

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Георгијевића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 848. од 11. 2. 2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Николе Георгијевића под насловом

Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Никола Георгијевић је 23. 11. 2017. године пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“.

Комисија за студије трећег степена разматрала је 28. 11. 2017. године предлог теме за израду докторске дисертације и предложила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Комисију за оцену подобности теме и кандидата..

Наставно-научно веће је именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5046/11-1 од 13. 12. 2017. године) у саставу:

1. др Миомир Костић, редовни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет),
2. др Ђорђе Стојић, научни сарадник (Електротехнички институт Никола Тесла, Београд),
3. др Јован Цветић, редовни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), и
4. др Жељко Ђуришић, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет).

Дана 22. 12. 2017. кандидат је полагао јавну усмену одбрану теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5067/10-2 од 13 .2. 2018. године). За ментора дисертације именован је др Зоран Радаковић, редовни професор. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-852/2-18 од 26. 2.2018. године).

Кандидат је 24. 1. 2020. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 4. 2. 2020. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета. Наставно-научно веће именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“ (Одлука бр. 5046/11-3 од 24. 2. 2020. године) у саставу:

1. др Зоран Радаковић, редовни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет),

2. др Миомир Костић, редовни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет),
3. др Ђорђе Стојић, научни сарадник (Електротехнички институт Никола Тесла, Београд),
4. др Јован Цветић, редовни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), и
5. др Жељко Ђуришић, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет).

На основу одлуке Наставно–научног већа бр. 545/2 од 13. 3. 2012. године, кандидат је Студијски програм започео у пролећном семестру школске 2011/2012, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија за два семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Николе Георгијевића под насловом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужој научној области Енергетски претварачи и погони, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Зоран Радаковић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Зоран Радаковић се дуги низ година бави научноистраживачким радом у областима специјалних електричних инсталација и обновљивих извора електричне енергије, што је потврђено релевантним радовима који су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Георгијевић је рођен 31. 3. 1987. године у Београду. Основну школу "Душан Јерковић – Уча" у Шимановцима завршио је као носилац Вукове дипломе. Матурирао је 2006. године, завршивши Земунску гимназију, након чега уписује Електротехнички факултет у Београду. Основне академске студије, на Одсеку за енергетику, Смер за електроенергетске системе, завршио је 2010. године са просечном оценом у току студија 9,02 и оценом на дипломском раду 10. Дипломске академске (мастер) студије завршио је 2011. године на Електротехничком факултету у Београду, модул Електроенергетски системи, са просечном оценом 9,33 и оценом на завршном мастер раду 10.

Докторске студије је уписао 2011. године на Електротехничком факултету у Београду и положио све испите предвиђене планом и програмом модула за Енергетске претвараче и погоне са просечном оценом 10. Тренутно је студент докторских студија.

Од 1. 4. 2011. године запослен је на Електротехничком институту Никола Тесла у Београду, у Сектору за електроенергетске системе. Тренутно је у звању стручни сарадник. До сада је био ангажован на више различитих пројеката, где се бавио математичким моделовањем, анализом и оптимизацијом електроенергетских система, проблематиком компензације реактивне снаге и побољшањем енергетске ефикасности постројења.

Током докторских студија објавио је три рада у међународним часописима са SCI листе, четири рада у зборницима међународних стручних скупова, четири рада у домаћим часописима и два рада у зборницима скупова националног значаја. Наведен је као проналазач једног регистрованог патента на међународном нивоу.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“ написана је на 113 страна (116 страна са прилозима), организована је у 11 поглавља, има 122 слике, 3 табеле и листу од 112 референци. Наслови поглавља су:

- 1) Увод
- 2) Организација ФН система
- 3) Механизам настајања и манифестација РЕЛ
- 4) Стање технике
- 5) Метода за откривање РЕЛ помоћу ентропије струје једносмерног кола
- 6) Метода за откривање РЕЛ помоћу идентификације импедансе ФН поља
- 7) Експериментална мерења на комерцијалном ФН систему
- 8) Верификација методе засноване на праћењу ентропије сигнала струје
- 9) Верификација методе засноване на праћењу импедансе ФН поља на учестаности комутација
- 10) Тестирање прототипа детектора РЕЛ
- 11) Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дефинисани су предмет и циљ истраживања, као и мотивација. Приказани су различити примери пожара који су настали као последица електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система (на делу инсталације са фотонапонским панелима) и извршена је класификација електричних лука. Посебно је описан редни електрични лук (РЕЛ) који се појављује при лошем контакту или прекиду проводника струјног кола, а истакнуте су и потешкоће које се могу имати приликом његовог откривања. Критичким освртом на садашње стање технике указано је на потребу развоја нових алгоритама и метода који су прилагођени специфичним применама као што је откривање РЕЛ током експлоатације фотонапонских система.

У другом поглављу описана је типична организација фотонапонског (ФН) система прикљученог на наизменичну мрежу. Објашњени су принципи рада и представљене различите структуре ФН система. Детаљније су анализирани најчешће топологије претварача које се примењују у пракси и анализиран је њихов утицај на таласне облике напона и струје у једносмерном колу ФН система.

У трећем поглављу објашњени су механизми настајања РЕЛ, као и утицај који РЕЛ има на остатак једносмерног кола са ФН панелима. Закључци овог поглавља се касније користе као полазна тачка за претпоставке о понашању РЕЛ у ФН систему и на тој бази се израђују алгоритми за његово откривање.

Преглед тренутног стања технике у области откривања РЕЛ у једносмерном колу ФН система дат је у четвртном поглављу. Ту су представљене и класификоване методе које се користе за откривање РЕЛ у пракси, а дате су и предности и мане појединих метода.

Две нове методе за откривање РЕЛ, које представљају главни допринос ове дисертације, представљене су у петом и шестом поглављу.

У петом поглављу је приказана метода заснована на праћењу ентропије сигнала струје у једносмерном колу ФН система. У оквиру овог поглавља најпре је анализирана Шенонова ентропија дискретних догађаја и дискутовано је о њеној примени на континуалну расподелу вероватноће. Након тога, приказана је Цалисова ентропија као генерализација Шенонове ентропије и приказане су могућности њене употребе за откривање РЕЛ. На крају поглавља приказан је комплетан алгоритам за откривање РЕЛ, као и

имплементација прорачуна Цалисове ентропије у рекурзивној форми. Прорачуном у рекурзивној форми значајно је смањен број инструкција процесора потребних за прорачуне и омогућен је рад алгорита на високим учестаностима.

У шестом поглављу приказана је метода за откривање РЕЛ заснована на праћењу импедансе ФН система на учестаности комутација транзистора ФН инвертора. У овом поглављу су приказани и динамички модели ФН ћелије и електричног лука који се односе на мале поремећаје, као и утицај који РЕЛ има на остатак ФН система. Детаљно је описан алгоритам који се користи за откривање РЕЛ.

У седмом поглављу приказани су резултати експерименталних мерења која су спроведена на реалном ФН систему. Најпре су описани експериментална поставка и систем за мерење и аквизицију сигнала. Приказани су резултати експерименталних мерења у карактеристичним радним режимима рада ФН система, као и резултати спектралне анализе појединих сигнала снимљених током времена.

У осмом и деветом поглављу извршене су рачунарске симулације предложених алгоритама над узорцима који су добијени мерењима. Разматрани су карактеристични показатељи присуства РЕЛ за обе методе развијене у оквиру докторске дисертације, приказане у петом и шестом поглављу, а дискутовано је и о одређивању граница за реаговање заштите.

У оквиру ове дисертације реализован је и прототип детектора РЕЛ. Резултати тестирања прототипа приказани су у десетом поглављу. Тестирање је вршено при карактеристичним радним режимима ФН система са и без РЕЛ.

Конечно, у једанаестом поглављу су сумирани основни закључци предметне докторске дисертације и наглашени њени главни доприноси и могућности примене у пракси.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Један од кварова који може настати у фотонапонском систему је електрични лук, који се може појавити услед старења и хабања каблова, конектора и изолације. У зависности од места у електричном колу фотонапонског система и начина на који електрични лук може да се успостави, издвајају се два главна типа електричног лука: редни и паралелни. Паралелни електрични лук може настати на местима дотрајале или оштећене изолације, док се редни електрични лук може јавити на местима лоших контаката. Како код паралелног, тако и код редног електричног лука, долази до појаве плазме високе температуре, која може да изазове пожар. Механизми настајања редног и паралелног електричног лука су различити и за њихово откривање се користе различите методе. Када се јави паралелни електрични лук, најчешће долази до појаве великих струја и пропада напона на прикључцима фотонапонског поља, те је откривање паралелног електричног лука у већини случајева једноставно. Будући да се редни електрични лук у квазистационарном стању понаша као отпорност која је додата у коло, приликом појаве редног електричног лука долази до релативно малог смањења вредности струје у једносмерном колу, а вредности напона на прикључцима се практично не мењају. Због тога се од редног електричног лука не може штитити прекострујном заштитом, нити праћењем пропада напона на прикључцима фотонапонског поља, већ је неопходна употреба специјалних врста заштита прилагођених фотонапонским системима. То представља савремену истраживачку тему, чији је значај порастао са све већом применом фотонапонских система прикључених на наизменичну мрежу, како по броју, тако и по снази појединачних постројења. Неколико великих пожара са значајним материјалним штетама који су настали као последица РЕЛ у једносмерном колу фотонапонских система појачали су интерес за решавање описаног проблема.

У предметној дисертацији предложене су две нове методе којима се редни електрични лук може открити у једносмерном колу фотонапонских система. Прва метода је заснована на континуалном праћењу Цалисове ентропије таласног сигнала струје једносмерног кола. Предложени алгоритам одређује присуство лука израчунавањем линеарне трансформације Цалисове ентропије прорачунате над скупом одбирака струје ФН поља. Пратећи ентропију сигнала струје, алгоритам је способан да разликује стања са редним електричним луком, која карактеришу хаотичне варијације струје, од стања без РЕЛ, која карактеришу

варијације уређене прекидачком логиком претварача. Предност оваквог приступа у односу на општеприхваћене методе засноване на брзој Фуријеовој трансформацији састоји се у томе да за рад нове методе није потребно познавати фреквентни спектар струје у једносмерном колу у случајевима са и без квара. РЕЛ изазива велике промене у сигнаlima који се добијају након примене предложене методе, те је једноставно разликовати случајеве са и без РЕЛ.

Друга предложена метода је заснована на континуалном праћењу импедансе фотонапонског поља са стране једносмерног прикључака инвертора преко кога се фотонапонски панели прикључују на електродистрибутивну мрежу. За примену методе потребно је мерити напон и струју на прикључцима претварача на које је повезано фотонапонско поље. Услед прекидачких активности транзистора уграђених у енергетске претвараче, у једносмерном колу долази до појаве хармоника који су последица прекидања струје. Користећи технику фазно спрегнуте петље за синхронизацију са хармоницима присутним у таласном облику напона и струје, извршено је континуално праћење фазе и амплитуде хармоника напона и струје изазваних комутацијама. Када се одреде амплитуда и фаза хармоника који су присутни у сигнаlima струје и напона, одређивање импедансе на учестаности комутација извршено је дељењем комплексних бројева који представљају фазоре напона и струје хармоника у систему који је у синхронизму са напоном основног хармоника. У односу на случајеве када нема редног електричног лука и када се импеданса фотонапонског поља споро мења, у случајевима са луком у једносмерно коло се додаје импеданса лука који слободно гори у простору. Показано је да импеданса РЕЛ доводи до нагле промене реактансе ФН система у одређеном фреквентном опсегу. Осим тога, услед изузетно хаотичне природе електричног лука, чија се дужина и геометрија стално мењају, појављује се додатни шум у импеданси коју чине фотонапонско поље и лук. Нагли скок реактансе ФН система уз присуство шума је поуздан показатељ присуства редног електричног лука који се користи у предложеној методи.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, али садржи и класичне радове, као и одговарајуће књиге. Број библиографских јединица наведених на крају дисертације указује на кандидатов широк и темељан увид у научну област третирану у дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање у оквиру предложене докторске дисертације обухватило је следеће фазе:

- Проучавање релевантне литературе о фотонапонским системима, електричном луку који се може јавити као последица квара и методама за његову детекцију,
- Развој методе за прорачун ентропије сигнала према Цалисовој генерализацији,
- Развој методе за идентификацију импедансе низа ФН панела на фреквенцији комутација,
- Израда мерног кола за мерење напона, струје и високофреквентних компоненти струје у једносмерном колу ФН система,
- Спровођење мерења на реалном ФН систему,
- Развој алгоритама за откривање присуства редног електричног лука и њихова рачунарска програмска реализација,
- Тестирање и анализа рада алгоритама коришћењем скупа мерења на реалном ФН систему,
- Израда прототипа детектора редног електричног лука,
- Верификација рада прототипа детектора на реалном ФН систему.

Наведене методе и поступци су засновани на теоријским истраживањима, која су затим верификована и експериментално. Поступци су у потпуности били примерени проблему који је решаван што је довело до остварења декларисаних циљева дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати приказани у дисертацији, који су експериментално верификовани, имају директну применљивост у заштити ФН система прикључених на електродистрибутивну мрежу. Приказани алгоритми су тестирани у бројним ситуацијама које се могу јавити у пракси. Утврђено је да су предложени алгоритми имуни на транзијенте који се могу јавити у радним режимима без квара, док је РЕЛ успешно откривен у свим анализираним експерименталним ситуацијама у врло кратком временском периоду. Имајући у виду брзо повећање укупне инсталисане снаге ФН система у свету, као и велики број ФН система који су инсталирани на крововима стамбених и пословних објеката, јасна је велика важност примене уређаја који поуздано могу да заштите ФН системе и њихову околину од РЕЛ који може да изазове пожар.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде предметне докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим научним сазнањима, методама и техникама. Такође, кандидат је испољио захтевану научну зрелост и оспособљен је за даљи успешан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру предложене докторске дисертације истичемо следеће научне доприносе:

- Развијен је нови показатељ за одређивање присуства редног електричног лука заснован на Цалисовој генерализацији израза за прорачун ентропије,
- Развијен је алгоритам линеарне сложености за прорачун Цалисове генерализације израза за прорачун ентропије, који је погодан за реализацију на микроконтролеру,
- Развијена је метода за идентификацију импедансе низа ФН панела на фреквенцији комутација,
- Развијен је нови показатељ за одређивање присуства редног електричног лука заснован на праћењу промена импедансе низа ФН панела на фреквенцији комутација,
- Развијена је метода која на основу анализе више показатеља присуства редног електричног лука разликује режиме са редним електричним луком од устаљених радних режима и транзијентата који се јављају у нормалном погону.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављене хипотезе, циљеве истраживања и добијене резултате, констатовали смо да је кандидат успешно одговорио на суштинска питања која су од значаја за решење проблема којим се бави докторска дисертација. Предложени алгоритми су имплементирани и тестирани најпре рачунарским симулацијама, а затим и на прототипу детектора РЕЛ. Тиме су потврђене полазне претпоставке и остварен научни допринос који се односи на развој методологије и новог решења погодног за примену у наменским системима са ограниченим процесорским и меморијским ресурсима. Увидом у приложену литературу, као и у публиковане радове кандидата у часописима *IEEE Transactions on Power Electronics* и *International Transactions on Electrical Energy Systems*, констатујемо да се истраживањима у овој дисертацији дошло до нових резултата који до сада нису били публиковани.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Никола Георгијевић је до сада објавио следеће радове релевантне за докторску дисертацију:

Категорија M21a:

1. N. L. Georgijevic, M. V. Jankovic, S. Srdic, and Z. Radakovic, "The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 8, pp. 5917–5930, 2016. doi: 10.1109/TPEL.2015.2489759

Категорија M22:

2. N. L. Georgijevic, D. Stojic, and Z. Radakovic, "Series arc fault detection in photovoltaic system by small-signal impedance and noise monitoring," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, February 2020, e12234, DOI: 10.1002/2050-7038.12234

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Николе Георгијевића под насловом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији се решава актуелан технички проблем откривања РЕЛ у једносмерном колу ФН система. Критички је анализирано стање у области на бази постојећих решења и предложена су два нова решења за брзо откривање РЕЛ која су погодна за примену на наменским хардверским платформама са ограниченим ресурсима. Резултати научног истраживања су верификовани како у симулираним тако и у реалним условима. Истраживање показује да решење које је приказано у дисертацији отвара нове могућности и у потпуности обезбеђује применљивост у области заштите ФН система.

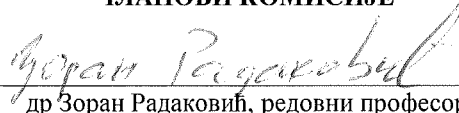
Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у водећим међународним часописима. Комисија са задовољством констатује да рад објављен у часопису категорије M21a у августу 2016, према подацима Scopus-a на дан 2. мај 2020. има 62 хетероцитата. Дисертација одражава способност кандидата да идеје претвори у реална техничка решења, тако да је теоријска поставка добила и техничко отелотворење. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да докторска дисертација садржи оригиналан и савремен научни допринос у домену заштите ФН система у области енергетике, електронике и информационих технологија.

Кандидат Никола Георгијевић показао је способност за самосталан научни рад, што потврђује и чињеница да је објавио више научних радова који су проистекли из рада на дисертацији, а у којима је први аутор. Оцењујући докторску дисертацију, уз уважавање чињенице да је анализирана проблематика актуелна и савремена и да дисертација садржи научне доприносе, Комисија констатује да је кандидат Никола Георгијевић, дипломирани инжењер електротехнике, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.


Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Откривање редног електричног лука у једносмерном колу фотонапонских система“ кандидата **Николе Георгијевића** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 4. 5. 2020. године

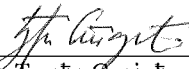
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



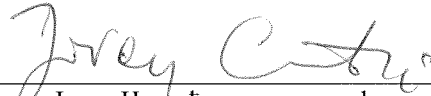
др Зоран Радаковић, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



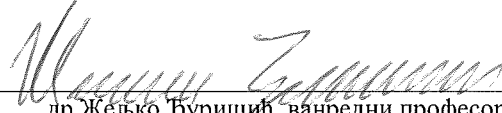
др Миомир Костић, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Борђе Стојић, научни сарадник
Електротехнички институт Никола Тесла, Београд



др Јован Цветић, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Жељко Буришић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет