

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Јелисавете Крстивојевић

Одлуком Научно-наставног већа Електротехничког факултета бр. 5039/07-3 од 24.03.2015. године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Јелисавете Крстивојевић, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом

„Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“

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 Јелисавета Крстивојевић уписала је докторске студије на Електротехничком факултету у Београду у школској 2007/2008. години. На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 2944/2 од 11.10.2007. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008, 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 ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/05-2007/5039.

Кандидат је тему докторске дисертације под насловом „Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“ пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету у Београду 27.6.2013. године и за менторе предложила редовног проф. др Миленка Ђурића и доцента др Јована Микуловића.

Дана 3.7.2013. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно –научном већу на усвајање.

Дана 11.7.2013. године Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Дана 8.10.2013. године Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Дана 18.11.2013. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом: “Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“. (број одлуке 61206-5374/2-13 од 18.11.2013. године).

Дана 4.3.2015. године предата је докторска дисертација на преглед и оцену.

Дана 10.3.2015. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације

Дана 17.3.2015. године Наставно-научно веће Факултета на седници бр. 784 именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу др Миленко Ђурић, редовни проф. у пензији (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Јован Микуловић, ванредни проф. (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Драган Тасић, редовни проф. (Универзитет у Нишу, Електронски факултет), др Зоран Стојановић, доцент (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Зоран Лазаревић, редовни проф. (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), бр. Одлуке 5039/07-3 од 24.03.2015. године.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Јелисавете Крстивојевић припада научној области Техничке науке - Електротехника, ужа научна област Електроенергетски системи, подобласт Релејна заштита. За менторе дисертације одређени су др Миленко Ђурић, редовни професор у пензији на Универзитету у Београду - Електротехнички факултет и др Јован Микуловић, ванредни професор на Универзитету у Београду - Електротехнички факултет, због истакнутих доприноса у области електроенергетске мреже и системи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Јелисавета Крстивојевић је рођена 23.3.1982. године у Ваљеву, где је завршила основну школу и гимназију. Носилац је дипломе „Вук Стефановић Караџић“. Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписала је 2001. године, где је дипломирала 2006. године на Енергетском одсеку – Смер за Електроенергетске системе са укупном просечном оценом 8,77 и оценом 10 на дипломском раду. У марту 2008. године је уписала докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Електроенергетске мреже и системи, где је положила све предвиђене испите са просечном оценом 10.

Током основних студија од стране Електротехничког факултета Универзитета у Београду проглашена је за најбољег студента у генерацији на Енергетском одсеку у трећој, четвртој и петој години студирања. Добитник је ETF BAFA USA награде за изванредан успех постигнут у току студирања. Након завршетка основних студија, од стране Електротехничког факултета Универзитета у Београду, проглашена је за најбољег дипломца у генерацији на Енергетском одсеку.

Од марта 2007. године три месеца је радила као пројектант сарадник у Пројектном бироу “Електроисток”, Београд. Од јула 2007. године је запослена на Електротехничком факултету Универзитета у Београду као сарадник у настави на Катедри за Електроенергетске системе. Тренутно је у звању асистента. Учествоје у извођењу рачунских вежби из предмета Елементи електроенергетских система, Разводна постројења, Релејна заштита, Практикум из елемената електроенергетских система и Пројектовање ТС надземних и кабловских водова, као и лабораторијских вежби из предмета Електрична мерења 1, Електрична мерења 2, Релејна заштита и Практикум из елемената електроенергетских система.

Учествовала је у изради три научна пројекта. Коаутор је једног рада публикованог у часопису међународног значаја, два рада на међународним конференцијама, два рада у националном часопису и четири рада публикована на домаћим конференцијама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“ садржи 182 нумерисане стране текста и остале пратеће странице са подацима захтеваним прописаном формом. Презентовани материјал укључује 152 слике и 23 табеле. Текст докторске дисертације је подељен у седам поглавља, која су насловљена: 1. Увод; 2. Диференцијална заштита енергетског трансформатора; 3. Анализа могућности примене фазног компаратора у заштити енергетског трансформатора; 4. Унапређење диференцијалне заштите током спољашњих кварова применом дигиталног фазног компаратора; 5. Земљоспојна заштита енергетског трансформатора; 6. Софтверски алат за симулацију дигиталне заштите енергетског трансформатора; 7. Закључак. На крају текста дат је преглед коришћене литературе (61 библиографска референца), номенклатура и биографија аутора.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље представља увод у дисертацију. У овом поглављу најпре је описан значај заштите енергетских трансформатора како од унутрашњих кварова тако и од ефеката кварова који настају ван енергетског трансформатора (ЕТ-а). Затим је истакнуто да се за заштиту ЕТ-а најчешће примењује диференцијална заштита, која представља брзу и селективну заштиту ЕТ-а од унутрашњих кварова. Након тога, скренута је пажња на недостатке и мане диференцијалне заштите енергетских трансформатора и дат је преглед метода и техника које служе за побољшање рада диференцијалне заштите.

На основу прегледа постојећих решења за заштиту ЕТ-а постављени су основни задаци и циљеви које нови алгоритми за заштиту ЕТ-а треба да испуне.

У другом поглављу је описан принцип рада диференцијалне заштите енергетских трансформатора и истакнуте су њене предности и мане. Затим су представљене методе за побољшање рада диференцијалне заштите које су нашле широку употребу у пракси.

У трећем поглављу су приказани резултати истраживања могућности примене фазне компарације струја на примару и секундару енергетског трансформатора за детекцију кратких спојева намотаја енергетског трансформатора. У овом поглављу представљен је принцип дигиталне фазне компарације у временском домену, затим је представљена идеја примене фазне компарације у заштити ЕТ-а, након чега су приказани резултати добијени

помоћу симулација кратких спојева намотаја ЕТ-а и помоћу лабораторијских снимака кратких спојева на физичким моделима једнофазног и трофазног ЕТ-а.

У четвртом поглављу је представљен нови алгоритам базиран на дигиталном фазном компаратору који служи за унапређење диференцијалне заштите током спољашњих кварова. Показано је да би се применом новог алгоритма као додатног критеријума за рад диференцијалне заштите елиминисало непотребно деловање диференцијалне заштите узроковано засићењем струјних трансформатора и на тај начин повећала њена поузданост.

У петом поглављу представљен је алгоритам за земљоспојну заштиту ЕТ-а базиран на дигиталној фазној компарацији суме струја на прикључцима ЕТ-а и струје неутралног проводника. Алгоритам одређује да ли је присутан земљоспој унутар штићене зоне трансформатора коришћењем функције усмерености. Показано је да би се применом новог алгоритма избегло непотребно реаговање конвенционалне земљоспојне заштите базиране на диференцијалном принципу узроковано засићењем струјних трансформатора током спољашњих кварова или укључења неоптерећеног енергетског трансформатора. На основу експерименталних резултата и резултата добијених симулацијама показано је да је нови алгоритам прецизан током свих испитаних поремећаја.

У шестом поглављу на основу развијених алгоритама за заштиту енергетског трансформатора креиран је софтверски алат помоћу кога су кориснику сликовито и јасно приближени принципи рада традиционалне диференцијалне заштите и земљоспојне заштите ЕТ-а, и представљен је рад заштите која се базира на фазној компарацији у временском домену. Креирани софтверски алат се може користити у едукативне сврхе. Софтверски алат омогућава да се алгоритми за заштиту тестирају учитавањем реалних сигнала који су снимљени у лабораторији или коришћењем сигнала који су генерисани компјутерским симулацијама.

У седмом поглављу су сумирани сви резултати анализа и тестирања. Изведени су закључци и наглашени доприноси остварени у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Задаци релејне заштите су да спречи појаву квара због ненормалних радних стања, као и да минимизира штету уколико до квара дође. Константним развојем електроенергетског система питања поузданости, селективности, осетљивости и брзине деловања заштите све више добијају на значају.

Енергетски трансформатор је изузетно битна и скупа компонента електроенергетског система. У општем случају заштита енергетских трансформатора се може поделити на: заштиту од кварова који настају у трансформатору и заштиту од ефеката кварова који настају ван трансформатора.

У докторској дисертацији представљен је оригиналан приступ у детекцији кратких спојева намотаја енергетског трансформатора базиран на фазној компарацији струја на примарним и секундарним прикључцима енергетског трансформатора. Алгоритам за елиминацију непотребног реаговања диференцијалне заштите услед спољашњих кварова, који је развијен у дисертацији, представља оригинално решење за унапређење заштите енергетског трансформатора. Алгоритам за земљоспојну заштиту енергетског трансформатора, који је развијен у дисертацији, представља оригиналан приступ за детекцију унутрашњих земљоспојева и елиминацију непотребног реаговања земљоспојне заштите базиране на диференцијалном принципу услед појаве засићења струјних трансформатора.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је истражио постојећу релевантну литературу и коректно навео референце које су од значаја за тему дисертације. Наведена је укупно 61 библиографска референца. Литература обухвата широк опсег доступних публикација, од старијих до савремених, а извори референци су доминантно из часописа са SCI листе и престижних међународних конференција. Листа укључује и неколицину радова које су током истраживања на тему докторске дисертације заједно објавили кандидат и ментор.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија примењена приликом израде ове докторске дисертације може се сумирати кроз следећи низ активности:

- Проучавање досадашњих теоријских сазнања и најновијих резултата везаних за предмет дисертације.
- Методе прикупљања, обраде и анализе података о постојећим решењима на основу доступне литературе.
- На основу систематизованог прегледа литературе одређен је простор који је отворен за даље истраживање у погледу развоја нових и унапређења постојећих алгоритама за заштиту енергетских трансформатора.
- Формирање основних захтева и циљева које нови алгоритам треба да испуни на основу уочених недостатака постојећих решења.
- Тестирање предложених алгоритама рачунарским симулацијама.
- Верификација предложених алгоритама лабораторијским експериментима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Приликом одабира заштите неког енергетског трансформатора често је могуће применити више заштитних шема. При одабиру најпогодније и најефикасније заштитне шеме треба наћи баланс између брзине, осетљивости и селективности са једне стране и њихове исплативости са друге стране.

Сваки од предложених алгоритама верификован је серијом рачунарски генерисаних улазних сигнала и са реалним сигнаlima снимљеним у лабораторији на физичким моделима једнофазног и трофазног енергетског трансформатора.

Предност алгоритама, који су представљени у овој докторској дисертацији, за примену у заштити енергетског трансформатора чини њихова поузданост, брзина и једноставност. Представљени алгоритми се лако могу имплементирати у већ постојеће јединице за заштиту енергетског трансформатора. Заштита енергетског трансформатора најчешће обухвата неколико јединица, међу којима су диференцијални релеји и земљоспојни релеји. За рад поменутих јединица врши се мерење струја на прикључцима трансформатора и струје неутралног проводника. Тако да су у већ постојећим јединицама за заштиту енергетских трансформатора, сигнали потребни за рад предложених алгорита обезбеђени.

На основу развијених алгоритама за заштиту енергетског трансформатора креиран је софтверски алат помоћу кога су кориснику сликовито и јасно приближени принципи рада традиционалне диференцијалне заштите и земљоспојне заштите енергетских трансформатора, и представљен је рад заштите која се базира на фазној компарацији у временском домену, а која је резултат ове докторске дисертације. Софтверски алат омогућава да се алгоритми за заштиту тестирају читавањем реалних сигнала који су снимљени у лабораторији или коришћењем сигнала који су генерисани компјутерским симулацијама. Креирани софтверски алат се може користити у едукативне сврхе.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је радећи на својој дисертацији показала систематичност, упорност, креативност, самосталност и зрелост. Треба истаћи да је област којом се кандидаткиња бави веома актуелна, као и да добијени резултати у овој дисертацији у великој мери превазилазе недостатке које постојећа решења показују. Остварени доприноси у овој дисертацији су оригинални и потврђују способност кандидаткиње за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији под насловом „Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“ остварени су следећи научни доприноси:

- Дат је нови приступ за детекцију кратких спојева намотаја енергетског трансформатора базиран на фазној компарацији у временском домену. Показано је да се применом фазне компарације струја на примарним и секундарним прикључцима енергетског трансформатора могу детектовати кратки спојеви намотаја.
- Развијен је нови алгоритам који се базира на фазној компарацији струја на примарним и секундарним прикључцима енергетског трансформатора и посматрању њихових ефективних вредности. Алгоритам је намењен за блокаду непотребног реаговања диференцијалне заштите током спољашњих кварова. Показано је да се применом предложеног алгоритма може решити проблем непотребног реаговања диференцијалне заштите током спољашњих кратких спојева услед појаве засићења струјних трансформатора.
- Развијен је нови алгоритам за земљоспојну заштиту енергетског трансформатора који се базира на фазној компарацији у временском домену суме струја на прикључцима енергетског трансформатора и струје неутралног проводника. Алгоритам служи за детекцију унутрашњих земљоспојева. Такође, применом представљеног алгоритма елиминисало би се непотребно реаговање конвенционалне земљоспојне заштите енергетског трансформатора базиране на диференцијалном принципу током спољашњих кварова и укључења неоптерећеног енергетског трансформатора праћених засићењем струјних трансформатора.
- Предложен је начин подешавања зоне реаговања на карактеристици реаговања релеја за земљоспојну заштиту енергетског трансформатора који се базира на фазној компарацији у временском домену.
- Верификација предложених алгоритама помоћу сигнала који су снимљени у лабораторији на физичким моделима једнофазног и трофазног енергетског трансформатора и помоћу компјутерски генерисаних сигнала.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављене претпоставке, циљеве истраживања и остварене резултате констатујемо да је кандидаткиња успешно одговорила на постављене захтеве. Развијени су нови алгоритми за заштиту енергетских трансформатора и извршено је побољшање постојећих алгорита за диференцијалну заштиту енергетских трансформатора.

Показано је да се применом фазне компарације струја на примарним и секундарним прикључцима енергетског трансформатора могу детектовати кратки спојеви намотаја. Такође, применом фазне компарације струја на примарним и секундарним прикључцима енергетског трансформатора, као и праћењем њихових ефективних вредности, елиминисано је непотребно реаговање диференцијалне заштите током спољашњих кратких спојева праћених засићењем струјних трансформатора. Приказани резултати потврђују да алгоритам може да идентификује присуство спољашњег квара и активира сигнал за блокаду пре него што струјни трансформатори уђу у засићење.

Тестирањем представљеног алгоритма за земљоспојну заштиту енергетског трансформатора показано је да алгоритам у режимима праћеним засићењем струјних трансформатора прави јасну разлику између квара унутар штићене зоне и: (1) квара ван штићене зоне и (2) укључења неоптерећеног трансформатора. Алгоритам не користи блокаду по другом хармонику што има велику предност у брзини формирања сигнала реаговања.

Правилним подешавањем зоне реаговања на карактеристици реаговања релеја за земљоспојну заштиту енергетског трансформатора који се базира на фазној компарацији у временском домену избегава се непотребно реаговање заштите услед засићења струјних трансформатора.

Предност алгоритама који су резултат ове дисертације за примену у заштити енергетског трансформатора чини њихова поузданост, брзина и једноставност, као и могућност једноставне имплементације у већ постојеће јединице за заштиту енергетског трансформатора.

4.3. Верификација научних доприноса

У току свог истраживачког рада, у ужој области теме докторске дисертације, кандидат Јелисавета Крстивојевић објавила је следеће радове:

Категорија M23:

1. **Krstivojević, J.**, Djurić, M.: A new method of improving transformer restricted earth fault protection, - *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 41-48, 2014. (IF=0.642) (ISSN: 1582-7445, e-ISSN: 1844-7600) (DOI: 10.4316/AECE.2014.03005)

Категорија M33:

1. **Krstivojević, J.**, Djurić, M.: A new algorithm for transformer ground fault protection, -*The 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion*, Athens, Greece, 2014. pp. 1-6.

Категорија M51:

1. **Krstivojević, J.**, Đurić, M.: Primena digitalne fazne komparacije u diferencijalnoj zaštiti energetskog transformatora, *ENERGIJA*, br 3-4, str 129 – 135, mart 2015. ISSN: 0354-8651.

Категорија M63:

1. **Krstivojević, J.**, Djurić, M., Terzić, M.: Algoritmi za prepoznavanje struje uključenja neopterećenog energetskog transformatora, - *INFOTEH-JAHORINA 2014*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, vol. 13, pp. 208-213, 2014.
2. **Krstivojević, J.**, Djurić, M.: Uticaj opterećenja strujnih transformatora na diferencijalnu zaštitu energetskog transformatora, - *INFOTEH-JAHORINA 2015*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, vol. 14, pp. 186-191, 2015.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Јелисавете Крстивојевић под називом „Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“ представља оригиналан научни допринос у области релејне заштите електроенергетских система. Дисертација садржи све елементе које предвиђа Правилник о докторским студијама Универзитета у Београду – Електротехничког факултета. У дисертацији је разматран проблем дигиталне заштите енергетских трансформатора са циљем унапређења постојећих и развоја нових алгоритама за заштиту енергетских трансформатора. Комисија истиче да сва решења која су резултат ове докторске дисертације поред научних доприноса могу имати и практичну примену у области релејне заштите.

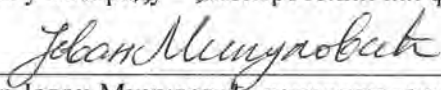
На основу оцењене дисертације, достигнуте способности кандидата за научно-истраживачки рад и остварених научних доприноса, Комисија констатује да је **Јелисавета Крстивојевић** испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Универзитета у Београду - Електротехничког факултета.

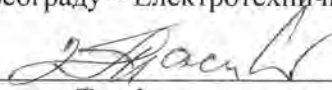
Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Универзитета у Београду - Електротехничког факултета, да се докторска дисертација под називом „Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова“ кандидата **Јелисавете Крстивојевић** прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Унивезитета у Београду и одобри јавна усмена одбрана.

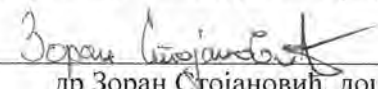
Београд, 15.05.2015.

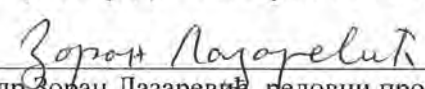
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Миленко Ђурић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Јован Микуловић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Драган Тасић, редовни професор
Универзитет у Нишу – Електронски факултет у Нишу


др Зоран Стојановић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет