

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Срђана Срдиха

Одлуком Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 869/2, донетом на 755. седници, одржаној 06. 11. 2012. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Срђана Срдиха под насловом

Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука

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 мр Срђан Срдих је 17. 09. 2010. године завршио магистарске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, Одсек за енергетику, смер Енергетски претварачи и погони, са магистарском тезом на тему "Предиктивни струјни регулатор за тиристорске исправљаче".

Кандидат мр Срђан Срдих је 16. 05. 2011. године пријавио тему докторске дисертације под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука". На основу предлога Комисије за студије III степена, на 732. седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 24. 05. 2011. године, именована је Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације, у саставу: др Зоран Радаковић, редовни професор (Електротехнички факултет у Београду); др Милош Недељковић, доцент (Електротехнички факултет у Београду); др Слободан Вукосавић, редовни професор (Електротехнички факултет у Београду); др Зоран Лазаревић, редовни професор (Електротехнички факултет у Београду); др Жељко Деспотовић, научни сарадник (Институт "Михајло Пупин" у Београду). За ментора дисертације именован је др Зоран Радаковић. Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације усвојен је на 734. седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 05. 07. 2011. године. На захтев Електротехничког факултета у Београду, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на 8. седници, одржаној 26. 09. 2011. године, одлуком бр. 06-7092/8-11 дало сагласност на предлог теме докторске

дисертације кандидата мр Срђана Срдиха, под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука".

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 02. 10. 2012. године. На основу предлога Комисије за студије III степена, на 755. седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 06. 11. 2012. године, именована је Комисија за преглед и оцену докторске дисертације мр Срђана Срдиха, под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука". Комисија је именована у следећем саставу: др Зоран Радаковић, редовни професор (ментор, Електротехнички факултет у Београду); др Милош Недељковић, доцент (Електротехнички факултет у Београду); др Жељко Деспотовић, научни сарадник (Институт "Михајло Пупин" у Београду); др Зоран Лазаревић, редовни професор (Електротехнички факултет у Београду), др Слободан Вукосавић, редовни професор (Електротехнички факултет у Београду).

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области Техничке науке - Електротехника, ужа научна област је Енергетска електроника (подобласт: тиристорски мрежом вођени претварачи), за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матични факултет.

Ментор докторске дисертације је др Зоран Радаковић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду. Проф. Радаковић има вишегодишње искуство у области електротермије и термичких процеса у електроенергетици, аутор је 18 радова (5 радова је објављено у последњих 5 година) у часописима са *SCI* листе, углавном из наведене области. Проф. Радаковић је предметни наставник за предмете из наведене области, у којима се проучавају и електролучне пећи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Срђан Срдих је рођен у Ливну, БиХ, 15. 06. 1977. године. Основну школу је завршио у Гламочу, а XII Београдску гимназију "Димитрије Туцовић" у Београду. Основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао је 1997. године, а дипломирао је 2004. године на Енергетском одсеку, смер Енергетски претварачи и погони, са укупном просечном оценом 8.28 и оценом 10 на дипломском раду на тему "Анализа рада управљачких кола сервопојачавача *DBM03*". Магистарске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао је 2004. године, а магистрирао је 2010. године на Одсеку за енергетику, смер Енергетски претварачи и погони, са просечном оценом 10 и магистарском тезом на тему "Предиктивни струјни регулатор за тиристорске исправљаче".

Од 2005. године запослен је на Катедри за енергетске претвараче и погоне, Електротехничког факултета Универзитета у Београду, у звању асистента-приправника. Ангажован је на предметима Енергетски претварачи 1 (изводи рачунске и лабораторијске вежбе), Енергетски претварачи 2 (изводи рачунске и лабораторијске вежбе) и Управљање енергетским претварачима (изводи рачунске и лабораторијске вежбе). Кандидат је учествовао на једном *TEMPUS* пројекту и на два пројекта Министарства за науку и заштиту животне средине.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација мр Срђана Срдиха, под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука", састоји се од седам поглавља, списка референци, два прилога и кратке биографије кандидата. Наслови појединих поглавља су: 1. Увод; 2. Примјена електричног лука у металургији и осталим гранама индустрије; 3. Карактеристике електричног лука и преглед модела електричног лука; 4. Принципи и методе регулације струје лука у електролучној пећи за једносмерну струју; 5. Нова предиктивна метода за регулацију струје електричног лука; 6. Експериментална верификација предложене предиктивне методе за регулацију струје електричног лука; 7. Закључак. Наслови прилога су: Прилог П1: Електричне шеме лабораторијског прототипа исправљача; Прилог П2: Опис битних карактеристика управљачке *DSP* картице. Дисертација садржи 242 слике и 28 табела. У дисертацији је наведено 129 библиографских референци. Обим дисертације је 401 страна.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном, поглављу дисертације најпре је дат кратак историјски преглед развоја технологије електролучних пећи. Затим је дат кратак преглед најважнијих особина електролучних пећи, као и кратак преглед најважнијих утицаја пећи на функционисање електроенергетског система.

У другом поглављу дисертације дат је кратак преглед примене електричног лука у металургији. Посебна пажња је посвећена примени електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју, као и основним разликама између пећи за једносмерну струју и пећи за наизменичну струју. Описан је процес добијања челика у електролучним пећима и анализиран енергетски биланс за типичне модерне електролучне пећи великих снага. Наведене су и анализиране основне особине електролучних пећи као потрошача електричне енергије, као и њихов утицај на квалитет електричне енергије. Дат је и кратак преглед примене електричног лука у другим гранама индустрије.

У трећем поглављу је описана појава електричног лука и анализиране су основне карактеристике електричног лука. Затим је дат детаљан преглед постојећих модела електричног лука.

У четвртом поглављу је дат преглед основних принципа за регулацију струје лука у електролучним пећима за једносмерну струју. На основу података из доступне литературе, најпре је утврђено да се у модерним електролучним пећима струја лука регулише искључиво *PI* регулатором, а затим је извршена анализа перформанси комерцијалних регулатора.

У петом поглављу је представљена и анализирана нова предиктивна метода за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју, напајаним из тиристорских исправљача, која није заснована на познавању модела електричног лука. Представљени су и резултати симулације (користећи упрошћен модел електричног лука), који илуструју веома добре динамичке особине предложеног регулатора. Такође, извршено је и поређење предложеног регулатора струје лука са *PI* регулатором који се користи у модерним електролучним пећима за једносмерну струју. Поређење је извршено

са аспекта квалитета одзива система и са аспекта генерисања нежељених варијација снаге до којих долази у току рада пећи, а које доводе до нежељене појаве фликера. У овом поглављу је показано да, у случају када често долази до кратких спојева електрода, применом предложеног регулатора струје електричног лука фликер може бити смањен и до 50%, у односу на *PI* регулатор струје лука.

У шестом поглављу је укратко описана лабораторијска поставка која садржи прототип трофазног тиристорског пуноуправљивог мосног исправљача и уређај за добијање електричног лука. Затим су представљени резултати мерења на основу којих је извршена верификација перформанси предложеног регулатора. Показано је да симулациони модел предложеног регулатора верно представља реализовани лабораторијски прототип регулатора. Експериментално је потврђено да је регулатор робусан на промену индуктивности пригушнице у једносмерном колу исправљача. Експериментално је потврђено и да регулатор успешно регулише струју лука и након појаве несиметрије напона мреже. Такође, експериментално је потврђено да регулатор успешно компензује последице наглих промена напона електричног лука (укључујући и кратке спојеве електрода), као и последице наглих промена напона мреже, чиме је илустрована и робусност предложеног регулатора на ове промене.

У седмом поглављу су сумирани остварени резултати, наведени главни доприноси дисертације и размотрене могућности примене предложене методе за регулацију струје електричног лука у постројењима електролучних пећи напајаних из тиристорских исправљача.

У Прилогу П1 су дате електричне шеме лабораторијског прототипа трофазног тиристорског исправљача који је коришћен приликом експерименталне верификације резултата симулације.

У Прилогу П2 су описане битне карактеристике управљачке картице, која је коришћена приликом експерименталне верификације резултата симулације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Проблематика дисертације се односи на веома актуелну област примене полупроводничких енергетских претварача у циљу побољшања квалитета електричне енергије. На основу увида у доступну литературу, може се закључити да је предложена метода регулације струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју потпуно оригинална. За разлику од до сада примењиваних метода регулације струје електричног лука класичним *PI* регулатором, предложена метода је предиктивна, при чему за њену реализацију није неопходно познавати модел електричног лука. Имајући у виду остварене резултате, значај дисертације се огледа првенствено у томе што предложена метода регулације струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју омогућава (без додатних инвестиција у опрему за компензацију поремећаја) знатно смањење поремећаја у преносној мрежи електроенергетског система, који су последица честих кратких спојева електрода током рада електролучних пећи, а који доводе до нежељене појаве фликера. Такође, очекује се да би се применом предложене методе за регулацију струје

електричног лука значајно смањили трошкови одржавања енергетског претварача, а да би се истовремено повећале расположивост постројења и продуктивност пећи.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

На основу списка библиографских референци, може се закључити да је кандидат користио најновије научне радове, релевантне за проблематику регулације струје електричног лука у електролучним пећима и проблематику утицаја пећи на квалитет електричне енергије. Са друге стране, кандидат је користио и фундаменталне радове о електролучним пећима и електричном луку, са краја 19. и почетка 20. века. Осим научних радова, кандидат је користио и релевантне patente, уџбенике и монографије, као и документацију произвођача електролучних пећи и енергетских претварача.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У предметној дисертацији примењене су теоријске и експерименталне методе истраживања. На основу изложеног концепта методе за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју, развијен је симулациони модел система са предложеним регулатором. Електрични лук је у овом систему представљен упрошћеним моделом. Модел система је реализован у програмском окружењу *Simulink*[®] (које је део програмског пакета *MATLAB*[®]), коришћењем елемената из библиотеке *SimPowerSystems*. Након што су симулацијом рада система са предложеним регулатором остварени повољни резултати, реализован је лабораторијски прототип трофазног тиристорског исправљача са предложеним предиктивним регулатором. Затим су експерименталним путем верификоване очекиване перформансе предложеног регулатора. Примењене научне методе истраживања у потпуности су адекватне за проучавање проблема који је предмет дисертације, као и за постизање постављеног циља дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати који су остварени у предметној дисертацији имају примену у системима са електролучним пећима за једносмерну струју напајаним из тиристорских исправљача, али и у другим системима са тиристорским исправљачима у којима се захтева брза, прецизна и робусна регулација струје електричног лука који се успоставља у колу једносмерне струје. Посебно је значајно да предложена метода може веома једноставно да се примени и у старијим постројењима електролучних пећи за једносмерну струју, напајаним из тиристорских исправљача, практично без додатних инвестиција у опрему.

На основу анализе доступне литературе, извршене у четвртном поглављу дисертације, може се закључити да се за регулацију струје лука у електролучним пећима за једносмерну струју у индустрији искључиво користе *PI* регулатори. Имајући у виду резултате добијене рачунарским симулацијама и мерењима на лабораторијском прототипу система са предложеним регулатором струје електричног лука, може се закључити да би примена предложеног регулатора за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју донела низ предности у односу на *PI* регулатор струје лука. Најважније

предности су: смањење негативних утицаја пећи на квалитет електричне енергије, продужење радног века полупроводничких прекидача и примењених брзих осигурача, смањење трошкова одржавања претварача и повећање продуктивности пећи.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Имајући у виду систематичност у приступу анализи, идентификацији и решавању проблема, коју је кандидат мр Срђан Срдих испољио у предметној дисертацији, Комисија сматра да је кандидат способан за самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука" су остварени следећи научни доприноси:

- Развијена је оригинална предиктивна метода за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју, напајаним из тиристорских исправљача, за чију реализацију није потребно познавати модел објекта управљања.
- Развијен је и на лабораторијском прототипу имплементиран нови регулатор за регулацију струје електричног лука у колу једносмерне струје, напајаног из тиристорских исправљача.
- Развијен је и имплементиран нови брзи естиматор индуктивности пригушнице у једносмерном колу тиристорског исправљача.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Чињеница да предложена предиктивна метода не користи модел објекта управљања (тј. модел електричног лука) је веома важна. Наиме, на основу анализе доступних модела електричног лука, која је извршена у трећем поглављу предметне дисертације, може се закључити да још увек не постоји довољно прецизан модел електричног лука који је практично примењив у предиктивним регулаторима струје базираним на познавању модела објекта управљања. Тиме је за регулацију струје електричног лука практично онемогућена употреба предиктивних регулатора базираних на познавању објекта управљања.

У дисертацији су експериментално верификовани резултати симулација који показују да предложени предиктивни регулатор веома брзо компензује последице кратких спојева електрода пећи, чиме је омогућено смањење нежељених флукуација реактивне снаге услед кратких спојева електрода, које доводе до појаве фликера. Остварени резултати показују да, у случају честих кратких спојева електрода (што је најкритичнији случај са аспекта генерисања фликера), у систему са предложеним предиктивним регулатором струје лука фликер може бити смањен и до 50%, у односу на систем са *PI* регулатором струје лука. Значајан практични резултат примене предложеног регулатора је да се због смањења фликера може повећати снага пећи у дефинисаној тачки прикључења пећи на мрежу, а да

притом генерисани фликер остане у границама дозвољеног. Повећањем снаге пећи се повећава продуктивност технолошког процеса у коме се пећ користи.

Друга важна предност система са предложеним предиктивним регулатором је у томе што се у овом систему струја лука успешно регулише и након појаве несиметрије напона мреже. Наиме, на основу резултата представљених у петом поглављу дисертације, може се закључити да *PI* регулатор струје лука, чији параметри су подешени за регулацију струје лука при симетричним напонима мреже, није у стању да одржи струју лука на задатој вредности чак ни при малим несиметријама напона мреже.

Веома важна предност предложеног предиктивног регулатора, са аспекта трошкова експлоатације пећи, у односу на *PI* регулатор, су много мања електрична напрезања тиристора и осигурача при кратким спојевима електрода, због мањих амплитуда струје лука које се достижу након појаве кратких спојева електрода. Ово као директну последицу има мањи број отказа тиристора и нежељених прегоривања осигурача. Самим тим, мањи су трошкови одржавања претварача са предложеним предиктивним регулатором, већа је расположивост постројења и продуктивност пећи.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио следећи научни рад који је у непосредној вези са докторском дисертацијом:

Категорија M21:

1. **Srdic, S.**, Nedeljkovic, M.: Predictive Fast DSP-Based Current Controller for Thyristor Converters, - *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3349-3358, Aug. 2011 (**IF=5.160**) (ISSN 0278-0046).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Кандидат је у дисертацији под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука" идентификовао потребу за побољшањем постојећих система за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју (који су данас искључиво базирани на примени *PI* регулатора струје лука), са циљем да се ублаже или потпуно елиминишу негативни утицаји пећи на квалитет електричне енергије. Затим је предложио и детаљно анализирао нову методу за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју. На основу модела система са предложеним регулатором струје, утврдио је да би примена предложеног регулатора довела до значајног смањења фликера који настаје због промена реактивне снаге при кратким спојевима електрода. Претходно је експериментално верификована исправност формираног модела система. Исправност модела је верификована мерењима на лабораторијском прототипу система који се састојао од енергетског претварача мале снаге и уређаја за генерисање електричног лука. Притом је утврђена веома добра усаглашеност експерименталних резултата са одговарајућим резултатима симулација. Иако метода није експериментално верификована у реалним условима експлоатације електролучне пећи за једносмерну струју, добијени резултати на

прототипу мале снаге јасно илуструју многобројне предности предложене методе у односу на до сада коришћене методе за регулацију струје електричног лука. Другим речима, предложена метода за регулацију струје електричног лука у електролучним пећима за једносмерну струју представља значајан научни и стручни допринос у области система за регулацију струје тиристорских исправљача великих снага.

Докторска дисертација кандидата мр Срђана Срдиха, под насловом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука" представља оригинални научни допринос у области тиристорских мрежом вођених исправљача. Оцењујући докторску дисертацију кандидата мр Срђана Срдиха, остварене резултате дисертације, као и чињеницу да су остварени резултати добијени самосталним радом кандидата, Комисија констатује да је кандидат мр Срђан Срдих испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Комисија стога са задовољством предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом "Регулација струје електролучне пећи за једносмерну струју предиктивном методом без коришћења модела електричног лука" кандидата Срђана Срдиха прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

др Милош Недељковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Жељко Деспотовић, научни сарадник
Институт "Михајло Пупин"

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

др Слободан Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет