

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Попова

Одлуком бр. 5049/09-3 од 24.3.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Попова, мастер инжењера електротехнике и рачунарства под насловом

„Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“.

После прегледа достављене дисертације, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија

Кандидат Никола Попов је 8. 12. 2011. пријавио тему докторске дисертације Комисији за студије трећег степена Електротехничког факултета у Београду. Наслов пријављене теме је „Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“. За ментора је предложен професор др Слободан Н. Вукосавић. Комисија је 16. 12. 2011. размотрила предлог теме и упутила Наставно научно већу предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата.

На својој 741. седници одржаној 27. 12. 2011. године, Наставно научно веће је именovalo комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Слободан Н. Вукосавић, проф. др Зоран Лазаревић, проф. др Дарко Марчетић, проф. др Жељко Ђуровић и проф. др Миодраг Поповић. На 757. седници одржаној 18. 12. 2012. године, Наставно научно веће усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Николе Попова.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је 4. 2. 2013. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом: “Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“ (број одлуке 06-419/33-13 од 4.2.2013. године).

Кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену 5. 3. 2015. године.

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета је 10. 3. 2015. године потврдила да постоје сви потребни услови да се Наставно научно већу Електротехничког факултета поднесе предлог за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно научно веће је на својој 784. седници именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Слободан Н. Вукосавић, проф. др Зоран

Лазаревић, проф. др Дарко Марчетић, проф. др Жељко Ђуровић и проф. др Миодраг Поповић, (број одлуке 5049/09-3 од 24.3.2015. године).

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Николе Попова припада научној области Техничке науке - Електротехника, ужој научној области Енергетика, за који је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Ментор докторског рада је проф. др Слободан Н. Вукосавић, који је изабран у звање редовног професора за исту научну област и који испуњава услове прописане за менторе на докторским студијама.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Никола Попов је рођен 24. 8. 1984. године у Београду где је завршио основну и средњу школу. Електротехнички факултет је уписао 2003. године. Дипломирао је на Одсеку за енергетику 2008. године са просечном оценом 9,04. Мастер студије на Електротехничком факултету уписао је 2008. године а завршио 2010. године са просечном оценом 9,67. Докторске студије на Електротехничком факултету уписао је 2010. године. Од марта 2009. године запослен је на Електротехничком факултету као сарадник у настави а после уписаних докторских студија ради у звању асистента. Ангажован је у настави на Катедри за Енергетске претвараче и погоне и ради на домаћим и међународним истраживачким пројектима.

Мастер студије је завршио одбраном рада под насловом „Процена температуре ротора асинхронног мотора анализом спектра напона и струја“. После мастер студија, кандидат је наставио истраживање и научни рад у истој области. Објавио је неколико радова у домаћим и међународним часописима као и у зборницима конференција.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“ је написана на српском језику, латиничним писмом и има укупно 142 стране. По форми и структури она одговара Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. 12. 2011. године.

Дисертација је подељена у 9 поглавља. Називи поглавља су:

1. Увод (15 страна),
2. Анализа електромагнетских појава у машини на повишеним фреквенцијама (16 страна),
3. Анализа губитака у гвожђу (10 страна),
4. Заменска шема и дефинисање фреквенцијског опсега од интереса за примену алгоритма (7 страна),
5. Алгоритам за израчунавање температуре ротора коришћењем сигнала статорских напона и струја (27 страна),
6. Опис експерименталне поставке (18 страна),
7. Резултати експеримента и верификација рада алгоритма за прорачун температуре ротора (36 страна),
8. Закључак (4 стране),
9. Литература (8 страна).

Дисертација садржи укупно 81 слику и 16 табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу је дат предмет и циљ истраживања. Наведен је и кратак сажетак дисертације уз анализу постојећих решења у области. Представљена је и кратка анализа прелазних појава у машини на којима се базира предложени метод за оцену температуре. Као последица импулсног напајања, спектар напона садржи компоненте који могу бити коришћене као инхерентни тест сигнал. Фреквенцијски састав струје статора на одговарајућим учестаностима тада узима улогу одзива на тест сигнал. Обрадом сигнала напона и струје може се добити оцена температурно зависних компоненти импедансе машине, чиме се стварају услови за оцену температуре.

У другом поглављу су анализирани електромагнетске појаве у асинхроним машинама на фреквенцијама значајно већим од основне фреквенције. Анализа је усмерена на проучавање ефекта потискивања струја у статорском и роторском колу уз компаративну анализу утицаја геометрија и димензија роторских и статорских магнетских и струјних кола. Утврђено је да фреквенцијском опсегу од 2 kHz до 50 kHz постоје услови за оцену температуре са повећаном тачношћу. У датом опсегу је могуће применити технике за обраду сигнала који потискују ефекте сметњи и појава које нису повезане са улазном импедансом. Реални и имагинарни део импедансе се асимптотски приближавају, док се модул импедансе мења као корена функција температуре.

У трећем поглављу је извршена анализа губитака у гвожђу у посматраном опсегу. Анализира се снага губитака у магнетском колу услед суперпониране компоненте магнетске индукције на фреквенцијама значајно већим од основне. Показано је да додатни губици у гвожђу до којих долази услед сложенопериодичне, импулсне побуде нема значајнији утицај на тачност предложеног метода за оцену температуре.

Четврто поглавље је посвећено утврђивању заменске шеме за фреквенцијски опсег од интереса. Ослањањем на опсег фреквенција у коме паразитне капацитивности и резонантне појаве могу бити занемарене, заменска шема може бити сведена на редну везу променљиве отпорности и променљиве индуктивности.

У петом поглављу је дат предложени метод за одређивање температуре, заснован на претпоставкама које су изложене у претходним поглављима. Пројектован је алгоритам за обраду мерених сигнала статорских струја и напона, као и алгоритам за одређивање средње вредности импедансе у посматраном фреквенцијском опсегу. Температура се одређује на основу прираштаја модула улазне импедансе у односу на познату вредност одређену на референтној температури. Ослањањем на референтну вредност се уклања потреба за познавањем геометрије машине и елиминише зависност добијене оцене од промене преосталих параметара машине.

У шестом поглављу је описана експериментална поставка коју је кандидат формирао ради евалуација предложеног метода и поређења добијених резултата да до сада расположивим решењима. Описани су енергетски претварачи, електричне машине, мерна опрема, управљачки хардвер и програмска решења коришћена током експеримената.

Седмо поглавље представља резултате експеримента добијених при напајању 4 различита асинхрона мотора са 2 врсте ширинске модулације.

Закључак и анализа добијених резултата дати су у осмом поглављу.

Листа коришћене литературе налази се у деветом поглављу.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Предмет истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације је могућност одређивање температуре ротора асинхроних машина на основу сигнала напона и струје статора. Температура ротора се може одредити анализом улазне импедансе машине на повишеним фреквенцијама. Улогу инхерентног тест сигнала преузимају паразитне компоненте у спектру напона, које су присутне у свим случајевима где се машине напајају из енергетских претварача са ширинском модулацијом. Статорски напон тада садржи значајан број фреквенцијских компоненти блиских прекидачкој фреквенцији и њеним целобројним умношцима. Мерењем и обрадом сигнала струје и напона могуће је одредити улазну импедансу машине у жељеној области фреквенција.

У оквиру истраживања, кандидат анализира промену улазне импедансе асинхроне машине на повишеним фреквенцијама, одређује опсег учестаности који је погодан за потребе одређивања температуре и предлаже модел машине који одговара датом опсегу фреквенција. Кандидат спроводи анализу релевантних електромагнетских појава у машини и утврђује њихов утицај на параметре мотора. Услед ефекта потискивања струје, на фреквенцијама већим од 2 kHz долази до изједначавања реалног и имагинарног дела роторске импедансе. Ефекат потискивања је знатно мање изражен на страни статора, па је оправдано занемарити фреквенцијске промене отпорности и индуктивности статорског намотаја. Анализом електромагнетских појава у магнетском колу и проучавањем дубине продирања у пакет међусобно изолованих динамо лимова утврђено је да се могу занемарити губици у гвожђу до којих долази услед суперпонираних компоненти магнетске индукције на повишеним учестаностима. На основу претходно наведеног, заменска шема асинхроне машине за посматрани опсег фреквенција се своди на редну везу отпорности и индуктивности. Будући да се реални и имагинарни део импедансе асимптотски приближавају, оцену температуре ротора могуће је добити на основу промена модула импедансе машине у опсегу фреквенција од 2 kHz до 50 kHz. Од посебног значаја је изостанак потребе за издвајањем реалног дела импедансе, чиме се постиже неосетљивост мерног система на фазне грешке у оцени импедансе.

Услед веома израженог ефекта потискивања струја у роторским проводницима, модул импедансе се мења као корена функција проводности материјала. Промена температуре ротора се може одредити на основу поређења модула импедансе на собној температури и модула импедансе одређене при раду.

У раду је представљен алгоритам који користи сигнале статорских напона и струја и израчунава модул импедансе за низ дискретних фреквенција у оквиру фреквенцијског опсега од интереса. Приликом одређивања средње вредности импедансе у датом опсегу фреквенција, поједини модули се множе са тежинским факторима. У предложеном алгоритму, тежински фактор за дату фреквенцију расте са енергијом напонске побуде на истој фреквенцији. На тај начин се потискује шум као и фреквенцијске компоненте које нису последица побуде и не носе информацију о импеданси мотора.

3.2. Осврт на референтну литературу

Приликом израде докторске дисертације кандидат је савесно истражио релевантну литературу. У раду је навео постојеће методе за одређивање температуре асинхроних машина и приказао предности и недостатке појединих метода. Развој веома брзих микроконтролера и дигиталних сигналних процесора за индустријске примене створио је могућност за имплементацију сложених, нумерички захтевних алгоритама за оцену температуре и параметара машине у току рада. Ослањајући се на наведене техничке могућности, кандидат је усмерио своје истраживање на унапређење постојећих метода,

заснованих на инјектовању наизменичног тест сигнала у намотаје машине, са циљем да се из анализе одзива детектују промене температурно осетљивих параметара.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Предложена метода се ослања на одређивање импедансе асинхроне машине на повишеним учестаностима. Улогу инхерентног тест сигнала узимају фреквенцијске компоненте у спектру напона добијеног на излазу трофазног инвертора са ширинском модулацијом. Промена импедансе машине у области повишених учестаности проучена је путем анализе електромагнетских појава на високим фреквенцијама, укључујући ефекте потискивања струје и губитке у феромагнетном материјалу. Утврђено је да се модул импедансе мења као корена функција температуре, што ствара могућност за одређивање температуре машине на основу сигнала статорских струја и напона. Предложени алгоритам за обраду сигнала је робустан на транспортно кашњење и фазно заостајање, што омогућује достизање много веће тачности у односу на досада позната решења.

3.4. Примењивост остварених резултата

Предложени алгоритам омогућује оцену температуре ротора асинхроних машина, и то без додатних давача и без инјекције тест сигнала. Алгоритам се може применити у свим електричним погонима где се асинхроне машине напајају из одговарајућих погонских претварача са ширинском модулацијом. Имплементација предложеног алгоритма не тражи никакве измене у хардверу, већ се састоји у примени одговарајућих програмских модула у програмску меморију постојећег погонског контролера. Предложени алгоритам омогућује мерење температуре ротора асинхроних машина у сврху надзора и заштите, као и праћење промена температурно зависних параметара машине који се користе у оквиру алгоритама управљања.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Никола Попов је након основних студија показао интерес за научно истраживачки рад. Током мастер студија је започео истраживање које је доцније наставио на докторским студентима. Током израде докторске дисертације стицао је неопходна теоријска знања и практична искуства. Спровео је свестрану анализу прелазних појава у асинхроним машинама и експерименталну верификацију већег броја алгоритама за оцену параметара и стања на бази мерења статорских струја и напона. Знања стечена током рада лабораторијског рада су му омогућила да са лакоћом формира експерименталну поставку на којој је вршио верификацију предложеног алгоритма. У процесу научно истраживачког рада усавршио је своје истраживачке и инжењерске способности. Током рада на дисертацији кандидат је демонстрирао врло добро владање теоријом, високу стручност, зрелост и спремност за тимски рад. Радови објављени у часописима и конференцијама показују способност кандидата да јасно прикаже резултате свог истраживања.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација кандидата Николе Попова има следеће доприносе,

1. Као резултат савесне и свеобухватне анализе постојеће литературе и досадашњих резултата, кандидат је начинио систематизацију постојећих метода уз анализу њихових предности и недостатака. Недостатак приступа заснованих на инјекцији тест сигнала је уношење нежељених пулсација електромагнетског момента машине, док су неинвазивни приступи карактерисани релативно великом грешком и немогућношћу рада у свим режимима. Стога кандидат предлаже да улогу тест сигнала преузму хармонијске компоненте статорског напона које настају услед импулсног напајања и ширинске модулације. Такве компоненте напона су већ присутне у свим савременим погонима. Стога се предложени метод заснива на анализи постојећих сигнала, тако да не захтева никакве измене у хардверу.
2. Предложени метод се ослања на одређивање импедансе у фреквенцијском опсегу где се реални и имагинарни део импедансе асимптотски приближавају, тако да је модул импедансе пропорционалан реалном делу и мења се као корена функција температуре. Циљани опсег фреквенција је одабран тако да добијени резултати не зависе од паразитних капацитивности нити од последичних резонантних појава. Метод је неосетљив на фазу улазне импедансе, па самим тим и на транспортно кашњење у линијама за аквизицију и обраду сигнала.
3. Температура ротора се одређује на основу промене средње вредности импедансе у односу на референтну вредност. Референтну вредност је потребно одредити током иницијалног мерења на познатој, најчешће амбијенталној температури. После иницијализације, даљи рад не захтева познавање геометрије магнетских и струјних кола машине. Не постоји потреба за познавањем термичког модела машине нити параметара заменске шеме.
4. Предложени метод се може једнако применити у свим радним режимима. Тачност у одређивању температуре не зависи од радног режима.
5. Анализе и експерименти доказују велики степен отпорности предложеног метода на врсте електромагнетског шума какве су присутне у електромоторним погонима. Поменута особина је остварена специфичним начином пројектовања алгоритма за одређивање средње вредности импедансе у посматраном опсегу фреквенција. Приликом одређивања средње вредности већег броја фреквенцијских компоненти уведен је тежински коефицијент који зависи од енергије напонске побуде на сваком од посматраних фреквенција. Као резултат, значајно је увећана тачност мерења и отпорност на сметње.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је анализирао постојеће методе за одређивање температуре асинхроних машина у току рада. Инвазивне методе уносе тест сигнал у струје и напоне. Тиме се олакшава мерење, али се у исто време уносе нежељене пулсације момента. Неинвазивне методе карактерише смањена тачност и могућност за рад само у одређеним режимима рада. Кандидат уочава да се асинхроне машине у свим савременим применама напајају из енергетских претварача са ширинском модулацијом. Импулсни карактер напона на излазу претварача садржи већи број фреквенцијских компоненти које представљају инхерентан тест сигнал. Коришћењем овог тест сигнала могуће је одредити импедансу машине као и температуру ротора. Да би постигао овај циљ, кандидат успешно решава проблеме моделовања струјних и магнетских кола машине на повишеним учестаностима, проблеме промене параметара заменског кола услед ефеката потискивања струје на вишим фреквенцијама, проблеме аквизиције и обраде сигнала, као и проблеме практичне имплементације пројектованог алгоритма у оквиру реалног погона. У решавању поменутих проблема, кандидат је применио знања стечена на досадашњим студијама, искуство стечено у лабораторији и у раду на стручним пројектима, и пружио је мерљив научни допринос.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је био ангажован на већем броју стручних и научних пројеката. У области која је уско везана са темом докторске дисертације објавио је следеће радове:

Категорија М21:

- N. Popov, S. Vukosavic, E. Levi, "Motor Temperature Monitoring Based on Impedance Estimation at PWM Frequency," *IEEE Tran. Energy Convers.*, vol. 29, no. 1, pp. 215-223, Feb. 2014, DOI [10.1109/TEC.2013.2292566](https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2292566) (IF 3.353).

Категорија М51:

- Н. Попов, Д. Михаћ, С. Вукосавић, „Процена температуре ротора великих асинхроних мотора на основу мерења статорских струја и напона“, *Енергија-економија-екологија*, година XIII, бр. 2, сс. 65-68, март 2011.

Категорија М63:

- N. Popov, D. Mihić, S. Vukosavić, „Merenje impedanse asinhronе mašine na učestanosti komutacija i indirektno određivanje temperature“, *VIII Simpozijum Industrijska elektronika, INDEL 2010*, Banja Luka, 04-06. 11. 2010.
- Н. Попов, Д. Михаћ, С. Вукосавић, „Процена температуре ротора асинхроног мотора на основу анализе спектра статорских струја и напона“, *ЕТРАН, Доњи Милановац*, 7-10. 6. 2010.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Николе Попова под насловом „Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“ бави се анализом импедансе асинхроне машине на повишеним фреквенцијама са циљем да се детектовани прираштај модула импедансе искористи у одређивању температуре ротора. Област примене предложеног метода је широка и укључује асинхроне машине у индустрији, електропривреди и резиденцијалном сектору. Метод може бити примењен у серво погонима високих перформанси, дијагностици рада великих електричних мотора и генератора, као и у другим сличним применама. Поред примене у електричним машинама, оцена импедансе може бити од користи у одређивању оптерећења појединих компоненти енергетских претварача као и у електропреципитаторима, где се може одређивати дебљина пепела на електродама.


Кандидат је применио оригиналан приступ одређивању импедансе у циљу одређивања температуре. Предложени приступ до сада није публикован. До сада коришћене инвазивне методе уносе тест сигнал у струје и напоне. Тиме се олакшава мерење, али се у исто време уносе нежељене пулсације момента. Постојеће неинвазивне методе карактерише смањена тачност и могућност за рад само у одређеним режимима рада. Кандидат уочава да се асинхроне машине у свим савременим применама напајају из енергетских претварача са ширинском модулацијом. Импулсни карактер напона на излазу претварача садржи већи број фреквенцијских компоненти које представљају инхерентан тест сигнал. Коришћењем овог тест сигнала могуће је одредити импедансу машине као и температуру ротора. У постуку аналитичког пројектовања и решавања проблема практичне имплементације, кандидат је применио знања стечена на досадашњим студијама, искуство стечено у лабораторији и у раду на стручним пројектима, и пружио је значајан научни допринос.

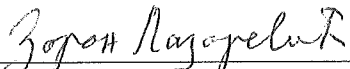
На основу свега изложеног, Комисија сматра да предметна дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове као и све критеријуме који се примењују приликом вредновања дисертације. Узимајући у обзир све наведене научне доприносе као и показану способност за самостални научно-истраживачки и инжењерски рад, Комисија је дошла до закључка да предметна докторска дисертација садржи оригиналне научне доприносе и да може наћи бројне примене у области енергетских претварача и електромоторних погона.

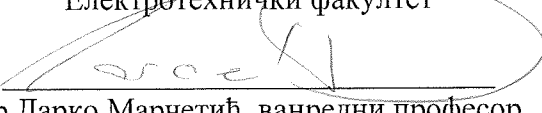
Комисија за задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Одређивање температуре и отпорности намотаја ротора асинхроне машине на основу анализе статорских напона и струја“ кандидата Николе Попова, прихвати, изложи на јавни увид и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, како би се одобрила усмена одбрана.


ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

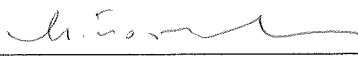
У Београду,
22. 6. 2015. године


др Слободан Н. Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду
Електротехнички факултет


др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду
Електротехнички факултет


др Дарко Марчетић, ванредни професор
Универзитет у Новом саду
Факултет техничких наука


др Жељко Туровић, редовни професор
Универзитет у Београду
Електротехнички факултет


др Миодраг Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду
Електротехнички факултет