

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка Икића

Одлуком бр. 551/16 од 25.04.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Икића, под насловом

**„Компоненте снаге и хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система”**

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

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Марко Икић је 05.11.2013. године уписао докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Електроенергетске мреже и системи. Све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 9,5.

Кандидат је 02.06.2022. године пријавио тему за израду докторске дисертације. За ментора је предложен др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Комисија за студије трећег степена је 07.06.2022. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5049/13-3 од 23.06.2022. године), у саставу:

1. др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Срђан Лале, доцент, Универзитет у Источном Сарајеву - Електротехнички факултет,
3. др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације одржана је 31.8. 2022. године. Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације оценила је усмену одбрану предложене теме као успешну (оцена „задовољно”).

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је 11.10.2022. усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. За ментора дисертације именован је др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Решење бр. 61206-4587/2-22 од 14.11.2022.).

Кандидат је 30.03.2023. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 04.04.2023. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Компоненте снаге и хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система” (Одлука бр. 551/16 од 25.04.2023. године), у саставу:

1. др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Срђан Лале, доцент, Универзитет у Источном Сарајеву - Електротехнички факултет,
3. др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
4. др Томислав Шекара, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
5. др Милета Жарковић, доцент, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева кандидата, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма. Кандидат је у школској 2020/2021. години био у статусу мировања.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Марка Икића припада научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство, ужа научна област Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због истакнутих доприноса у ужој области Електроенергетски системи, а посебно у подобласти обновљивих извора енергија и квалитета електричне енергије, којом се бави предметна дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Икић рођен је 20. 12. 1986. године у Сарајеву, БиХ. Основну школу „Паја Маргановић“ завршио је у Делиблату, Србија. Средњу школу „28. јуни“ завршио је 2005. године у Источном Сарајеву. Носилац је Вукових диплома и у основној и у средњој школи. Проглашен је учеником генерације у средњој школи.

На Електротехнички факултет у Источном Сарајеву уписује се 2005. године, као најбољи на пријемној ранг листи. Дипломирао је у септембру 2009. године на Одсеку за електроенергетику, са просечном оценом 9,66 као први у генерацији. Дипломски рад под називом „Преглед топологија електроенергетских претварача у електромоторним погонима“ одбранио је са оценом 10 (десет). Студије другог циклуса (мастер студије) на Електротехничком факултету Универзитета у Источном Сарајеву, на одсеку за

Електроенергетику, завршава у октобру 2013. године одбранивши рад под називом „Уштеда и побољшање квалитета електричне енергије у систему јавне расвете примјеном савремених технологија“ са оценом 10 (десет). Тренутно похађа докторске (III циклус) студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Електроенергетске мреже и системи.

Носилац је бројних признања Електротехничког факултета за успешно студирање и представљање Електротехничког факултета Универзитета у Источном Сарајеву на сусретима студента електротехнике – Електријадама. Током прве четири године студија додељиване су му Плакете ЕТФ-а за најбољег студента године. Такође, додељена му је и Плакета Универзитета у Источном Сарајеву у мају 2009. године. Добитник је стипендија Министарства просвете и културе Републике Српске, ЗП „Електродистрибуција“ а.д. Пале и фондације „Др Милан Јелић“ за мастер и докторске студије.

Члан је међународног удружења инжењера електротехнике IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Председник је техничког комитета BAS/TC 10 (Опрема за мерење електричне енергије и управљање оптерећењем) и активан члан техничког комитета BAS/TC 57 (Кућни и слични електрични апарати) Института за стандардизацију БиХ. Такође, члан је организационог одбора научно-стручног симпозијума ИНФОТЕХ-Јахорина, Уредничког већа часописа Босанскохерцеговачка електротехника (*B&H Electrical Engineering*), Управног одбора ВН К/О CIGRE, те председник секције SO4 ВН К/О CIGRE Дистрибуирана производња и ефикасно коришћење електричне енергије.

Тренутно ради као виши асистент на Електротехничком факултету у Источном Сарајеву, на ужим научним областима Електроенергетика и Општа електротехника.

Област његовог интересовања су обновљиви извори електричне енергије са фокусом на фотонапонске системе, њихову интеграцију и утицај на електроенергетски систем. Аутор је више радова публикованих у међународним и домаћим часописима, зборницима међународних, регионалних и националних конференција. Такође, као истраживач је учесник неколико међународних и националних истраживачких пројеката. Говори енглески језик, а по потреби се служи и грчким.

Ожењен је и отац троје дјеце.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је по форми и структури у потпуности усклађена са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Докторска дисертација је написана на српском језику, латиничним писмом, и има укупно 104 стране. Садржи 84 слике, 18 табела, 99 нумерисаних једначина и 103 библиографске референце. Делови дисертације су:

- Насловна страна на српском језику
- Насловна страна на енглеском језику
- Страна са информацијама о ментору и члановима комисије
- Страна са наведеном захвалницом и посветом
- Страна са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Страна са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику
- Садржај
- Списак слика
- Списак табела
- Списак скраћеница
- Текст рада по поглављима:

1. Увод
  2. Компоненте и топологије фотонапонских система повезаних на мрежу
  3. Моделовање фотонапонског система повезаног на мрежу
  4. Постојећи стандарди и техничке препоруке за прикључење фотонапонских система на мрежу са аспекта хармонијских изобличења
  5. Хармонијска изобличења напона и струја у фотонапонских системима
  6. Идентификација хармонијских изобличења напона и струја фотонапонских система примјеном комерцијалних мјерних инструмената
  7. Идентификација компоненти снага у фотонапонским системима
  8. Примјена дистрибуираних статичких компензатора у циљу смањења хармонијских изобличења струја инјектирања и поправке фактора снаге фотонапонских система
  9. Закључак
- Списак коришћене литературе
  - Прилози
  - Биографија аутора
  - Изјава о ауторству
  - Изјава о истовјетности штампане и електронске верзије докторског рада
  - Изјава о коришћењу

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу су наведени основни циљеви и значај предметног истраживања.

У другом поглављу дат је кратак осврт на фотонапонске системе, њихове врсте и структуре (топологије), компоненте, као и начине на које се могу повезати на електроенергетску мрежу.

У трећем поглављу је описан модел фотонапонског система повезаног на мрежу. Модел је реализован у *Matlab/Simulink* софтверском окружењу. Такође, представљени су и појединачни модели свих компоненти које чине један фотонапонски систем функционалним, од модела претварача до модела управљачких структура.

Четврто поглавље се бави постојећим прописима, препорукама и стандардима у области утицаја фотонапонских система на електроенергетску мрежу са акцентом на хармонијска изобличења. У овом поглављу су обрађени најзначајнији важећи стандарди према којима су креиране процедуре и техничке препоруке за прикључак фотонапонских система на мрежу.

У петом поглављу је обухваћена анализа различитих утицајних фактора на хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система. Разматран је директан утицај смањеног интензитета сунчевог зрачења и употребе конвенционалне топологије претварача на хармонијска изобличења. Такође, индиректно, употребом различитих управљачких структура, те различитих управљачких техника, али и некоректном синхронизацијом фотонапонског инвертора са мрежом, представљен је утицај на хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система.

Идентификација хармонијских изобличења напона и струја фотонапонских система употребом комерцијалних мерних инструмената је извршена у шестом поглављу. Резултати мерења параметара квалитета електричне енергије на конкретном примеру фотонапонског система инсталисане снаге од 15,9 kWp, прикљученог на локалну дистрибутивну мрежу, су имали за циљ да потврде анализе и резултате добијене моделовањем и симулацијом рада фотонапонског система у различитим условима експлоатације.

У седмом поглављу су представљени неки од главних доприноса ове докторске дисертације који се огледају у идентификацији компоненти снаге фотонапонских система. Идентификација компоненти снаге је извршена на основу теорије о физичкој интерпретацији

компоненти струја. За потребе ове анализе реализована је експериментална поставка за мерење струје и напона фотонапонског система повезаног на мрежу, као и аквизиција података у облику погодном за извршење прорачуна који има за циљ дефинисање компоненти снага у присуству виших хармоника.

Анализа примене дистрибуираних статичких компензатора у циљу смањења хармонијских изобличења струја ињектирања и поправке фактора снаге фотонапонских система је представљена у осмом поглављу. У оквиру овог поглавља предложен је компензатор којим се у периодима смањеног интензитета сунчевог зрачења и знатно мање производње фотонапонског система од номиналне, значајно могу компензовати присутне компоненте неактивне снаге уз смањење хармонијских изобличења у струјама ињектирања.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су наведени резултати истраживања и истакнути су основни доприноси докторске дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „Компоненте снаге и хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система” представља оригиналан научноистраживачки рад, који је настао као резултат вишегодишњих истраживања кандидата у области фотонапонских система и њихове интеграције у електроенергетски систем.

Глобална енергетска криза и проблеми утицаја производње електричне енергије на животну средину су допринели масовној употреби и експлоатацији обновљивих извора енергије. Фотонапонски системи су постали широко коришћена технологија за производњу електричне енергије која испуњава критеријуме чисте енергије и одрживости. Ови енергетски извори се најинтензивније развијају у садашње време и већ имају значајан удео у производним капацитетима у многим електроенергетским системима. Тренд пораста инсталираних капацитета фотонапонских система се очекује и у будућности због једноставности инсталирања и коришћења ових система, као и због све напредније технологије којом се повећава ефикасност фотонапонских модула и претварача енергетске електронике преко којих се прикључују на електроенергетску мрежу. Међутим, због саме природе сунчевог зрачења, његове променљивости и зависности од временских услова, коришћење фотонапонских система у електроенергетским системима као извора енергије наметнула је нове изазове у погледу одржања прописаног квалитета електричне енергије, као и поузданог и сигурног рада електроенергетске мреже. Решавање наведених проблема је неопходно у циљу интеграције и несметаног рада фотонапонских система у електроенергетским системима.

У литератури је назначено да низак интензитет сунчевог зрачења значајно утиче на хармонијска изобличења струја које фотонапонски системи ињектирају у мрежу, а самим тим и на снагу производње из фотонапонских система задржавајући фактор снаге на ниском нивоу. У дисертацији је развијен модел реалног фотонапонског система и формирана симулација рада система у различитим експлоатационим условима у циљу испитивања и бољег разумевања утицаја различитих параметара на квалитет електричне енергије у тачки прикључења фотонапонског система на мрежу.

Хармонијска изобличења струја која ињектира фотонапонски систем у прикључну електроенергетску мрежу, зависе у највећој мери од топологије инвертора/претварача преко којег су повезани на мрежу, као и од реализације управљачке структуре којом се регулише рад претварача. Такође, карактеристике филтерског кола на страни мреже у претварачу за фотонапонске системе могу у великој мери да утичу на хармонијска изобличења струје. Из

тих разлога, проблем са квалитетом електричне енергије ће бити изражен при масовној употреби фотонапонских система, нарочито у нисконапонској дистрибутивној мрежи. Због тога, истраживања у циљу побољшања квалитета електричне енергије у тачки прикључења фотонапонских система на мрежу иду у правцу одређивања и дефинисања стратегија и начина управљања фотонапонским инверторима како би се обезбедио баланс између захтева за максималном производњом активне снаге и задовољење постављених критеријума за обезбеђење захтеваног квалитета електричне енергије у тачки прикључења на мрежу.

За интеграцију и повезивање фотонапонских система на мрежу и њихову правилну синхронизацију, неопходно је обезбедити прецизно одређивање величина у мрежи као што су фреквенција, амплитуда и фазни угао мрежног напона. С обзиром да се ови параметри естимирају фазно-закључаним петљама (PLL), које су део управљачке структуре инвертора, јављају се проблеми естимације наведених величина што доводи до хармонијских изобличења струја и нижег фактора снаге. Будући да се на излазу фазно-закључаних петљи добија референтни сигнал за генерисање управљачких импулса инвертора, у дисертацији је показано да је од велике је важности да се проблеми у погледу једносмерне компоненте и шума при мерењу и аналогно-дигиталној конверзији сигнала у оквиру PLL структуре елиминишу и на тај начин смањи утицај на хармонијска изобличења у генерисаним струјама на излазу инвертора.

У системима са хармонијским изобличењима и несиметријама напона и струја, питање идентификације компоненти неактивне снаге је тема о којој се још увек расправља у широј академској заједници. Како фотонапонски системи повезани на мрежу производе електричну енергију са значајним релативним уделом хармоника у струји, посебно у интервалима са ниским интензитетом сунчевог зрачења, ови системи се могу класификовати као нелинеарни системи. У оквиру ове докторске дисертације један од постављених циљева је идентификација компоненти снага инјектирања и поправке фактора снаге у тачки прикључења фотонапонских система на мрежу. У дисертацији су разматрана нова решења за побољшање квалитета електричне енергије и поправку фактора снаге фотонапонских система која се заснивају на употреби дистрибуираних статичких компензатора који имају улогу компензатора неактивне снаге и активног филтера за елиминацију виших хармоника.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је детаљно истражио релевантну литературу из научне области којом се бави дисертација. Литература наведена у дисертацији броји 103 библиографске јединице, на основу чега се може закључити да је кандидат остварио темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области. У оквиру наведене литературе налазе се и кандидатови радови који су публиковани у међународним часописима са *Impact Factor*-ом, а који су проистекли из рада на докторској дисертацији или су у директној вези са темом дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току израде докторске дисертације спроведене су различите методе истраживања, почевши од нумеричких анализа, моделовања, симулација до мерења реалних параметара на постојећем фотонапонском систему. За анализу утицаја фотонапонског система повезаног на дистрибутивну мрежу на квалитет електричне енергије најпре је извршено прикупљање, систематизација и детаљна анализа постојећих знања у области истраживања са циљем да се сагледа проблематика и утврде смернице у наредним фазама истраживања. Употребом програмског пакета Матлаб/Симулинк, развијен је модел реалног фотонапонског система и формирана је симулација рада система у различитим експлоатационим условима у циљу испитивања и бољег разумевања утицаја различитих параметара на квалитет електричне

енергије у тачки прикључења фотонапонског система на дистрибутивну мрежу. Валидација и верификација истраживања је извршена кроз поређење резултата добијених моделовањем са резултатима добијеним на основу мерења на конкретном фотонапонском систему.

Примењене методе су у потпуности примерене проблемима који су решавани у дисертацији, што је довело до остварења постављених циљева дисертације.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања утицаја фотонапонских система на квалитет електричне енергије у електродистрибутивној мрежи која су урађена у оквиру докторске дисертације имају велики практичан значај имајући у виду извршене прорачуне, мерења, анализе и симулације, као и предложена решења у циљу побољшања квалитета електричне енергије.

Добијени резултати у експерименталној анализи хармонијских изобличења напона и струје при различитом оптерећењу фотонапонског система су показали да при ниском интензитету сунчевог зрачења долази до повећања хармонијских изобличења струја фотонапонског система у тачки прикључења на мрежу, а самим тим и до смањења фактора снаге фотонапонског система. У дисертацији је развијена и реализована експериментална поставка за мерење и аквизицију струја и напона у циљу добијања података о струјама и напонима фотонапонског система у реалним условима експлоатације. Коришћењем мерних података извршена је анализа хармонијских изобличења струја и напона, као и идентификација компоненти неактивне снаге за три случаја са различитим интензитетима сунчевог зрачења (низак, средњи и висок). Добијени резултати дају комплетан увид у утицај фотонапонских система на квалитет електричне енергије у дистрибутивној мрежи и могу бити од користи истраживачима у овој области, као и инжењерима који се баве пројектовањем фотонапонских система.

У дисертацији је показано да се за исправан и стабилан рад фотонапонских система на мрежи захтева адекватна синхронизација између фотонапонског инвертора и мреже. У циљу елиминисања утицаја једносмерне компоненте сигнала на генерисање управљачких сигнала инвертора дата је једнофазна PLL структура помоћу које се појава једносмерне компоненте у естимираном напону може потиснути или потпуно елиминисати употребом адекватног двофазног генератора. У десертацији је показана ефикасност и применљивост предложене управљачке структуре у смањењу таласности у естимираним величинама мреже.

У досадашњој пракси већина управљачких алгоритама за управљање фотонапонским инвертором се заснива на управљању активном и реактивном снагом при основном хармонику. Због тога се проблем смањеног фактора снаге не може превазићи при ниском интензитету сунчевог зрачења. Компензација неактивне снаге фотонапонских система повезаних на мрежу није разматрана, јер се утицају производње фотонапонског система при нижем интензитету сунчевог зрачења није давало на значају. У оквиру дисертације, разматрана су нова решења за побољшање квалитета електричне енергије и поправку фактора снаге фотонапонског система повезаног на дистрибутивну мрежу заснована на употреби дистрибуираних статичких компензатора. Приказана решења имају практични значај, с обзиром да се коришћењем предложеног статичког компензатора постиже компензација неактивне снаге и филтрирање виших хармоника при различитим интензитетима сунчевог зрачења и различитим снагама које фотонапонски систем инјектира у дистрибутивну мрежу.

#### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Марко Икић је током докторских студија, као и током целокупног досадашњег рада, показао све особине неопходне за самосталан научноистраживачки рад. У прилог томе сведочи и чињеница да је до сада публикувао укупно 49 научно-стручних радова. Кандидат

је из области којом се бави дисертација публиковао један рад у међународном часопису (M23) као првоименовани аутор и један рад у истакнутом међународном часопису (M22).

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата за самосталан научни рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења постојећих метода, до развоја методологије која превазилази уочене недостатке. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању научних проблема.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Најзначајнији научни доприноси коју су остварени у оквиру докторске дисертације огледају се у следећем:

- Извршена је детаљна анализа утицаја фотонапонског система на хармонијска изобличења струја и напона у тачки прикључења на дистрибутивну мрежу при различитим нивоима инсолације на фотонапонски панел.
- Развијен је симулациони модел за анализу рада фотонапонског система и његовог утицаја на квалитет електричне енергије у мрежи.
- Извршена је анализа параметара у управљачким структурама енергетских претвараача у фотонапонским системима који индиректно утичу на хармонијска изобличења струја.
- Предложено је решење за смањење хармонијских изобличења струја инјектирања и поправак фактора снаге фотонапонских система који се заснива на употреби дистрибуираног статичког компензатора који генерише неактивне компоненте струја.
- Реализован је мерно-аквизициони систем за добијање експерименталних резултата истраживања.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Проблем са квалитетом електричне енергије ће бити изражен при масовној употреби фотонапонских система, нарочито у нисконапонској дистрибутивној мрежи. Висока пенетрација фотонапонских система у дистрибутивној мрежи је већ присутна, а биће још већа услед напретка фотонапонске технологије, смањења капиталних трошкова, као и увођења државних субвенција и повлашћених тарифних политика. Према томе, задаци истраживања у циљу побољшања квалитета електричне енергије у тачки прикључења фотонапонских система на мрежу иду у правцу одређивања и дефинисања стратегија и начина управљања фотонапонским инверторима како би се обезбедио баланс између захтева за максималном производњом активне снаге и задовољење постављених критеријума за обезбеђење захтеваног квалитета електричне енергије у тачки прикључења на мрежу. Самим тим, анализа управљања инвертором у циљу регулације активне и реактивне снаге која се инјектира у мрежу у условима смањене ирадијансе од важности је за несметан рад целог система.

Променљивост у интензитету сунчевог зрачења, као доминантног утицајног фактора на производњу фотонапонског система, у великој мери се одражава и на генерисање хармонијских изобличења струја, па самим тим и на смањење фактора снаге читавог система. Проблем смањеног фактора снаге фотонапонског система при ниском интензитету сунчевог зрачења не може се превазићи управљањем активном и реактивном снагом при основном хармонику. У докторској дисертацији је разматрано коришћење дистрибуираних статичких компензатора који имају улогу компензатора неактивне снаге и активног филтера за елиминацију виших хармоника. При томе, предложено је да се управљање компензатором



неактивне снаге врши на основу активних компоненти инјектиране струје фотонапонском система према DIN 40110 стандарду. И поред употребе компензатора, струја фотонапонског система која се инјектира у мрежу при ниском интензитету сунчевог зрачења има значајно хармонијско изобличење. Разлог томе се може наћи у чињеници да струја компензатора треба да садржи значајан ниво виших хармоника како би елиминисала високофреквентне компоненте у генерисаној струји фотонапонског инвертора, што има за последицу комплексан и сложен поступак регулације струје компензатора, уз сва динамичка ограничења дате управљачке структуре.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Марко Икић је објавио 49 научно-стручних радова, од којих 3 у међународним часописима са SCI листе. Кандидат је научне доприносе који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације публиковао у међународном часопису (M23) као првоименовани аутор на раду, као и у раду у истакнутом међународном часопису (M22). Такође је из области којом се бави дисертација публиковао 3 рада на међународним конференцијама, 2 рада у националним часописима и више радова на скуповима националног значаја.

Списак радова је дат у наставку, при чему су звездицом означени радови који су проистекли из докторске дисертације.

##### Категорија M23:

- [1]\* Marko Ikić, Jovan Mikulović: „*Experimental Evaluation of Distortion Effect for Grid-Connected PV Systems with Reference to Different Types of Electric Power Quantities*“, MDPI Energies, Vol. 15, No. 2, pp. 416, ISSN 1996-1073, DOI 10.3390/en15020416, January 2022
- [2] M. Vukovic, M. Miskic, I. Kastelan, S. Lale, M. Forcan, G. Vukovic, M. Ikić: „*Renewable Energy-Powered Traffic Signalization as a Step to Carbon-Neutral Cities (The Case of Western Balkans)*“, MDPI Sustainability, Vol. 15, No. 7, pp. 6164, April 2023, DOI 10.3390/su15076164.

##### Категорија M22:

- [1]\* Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Srđan Lale, Marko Ikić, „*Single-phase phase locked loop with DC offset and noise rejection for photovoltaic inverters*“, IET Power Electronics, Vol. 7, pp. 1-12, ISSN 1755-4535, DOI 10.1049/iet-pel.2013.0413, 2014

##### Категорија M33:

- [1]\* Marko Ikić, Bojana Čolić, Jovan Mikulović, Srđan Jokić: „*Impact assessment of irradiance and temperature variation on PV system current harmonics injection*“, 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 16 - 18 March, 2022, Jahorina, RS, B&H.
- [2]\* Milica Ristović Krstić, Slobodan Lubura, Srđan Lale, Milomir Šoja, Marko Ikić, Dragiša Milovanović: „*Analysis of discretization methods applied on DC-SOGI block as part of SRF-PLL structure*“, INDEL Banja Luka, IEEE, pp. 1-5, ISBN 978-1-5090-2329-5, DOI 10.1109/INDEL.2016.7797771, 2016.
- [3]\* Milica Ristović, Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Srđan Lale, Marko Ikić: „*Adaptive Delay Bank Filter for Selective Elimination of harmonics in SRF-PLL structures*“, IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical engineering, June 2015.
- [4] Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Srđan Lale, Marko Ikić: „*Experimental Verification of Single-Phase PLL With Novel Two-Phase Generator for Grid-Connected Converters*“, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition – EPE-

PEMC 2012 ECCE Europe, NOVI SAD, REPUBLIC OF SERBIA, T15 – Id223, September 4th – 6th

- [5] Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Marko Ikić: „A novel two-phase generator as part of single phase PLL for grid connected converters“, 16th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS – Ee2011, NOVI SAD, REPUBLIC OF SERBIA, T4 – 2.4, October 26th – 28th
- [6] Milomir Šoja, Slobodan Lubura, Marko Ikić: „4Q pretvarač kao ulazni dio VSD pretvarača“, 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM on POWER ELECTRONICS – Ee2009, NOVI SAD, REPUBLIC OF SERBIA, EE1 – 1.2, October 28th – 30th

#### Категорија М52:

- [1]\* Srđan Lale, Milomir Šoja, Slobodan Lubura, Marko Ikić: „Educational Experimental Platform for Emulation of Photovoltaic Modules“, International Journal of Electrical Engineering and Computing, University of East Sarajevo, Faculty of Electrical Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 75-82, DOI 10.7251/IJEEC1802075L, ISSN 2566-3682, December 2018.
- [2]\* Marko Ikić, Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Srđan Lale, Srđan Vasković: „Hybrid Power Supply System“, ACTA TEHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, Vol. VIII, No. 3, pp. 33-37, ISSN 2067 – 3809, July-Sep 2015.
- [3] Марко Икић: „Енергетски ефикасне јавне расвјете“, ГЛАСНИК Институт за стандардизацију Босне и Херцеговине, ISSN 1840-2860, број 1-2, јули 2014.
- [4] Milomir Šoja, Marko Ikić, Mladen Banjanin, Milan Radmanović: „Improving Efficiency of Power Electronics Converters“, ELECTRONICS, Vol.14, No.2, Banja Luka, Decembar 2010., strana 37-42.
- [5] Бојана Новаковић, Срђан Јокић, Марко Икић, Горан Вуковић, Жељко Ђуришић: „Преглед методологија контроле хармонијских изобличења у индустријским мрежама са компензацијом реактивне снаге“, ЕНЕРГЕТИЧАР, број XV, САВЕЗ ЕНЕРГЕТИЧАРА РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ Бања Лука, Мај 2010., страна 27-48

#### Категорија М63:

- [1]\* Младен Бањанин, Марко Икић, Владан Андрић: „Мјерење и анализа параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења ФНЕ Бранковићи 1 и ФНЕ Бранковићи 3 на електродистрибутивну мрежу“, 22nd International Symposium INFOTEN-JANORINA, 15-17 March 2023
- [2]\* Младен Бањанин, Марко Икић, Милан Тимотија, Слађан Макљеновић, Лазар Глуховић: „Мјерење и анализа параметара квалитета електричне енергије у тачки прикључења МХЕ Миљацка на 10 kV електродистрибутивну мрежу“, 22nd International Symposium INFOTEN-JANORINA, 15-17 March 2023
- [3] Бојана Чолић, Марко Икић, Јован Ч. Микуловић: „Утицај несиметрије напона на израчунавање снага и фактора снаге“, 13. саветовање о електродистрибутивним мрежама са регионалним учешћем (CIRED), R-2.05, 12-16. септембра 2022., Копаноник, Србија
- [4] Srđan Lale, Ognjen Petrić, Slobodan Lubura, Marko Ikić: „Platform for Rapid Prototyping of Maximum Power Point Tracking Algorithms in Photovoltaic Systems“, IX International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2022, ISBN 978-86-7466-930-3, pp 918-922
- [5]\* Душан Ђурђевац, Марко Икић: „Анализа утицаја фотонапонских електрана на преносну мрежу“, 15. савјетовање ВН К/О CIGRE 2021, 17-20. октобар 2021., Неум
- [6]\* Марко Икић, Младен Бањанин, Владимир Милојевић, Срђан Чалија: „Експериментална анализа утицаја фотонапонске електране на квалитет електричне енергије дистрибутивне мреже“, 2. савјетовање ВН К/О CIGRE 2020, 25-27. октобар 2020., Мостар

- [7] Младен Бањанин, Марко Икић, Игор Крајишник, Александар Тодоровић: „Анализа ефикасности громобранских хватаљки са раним стартовањем“, 2. савјетовање ВН К/О CIREД 2020, 25-27. октобар 2020., Мостар
- [8] Сања Јовић, Марко Икић, Младен Бањанин, Горан Вуковић: „Утицај CFL и LED расвјетних тијела на квалитет електричне енергије“, научно-стручни симпозијум ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ - ENEF 2019, 3-4. новембар 2019., Бања Лука
- [9] Младен Бањанин, Марко Икић, Горан Вуковић, Срђан Јокић: „Анализа проблема неравномјерне расподеле струје кроз кратке паралелне проводнике и смјернице ка његовом рјешавању“, 14. савјетовање ВН К/О CIGRE 2019, 20-23. октобар 2019., Неум
- [10] Младен Бањанин, Марко Икић: „Утицај малих хидроелектрана на напонске прилике и губитке у локалној електродистрибутивној мрежи“, Прво савјетовање ВН К/О CIREД 2018, 14-16. октобар 2018., Мостар
- [11] Ернад Шабановић, Марко Икић, Слободан Лубура, Миломир Шоја: „Класификација фотонапонских система интегрисаних на омотач зграде“, научно-стручни симпозијум ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ - ENEF 2017, 3-4. новембар 2017., Бања Лука
- [12] Ернад Шабановић, Марко Икић, Слободан Лубура, Миломир Шоја: „Могућности и начини искориштења фотонапонских система у зградарству (BIPV)“, COMETA2016, Децембар 2016., Јахорина
- [13]\* Ернад Шабановић, Марко Икић, Слободан Лубура, Миломир Шоја: „Повезивање фотонапонских система на мрежу. Избор топологије прикључка“, COMETA2016, Децембар 2016., Јахорина
- [14] Slobodan Lubura, Srđan Lale, Bojana Novaković, Milica Ristović, Milomir Šoja, Marko Ikić: „Eksperimentalna verifikacija uticaja metoda diskretizacije na rad dvofaznog generatora kod SRF-PLL struktura“, Друштво за електронику, телекомуникације, рачунарство, аутоматiku и нуклеарну технику ETRAN, ISBN 978-86-7466-618-0, јун 2016., Златибор
- [15] Marko Ikić: „Jedna realizacija faznog upravljanja tiristorskim pretvaračima pomoću Matlabа“, 3rd International Conference „NEW TECHNOLOGIES NT-2016“ Development and Application, Мај 2016., Мостар
- [16] Срђан Лале, Миломир Шоја, Марко Икић, Драгиша Миловановић: „Упоредна анализа метода дискретизације двофазног генератора као дијела једнофазне фазно-закључане петље“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2016.
- [17] Марко Икић: „Улога управљања могућим ризицима пројекта модернизације система јавне расвјете у циљу ефикаснијег извршавања пројекта“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2016.
- [18] Marko Ikić, Semir Hadžimuratović: „Long-term Renewable Targets and Energy Efficiency Savings in the B&H Energy Sector“, INFOTEH-JAHORINA, Mart 2016.
- [19] Марко Икић: „Преглед и анализа аналитичких модела криве снаге вјетротурбине са становишта одређивања фактора искориштења производних капацитета“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2015.
- [20] Слободан Лубура, Миломир Шоја, Срђан Лале, Милица Ристовић, Марко Икић, Драгиша Миловановић: „АДБ филтерска банка за селективно елиминисање виших хармоника у SRF-PLL структурама“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2015.
- [21] Marko Ikić, Jovan Mikulović, Željko Đurišić: „Improved model for estimating PV system production“, INDEL 2014, Novembar 2014., Бања Лука
- [22] Srđan Lale, Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Marko Ikić: „A Digital Design of Novel Two-Phase Generator as Part of SRF-PLL Structure for PV Inverters“, INFOTEH-JAHORINA, Mart 2014.
- [23] Марко Икић, Миломир Шоја, Слободан Лубура, Срђан Лале, Милан Радмановић: „Нови концепт напајања система јавне расвјете“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2014.
- [24] Марко Икић, Миломир Шоја, Слободан Лубура, Ненад Јованчић: „Уштеда електричне енергије у систему јавне расвјете“, научно-стручни симпозијум ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ - ENEF 2013, 22-23. новембар 2013., Бања Лука

- [25] Ненад Јованчић, Миломир Шоја, Марко Икић: „Примјена SolarMagic SM3320 – ВАТТ – ЕВ претварача код самосталних РВ система напајања“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2013.
- [26] Марко Икић, Миломир Шоја, Слободан Лубура, Срђан Лале, Ненад Јованчић: „Принципи уштеде електричне енергије система јавне расвјете“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2013.
- [27] Марко Икић, Срђан Лале, Миломир Шоја, Слободан Лубура, Милан Радмановић: „Реализација и примјена вишенамјенског DC/ХС претварача“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2012.
- [28] Srdan Lale, Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Marko Ikić: „Analysis of single-phase PLL with novel two-phase generator for grid-connected converters“, 19th Telecommunications Forum TELFOR-2011, Beograd, REPUBLIC OF SERBIA, 5.24, November 22th – 24th
- [29] Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Marko Ikić: „A single-phase SRF PLL with a novel two-phase generator for PV microinverters“, ETAI2011, Ohrid, Macedonia, September 2011.
- [30] Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Marko Ikić: „The improved single-phase srf dpll algorithm with a second – order digital filter“, INFOTEN-JAHORINA, Mart 2011.
- [31] Миломир Шоја, Слободан Лубура, Марко Икић, Срђан Лале: „Неке методе за повећање ефикасности микроинвертора“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2011.
- [32] Marko Ikić, Semir Hadžimuratović, Boško Kenjić, Gary A. Goldstein, Evelyn L. Wright, Bruno Merven: „Implementation of strategic energy planning tools for the ВИН energy system“, INFOTEN-JAHORINA, Mart 2010.
- [33] Миломир Шоја, Марко Икић, Младен Бањанин, Милан Радмановић: „Повећање ефикасности претварача енергетске електронике - I дио“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2010.
- [34] Миломир Шоја, Марко Икић, Младен Бањанин, Милан Радмановић: „Повећање ефикасности претварача енергетске електронике - II дио“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2010.
- [35] Марко Икић: „Безколекторски једносмјерни мотор (BLDC) са трапезним обликом индукваног фазног напона“, ИНФОТЕХ-ЈАХОРИНА, Март 2009.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Марка Икића под насловом „Компоненте снаге и хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система” у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Допринос истраживања докторске дисертације се огледа у детаљној анализи утицаја фотонапонских система на хармонијска изобличења струја и напона у тачки прикључења при различитим условима експлоатације и у идентификацији компонената снаге које се инјектирају у тачки прикључења на електроенергетску мрежу. У дисертацији је развијен симулациони модел за анализу рада фотонапонског система и његовог утицаја на квалитет електричне енергије у мрежи. Валидација и верификација истраживања извршена је поређењем резултата добијених моделовањем са резултатима добијеним на основу мерења на фотонапонском систему. У дисертацији је извршена анализа параметара у управљачким структурама енергетских претварача у фотонапонским системима који индиректно утичу на хармонијска изобличења струја и напона. У циљу адекватне синхронизације између фотонапонског инвертора и мреже предложена је једнофазна PLL структура помоћу које се елиминише појава једносмерне компоненте у естимираном напону. Такође су од значаја и нова решења за побољшање квалитета електричне енергије и поправку фактора снаге фотонапонских система која се заснивају на употреби дистрибуираних статичких компензатора.

Докторска дисертација кандидата Марка Икића представља резултат вишегодишњег истраживачког рада у области фотонапонских система и њихове интеграције у електроенергетски систем. Научне доприносе који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације кандидат је публиковао у два рада у међународним часописима, од којих је на једном првоименовани аутор. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија закључује да докторска дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос.

Током израде докторске дисертације, као и током целокупног трајања докторских студија, кандидат Марко Икић је показао склоност ка научноистраживачком раду и способност за самосталан научноистраживачки рад. Комисија констатује да је кандидат Марко Икић, магистар 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 „Компоненте снаге и хармонијска изобличења напона и струја фотонапонских система” кандидата Марка Икића изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 27.04.2023. године

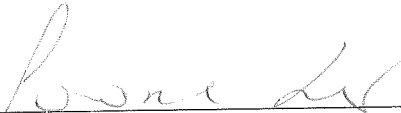
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ




Др Жељко Ђуришић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



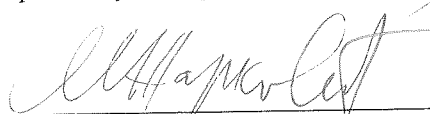
Др Срђан Лале, доцент  
Универзитет у Источном Сарајеву - Електротехнички факултет



Др Лазар Сарановац, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Томислав Шекара, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Милета Жарковић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет