

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Томислава Рајића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5008/14-3 од 24.03.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Томислава Рајића под насловом

Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова

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

Кандидат Томислав Рајић је 21.11.2018. године пријавио тему за израду докторске дисертације под називом „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“.

Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације (27.11.2018. године) и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета.

Одлуком бр. 5008/14-1 од 14.12.2018. године, за чланове Комисије за оцену подобности теме именовани су:

1. др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Никола Рајаковић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Зоран Радаковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
4. др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Јелисавета Крстивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Дана 11.01.2019. године кандидат је полагао јавну усмену одбрану теме.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је извештај Комисије о прихватању теме докторске дисертације (Одлука број 5008/14-2 од 12.03.2019. године). За ментора дисертације, именован је др Зоран Стојановић, ванредни професор. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука број 61206-1288/2-19 од 25.03.2019. године).

Кандидат је 20.02.2020. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за предају дисертације на преглед и оцену (03.03.2020. године). Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације, под називом „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ (Одлука број 5008/14-3 од 24.03.2020. године), у следећем саставу:

1. др Зоран Стојановић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла
4. др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Јелисавета Крстивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Кандидат је Студијски програм започео у јесењем семестру школске године 2014/2015 (23.10.2014. године).

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Томислава Рајића под насловом „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужој научној области Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Зоран Стојановић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Зоран Стојановић се дуги низ година бави научноистраживачким радом у областима релејне заштите постројења и мрежа, што је потврђено релевантним радовима који су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Томислав Рајић рођен је 1989. године у Београду. Завршио је основну школу и гимназију у Лазаревцу. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2008. године. У току основних студија на одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, остварио је просечну оцену 9,27. Дипломирао је у септембру 2012. године. Мастер студије је уписао 2012. године на Електротехничком факултету, смер за Електроенергетске мреже и системе. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је септембра 2014. године. Мастер студије је завршио са просечном оценом 9,80. Завршни мастер рад под називом „Симулација подужне диференцијалне заштите вода“ одбранио је са оценом 10. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2014. године.

Учествовао је на Електријади у Мађарској 2013. године и освојио друго место на такмичењу из предмета Анализа електроенергетских система.

Од јула месеца 2013. године па све до јануара 2014. године радио је у Електротехничком Институту Никола Тесла у Центру за електромерења.

Од јануара 2014. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду најпре као сарадник у настави а потом и као асистент. На Основним и Мастер студијама је ангажован у извођењу наставе из неколико предмета.

Учесник је на изради неколико елабората, студија и пројеката. Аутор је више радова публикованих у часописима са SCI листе, домаћим часописима, зборницима међународних, регионалних и домаћих конференција.

Области његовог интересовања су: релејна заштита, разводна постројења, анализа електроенергетских система и електромагнетна компатибилност.

Од 2015. до 2018. године обављао је функцију секретара Одсека за енергетику. Изабран је за члана Етичке комисије на Електротехничком факултету у Београду. Такође, члан је удружења CIGRE Србија у комитетима А3 и Д1 где обавља и функцију секретара.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ написана је на 143 стране. Организована је у 10 поглавља, има 333 слике, 21 табелу и листу од 44 референце. Наслови поглавља су:

1. Увод
2. Дигитална диференцијална заштита водова
3. Алгоритми примењени у пракси и публиковани у литератури
4. Предложени алгоритам
5. Моделовање система потребног за симулацију помоћу софтверског пакета MATLAB/Simulink
6. Приказ резултата симулација извршених помоћу софтверског пакета MATLAB/Simulink
7. Лабораторијски тестови
8. Снимак квара
9. Приказ резултата симулација извршених помоћу софтверског пакета EMTP/ATP
10. Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дефинисани су предмет и циљ истраживања, као и мотивација. Објашњена је хронологија развоја релејне заштите и заштитних функција. Представљене су све предности и мане заштита које се примењују на водовима, од прекострујне до дистантне, са посебним акцентом на диференцијалну заштиту.

У другом поглављу представљени су основни аспекти рада и примене дигиталне диференцијалне заштите водова. Објашњени су и недостаци исте. Дат је детаљан опис ситуација, односно фактора који могу утицати на рад диференцијалне заштите. Ти фактори

су: засићење струјних трансформатора, кварови преко електричног лука, слаб извор са једне, а јак са друге стране вода, земљоспојеви у радијалним мрежама и кварови на дугачким водовима.

Треће поглавље даје прегледан увид у тренутно стање у пракси. Објашњена су два алгоритма која се примењују у реалним ситуацијама и који су идеја и производ реномираних произвођача релејне заштите. Такође, објашњене су и неке од новијих идеја за реализацију диференцијалне заштите које се помињу у новијим истраживањима и публикованим радовима. Дат је критички осврт на њихове предности и мане.

У четвртом поглављу је дат детаљан опис новог алгоритма. Представљено је како се врши одабирање струјних сигнала и које се рачунске операције примењују над њима. Детаљно је објашњено које су предности фазне диференцијалне заштите у смислу брзине и селективности приликом детектовања квара. Посебан додатак је нулта диференцијална заштита која има бржи одзив при земљоспојевима у радијалним мрежама.

Описани алгоритам је тестиран помоћу модела мреже формираног у програмском пакету MATLAB/Simulink. Пето поглавље даје осврт на то како је формиран модел мреже, односно сваки елемент мреже.

Резултати симулација приказани су у шестом поглављу. Поред новог алгоритма, испрограмирана су и тестирана два алгоритма која се користе у пракси. Дата је упоредна анализа понашања сва три алгоритма за различите типове кварова. Разматрана је и примена аутоматског поновног укључења прекидача.

Верификација новог алгоритма остварена је на физичком моделу једноструког вода у лабораторијским условима. Опис модела и резултати приказани су у седмом поглављу.

Такође, алгоритам је тестиран на основу струјних сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону, чиме је алгоритам верификован и при кваровима у реалној мрежи. Осмо поглавље даје детаљан увид у овај део истраживања.

Алгоритам је проверен и на мрежи која је формирана помоћу програмског пакета ЕМТР/АТР. Овај софтверски пакет је специјализован за брзе електромагнетске процесе и омогућено је уважавање промене параметара система са променом фреквенције. У деветом поглављу дато је физичко објашњење ових појава и резултати симулација.

Коначно, у десетом 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

Водови су један од најважнијих елемената електроенергетског система јер омогућавају пренос електричне енергије од произвођача до потрошача. Уколико би кварови на водовима релативно дуго трајали, била би угрожена стабилност самог електроенергетског система.

Као посебна заштита за кратке и важне водове употребљава се диференцијална заштита. Ова заштита је само у почетку била оријентисана и ограничена на кратке водове због неопходне употребе пилот водова. Употребом OPGW ужади и дигиталним преносом сигнала са једне на другу страну вода, примена диференцијалне заштите се проширила и на дугачке водове.

Основни алгоритам подужне диференцијалне заштите поседује извесне недостатке. Највећи проблем могу проузроковати засићења струјних трансформатора. Засићење изазива изобличење секундарних струја. Приликом квара ван штићене деонице, што за последицу

има повећање диференцијалне струје, може се изазвати непотребно реаговање заштите. Нежељено реаговање може бити резултат још неколико фактора. Дугачки водови имају велике капацитивне струје одвођења дуж вода и уносе осетну разлику између струја са једне и друге стране вода. Последица тога је повећање диференцијалне струје. Кварови са прелазним отпорностима смањују струју квара и утичу на осетљивост диференцијалног релеја. Иоловано звездиште и уземљење преко активне отпорности ради ограничења струје једнофазног кратког споја имају исти ефекат. Средњенапонске мреже обично имају тако реализовано уземљење неутралне тачке, што се одражава на рад диференцијалне заштите.

У предметној дисертацији описан је алгоритам који се састоји од два дела. Један део посматра тренутне вредности фазних струја, а други део је усмерен ка тренутним вредностима нултих компоненти струја. Употребом нултог компонентног система струја повећава се осетљивост и брзина реаговања релеја у мрежама са малим или ограниченим струјама једнофазног кратког споја.

Алгоритам заснован на фазној диференцијалној заштити ради са тренутним вредностима струја и тиме се избегавају компликоване рачунске операције и обраде сигнала. У сваком тренутку одабирања релеја се доводи по један одбирак струјног сигнала са леве и десне стране вода, за сваку фазу посебно. Сигнали се узимају са обе стране вода, као што је то случај и код класичне подужне диференцијалне заштите, али је разлика у односу на класични принцип у томе што се уместо стабилизационе струје прати смер струја са две стране вода. Праћење смера је реализовано дефинисањем нове величине, назване индикатор смера.

Алгоритам за фазну диференцијалну заштиту је потпуно неосетљив на засићење струјних трансформатора и даје изузетно брз одзив. Такође, неосетљив је и на друге околности које имају негативан утицај на брзину реаговања као што су велика дужина вода и квар преко електричног лука. Међутим, и овај алгоритам, као и све друге алгоритме за диференцијалну заштиту, карактерише спорија конвергенција при земљоспојевима у радијалним мрежама. Овај проблем се превазилази праћењем нултих компоненти струја са обе стране вода. Принцип рада овог алгоритма је исти као и код алгоритма за фазну диференцијалну заштиту. Разлика је једино у томе што се прорачуни врше са тренутним вредностима нултих компоненти струја. Употребом нултог компонентног система струја повећава се осетљивост и брзина реаговања релеја у мрежама са малим или ограниченим струјама једнофазног кратког споја.

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:

- Упознавање са принципима рада традиционалне диференцијалне заштите вода.
- Преглед и систематизација најновијих истраживања везаних за подужну диференцијалну заштиту вода.
- Сагледавање проблема са којима се сусреће подужна диференцијална заштита вода: амплитудска и фазна грешка струјних трансформатора, засићење струјних трансформатора, дужина вода, синхроно одабирање и прикупљање одбирака сигнала са

различитих крајева вода, прелазна отпорност на месту квара, начин уземљења звездишта енергетског трансформатора.

- Развој новог алгоритма за заштиту вода који се заснива на диференцијалном принципу.
- Формирање модела система применом програмског пакета MATLAB, у којем је симулиран, тестиран и верификован рад новог алгоритма. Такође, тестирање је извршено формирањем модела мреже помоћу софтвера ЕМТР/АТР.
- Упоредна анализа перформанси новог алгоритма са комерцијалним решењима.
- Верификација новог алгоритма на физичком моделу надземног вода у лабораторијским условима и на основу записа релеја који се налазе у погону.

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 надземних водова електроенергетског система. Приказани алгоритам је тестиран у бројним ситуацијама које се могу јавити у пракси. Утврђено је да је предложени алгоритам имун на све околности које могу имати негативан ефекат на до сада познате алгоритме за диференцијалну заштиту. Засићење струјних трансформатора, велика дужина вода и начин уземљења звездишта трансформатора лако се превазилазе и немају утицај на брзину реаговања и селективност новог алгоритма. Имајући у виду важност за брзим одзивом релеја зарад поузданог функционисања електроенергетског система, јасна је велика важност примене уређаја који могу непогрешиво да препознају квар на водовима и да их благовремено искључе.

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 могу се истаћи следећи научни доприноси:

- Нови приступ у реализацији дигиталне подужне диференцијалне заштите вода који се заснива на принципу поређења смера фазних и нултих струја са две стране вода.
- Једноставност новог алгоритма у поређењу са решењима која се наводе у радовима новијег датума из ове области.
- Елиминисање употребе Фуријеовог филтра у обради сигнала.
- Добијање бржег одзива релеја за кварове унутар зоне заштите у односу на алгоритме које користе реномирани произвођачи релејне заштите.
- Неосетљивост алгоритма у ситуацијама које могу изазвати неселективно реаговање диференцијалне заштите.
- Употребљивост алгоритма и на водовима на којима је примењена техника аутоматског поновног укључења прекидача.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављену проблематику, 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 алгоритам је тестиран на рачунарским симулацијама. Верификација новог алгоритма остварена је на физичком моделу једноструког вода у лабораторијским условима. Такође, алгоритам је тестиран на основу струјних сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону електроенергетског система Србије. Тиме су потврђене полазне претпоставке и остварен је значајан научни допринос. Увидом у приложу литературу, као и у публиковане радове кандидата у часописима *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* и *Electrical Engineering* (некадашњи *Archiv für Elektrotechnik*), констатујемо да се истраживањима у овој дисертацији дошло до нових резултата који до сада нису били публиковани.

4.3. Верификација научних доприноса

Томислав Рајић је до сада објавио следеће радове релевантне за докторску дисертацију:

Категорија M21:

1. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** An algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* vol. 94, pp. 276-286, 2018, (**IF=3.289**) (DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.07.001 ISSN 0142-0615)

Категорија M23:

2. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** Zero-sequence longitudinal differential protection of transmission lines, *Electrical Engineering* vol. 102, pp. 747-762, 2020, (**IF=1.296**) (DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00908-4> ISSN 1432-0487)

Категорија M33:

3. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** The influence of current transformer saturation on longitudinal differential protection of transmission lines, *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower)*, Belgrade, Serbia, 2016, pp. 113-119, (DOI: [10.1049/cp.2016.1102](https://doi.org/10.1049/cp.2016.1102), ISBN: 978-1-78561-406)

Категорија M50:

4. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** Simulacija podužne diferencijalne zaštite dalekovoda sa primenom dodatne stabilizacije i sistema APU, *Tehnika*, vol. 71, br. 6, str. 861-867, 2016, (ISSN 0040-2176, DOI: [10.5937/tehnika1606861R](https://doi.org/10.5937/tehnika1606861R))

Категорија M63:

5. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** Podužna diferencijalna zaštita vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja, *Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, JAHORINA*, Bosna i Hercegovina, 2015, pp.180-185 (ISBN 978-99955-763-6-3)
6. **Rajić, T., Stojanović, Z.:** Uticaj stabilizacione struje na podužnu diferencijalnu zaštitu dalekovoda, *Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, JAHORINA*, Bosna i Hercegovina, 2016, pp.78-83 (ISBN 978-99955-763-9-4)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Томислава Рајића под насловом „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ 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 проблем реализације алгорита за подужну диференцијалну заштиту надземних водова. Сагледана је проблематика и дат је осврт на решења која се јављају у пракси и која су предложена у новијим радовима из поменуте области. Алгоритам је тестиран на софтверском моделу вода као и на физичком моделу једноструког вода у лабораторијским условима. Такође, алгоритам је тестиран на основу струјних сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону. Показано је да је алгоритам потпуно неосетљив на све околности и ситуације које имају негативан утицај на брзину реаговања и селективност диференцијалне заштите.

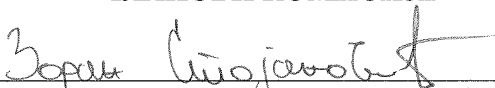
Резултати су верификовани у радовима објављеним у часописима са SCI листе, међународним и домаћим конференцијама. Тиме је показано да је основна теоријска поставка била исправна и да наведени алгоритам представља значајан допринос на пољу релејне заштите.

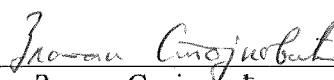
Кандидат Томислав Рајић показао је способност за самосталан научни рад, што потврђује и чињеница да је објавио више научних радова који су проистекли из рада на дисертацији, а у којима је први аутор. Оцењујући докторску дисертацију, уз уважавање чињенице да је анализирана проблематика актуелна и савремена и да дисертација садржи научне доприносе, Комисија констатује да је кандидат Томислав Рајић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, 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 „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ кандидата Томислава Рајића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 15.7.2020. године

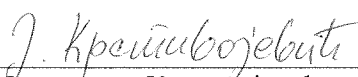
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Зоран Стојановић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет


др Жарко Јанда, виши научни сарадник
Електротехнички институт Никола Тесла, Београд


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


др Јелисавета Крстивојевић, доцент
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет