини врхова елиса; СЛУЧАЈ III – елисе од композитних материјала без заштитних система.

Слика 5.10 – стр. 96. (а) Тестови са ударним струјама на GFRP елисама пуне величине. (б) Тестови за одређивање јачине пробног поља на правоугаоним узорцима. (в) На квадратним узорцима.

Слика 5.11 – стр. 97. (а) Мерни и контролни системи у високонапонској лабораторији. (б) Таласни облик примењеног склопног ударног напона.

Слика 5.12 – стр. 100. Детектована типична оштећења на површини изолационих композитних елиса са и без громобранских заштитних система ($4,3 \leq \epsilon_r \leq 4,7$). (а) Продор непосредно испод проводне капе. (б) Пукотина и рупе на ивици елисе са рецепторском заштитом непосредно испод врха елисе. (в) Напрснуће и удубљење елисе без громобранске заштите. Напомена: Израчунате вредности специфичне енергије развијене на спољној површини елисе биле су у опсегу 3,1-3,3 MJ/Ω.



Слика 5.13 – стр. 102. Метода горе-доле за СЛУЧАЈ I, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.

Слика 5.14 – стр. 103. Карактеристични таласни облици за СЛУЧАЈ I, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.

Слика 5.15 – стр. 104. (а)-(в) Увећане фотографије спајања силазног и узлазног лидера за неколико карактеристичних брзина обртања ротора.

Слика 5.16 – стр. 105. Метода горе-доле за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.

Слика 5.17 – стр. 106. Карактеристични таласни облици за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.

Слика 5.18 – стр. 107. Метода горе-доле када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди за специјалан СЛУЧАЈ III при малој брзини обртања елиса ветротурбине ($w = 50$ о/мин).

Слика 5.19 – стр. 108. Карактеристични таласни облици када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди за специјалан СЛУЧАЈ III ($w = 50$ о/мин).

Слика 5.20 – стр. 109. Осцилаторност увећаних таласних облика за СЛУЧАЈ II, када је негативан ударни напон примењен на лучној електроди. (а) $w = 0$ о/мин. (б) $w = 250$ о/мин. (в) $w = 400$ о/мин.

Слика 5.21 – стр. 110. Фотографије из ВН лабораторије у вези са имплементацијом различитих типова громобранске заштите на елисама ветротурбине. (а) Проводна капа на врху шупље елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости. (б) Проводна електрода у облику дугме рецептора на врху шупље елисе и спусни проводник у њеној унутрашњости. (в) Спусни проводник преко задње спољне површине елисе. (г) Спусни проводници дуж нападне и излазне ивице елисе и преко задње спољне површине елисе.

Слика 5.22 – стр. 111. (а)-(б) Приказ унапређеног заштитног система елиса ветротурбине. (в) Заштита метео инструмената на врху гондоле.

Табела 5.1 – стр. 95. Број прескока дуж лучне електроде за негативне ударне напоне.

Табела 5.2 – стр. 98. Атмосферски корекциони фактори.

Табела 5.3 – стр. 99. Начини пражњења за анализиране случајеве.

Табела 5.4 – стр. 100. 50% и 10% прескочни напони за анализиране случајеве.

Табела 5.5 – стр. 101. Карактеристичне вредности параметара таласних облика негативних прескочних напона за СЛУЧАЈ I.

Табела 5.6 – стр. 104. Карактеристичне вредности параметара таласних облика негативних прескочних напона за СЛУЧАЈ II.

Табела 5.7 – стр. 107. Карактеристичне вредности параметара таласних облика ударних напона за специјални СЛУЧАЈ III за $w = 50$ о/мин.

Табела 5.8 – стр. 109. Релативни пораст 50% ПН и дисперзија σ ПН за анализиране случајеве.

Табела 5.9 – стр. 113. Утицај брзине ротације елиса са инсталираним различитим типовима громобранских заштитних система на очекиван број година рада ветротурбине без значајнијих оштећења на елисама, која могу да настану због директног удара грома.

ПОГЛАВЉЕ 6:

Слика 6.1 – стр. 115. (а) Испитна шема за тестирање прескока дуж површине узорка елисе и настанак пробоја у ваздушном зазору типа узорак елисе-сферна електрода у случају стационарне елисе. (б) Бакарно-месингана високонапонска електрода (рецептор) која је монтирана на једном крају испитиваног узорка. (в) Фотографија испитивања у високонапонској лабораторији [2].

Слика 6.2 – стр. 116. (а) Стримери се простиру у продужетку тачке одвајања канала негативно поларисаног пражњења са површине узорка елисе. (б) Дефиниција угла θ и осталих битних параметара коришћених у тестовима прескока дуж површине узорка елисе.

Слика 6.3 – стр. 117. Разлике између позитивно и негативно поларисаног пражњења дуж изолационе површине елисе. (а) Позитивна наелектрисања се одбијају од позитивног просторног наелектрисања на површини елисе и директно скачу са ВН електроде ка уземљеној сфери не додиривајући спољну површину елисе. (б) Негативна наелектрисања су привучена од стране позитивног просторног наелектрисања, и простиру се дуж површине елисе на одређеном растојању пре него што дође до скока према уземљеној сфери.

Слика 6.4 – стр. 119. (а) 2D симулација расподеле тангенцијалне компоненте електричног поља дуж спољне површине елисе. Када су на површини формиране капљице воде јако електрично поље је сконцентрисано у њиховој околини, где долази до јонизације ваздуха и стварања проводне плазме за проток наелектрисања (на сличан начин функционишу и проводне попречне траке у околини рецептора - *diverter strips*). Значајно смањен прескочни напон омогућава распрострањавање наелектрисања дуж површине елисе на најкраћем могућем (ортогоналном) растојању у односу на



уземљену сферу. Равномерни слој воде на површини елисе не утиче на расподелу поља (ситуација је слична као у случају чисте елисе). Такође, када је површина елисе запрљана сувим вештачким загађењем показује исте особине као и чиста елиса. (б) Поређење начина пражњења за стримере негативног поларитета на сувој и влажној површини елисе. Коначна брзина пропагације стримера дуж суве површине елисе омогућава њихово одвајање од површине ближе у односу на ВН электроду. Стримери се простиру дубље у ваздушном зазору, у поређењу са стримерима који напуштају површину елисе нешто даље од ВН електроде. На влажним површинама елисе брзина пропагације стримера је већа, што доводи до тога да разлика у дужини стримера који су иницирани са различитих тачака дуж површине елисе није толико значајна.

Слика 6.5 – стр. 120. Карактеристике просторног наелектрисања које се генерише у околини врхова елиса и резултујуће електрично поље у асиметричним ваздушним зазорима, при променљивим брзинама ротирања елиса: $w = 0$ о/мин, и $w > 0$ о/мин. (а) Врх елисе је на позитивном потенцијалу. (б) Врх елисе је на негативном потенцијалу. Када су врхови елиса на позитивном потенцијалу пропагација стримера се одвија у ваздуху изнад рецептора, а у случају негативног поларисаних врхова елиса претежно дуж њихове спољне површине. На ваздушном притиску од око 1 бар и при усвојеној вредности електричног поља непосредно испод иницирања пражњења од 1 KV/mm, средња вредност брзине електрона је око 0,1 m/ μ s, а позитивних јона 10^{-4} m/ μ s, и због примене склопних прескочних напона D типа 250/2500 μ s електрично поље након формирања стримера углавном зависи од споро покретљивих јона. Напомена: EGAP – јачина електричног поља у ваздушном зазору, ESC – јачина поља услед присуства просторног наелектрисања, E – укупна јачина примењеног поља.

Слика 6.6 – стр. 122. (а) Иницирање прескока у кратким ваздушним зазорима у функцији производа притиска и дужине зазора. (б) Пораст позитивних склопних прескочних напона у функцији међуелектродног растојања у дугим зазорима у ВН лабораторији.

Слика 6.7 – стр. 123. Утицај ротације елиса на 50% прескочне напоне. (а) За ударне напоне негативног поларитета. (б) За ударне напоне позитивног поларитета.

Слика 6.8 – стр. 124. 2D симулација еквипотенцијалних линија и линија електричног поља у ваздушном зазору типа позитивно поларисана лучна електрода – врхови ротирајућих елиса.

Слика 6.9 – стр. 125. Пораст вредности прескочних напона, смањење електричног поља у ваздушном зазору типа лучна електрода–врхови елиса ветротурбине, и смањење броја директних удара на елисама, упоредо са повећањем брзине ротације елиса за анализирани СЛУЧАЈЕВЕ I, II и III, респективно. (а) За ударне напоне негативног поларитета. (б) За ударне напоне позитивног поларитета.

Табела 6.1 – стр. 118. Компарација површинских карактеристика елиса за суву и влажну средину, приликом пражњења негативног поларитета.

8.3. Биографија аутора



Бранко М. Радичевић је рођен 14.5.1970. године у Београду, где је завршио основну школу и Математичку гимназију. На Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за енергетику, дипломирао је 12.7.2001. године, са просечном оценом током студија 8,12 и оценом 10 на дипломском раду под насловом „Техноекономска анализа савремених ветрогенератора велике снаге“. Постдипломске студије уписао је такође на Електротехничком факултету у Београду, на профилу Енергетски претварачи и погони. Све предвиђене испите положио је са оценом 10. Магистарски рад са темом „Процена глобалног и локалног ветроенергетског потенцијала и савремена решења за добијање електричне енергије од енергије ветра“ одбранио је 10.12.2005. године. Од новембра 2001. године запослен је на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду, као асистент на Катедри за техничке науке. Држи рачунске и лабораторијске вежбе из предмета: *Обновљиви извори енергије, Електротехника у пољопривреди, Аутоматизација у пољопривреди и Физичко-техничка мерења*.

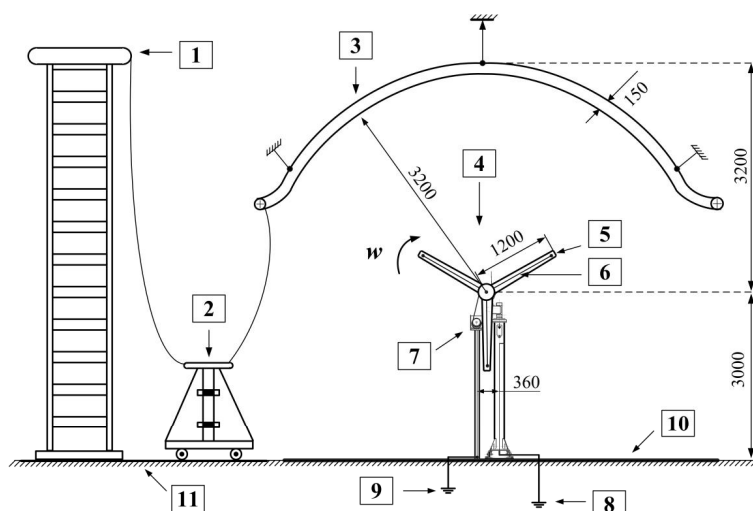
У свом досадашњем раду мр Бранко М. Радичевић је самостално, или у сарадњи са другим ауторима, објавио 20 радова у истакнутим међународним и домаћим часописима, 5 радова на међународним конференцијама и 10 радова на конференцијама националног значаја (више од половине радова је у непосредној вези са темом докторске дисертације). Учествовао је у реализацији пет пројекта технолошког развоја МНТР Републике Србије, две студије и једног међународног пројекта FP6 (из области ветроенергетике). Коаутор је једног удбеника. Пријавио је 1 међународни патент који је у фази одобравања. Научно-истраживачки рад мр Бранка М. Радичевића у протеклом периоду био је усмерен на следеће области: обновљиви извори електричне енергије, техника високог напона, заштита ветроелектрана од атмосферског пражњења, примена електричне енергије у индустрији и пољопривреди, електричне машине и информациони системи. Члан је Европског удружења за ветроенергију и IEEE организације.



ПРИЛОГ 1

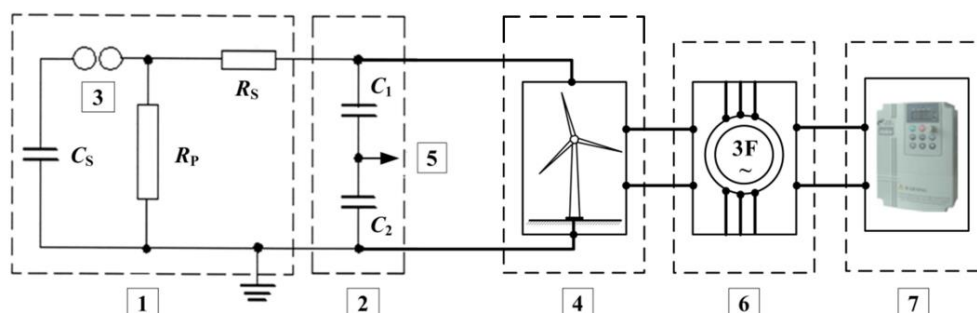
ПРЕГЛЕД И СПЕЦИФИКАЦИЈА КОРИШЋЕНЕ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ И ДОДАТНЕ ОПРЕМЕ

Модел ветротурбине умањених димензија



- 16-степенни ударни генератор HAEFELY (Marx типа) 4,5 MV (пик) и 336 kW;
 - Капацитивни делитељ напона;
 - Специјално конструисана алуминијумско-челична високонапонска лучна електрода дужине 10,5 m;
 - Модел ветротурбине са хоризонталном осом номиналне снаге 1 kW са троелисним ротором од GFRP изолационог материјала;
 - Бакарна капа/рецептор одговарајућих димензија на врховима елиса;
 - Систем спусних проводника кружног попречног пресека 50 mm²;
 - Трофазни фреквентно регулисани индукциони мотор ATB Sever ZKE номиналне снаге 4 kW;
 - Главни уземљивачки систем отпорности 4 Ω;
 - Помоћни уземљивачки систем отпорности 5,3 Ω;
 - Проводна плоча димензија 9 x 9 m;
 - Под лабораторије.
- Напомена:** Све линеарне димензије су дате у милиметрима.

Шема веза у високонапонској лабораторији



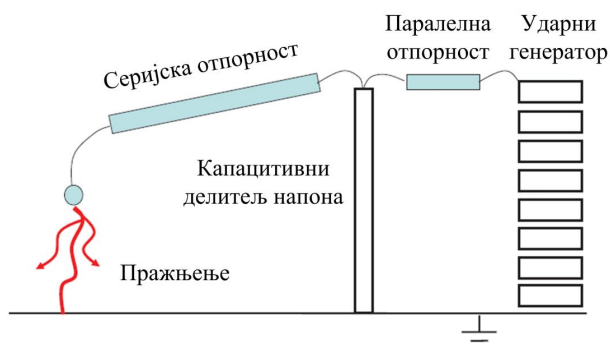
1. Ударни генератор 4,5 MV односа 10 x 1 конфигуриран да генерише склопни напон D типа позитивног и негативног поларитета;
2. Капацитивни делитељ напона $k = 3532,1$;
3. Сферно искриште; $R_s = 48 \text{ k}\Omega$ - еквивалентна серијска отпорност ударног генератора; $R_p = 53,3 \text{ k}\Omega$ - еквивалентна паралелна отпорност ударног генератора; $C_s = 0,0576 \text{ }\mu\text{F}$ - еквивалентни капацитет ударног генератора;
4. Модел ветротурбине умањених димензија;
5. Дигитални мерни и контролни систем типа TR-AS 100-10/3 (сертификат калибрације бр. 152/DKD - K - 18701/02.08);
6. Трофазни четворополни индукциони мотор номиналне снаге 4 kW;
7. Фреквентни регулатор ENC серије EDS-1000 за регулацију у опсегу снаге 5,5-7,5 kW.



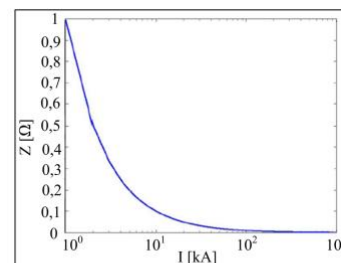
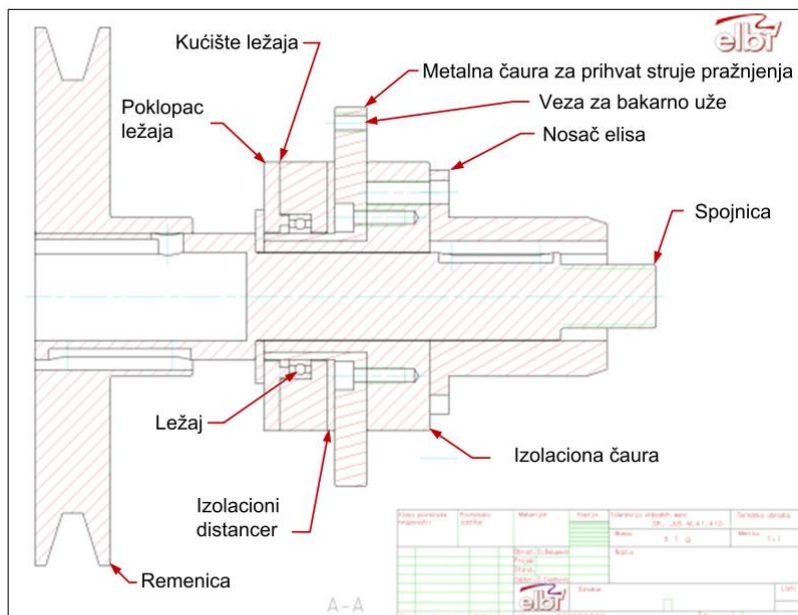
Наменски конструисане специјалне компоненте

(у току је фаза одобравања патената)

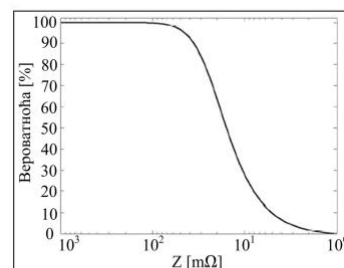
1. Серијска отпорност R_s већих димензија (до 3 m) између капацитивног делила напона и тестираног објекта, при чему је $45 \text{ k}\Omega \leq R_s \leq 75 \text{ k}\Omega$ – ради квалитетнијег испитивања појединих анализираних феномена.
2. Специјална лучна алуминијумско-челична електрода дужине 10,5 m у облику цилиндра пречника 15 cm, са циљем да иницирање развоја пражњења ка елисамо модела ветротурбине буде независно од њихове позиције.



3. Специјално дизајниран цилиндрични део са кугличним лежајем који је монтиран на главној осовини модела ветротурбине са циљем одвођења струје пражњења са ротирајућих елиса преко унутрашњости стуба ка уземљивачу.



Максимално дозвољена вредност импедансе на путањи струје пражњења кроз ветротурбину, при чему су посебно угрожени ротирајући куглични лежајеви.

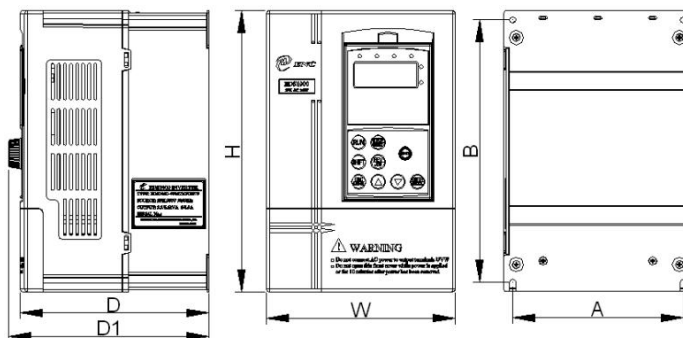


Дистрибуција укупне вероватноће импедансе на путањи струје пражњења кроз ветротурбину.

Приликом номиналне брзине ротације ветротурбине укупна дебљина слоја уља са обе стране кугличних лежајева процењена је на 100 μm и приликом пробоја у таквом зазору, за типичну вредност електричног поља од 15 MV/m, пробојни напон ће имати вредност 1500 V. Да би се спречила појава локалних прескока у зазору импеданса на путањи струје пражњења мора да има јако малу вредност (типично између 2–5 m Ω).



Фреквентни регулатор ENC серије EDS-1000 4Т0055G/0075P за управљање радом индукционог мотора којим је покретан троелисни ротор ветротурбине



Тип регулатора G: Generalni P: Specijalni EDS1000-4T0055G/0075P	A (mm)	B (mm)	W (mm)	H (mm)	D (mm)	D1 (mm)	Otvori za pričvršćenje (mm)	Težina kg.
	185	275	200	290	178	187	6	6,1

Ulaz	Nominalni napon/učestanost	3 x 380V, 50/60Hz ili 220V, 50/60Hz
	Dozvoljeni opseg napajanja	3 x 320-460V, ili 200-260V
Izlaz	Napon	400V tip: 0-380V; 200V tip: 0-220V
	Učestanost	od 0Hz do 400Hz
	Preopterećenje	G tip : 150% od nominalne struje 1 min. 200% od nominalne struje 0,5s P tip : 120% od nominalne struje 1 min.
Za indukcionni motor	Nominalna snaga	5,5/7,5 kW
Upravljačke performanse	Kontrolni mod	Zatvorena sprega vektora proklizavanja po brzini bez senzora, V/F kontrola otvorene sprege
	Opseg brzine	1 : 100
	Početni obrtni moment	150% nominalnog momenta na učestanosti od 1 Hz
	Preciznost stabilne brzine	±0,5% od nominalne sinhronne brzine
	Tačnost učestanosti	Digitalno max. učestanost x ± 0,01% Analogno max. učestanost x ± 0,2%
	Rezolucija učestanosti	Analogno 0,1% od max. učestanosti Digitalno 0,001 Hz Spoljnji impul 0,5% od max. učestanosti
	Povećanje obrtnog momenta	Automatsko/Manuelno od 0,1% do 20,0%
	V/F karakteristika	Zadavanje nominalne učestanosti u opsegu 5-400Hz, Izbor konstantnog momenta, Opadajući moment 1, Opadajući moment 2, Opadajući moment 3, Ukupno 4 vrste krivih.
	Dijagram ubrzanja/Usporenja	2 moda. Prava linija ubrzanja/usporenja i S kriva istih. 7 vremena ubrzanja/usporenja max. 6000 min.
	Kočnice	Otpor Ugrađeni ili spoljašni kočioni otpornik DC kočnica Opciono start i stop učestanost 0-15Hz, naponska 0-15%, vremenska 0-20s
	Pomak	Opseg pomaka učestanosti : 0,5-50,00Hz, zadavanje vremena ubrzanja/usporenja 0,1-60,0
	Rad sa više brzina	Ostvaren internim PLC-om ili preko kontrolnih priključaka
	Interni PID kontroler	Pogodan za izradu sistema sa zatvorenom spregom
	Rad sa automatskom štednjom energije	Optimizovana V/F kriva automatski prilagođena opterećenju, da bi se realizovala štednja energije
	Automatska regulacija napona (AVR)	Održava konstantni izlazni napon, ukoliko napon napajanja varira
Automatsko ograničenje struje	Automatsko ograničavanje struje da bi se izbegla česta prekoracjenja koja uzrokuju otkaz	
Radne funkcije	Izbora načina komandovanja	Sa tastature, preko priključaka, preko serijskog porta
	Izbor načina zadavanje učestanosti	Digitalno, analogno, impulsno, preko serijskog porta, kombinovano. Preklapanje moguće u svako doba.
	Impulsni izlaz	Kvadratni impulsi 0-20KHz
Tastatura	Analogni izlaz	2 izlaza : AO1 može biti 4-20mA ili 0-10V, a AO2 je 0-10V.
	LED displej	Prikazuje zadatu učestanost, izlaznu učestanost, izlazni napon, izlaznu struju itd. ukuno 20 vrsta parametara
	Blokiranje tastera	Blokira pojedine ili sve tastere (analogni potencijometar se ne može blokirati).
Zaštitne funkcije		Prekostrujna , prenaponska, podnaponska, preopterećenje, temperaturna, kao i zaštita od nestanka faze.
Ambijent	Ambijent za rad	Unutra, bez direktnog izlaganja suncu, bez prašine, bez korozivnih i zapaljivih gasova, bez ulja, magle, pare, vodenih kapi i sl.
	Nadmorska visina	Niže od 1000m
	Temperatura ambijenta	-10-+70°C
	Relativna vlažnost	Manja od 95%RH, bez kondenzacije
	Vibracije	Manje od 5,9 m/s ² (0,6g)
Konfiguracija	Temperatura skladištenja	-40-+70°C
	Stepen zaštite	IP20
	Hlađenje	Ventilatorom sa automatskom kontrolom temperature
Način montaže		Na zid, u orman.
Odgovarajući kočioni otpornici		Poseđuje ugrađeni kočioni otpornik ≥80Ω za snagu 650 W. Spoljnji se povezuje paralelno sa ugrađenim.



Трофазни индукциони фреквентно регулисани мотор АТВ Север – Суботица, са повећаним степеном корисног дејства, ZKE 4 kW, класа IE2 према IEC 60034-30



Standard	IEC 60034-1
Tip rotora	kavezni
Nominalna snaga	4 kW
Nominalna struja	7 A
Nominalna brzina	1435 o/min
Nominalni momenat	24 Nm
Efikasnost	86%
Faktor snage	0,82
Napon / frekvencija	230 - 690 V / 50 Hz, 60 Hz
Oсна visina	200 - 355
Broj polova	4
Klasa izolacije	F / B
Mehanička zaštita	IP 55
Hladenje	IC 411
Oblik ugradnje	IM B3, B5, V1
Prigradne mere	IEC 60072

Дигитална DSLR камера Nikon D7000 + 18-105mm VR + 70-300mm VR за снимање карактеристика пражњења у видљивом делу спектра



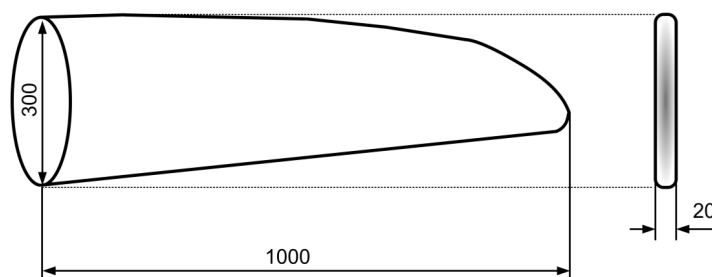
Tip	Refleksni digitalni fotoaparati sa jednim sočivom
Senzor	CMOS, 16,2 megapiksela, veličine 23,6 x 15,6 mm, 30-1/8000 s (zagvarач)
Objektiv	Tip sočiva: Nikkor AF/ F-mount, G-type, D-type Raspon objektivа: 18 - 105 mm / 70 - 300 mm Raspon blende: F/3,5-5,6G до F/4,5-5,6G Elektronska kontrolа blende sa vertikalnim zatvaranjem Balans bele boje: 12 predefinisanih pozicija Ekspozicija: 3D Colour matrix metering II, Centre weighted, Spot; Predefinisani režimi ekspozicije: 25 Stabilizacija slike: Optički zum: 5,8x / 4,3x
Autofokus	Nikon Multi-CAM 4800DX autofokus režim sa TTL detekcijom faze Maksimalno 39 tačaka fokusa (uključujući 9 unakrsnih senzora) AF 3D praćenje AF pomoćni iluminator Osetljivost: (-1 - +19) EV Ručni fokus: DA, 7 režima rada
ISO osetljivost	Auto, ISO 100-6400 Hi-1 (ISO 12800); Hi-2 (ISO 25600)
LCD	3 inča, 921000 piksela
Snimanje	Standard TV video: 640 x 424 @ 30 fps HD video zapis: 1280 x 720 @ 24/30 fps Full HD video zapis: 1920 x 1080 @ 24 fps Snimanje glasa (ugrađeni mikrofoni s promenljivom osetljivošću)
Dodatni objektiv 1	AF-S DX NIKKOR VR 18-55mm F/3,5-5,6G Ugao slike: 76° - 15°20'; Veličina priključka: 67 mm Maksimalni odnos reprodukcije: 0,2x (1/5) 15 elemenata u 11 grupa; 76 x 89 mm / 420 g
Dodatni objektiv 2	AF-S FX NIKKOR VR 70-300mm F/4,5-5,6G IF-ED Ugao slike: 22°50' - 5°20' (DX format) i 34°20' - 8°10' (FX format) Min. daljina fokusiranja / Veličina priključka: 150 cm / 67 mm Maksimalni odnos reprodukcije: 0,25x (1/4) 17 elemenata u 12 grupa; 80 x 143,5 mm / 745 g



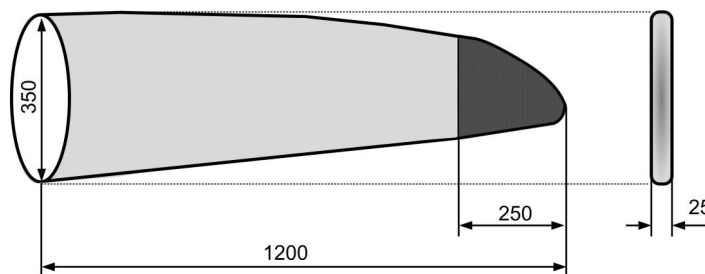
Појаве у UV делу спектра (претежно у опсегу таласних дужина 320–380 nm) снимане су помоћу специјалних и веома осетљивих лабораторијских камера, објектива и оптичких филтера.

Типови елиса фирме Елби (Ваљево) које су коришћене током динамичких испитивања утицаја ротације елиса на карактеристике директног атмосферског пражњења (све димензије су дате у [mm])

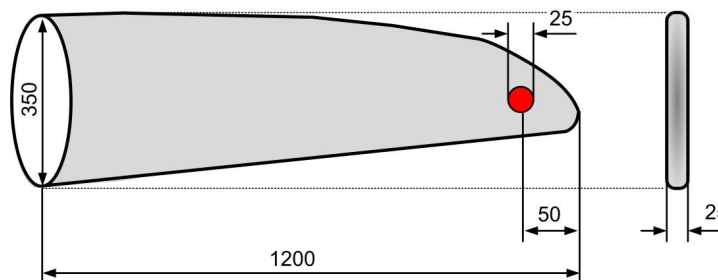
1. Елисе од изолационог GFRP ($\epsilon_r=4,7$) и/или делимично проводног CFC композита без заштитних громобранских система, шупљег и/или пуног попречног пресека.



2. Елисе од изолационог GFRP ($\epsilon_r=4,3$) и/или делимично проводног CFC композита са громобранском заштитом у облику металних капа и спусног проводника, шупљег и/или пуног попречног пресека.



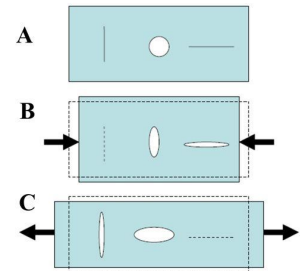
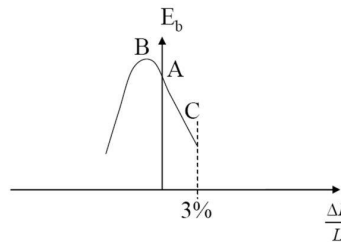
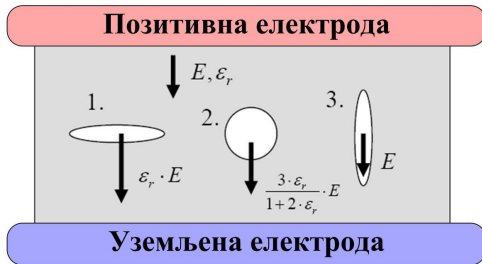
3. Елисе од изолационог GFRP ($\epsilon_r=4,3$) и/или делимично проводног CFC композита са громобранском заштитом у облику бакарних рецептора и спусног проводника, шупљег и/или пуног попречног пресека.



Приликом статичких испитивања коришћене су елисе од изолационог GFRP и/или делимично проводног CFC композита дужине 4 m (исечци врхова реалних елиса).



Коришћене елисе су имале хомогену и глатку спољну површину са добрим хидрофобним особинама и стандардним вредностима затезне чврстоће употребљених материјала, при чему су ваздушне шупљине у унутрашњости композита биле сведене на минимум.

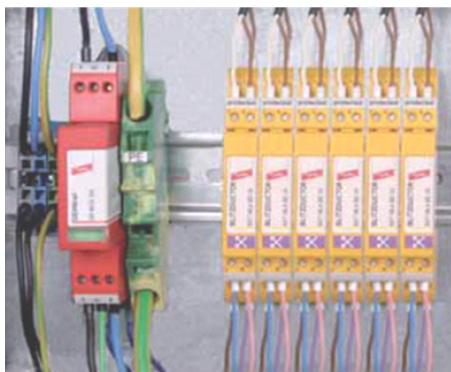


Слика лево: понашање различитих типова ваздушних шупљина у хомогеном изолационом слоју елисе. **Слика десно:** с обзиром да јачина пробојног поља (E_b) зависи од затезне чврстине GFRP материјала, као резултат сабијања и/или истезања елисе долази до различитих деформација ваздушних шупљина у унутрашњости композита.

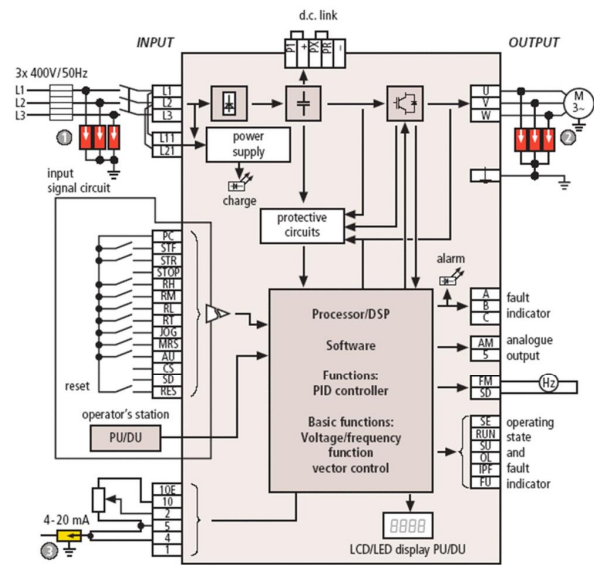
Пренапонска и прекострујна опрема фирме Dehn + Söhne, Neumarkt (Немачка) за заштиту модела ветротурбине и фреквентног регулатора



DEHNbloc maxi кординирана прекострујна заштита за 400/690 V TN-C систем.



DEHN BLITZDUCTOR XT прекострујна и пренапонска заштита.



No.	Type
①	DEHNguard S DG S 275
②	DEHNguard S DG S 600
③	BLITZDUCTOR XT BXT ML4 BE 24 + BXT BAS



ПРИЛОГ 2

ПРОРАЧУН ЗОНЕ ИЗЛОЖЕНОСТИ ВЕТРОТУРБИНЕ У ОДНОСУ НА ДИРЕКТНА АТМОСФЕРСКА ПРАЖЊЕЊА ПРИМЕНОМ ЕЛЕКТРОГЕОМЕТРИЈСКОГ МОДЕЛА

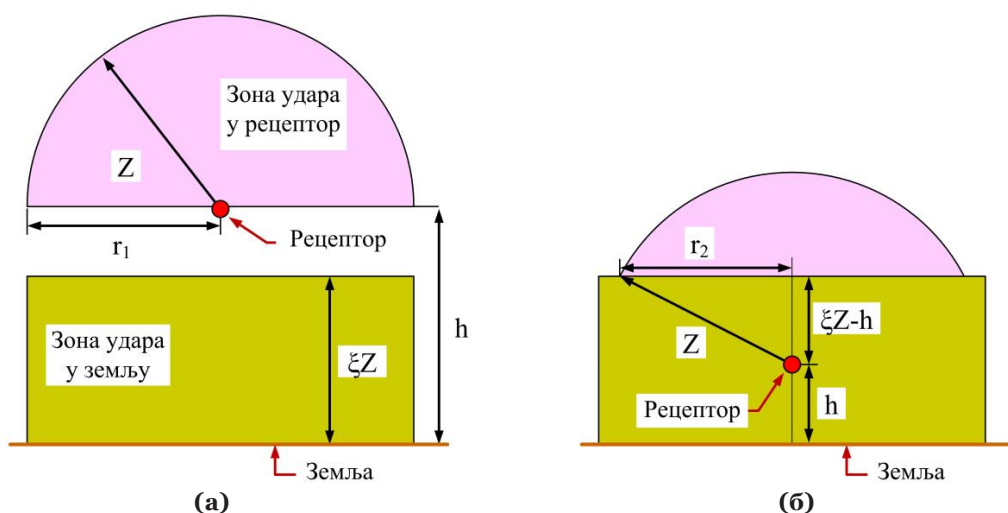
Интеракција негативно поларисаног силазног лидера (за потребе моделовања усвојено је да лидер има уопштности вертикалну путању) и врхова ротирајућих елиса ветротурбине настаје у зони изложености рецептора Z [m], при чему је ударно растојање r_1 [m] функција струје главног пражњења I [kA] на основу следеће релације:

$$Z = r_1 = 10 \cdot I^{0,65} \quad (\text{П2.1})$$

Удар у земљу (мимо ветротурбине) настаје када се лидер нађе у зони привлачног дејства земље која има дебљину ξZ и налази се непосредно изнад површине тла. Када је висина рецептора на врху елисе у односу на земљу h [m] већа од ударног растојања r_1 , зоне привлачног дејства рецептора и земље у околини ветротурбине се не поклапају – Слика П2.1(а). У случају када је $h < r_2$ долази до преклапања зона удара и атрактивна површина рецептора је круг са редукованим полупречником r_2 (Слика П2.1(б)):

$$r_2 = \left[2\xi Zh + Z^2 (1 - \xi^2) - h^2 \right]^{0,5} \quad (\text{П2.2})$$

при чему је константа ξ добијена на основу истраживања у вези са заштитом високонапонских водова и за типичну ветротурбину инсталисане снаге 3 MW може се усвојити да има вредност $\xi=0,75$.



Слика П2.1. Електрогеометријски модел примењен за ветротурбину инсталисане снаге 3 MW (висина гондоле $H=120$ m, дужина елиса $L_e = 50$ m). Ударно растојање за: (а) $h \geq \xi Z$, (б) $h < \xi Z$.

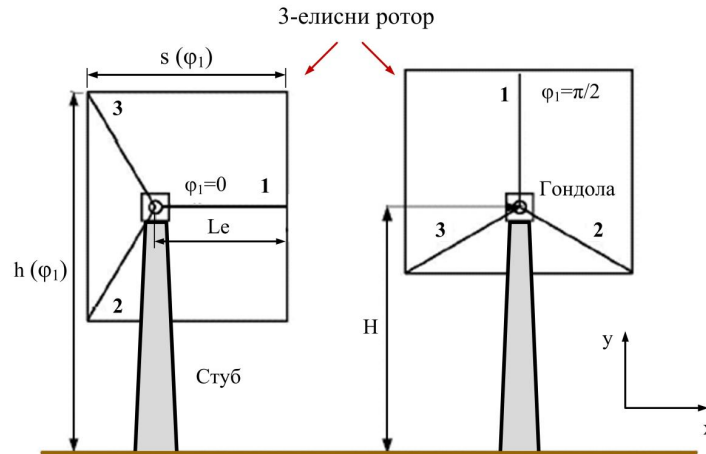
Троелисни ротор, који је најугроженија компонента ветротурбине, може се представити у облику правоугаоника, при чему су због ротације елиса ($0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi$) његова ширина и висина променљиве величине - Слика П2.2. Ширина правоугаоника s (φ_1) и његова висина h (φ_1) се могу представити на следећи начин:



$$s(\varphi_1) = L_e [\cos \varphi_1 - \cos(\varphi_1 + 2\pi / 3)] \quad (\text{П2.3})$$

$$h(\varphi_1) = H + L_e \sin \varphi_1 \quad (\text{П2.4})$$

где су: L_e [m] – дужина елисе ветротурбине, H [m] – висина гондоле изнад земље, и φ_1 [rad] угао између елисе обележене бројем 1 и x – осе.



Слика П2.2. Структурни модел ветротурбине.

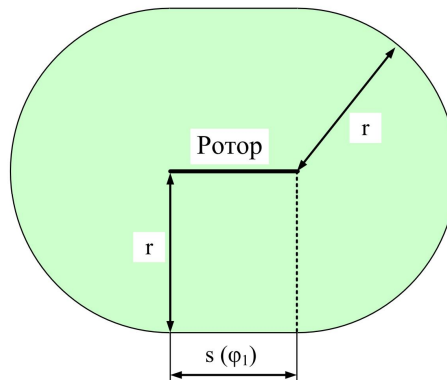
Еквивалентна изложена површина ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења дата је на Слици П2.3, при чему се ударно растојање може израчунати на следећи начин:

$$h \geq \xi Z \rightarrow r_1 = 10 \cdot I^{0,65}, \quad I < I_B \quad (\text{П2.5})$$

$$h < \xi Z \rightarrow r_2 = \left[20 \xi h I^{0,65} - h^2 + (10 I^{0,65})^2 (1 - \xi^2) \right]^{0,5}, \quad I \geq I_B \quad (\text{П2.6})$$

где је I_B гранична струја главног пражњења добијена на основу следећег израза:

$$I_B(\varphi_1) = e^{\frac{\ln[h(\varphi_1)/10\xi]}{0,65}} \quad (\text{П2.7})$$



Слика П2.3. Атрактивна зона изложености ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења.



Укупна годишња учесталост узлазних и силазних удара грома у ветротурбину N може се израчунати на основу следећег израза:

$$N = N_g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} A_d P_I P_{\varphi_1} dI d\varphi_1 \quad (\text{П2.8})$$

где су: N_g [$\text{km}^{-2} \cdot \text{година}^{-1}$] - локална просечна годишња густина удара грома по квадратном километру тла на локацији на којој су инсталиране ветротурбине, P_I и P_{φ_1} - функције густине вероватноће струје главног пражњења I и угла φ_1 , респективно, и A_d [m^2] - средња вредност површине атрактивне зоне директних удара у ветротурбину која се налази на равном тлу, при чему је:

$$A_d = \pi r^2 + 2rs(\varphi_1) \quad (\text{П2.9})$$

Заменом једначина П.2.5, П2.6 и П2.9 у П2.8 следи:

$$N = N_g \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{I_B(\varphi_1)} (\pi r_1^2 + 2r_1s(\varphi_1)) P_I dI + \int_{I_B(\varphi_1)}^{\infty} (\pi r_2^2 + 2r_2s(\varphi_1)) P_I dI \right] P_{\varphi_1} d\varphi_1 \quad (\text{П2.10})$$

Функција густине вероватноће угла φ_1 је униформна (угао φ_1 може имати било коју вредност у опсегу између 0 и 2π):

$$P_{\varphi_1} = (2\pi)^{-1}, \quad 0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi \quad (\text{П2.11})$$

Функција густине вероватноће струје главног пражњења I се може добити на основу *Anderson-Eriksson* једначине (Слика П2.4):

$$P_I = (2,6/39)(I/39)^{1,6} \times \left[1 + (I/39)^{2,6} \right]^{-2} \quad (\text{П2.12})$$

при чему је усвојено да функција густине вероватноће струје главног пражњења у разматрану ветротурбину има средњу вредност од 39 кА.

На основу једначине П2.8 може се добити укупан број директних удара грома у ветротурбину са струјом главног пражњења која има вредности између I_s и ∞ . Користећи програмски пакет MATLAB у опсегу струје I_s од 0 – 1000 кА нумерички се може решити следећи интеграл:

$$N(I_s) = N_g \int_0^{2\pi} \int_{I_s}^{\infty} A_d P_I P_{\varphi_1} dI d\varphi_1 \quad (\text{П2.13})$$

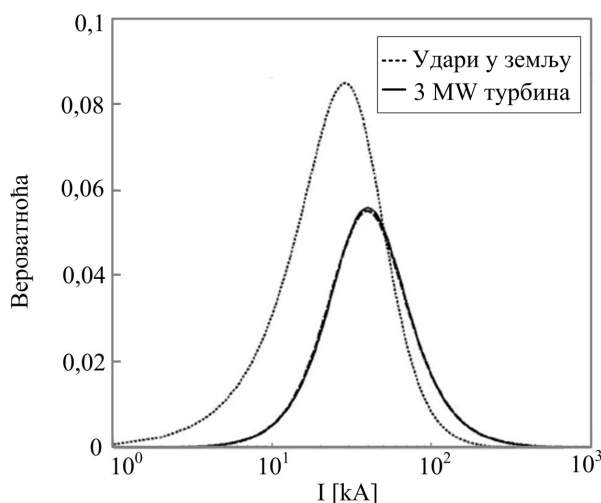
Дељењем једначине П2.13 са $N(0)$ добија се вероватноћа директних удара грома у ветротурбину са струјом пражњења која је већа од I_s .

Заменом једначина П2.11 и П2.12 у П2.10 и израчунавањем интеграла нумеричким путем у MATLAB-у са одговарајућим вредностима константи, може се моделовати зона изложености ветротурбине у односу на директна атмосферска пражњења. За разматрану ветротурбину номиналне снаге 3 MW вероватноћа директних удара у зони прихватног система на врховима елиса је:



$$P_N = 0,1432N_g \quad (\text{П2.14})$$

За усвојену вредност просечне годишње густине удара грома по квадратном километру тла на локацији инсталирања ветротурбина од $N_g=0,4 \text{ km}^{-2}\cdot\text{година}^{-1}$ и на основу предложеног модела добија се да вероватноћа директног атмосферског пражњења у ветротурбину износи 0,05728, што се у великој мери поклапа са детектованим вредностима у реалном раду разматраних ветротурбина. Ово практично значи да ће 5,73% ветротурбина доживети директан удар грома у току једне године.



Слика П2.4. Функције густине вероватноће струје главног пражњења у разматрану ветротурбину и у земљу у њеној околини.

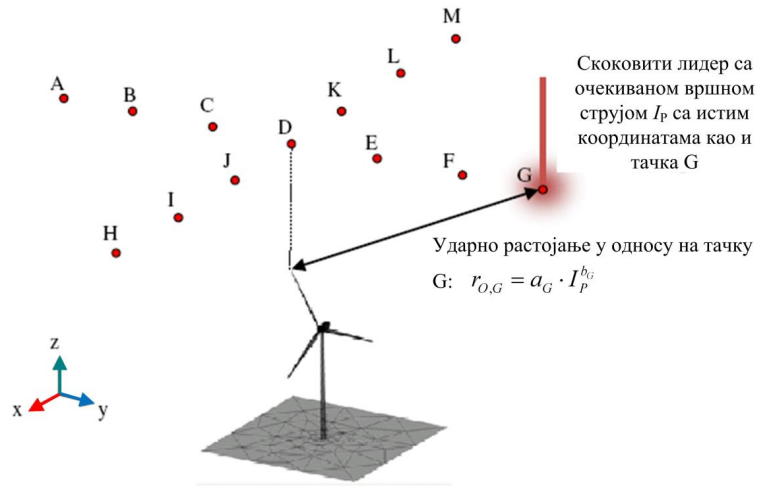
Узимајући у обзир утицај ротације елиса на смањење учесталости директног атмосферског пражњења за разматрану ветротурбину са инсталираном стандардном рецепторском заштитом и системом спусних проводника ($1 \leq n_r \leq 1,1$), добија се коригована вредност вероватноће директног удара грома у ветротурбину:

$$P_N = 0,1432n_r^{-1}N_g \rightarrow 0,1302N_g \leq P_N \leq 0,1432N_g \quad (\text{П2.15})$$

Ради одређивања тачније вредности ударног растојања у формули П2.8, за типична пражњења која погађају врхове ротирајућих елиса ветротурбине, може се применити модел (иницијално развијен од аутора *S. F. Madsen*) од 13 тачака (А-М), које представљају врх скоковитог лидера пред последњи скок. Тачка D је лоцирана вертикално изнад врха одговарајуће елисе, док су преостале тачке на међусобном растојању од 100 m дуж x и y осе – Слика П2.5.

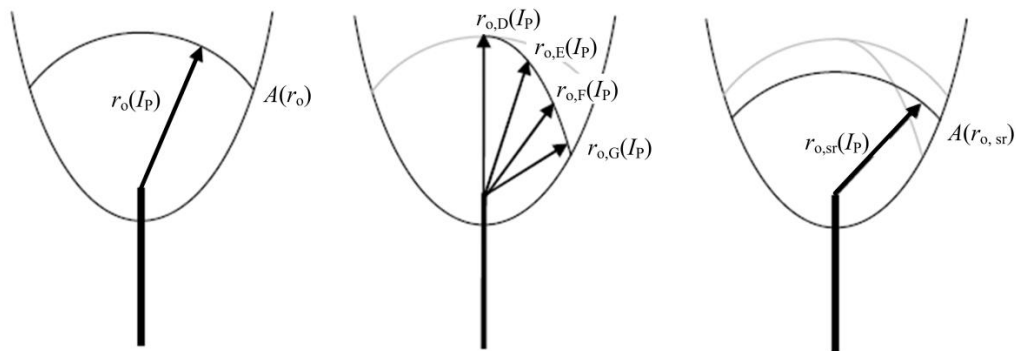
Процењена ударна растојања за сваку наведену тачку А-М у функцији вршне вредности струје пражњења (пик струје) су:

$$r_{0,A} = a_A \cdot I_P^{b_A}, r_{0,B} = a_B \cdot I_P^{b_B}, \dots, r_{0,G} = a_G \cdot I_P^{b_G} \quad (\text{П2.16})$$



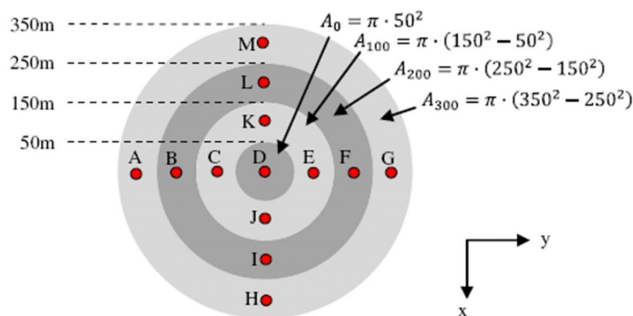
Слика П2.5. Процена ударног растојања за ветротурбине великих снага.

На тај начин се добија сферна површина ударних растојања $A(r_o)$ и средња вредност ударног растојања за сваку очекивану вршну вредност струје пражњења – Слика П2.6.



Слика П2.6. Прорачун средње вредности ударног растојања за случај када се врх скоковитог лидера налази у тачкама А-М са Слике П2.5.

Да би се израчунала средња вредност ударног растојања $r_{o,sr}(I_p)$, поједина ударна растојања $r_{o,A}$, $r_{o,B}$, ..., и $r_{o,M}$ морају бити скалирана у односу на вероватноћу да се врх скоковитог лидера пред последњи скок налази унутар површине која окружује место његовог иницирања у одређеном тренутку. Због тога, осенчене површине на Слици П2.7 представљају еквидистантне области могућег положаја главе лидера.



Слика П2.7. Ударна растојања $r_{o,A}$, $r_{o,B}$, ..., и $r_{o,M}$ скалирана на основу осенчених површина A_0 , A_{100} , A_{200} , и A_{300} .



Тежински фактори за тачке које су лоциране у областима A_0 , A_{100} , A_{200} , и A_{300} су:

$$\begin{aligned}
 T_{A_0} &= \frac{\pi \cdot 50^2}{\pi \cdot 350^2} = 2,04\% \approx \boxed{2\%} \\
 T_{A_{100}} &= \frac{\pi \cdot (150^2 - 50^2)}{\pi \cdot 350^2} = 16,3\% \approx \boxed{16\%} \\
 T_{A_{200}} &= \frac{\pi \cdot (250^2 - 150^2)}{\pi \cdot 350^2} = 32,6\% \approx \boxed{33\%} \\
 T_{A_{300}} &= \frac{\pi \cdot (350^2 - 250^2)}{\pi \cdot 350^2} = 48,9\% \approx \boxed{49\%}
 \end{aligned}
 \tag{П2.17}$$

Коначно, за средњу вредност ударног растојања $r_{0,sr}(I_P)$, која се употребљава за прорачун учесталости директног атмосферског пражњења у ветротурбине, добија се:

$$\begin{aligned}
 r_{0,sr}(I_P) &= T_{A_0} \cdot r_{0,D} + \frac{T_{A_{100}}}{4} (r_{0,C} + r_{0,E} + r_{0,J} + r_{0,K}) + \\
 &+ \frac{T_{A_{200}}}{4} (r_{0,B} + r_{0,F} + r_{0,I} + r_{0,L}) + \frac{T_{A_{300}}}{4} (r_{0,A} + r_{0,G} + r_{0,H} + r_{0,M})
 \end{aligned}
 \tag{П2.18}$$

Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges

Branko M. Radičević, *Member, IEEE*, and Milan S. Savić, *Senior Member, IEEE*

Abstract—The experimental research, whose most important segments are described in this paper, is one of the first attempts to determine the influence of wind turbine blade rotation on likelihood of getting struck by lightning. The tests were conducted in the high-voltage laboratory, applying the up-and-down method for determination of the 50% flashover standard switching voltage. The impulse voltage waves were applied between the specially designed arching electrode and the blades of a reduced-size wind turbine model, driven by a frequency controlled motor. Two types of lightning protection systems and the case of absent protection system were examined. According to the theory of similarity this paper discusses the characteristics of direct atmospheric discharges for the following typical rotational speeds of the wind turbine: $w = 0$ r/min (when the wind turbine is idle), $w = 250$ r/min (for the winds of moderate strength), and $w = 400$ r/min (rated rotor speed).

Index Terms—Air-termination system, arching electrode, blades, flashover voltage (FOV), induction motor, lightning protection, reduced-size model, rotation, up-and-down method, wind turbine.

I. INTRODUCTION

THE increasing need for the use of environmentally friendly energy sources has resulted in the incredible growth rate of installed wind turbines in the world [1], [2]. Using the doubled induction generator and the synchronous generator with permanent magnets, the development of power electronics and control systems, and the utilization of composite materials in the area of aeromechanics have enabled increase in physical dimensions and rated power of wind turbines.

Prospects of the further development of wind energy in the world are very optimistic. The improvement of the efficient protection of wind turbines against lightning is a very important because of their much specificity. Wind turbines are nonstandard structures with rotating elements being often placed at

locations with poor grounding conditions and when electrically interconnected in large wind farms, they are more vulnerable to lightning strikes [3]–[6].

Almost all direct strikes to a wind turbine will hit the rotor blades that are the most expensive single component of the turbine and/or the windvane. The probability distribution of lightning current values shows that the wind turbine blades capture lightning strikes with lower peak currents in comparison to the windvane [7]. More than 88% of lightning attachments occur within the outermost 1 m of the blade tip [8], but increased risk of inboard puncture for lightning strike of smaller current than 20 kA is also noticed [9].

Current lightning air-termination systems for rotor blades are designed to withstand about 98% of lightning strikes, but there is still a risk of local damage, particularly at the attachment point [10], [11]. This percentage largely depends on the type of composite material used for manufacturing the rotor blades [nonconductive glass fiber reinforced plastic (GFRP) or semi-conductive carbon fiber reinforced plastic (CFRP)], the applied type of lightning protection system (LPS) for blades, and its length.

The rotational speed of the blades w vary due to the stochastic nature of wind and for large wind turbines is between 0 and 25 r/min. A control system [12] provides the maximum possible electric power p_{el} at any moment and for each wind speed v_{wind} . Examining the current literature, we can conclude that the impact of wind turbine blade rotation on the lightning behavior is not sufficiently studied. The experimental results that are presented in this paper should enable a better understanding of this phenomenon.

II. IMPACT OF WIND TURBINE BLADE ROTATION

Development of thunderstorm in the region where wind turbines are located causes that the static electric field might increase to a level when streamers are formed on the blade tips prior an upward initiated lightning strike. A downward initiated lightning leader might propagate toward the blade tip until the field enhancement results in emission of answering leaders from the blade (see Fig. 1).

The increased field causes charge displacement in the metallic parts of the blade with induced positive charges in the tip area (in most cases) and negative charges moving to ground through the down conductor. The typical speed of the induced charges displacement ($\sim 2 \times 10^8$ m/s) is very high compared to the formation speed of the streamer (~ 0.1 – 1×10^6 m/s). The blade rotation of typical large wind turbines causes a maximum tip

Manuscript received February 22, 2011; revised June 15, 2011; accepted July 6, 2011. Date of publication September 15, 2011; date of current version November 23, 2011. This work was technically and financially supported by the ICMET Research, Development, and Testing National Institute for Electrical Engineering, Craiova, Romania (especially of D. Popa and I. Badea), the ELBI Company, Valjevo, Serbia (especially of Z. Cvetković, D. Belušević, and M. Jovanović), and the ABS Minel Elektrooprema Company, Ripanj, Serbia (especially of Z. Kukobat, and N. Rusić). Paper no. TEC-00094-2011.

The authors are with the Faculty of Electrical Engineering, Department of Electric Power Systems, University of Belgrade, Belgrade 11000, Serbia (e-mail: branko.radicevic@sbb.rs; savic_ms@eunet.rs).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TEC.2011.2162240

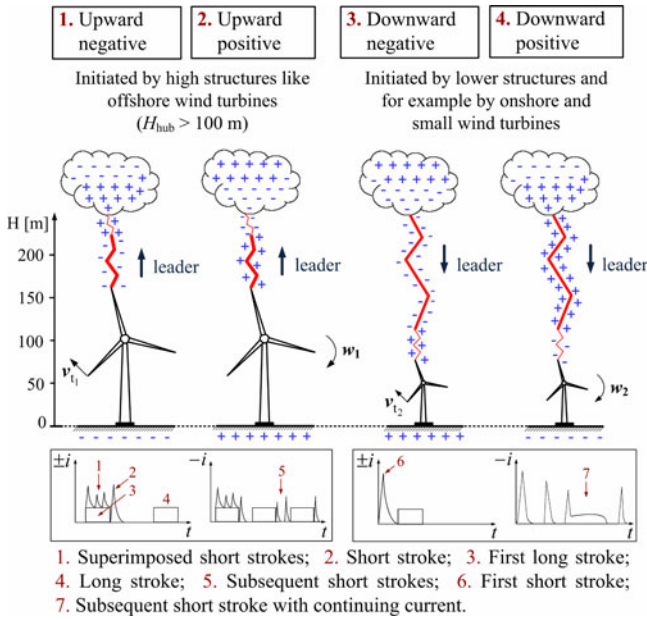


Fig. 1. Types of lightning and possible components of upward and downward flashes to wind turbines.

speed of about $v_{t1} = 90$ m/s for offshore and $v_{t2} = 80$ m/s for onshore wind turbines. According to the [13], the influence of the blade rotation can be ignored in connection with the initial answering leader formation. The lightning attachment process is not affected by the blade rotation, but after the attachment, when the lightning current flows and the time frame is up to a second, the situation is quite different.

In both upward and downward propagating lightning, the formation of upward propagating streamers from the wind turbine is most important in terms of defining the location on the structure that will be struck [14], [15]. For upward propagating lightning, the electric field in the air is near uniform being generated by the cloud (not by a stepped leader) and discharge is initiated at the wind turbine elements. For downward propagating lightning, the downward stepped leader provides a nonuniform electric field in the air around the wind turbine. The elements of the wind turbine LPS can intensify this electric field that will allow the formation of upward propagating streamers.

The incidence of upward and downward lightning flashes to the tall wind turbine can be calculated as follows:

$$N_{\text{upward}} = a \times N \quad (0.8 \leq a \leq 1) \quad (1)$$

$$N_{\text{downward}} = b \times N = C_d \times N_g A_d 10^{-6} \quad (0 \leq b < 0.2) \quad (2)$$

where coefficients a and b are relative number of upward and downward strokes, satisfying the condition: $a + b = 1$. The total annual lightning incidence of both directions N determined on the basis of observations of the lightning incidence to high structures in different countries is $N = 2.4 \times N_g H_e^{2.05} 10^{-5}$ [16]. The local average ground flash density N_g [$\text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$] may be estimated using the following relationship: $N_g \approx p T_d^q$. T_d is the number of thunderstorm days per year obtained from isokeraunic maps and the usually values for the coefficients are $p = 0.04$ and $q = 1.25$ [6]. H_e [m] is the effective height of a

wind turbine, taking into account the increase in the attractive area due to the surrounding uneven terrain. It can be calculated as: $H_e = k H_{\text{total}}$ ($k \geq 1$), where H_{total} [m] is the actual wind turbine total height above ground level ($H_{\text{total}} = H_{\text{hub}} + l_{\text{blade}}$).

C_d is the environmental factor with values ranging $1 \leq C_d \leq 5$ to give more correct estimation of the number of direct flashes at locations known to be very exposed to lightning in general (especially for wind turbines placed offshore) or to winter lightning in particular [17]. A_d [m^2] is the average collection area of direct lightning strikes and for a wind turbine placed on a flat ground can be estimated as circle area: $A_d = \pi \times (3H_{\text{total}})^2$.

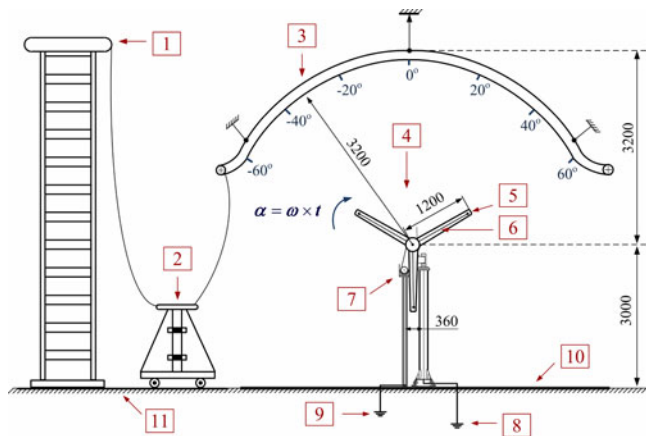
The lightning strike incidence and the main characteristics of the lightning discharges to wind turbines can be determined in following two possible ways.

- 1) Collection of data from actual lightning attachments on different types of wind turbines installed in various lightning environments.
- 2) Tests of wind turbine scale models conducted in a high-voltage laboratory, applying the standard switching impulse voltage waves of both polarities [18], [19].

The investigations have confirmed that upward initiated lightning might contribute to a large portion of the lightning strikes that attach to a wind turbine. The intensive move of wind farms to offshore sites and the low cloud height in winter months in coastal areas or in mountainous regions may increase the risk of upward lightning to wind turbines (the large percentage of winter lightning strikes, up to 98% are upward propagating) [15].

The electric field at ground level below thunderclouds can reach values in the range: $5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1} \leq E_g \leq 15 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ [4]. The wind turbine blade experiences fields that vary with the rotation of the blade from E_g (when the blade tip is near the ground) to a value than can reach a few times E_g (when the blade tip is at its highest position) which is due to the field-enhancement effect. According to [20], using finite element analysis modeling, it is concluded that the wind turbine was prone to higher field enhancement and that leaders would form in more locations when the blades are in motion. But the charging effect will appear also when only small winds are passing the blade surface, even when the turbine is standing still. The charging continues to raise the potential on the blade until minor surface flashovers short the surface charges to the air-termination system, or corona discharges to the air surroundings outbalances the charging current.

In [21], it is assumed that the lightning strike incidence for the operating blades of actual wind turbines should be statistically higher than that for inactive ones. The rotation of the blades may have a discernible impact on the number of strikes to the blades of large wind turbines as these may be triggering their own lightning. But this is more likely due to the geometry and the consequent upward initiated strikes. The charge build up in the thundercloud takes 20 min to an hour, and with a turbine revolving 12–15 times a min, it can be assumed that the rotation is not an impact itself, it is simply due to field enhancement. Also, the angular position of a blade for two different strokes in the same flash may vary as much as tens of degrees. If the interstroke interval Δt is long, it is possible that different return strokes within the same flash attach different blades.



Front view: 1. Impulse generator; 2. Capacitive voltage divider; 3. High-voltage arching electrode; 4. 3-bladed wind turbine model; 5. Conductive cap/receptor; 6. Down-conductor system; 7. Frequency-controlled induction motor; 8. Main grounding system of 4Ω ; 9. Auxiliary grounding system of 5.3Ω ; 10. Ground plane; 11. Laboratory floor. Note: All linear dimensions are in millimeters.

Fig. 2. Experimental setup for reduced-size wind turbine model testing.

Comparing the number of strikes to stationary wind turbines with the number of strikes to rotating blades in the same wind farm during a very long period of time, is a possible approach to determine the impact of the wind turbine blade rotation on the incidence of lightning strikes. However, it is very difficult to implement in practice. For this reason, the authors decided to build a reduced-size wind turbine model that was used to determine the influence of blade rotation on the lightning behavior. A very complex and challenging investigation was conducted in the certified high-voltage testing laboratories during the summer of 2010.

III. EXPERIMENTAL RESEARCH

A. Reduced-Size Wind Turbine Model

A reduced-size wind turbine model used in the impulse voltage tests is a modified version of commercial small wind turbine and also is a 1:33.3 scale model of an actual 2-MW wind turbine. A detailed model of the structure with arching electrode above the wind turbine in the high-voltage laboratory is schematically shown in Fig. 2.

The wind turbine model consists of the following main parts.

- 1) A three-bladed rotor is made of a composite GFRP insulating material. The first set of tests was conducted with the blades equipped with conductive caps 25 cm in length placed at the tops of the blades—Fig. 3(a). Second set of tests is performed by knob-type copper receptor 2.5 cm in diameter screwed into the both surfaces of each blade, 5 cm from the blade tip—Fig. 3(b). Caps/receptors are manufactured from a copper alloy having excellent electrical and thermal qualities. The last set of tests was conducted with the blades without lightning protection. Each cap/receptor was bonded to the main laboratory grounding system by means of the solid round copper down conductor 10 mm in diameter along the back of each blade—Fig. 3(c) (due to the greater stability of the entire wind turbine model the

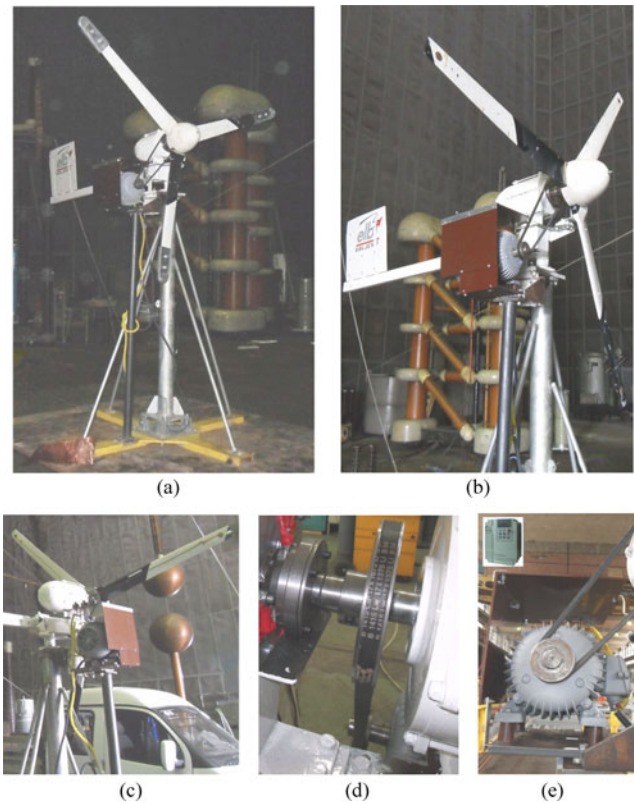


Fig. 3. (a) Three-bladed wind turbine model with the conductive caps at the rotor blade tops. (b) Conductive receptors at the rotor blade tips. (c) Down conductors on the back of the blades. (d) Main shaft ball bearings. (e) 4-kW frequency-controlled induction motor with belt coupling.

thin blades with full cross section were chosen). Therefore, when discharge hits the cap/receptor on one of the blades, a surge current propagates through a down conductor over the blade, a specially designed main shaft ball bearings [see Fig. 3(d)] and the grounding conductor inside a tower to the main grounding system.

- 2) The main tower is an iron cylinder with a height of 3 m. The nacelle is also the iron cylinder without a electric generator. The three-phase induction motor is placed into the Faraday cage attached to the main tower near its top, with the purpose to run the wind turbine rotor by means of belt coupling [see Fig. 3(e)]. The rotational speed of the blades may be continually regulated in a range between 0–1000 r/min by a frequency converter. The standard surge protection with the commercially available surge arresters was installed to protect the induction motor and frequency converter [22]–[24].
- 3) Massive cross-like base with vibration absorbers, where the main and auxiliary wind turbine tower are bolted.

B. High-Voltage Arching Electrode

The choice of the high-voltage electrode is very important during the investigation of the influence of wind turbine blade rotation on the characteristics of atmospheric discharges in the zone of the air-termination system on the blades.

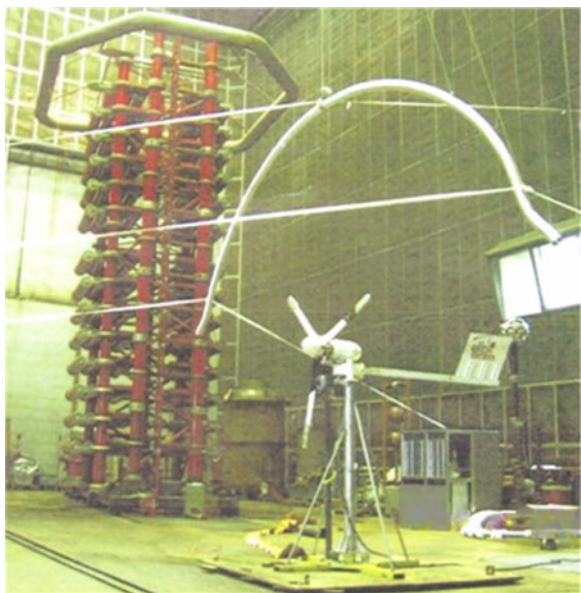


Fig. 4. Arching electrode set above the wind turbine model.

The authors decided to build a special arching electrode to initiate the discharge development toward the wind turbine blade independent on the blade position (see Figs. 2 and 4). The arching electrode was constructed to provide constant distance from the electrode to the blade tips while the blades are rotating. The electrode was made from thin aluminum cylinder 15 cm in diameter reinforced by the arc-shaped steel tube whose length is 10 m and was fastened by several insulating ropes to prevent its movements. The blades and the arching electrode are in the same plane.

Based on the measured values in the range $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ at several characteristic points above the blades, it was concluded that the electric field is nearly uniform (see Fig. 2). When the rotor is turning an approximately uniform flashovers distribution has been detected in the same range of α along the arch (see Table III). The arching electrode can provide a quasi-uniform field above the blade, less conducive to originating a discharge from it to approach the blade, or to represent a leader approaching from above the turbine, but mostly at its ends. For this reason the total length of the arching electrode is 10.5 m (arch length is somewhat greater than 120°) and its ends are bent for the purpose of eliminating the flashovers caused by border effect.

The optimal distance between the arching electrode and the top of the blades was set at 2 m for impulse voltages of both polarities. According to the theory of similarity the scaling is very difficult, as well as the assessment how long sparks in the lab needs to be to represent actual lightning environment. It is also necessary to scale the velocity of the blade tip and the velocity of the streamers. Considering naturally occurring downward initiated lightning, the distance of 2 m corresponds to a minimum striking distance of 66.6 m, whereas the arching electrode represents the top of stepped leader before the last jump. During the testing, the streamers could easily be developed from the wind turbine model. Therefore, the choice of arching electrode is a very realistic arrangement for the experiments.

C. Test Cases, Method, and Experimental Conditions

All tests were conducted according to current standards [17], [23], [24]. Experimental analysis was performed using the reduced-size model for following three characteristic cases.

CASE I: Conducting caps are installed at the tops of the blades.

CASE II: Conducting receptors are installed on blade tips.

CASE III: Wind turbine model without any protection systems on the blades.

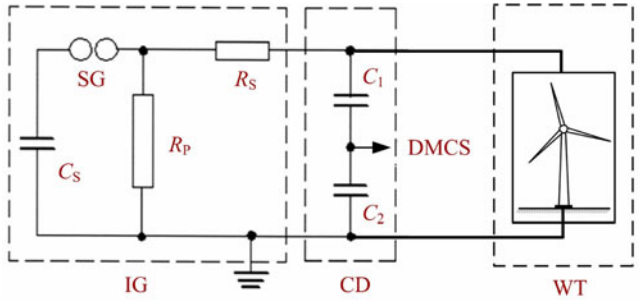
In all these cases, the experiments are performed for three typical rotational speeds of the wind turbine blades: 1) $w = 0$, when the wind turbine is fixed with one blade vertical; 2) $w = 250$ r/min, for the winds of moderate strength; and 3) $w = 400$ r/min, rated rotor speed. The observed range of rotational speeds w for the reduced-size wind turbine model corresponds to the range of rotational speeds 0–25 r/min for the actual wind turbine, according to the formula: $v_t = \pi w l_b \times 30^{-1}$, where v_t [m/s] is the peripheral blade tip speed, w [r/min] is the rotational speed of the blades, and l_b [m] is the blade length.

A large wind turbine is mostly designed to operate for 25 years with only a minimum of maintenance. The typical 2-MW turbine ($H_{\text{hub}} = 100$ m, $l_{\text{blade}} = 40$ m) for $N_g = 0.75$ km⁻²·year⁻¹ and $k = 1$ is hit by a lightning flash once within a period of about 2.2 years. But at some locations around the world, and for especially bad weather conditions, wind turbines are found struck up to ten times a day. It is important that the number of discharges in laboratory conditions is comparable with the expected conditions for the actual wind turbine location. In each of the analyzed cases, $n = 20$ discharges with negative and positive polarity were implemented, giving information on the areas of wind turbine blades that will possibly trigger a lightning strike by incepting leaders toward the arching high-voltage electrode.

A standard switching impulse voltage waveform 250/2500 μ s was applied to the arching electrode with amplitude sufficient to create a flashover [see Figs. 5 and 6(a)]. Switching impulse voltage is usually taken as the most representative for the electric field in the vicinity of a wind turbine during an initial leader attachment [25]. Flashover should take place on the rising front of the impulse wave and close to the peak. The time between initiation of the voltage waveform and the flashover to the structure must be at least 50 μ s [17].

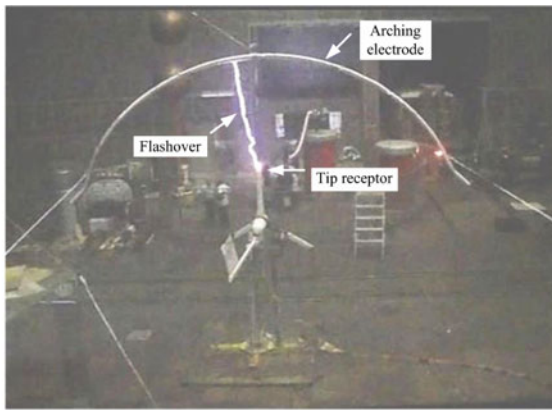
The up-and-down method was applied for determining 50% switching flashover voltage (FOV) in all the cases examined. When the FOV is normally distributed (according to the Gaussian distribution) the up-and-down method permits a quite reliable estimation of the 50% FOV [26]. Before the beginning of each measuring set, the initial voltage U_{00} was chosen at which with certainty no flashover occurs. The voltage is then initially raised in steps of an approximately constant amplitude Δu until the first flashover occurs at a voltage U_{l1} (see Fig. 7). The voltage is then reduced by Δu . If no flashover occurs at voltage $U_{l2} = U_{l1} - \Delta u$, the test voltage should again be raised through Δu , otherwise be reduced by Δu .

The process is repeated until a predetermined number n of voltage values $U_{l1}, U_{l2}, \dots, U_{ln}$ are obtained. With a large

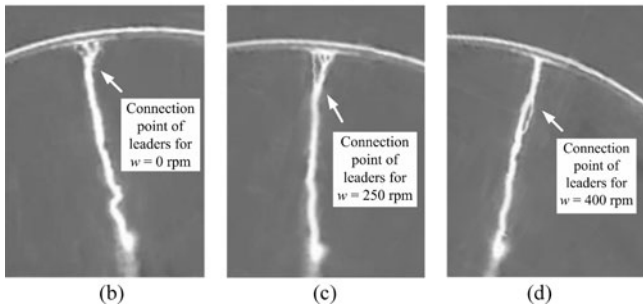


IG - Impulse generator; CD - Capacitive voltage divider; SG - Spark-gap; R_s - equivalent serial resistance of impulse generator; R_p - equivalent parallel resistance of impulse generator; C_s - equivalent capacity of impulse generator; WT - Reduced-size wind turbine model; DMCS - Digital measuring and control system.

Fig. 5. Measuring and control system in the high-voltage laboratory.



(a)



(b)

(c)

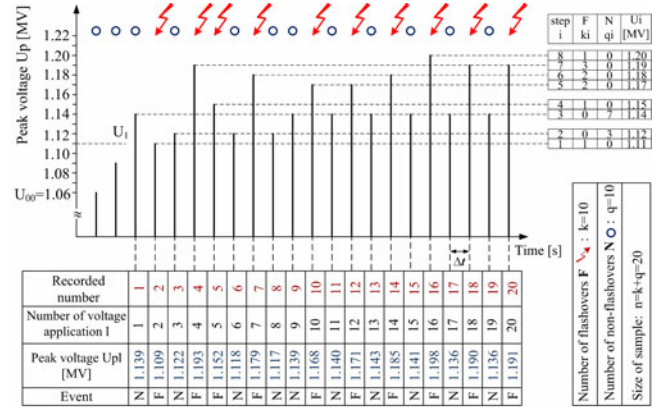
(d)

Fig. 6. (a) Photo from the control room when a negative impulse voltage is applied to the arching electrode for the CASE II. (b)–(d) Enlarged photos of typical leaders connection.

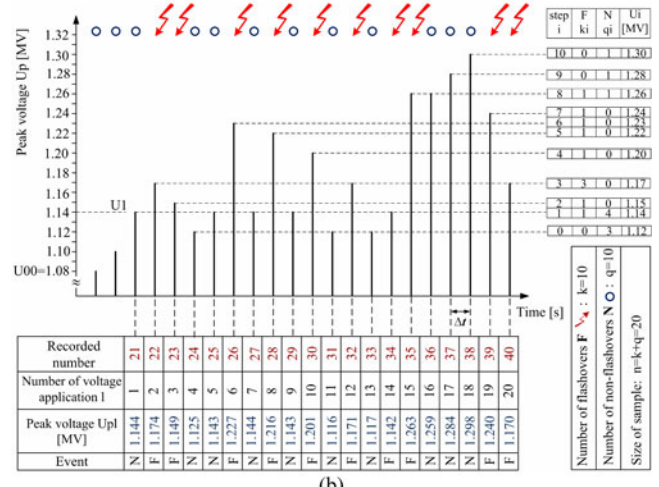
sample n , the arithmetic mean of these voltages in itself provides a preliminary estimate of the required 50% FOV. If the number of strikes was defined as n_l at any level U_l , the 50% FOV can be calculated as follows:

$$U_{50\%FOV} = \frac{\sum_{l=1}^{n=20} n_l U_l}{\sum_{l=1}^{n=20} n_l} \quad (3)$$

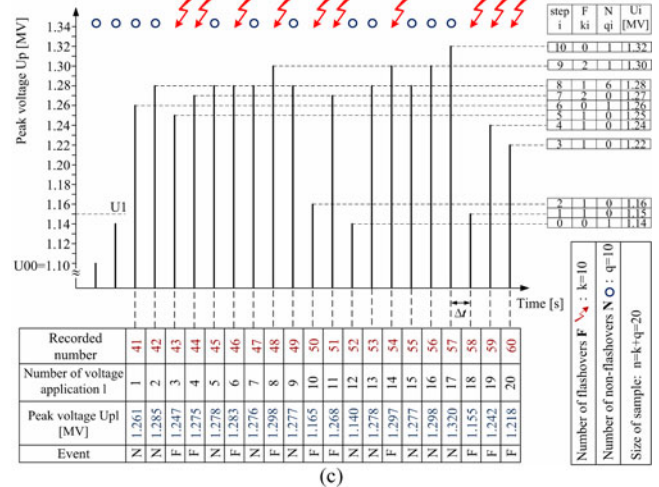
The first voltage level previously being adopted was the one having two or more strikes, in order to avoid mistakes if the initial voltage was chosen too low or high. The 10% FOV was also determined on the basis of the Gaussian distribution. Uncertainty for determined voltage peak value, for both polarities,



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Up-and-Down method for the CASE II when a negative impulse voltage is applied to the arching electrode. (a) $w = 0$ r/min. (b) $w = 250$ r/min. (c) $w = 400$ r/min.

was 1.6%. The stated uncertainty is expanded one, obtained by multiplying the standard uncertainty by a coverage factor $k = 2$. The value of a measuring results lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

TABLE I
DISCHARGE MANNER FOR THE ANALYZED CASES

Switching voltage polarity	CASE I Conductive caps at the blade tops		CASE II Conductive receptors at the blade tips		CASE III Non-conductive blades without protection	
	Discharge manner	No. of times	Discharge manner	No. of times	Discharge manner	No. of times
Rotational speed of the blades: $\omega = 0$ rpm						
Negative	Electrode - to-ground	0	Electrode - to-ground	0	Electrode - to-ground	6
Negative	Cap	10	Receptor	9	Creeping	4
Negative	Penetration/damage	0	Penetration/damage	1	Penetration/damage	0
Positive	Electrode - to-ground	0	Electrode - to-ground	0	Electrode - to-ground	7
Positive	Cap	9	Receptor	8	Creeping	2
Positive	Penetration/damage	1	Penetration/damage	2	Penetration/damage	1
Rotational speed of the blades: $\omega = 250$ rpm						
Negative	Electrode - to-ground	1	Electrode - to-ground	1	Electrode - to-ground	7
Negative	Cap	9	Receptor	8	Creeping	3
Negative	Penetration/damage	0	Penetration/damage	1	Penetration/damage	0
Positive	Electrode - to-ground	1	Electrode - to-ground	2	Electrode - to-ground	8
Positive	Cap	8	Receptor	6	Creeping	1
Positive	Penetration/damage	1	Penetration/damage	2	Penetration/damage	1
Rotational speed of the blades: $\omega = 400$ rpm						
Negative	Electrode - to-ground	2	Electrode - to-ground	2	Electrode - to-ground	8
Negative	Cap	8	Receptor	7	Creeping	2
Negative	Penetration/damage	0	Penetration/damage	1	Penetration/damage	0
Positive	Electrode - to-ground	2	Electrode - to-ground	2	Electrode - to-ground	9
Positive	Cap	7	Receptor	5	Creeping	0
Positive	Penetration/damage	1	Penetration/damage	3	Penetration/damage	1

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Comparison of Applied LPS

The reduced-size wind turbine model is not quite appropriate for evaluating the composite blade protection effectiveness. However, in the first part of the investigation a short comparison of applied LPS on the blades, for different rotational speeds, was carried out (see Table I).

The high-voltage tests have been used to predict possible lightning attachment locations on the blades, especially to assess the likelihood of successfully capturing the lightning strikes to a preferred attachment points, and to determine breakdown paths across or through the blades.

The blades covered with conducting cap at the top showed relatively higher protection efficiency than the blades with receptors. When a negative impulse voltage was applied to the arching electrode, the electrical discharge starts at the positive induced charges on the blade tips and in most cases was attached to the conductive caps/receptors at the 50%FOV between -1110 and -1710 kV (see Table II). On the other hand, when a positive impulse voltage was applied to the electrode, the discharge will

TABLE II
50% AND 10% FOV FOR THE ANALYZED CASES

50% and 10% switching flashover voltages [kV]	Rotational speed $\omega = 0$ rpm		Rotational speed $\omega = 250$ rpm		Rotational speed $\omega = 400$ rpm	
	Voltage polarity					
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
CASE I Conductive caps at the blade tops						
$U_{50\%}$	-1109.3	2118.8	-1144.7	2231.1	-1223.8	2459.9
$U_{10\%}$	-1020.6	1949.3	-1053.1	2052.6	-1125.9	2263.1
CASE II Conductive receptors at the blade tips						
$U_{50\%}$	-1139.0	2164.2	-1171.5	2270.2	-1246.2	2488.7
$U_{10\%}$	-1047.9	1991.0	-1077.8	2088.6	-1146.5	2289.7
CASE III Non-conductive blades without protection						
$U_{50\%}$	-1608.4	3039.8	-1637.6	3121.8	-1708.2	3325.5
$U_{10\%}$	-1479.7	2796.6	-1506.6	2872.0	-1571.6	3059.5

start here and proceed all the way to the blade, where positive space charge due to the pointy geometry and the induced negative charge on the blade shields the air-termination system (the consequence is a puncture of the blade, also very common in the real world). In this case, the discharge was easily attached to an insulated surface of a blades at the 50% FOV around 2120–3325 kV. The difference in voltage amplitude can be explained by strongly inhomogeneous electric field and the extensive mobility of electrons in comparison with positive ions.

In most cases, the discharge struck the caps/receptors directly, as shown in Fig. 6(a). Sometimes the discharge propagated along the surface of the blade tips and attached to the receptors. In both cases lightning current is transmitted to ground through the down conductor safely. In the case of positive switching impulse voltage (blades at negative polarity) greater damages appeared on the blades, due to the increased FOV. The discharge may be attached to the blade edge just below the conducting cap. The higher field is necessary to overcome the positive space charge that surrounds and shields receptors on negative charged blades, making them less effective in producing answering leaders. In respect of nonconductive blades without LPS, the electrode-to-ground discharges were frequently noticed. Creeping discharges along the edge of the lower half of the blades and penetrative destructions were also observed several times.

In all analyzed cases, on the basis of the review of recorded video material during the testing the following was concluded. In the case of negative polarity on the electrode, the connection points of leaders from the wind turbine and the arching electrode were closer to the electrode. When the electrode was at positive polarity, the connection points have moved closer to the blade tip, due to the increased voltage necessary for creating a spark.

B. Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges

The main objective of the second part of this experimental research was to analyze the influence of wind turbine blade rotation on the lightning strike incidence.

1) *Tests With Negative Switching Impulse Voltages (Blades at Positive Polarity)*: For the CASE I from the Table II, it can be seen the FOV rise for $w = 250$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min for 3.2%, as well as the FOV rise for $w = 400$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min for about 10.3%.

It is well known that more than 90% of natural lightning flashes are of negative polarity. As stated in Section II, wind turbines are mostly exposed to upward initiated lightning. Also, the majority of actual wind turbines have the air-termination system in the form of lightning receptors on the tips of the blades. Therefore, these cases are examined in detail.

A comprehensive analysis for the CASE II when a negative impulse voltage is applied to the arching electrode is presented in Figs. 6–8. Based on the Fig. 6(b)–(d) can be observed that the connection points of leaders from the arching electrode and the corresponding blade are located closer to the arching electrode. However, concurrently with the increase in the rotational speed of wind turbine blades the connection points are moved a little closer to the blade tip and the discharges from the arching electrode are extended deeper into the gap.

In the CASE II, the FOV rise for $w = 250$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min for 2.9% can be observed, as well as the FOV rise for $w = 400$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min for 9.4% (see Table II).

In the CASE III, a somewhat slighter FOV rise for $w = 250$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min, as well as the FOV rise for $w = 400$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min (values are 1.8% and 6.2%, respectively) can be detected in relation to previous examples (see Table II). In all three cases, a slight increase in the number of electrode-to-ground lightning discharges was observed. This effect becomes more pronounced when the rotational speed increases (see Table I).

2) *Tests With Positive Switching Impulse Voltages (Blades at Negative Polarity)*: From the Table II, it can be seen the FOV rise for $w = 250$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min of 5.3% in the CASE I and 4.9% for CASE II. The FOV rise for $w = 400$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min is about 16.1% in the CASE I and 15% for CASE II.

Unlike the two previous cases in the CASE III somewhat slighter FOV rise for $w = 250$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min, as well as the FOV rise for $w = 400$ r/min in relation to the FOV for $w = 0$ r/min (values are 2.7% and 9.4%, respectively) is noticed. As in the case of negative switching impulse voltage, a slight rise in the number of electrode-to-ground lightning discharges, when the rotor is turning, was detected (see Table I). Also, the impact of blades rotation was more noticeable in the cases of positive discharges.

C. Voltage Waveforms

By analyzing the enlarged voltage waveforms, it can be concluded that slight increase in wave oscillation occurs concurrently with the increase in the rotational speed of the wind turbine blades, particularly in the zone near the peak values of the FOV (see Fig. 8). It was detected that increase in the dispersion σ of FOV occurs simultaneously with the increase in the rotational speed (see Table IV). Likewise, the mean value of

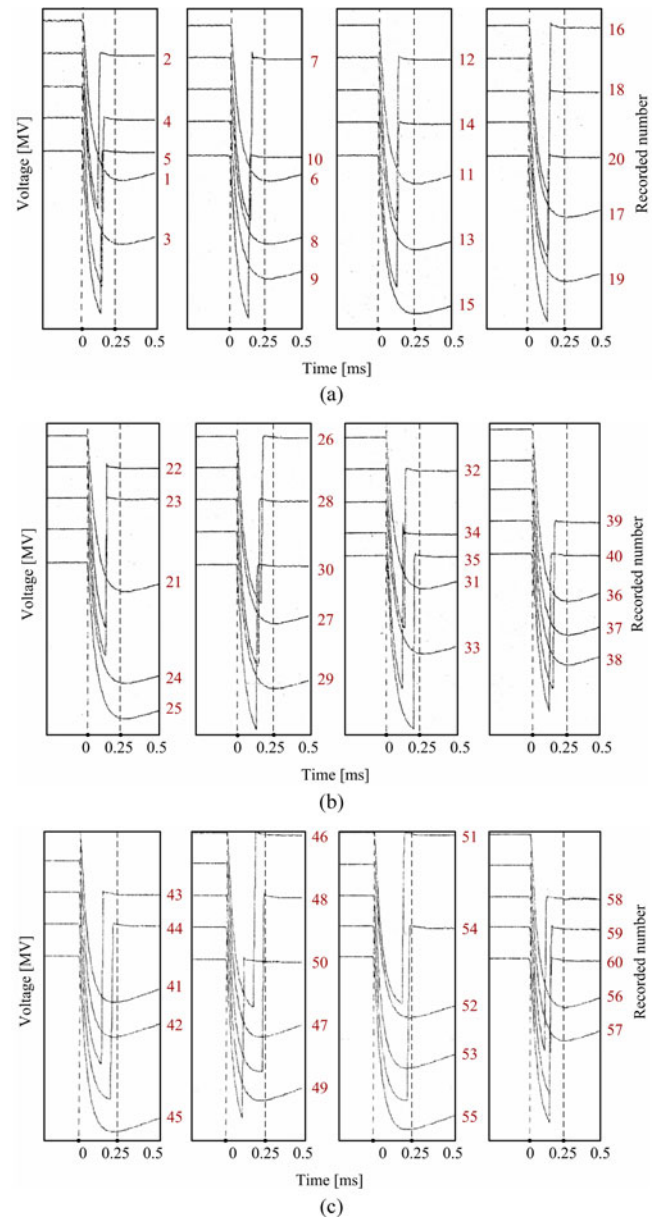


Fig. 8. Characteristic waveforms when a negative impulse voltage is applied to the arching electrode for the CASE II. (a) $w = 0$ r/min. (b) $w = 250$ r/min. (c) $w = 400$ r/min.

the wave time to flashover was increased concurrently with the increase in the rotational speed.

V. DISCUSSION

Although the reduced-size wind turbine model is not quite suitable for analysis and comparison of the applied LPS on the blades, the data presented in Table I agree with full scale laboratory test results of GFRP blades with tip receptors and enclosed down conductors.

The experimental results of the second part of this investigation show the following; concurrently, with the increase in rotational speed of wind turbine blades the number of direct lightning strikes to the blades, when the discharge struck cap/receptor

TABLE III
NUMBER OF FLASHOVERS ALONG THE ARCHING ELECTRODE FOR NEGATIVE SWITCHING IMPULSE VOLTAGE

CASE II Conductive receptors at the blade tips						
Rotational speed of the blades	Position along the arching electrode α [°]					
	[-60°, -40°]	[-40°, -20°]	[-20°, 0°]	[0°, 20°]	[20°, 40°]	[40°, 60°]
Number of flashovers (F)						
$w = 0$ rpm one blade is straight up	0	0	4	5	1	0
$w = 0$ rpm one blade is straight down	3	2	0	0	1	4
$w = 250$ rpm	2	1	2	1	2	2
$w = 400$ rpm	2	1	1	1	2	3

TABLE IV
RELATIVE INCREASE OF 50% FOV AND DISPERSIONS OF FLASHOVER VOLTAGES FOR THE ANALYZED CASES

Voltage polarity	$\frac{U_{50\% 250rpm}}{U_{50\% 0rpm}}$	$\frac{\sigma_{250rpm}}{\sigma_{0rpm}}$	$\frac{U_{50\% 400rpm}}{U_{50\% 0rpm}}$	$\frac{\sigma_{400rpm}}{\sigma_{0rpm}}$	$\frac{U_{50\% 400rpm}}{U_{50\% 250rpm}}$	$\frac{\sigma_{400rpm}}{\sigma_{250rpm}}$
	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
CASE I Conductive caps at the blade tops						
(-)	1.032	1.078	1.103	1.117	1.069	1.080
(+)	1.053	1.081	1.161	1.119	1.102	1.084
CASE II Conductive receptors at the blade tips						
(-)	1.028	1.081	1.094	1.122	1.064	1.087
(+)	1.049	1.086	1.150	1.126	1.096	1.090
CASE III Non-conductive blades without protection						
(-)	1.018	1.098	1.062	1.246	1.043	1.134
(+)	1.027	1.100	1.094	1.250	1.065	1.137

directly or penetrate/damaged the blade tip, slightly decreased (see Table I). The influence of blade rotation becomes more dominant with the increase in rotational speed of the blades and is more noticeable in the cases of positive discharges. Effect of blade rotation on the 50% switching FOV, which are obtained based on the up-and-down method, is shown in Fig. 9.

The consistent increase in FOV occurs due to a separation of space charge from the blade tip. At $w = 250$ r/min a blade tip moves 6.3 mm during the 200 μ s time that an impulse voltage is increasing before flashover. In some cases of lightning discharge, the blade tip moves very little after the applied electric field has become sufficient to initiate corona at the blade. The increase in 50% FOV compared to the case when the wind turbine is idle is relatively small (about 3%).

But it must be noted that at $w = 400$ r/min (rated rotor speed) the blade tip moves about 1 cm during the 200 μ s time and the increase in 50% FOV compared to the $w = 0$ r/min is noticeable (about 10%). The initial leader may “sweep” along the blade surface a short distance prior to first stroke arrival. The original ionized channel may shift and can be extended as the rotating tip moves away from it. The cumulative effect of increased space charge dispersion in the zone of the air-termination system on the blades, caused by strong wind circulation near the blades, is more pronounced in this case (due to greater utilization of wind

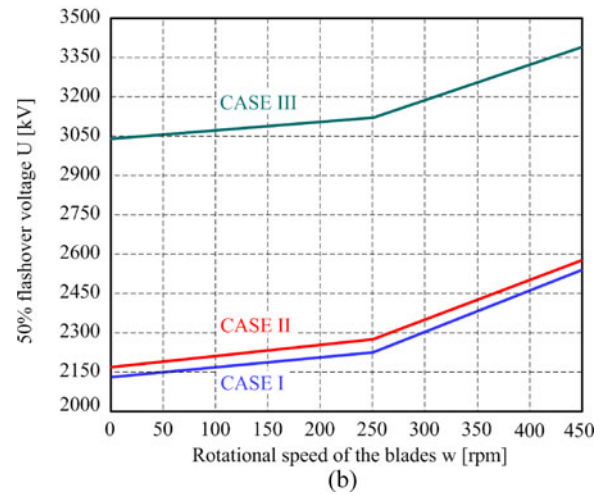
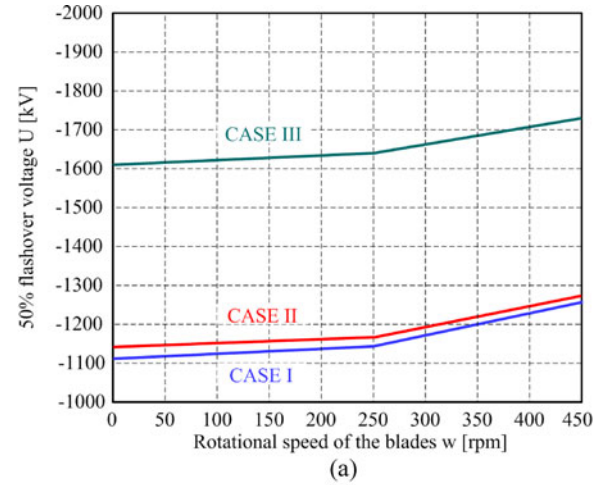


Fig. 9. Impact of blade rotation on the 50% FOV. (a) For (–) switching voltage polarity. (b) For (+) switching voltage polarity.

energy it is necessary that the blades rotate at the rated speed as long as possible).

When the rotor is turning more rapidly there is a statistically greater possibility that one of the blades will happen to be near an end of the arching electrode when the impulse generator is triggered, as compared to when the rotor is turning slowly, or stationary. The field intensity about the blade tip is lowest when one of the blades is straight up ($\alpha = 0^\circ$) and slightly higher when one of the blades is straight down ($\alpha = 180^\circ$) due to somewhat higher charge density at the ends of the arching electrode. In order to minimize these effects, the arching electrode is designed to have an arc length that is slightly greater than 120° and its ends are bent (see Fig. 2). Also, when the blades are rotating a nearly uniform flashovers distribution has been detected along the arch (see Table III).

The conclusion that blades of a moving rotor are less likely to get struck by lightning than the blades that are stationary can be gained based on the typical photos of the test flashovers, especially of their positions along the arch, and of the connection locations in typical flashover between approaching and junction leaders (see Fig. 6(b)–(d) and Table III for the CASE II). It is important to note that each test procedure was recorded using

two digital cameras, but a certain number of photos of the test flashovers could not be obtained with a satisfactory quality, because the blades were mostly rotated at very high speeds. A tendency that concurrently with the increase in rotational speed of the blades the connection points of leaders from the arching electrode and the corresponding blade are moved a little closer to the blade tip can be observed.

On the basis of everything stated earlier, it can be concluded that the overall effects of the analyzed phenomena at speeds $w = 250$ and 400 r/min are congruent. The obtained results substantiate the conclusion about lightning susceptibility of rotating versus stationary rotor blades in laboratory conditions.

VI. CONCLUSION

The presented experimental research, which was very challenging and demanding, is one of the first attempts to analyze the influence of wind turbine blade rotation on the characteristics of atmospheric discharges. The following main results were obtained.

- 1) When the rotor of the reduced-size wind turbine is turning, a slight decrease in the number of direct lightning strikes in the zone of the air-termination system on the blades was observed, in regard to the case when the rotor is stationary. Also, when the blades are rotating an increase of 50% FOV was recorded according to the up-and-down method and the connection points of leaders from the arching electrode and the corresponding blade are moved a little closer to the blade tip. These effects become more dominant as the rotational speed of the blades increases, being more noticeable on positive discharges.
- 2) In the cases when the blades are rotating, increasing dispersion of FOV and somewhat more pronounced transience of voltage waveforms were noticed.
- 3) Effectiveness of applied LPS of the wind turbine reduced-size model was relatively high and results have shown good agreement with real experience. The air-termination system in the form of conductive caps at the tops of the blades showed higher protective efficiency in regard to the receptors. The discharge with a negative polarity from the arching electrode is attached to the conductive caps/receptors in almost 100% of the cases and at all considered rotational speeds. On the other hand, the positive polarity discharges are sometimes attached to the insulated surface of a blade instead of cap/receptor.
- 4) During the high-voltage testing with a rotating model a certain number of unexpected results was obtained. According to the theory of similarity the derived general conclusions can be extrapolated to actual wind turbines. It is quite realistic to assume that there is a difference in the lightning attachment process whether the real blades are rotating or not. However, it is necessary to verify and validate the obtained results in service. It is also important to conduct further research.

VII. FUTURE WORK

The opportunity to test a rotating wind turbine is very attractive. The authors will extend the experimental tests presented in this paper to include a number of aspects that have been deemed important for further research.

Instead of the arching electrode can be used a single rod electrode (to represent a downward leader at an assumed striking distance) at discrete positions along the arch described by the present arching electrode. As an alternative and a third solution, the authors will consider the possibility to use several rod electrodes at discrete positions along the arch (three rod electrodes along the left and right segment of the arch).

- 1) The objective of future impulse voltage tests would be to see at what angles a blade becomes susceptible to being struck, and what is the likelihood of strikes inboard from the tip area where punctures of actual blades sometimes occur. Use a single rod electrode arrangement. See, if triggering of the impulse generator can be synchronized with blade position. Variables would be striking (electrode) distance to blade, blade position, polarity, and rotor speed. At the beginning find the blade position that yields the highest 50% FOV when not rotating. Thereafter, set the same generator voltage. Apply voltage to flashover on the wave front and this would require increasing the applied voltage. The objective will be to learn where on a blade strikes are possible (assuming for the test that the entire model blade surface is conductive).
- 2) Charge a single rod electrode with dc voltage and examine the influence of rotor speed, and blade position, in initiating a flashover. Reposition the electrode to several locations along the upper 120° of arch and repeat, at both polarities.
- 3) Charge the same electrode with ac voltage, achieve a flashover and study the hang-on behavior of the sustained electric arc and the reattachment locations at subsequent blades as they rotate through the electric arc.

The authors will also consider testing in a wind tunnel when the blade is steady and the air is moving by using a real blade tip and similar velocities as in the real world.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank R. Kovačić who provided a number of comments in realization of the experimental setup.

REFERENCES

- [1] *Wind Energy—The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power*, 1st ed., European Wind Energy Association, Earthscan Ltd., Oxford, U.K., 2009, p. 590.
- [2] B. Radičević, D. Mikičić, and Ž. Đurišić, "Estimation of wind energy potential," *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 19, no. 1, pp. 47–61, 2006.
- [3] V. G. Cooray, *Lightning Protection*. London, U.K.: The Institution of Engineering and Technology, 2009, p. 574.
- [4] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects (Encyclopedia of Lightning)*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003, p. 687.
- [5] T. Horváth, *Understanding Lightning and Lightning Protection—A Multimedia Teaching Guide*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd.—Research Studies Press Limited, 2006, p. 220.

- [6] M. S. Savić and Z. Stojković, *High-Voltage Techics, Lightning Impulses*. Belgrade: Faculty of Electrical Engineering, 1997, p. 506.
- [7] V. Peesapati and I. Cotton, "Lightning protection of wind turbines—A comparison of lightning data & IEC 61400-24," in *Proc. 1st Int. Conf. Sustainable Power Generation Supply*, Nanjing, China, Apr. 6–7, 2009, pp. 1–7.
- [8] S. F. Madsen, J. Holboll, M. Henriksen, K. Bertelsen, and H. V. Erichsen, "New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades," in *Proc. 28th Int. Conf. Lightning Protection*, Kanazawa, Japan, Sep. 18–22, 2006, pp. 1497–1502.
- [9] S. F. Madsen and H. V. Erichsen, "Numerical model to determine lightning attachment point distributions on wind turbines according to the revised IEC 61400-24," in *Proc. Int. Conf. Lightning Static Electr.*, Pittsfield, MA, Sep. 15–17, 2009, pp. 1–12.
- [10] T. Naka, N. J. Vasa, S. Yokoyama, A. Wada, A. Asakawa, H. Honda, K. Tsutsumi, and S. Arinaga, "Study on lightning protection methods for wind turbine blades," *IEEEJ Trans. PE*, vol. 125, no. 10, pp. 993–999, 2005.
- [11] I. Cotton, N. Jenkins, and K. Pandiaraj, "Lightning protection for wind turbine blades and bearings," *Wind Energy J*, vol. 4, no. 1, pp. 23–37, Mar. 2001.
- [12] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind Energy Generation: Modelling and Control*. Glasgow, U.K.: Wiley–Blackwell, 2009, p. 288.
- [13] J. Holbøll, S. F. Madsen, M. Henriksen, K. Bertelsen, and H. V. Erichsen, "Lightning discharge phenomena in the tip area of wind turbine blades and their dependency on material and environmental parameters," in *Proc. 28th Int. Conf. Lightning Protection*, Kanazawa, Japan, Sep. 18–22, 2006, pp. 1–9.
- [14] M. Becerra, "On the attachment of lightning flashes to grounded structures," Ph.D. dissertation, Dept. Eng. Sci., Faculty Sci. Technol., Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2008, 85 pp.
- [15] V. Peesapati and I. Cotton, "Lightning protection of wind turbines—A comparison of real lightning strike data and finite element lightning attachment analysis," in *Proc. 1st Int. Conf. Sustainable Power Generation Supply (SUPERGEN)*, Nanjing, China, Apr. 6–7, 2009, pp. 1–8.
- [16] A. J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to power lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 1, no. 3, pp. 859–870, Jul. 1987.
- [17] *Wind Turbines— Part 24: Lightning Protection*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, IEC 61400-24, International Standard, Ed. 1.0, Jun. 2010.
- [18] *Aircraft Lightning Test Methods, Section 5: Direct Effects Test Methods*, (US) SAE ARP 5416, (EU) EUROCAE ED-105, 2005-3.
- [19] *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*, (US) SAE ARP 5412, (EU) EUROCAE ED-84, Feb. 2005.
- [20] M. A. Alonso and D. C. Irastorza, "Dynamic wind turbine lightning protection behaviour under storm conditions," in *Proc. 29th Int. Conf. Lightning Protection*, Uppsala, Sweden, 23–26 Jun. 2008, pp. 1–10.
- [21] F. Rachidi, M. Rubinstein, J. Montanya, J. L. Bermudez, R. R. Sola, Gloria, and N. Korovkin, "A review of current issues in lightning protection of new-generation wind turbine blades," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2489–2496, Jun. 2008.
- [22] M. S. Savić, "Estimation of the surge arrester outage rate caused by lightning overvoltages," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 116–122, Jan. 2005.
- [23] *High-Voltage Test Techniques— Part 1: General Definitions and Test Requirements, Part 2: Measuring Systems—Part 3: Definitions and Requirements for On-Site Testing*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, IEC 60060-1 (Ed. 3.0), IEC 60060-2 (Ed. 3.0), IEC 60060-3 (Ed. 1.0), International Standard, Sep. 2010.
- [24] *Protection Against Lightning— Part 1: General Principles—Part 2: Risk Management—Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard—Part 4: Electrical and Electronic Systems Within Structures*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, IEC 62305-1 (Ed. 2.0), IEC 62305-2 (Ed. 2.0), IEC 62305-3 (Ed. 2.0), IEC 62305-4 (Ed. 2.0), International Standard, Ed. 2.0, Sep. 2010.
- [25] B. Glushakow, "Effective lightning protection for wind turbine generators," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 214–222, Mar. 2007.
- [26] W. Hauschild and W. Mosch, *Statistical Techniques for High-Voltage Engineering*. London, U.K.: P. Peregrinus Ltd., 1992, p. 324.



Branko M. Radičević (M'10) received the B.S. degree in electrical and electronics engineering in 2001 and the M.S. degree in electrical engineering in 2005 from the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade, Serbia, where he is currently working there toward the Ph.D. degree, and his Ph.D. focuses on "Lightning Protection of Wind Turbines."

Since 2001, he has been a Research and Teaching Assistant at the University of Belgrade. He is the author of over 20 scientific publications in journals and conferences. His research interests include various aspects of lightning protection, high-voltage technique, wind energy, and application of power electronics in industry.

Mr. Radičević is a member of the European Wind Energy Association.



Milan S. Savić (M'91–SM'02) was born in 1947, in Belgrade, former Yugoslavia. He received the B.S. degree in electrical engineering in 1971, the M.S. degree in 1974 and Ph.D. in 1977 from the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade, Serbia.

He joined the same Faculty in 1971, where he is currently a Full Professor working in the field of high voltage technique. His main research interests include lightning protection, fast transients modeling, and switching equipment.

Dr. Savić was a chairman of Yugoslav CIGRE Study Committee 13 for Switching equipment from 1994 to 2002, as well as a chairman of Serbian CIRED Committee for Energy Quality from 1998 to 2006.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а мр Бранко Рагивевић

број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Анализа метода за заштитну ветроелектрана од директног атмосферског ирадирања

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 20.04.2012.

Бранко Рагивевић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бранко Рагмевит

Број уписа _____

Студијски програм _____

Наслов рада Анализа метода за заштиту ветроелектрана
од директне атмосферске трансјекције

Ментор проф. др Милан С. Савић

Потписани мр Бранко Рагмевит

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 20.04.2012.

Бранко Рагмевит

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Анализа метода за заштитну ветроелектрана од директне атмосферске прањивости

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 20.04.2012.

Бранко Рагмелић