

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 741. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 27.12.2011. године одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације М.Sc. Младена Терзића, под насловом „Пројектовање асинхроних машина са малом инерцијом и великом брзином обртања“. Након прегледа добијеног материјала, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1 Општи биографски подаци

Кандидат Младен Терзић рођен је 30.11.1984. године у Ужицу где је завршио основну и средњу школу. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2003. године где је и дипломирао 2007. године на Одсеку за енергетику, смер Енергетски претварачи и погони са просечном оценом 9,21. Исте године завршава и стручну праксу у фирми „BDSP-YU“ у Београду где је радио на пројектима електроенергетских инсталација и осветљења. Након завршене праксе 2007. године уписао је мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, а завршио 2009. године са проценом оценом 10,00, обраном мастер рада под насловом „Процена остарелости изолације трансформатора према историјату оптерећивања и испитивањима према стању“. Докторске студије на Електротехничком факултету уписао је 2009. године. Од децембра 2007. године запослен је на Електротехничком факултету као сарадник у настави, а након уписа докторских студија изабран је у звање асистента.

Младен Терзић је ангажован у настави и лабораторији на смеру за Енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета у Београду у оквиру следећих предмета:

- Енергетски трансформатори,
- Електричне машине за једносмерну струју,
- Испитивање електричних машина,
- Енергетске пригушнице.

1.2 Активности на докторским студијама

Кандидат је у току докторских студија положио предмете који покривају област из које се предлаже тема докторске дисертације, што укључује познавање теорије електричних машина, прелазних појава у електричним машинама, испитивање електричних машина као и област микрипроцесорског управљања енергетским претварачима и погонима. У прве две године студија положио је све предмете и одрадио све обавезе везане за научно истраживачки рад који су предвиђени наставним планом студија чиме је сакупио максималних 120 ESPB. Списак положених предмета налази се у прилогу.

1.3. Учешће на домаћим научно-истраживачким пројектима:

Учествовао је на више научно-истраживачких пројеката:

- *Интегрисани системи за уклањање штетних састојака дима и развој технологија за реализацију термоелектрана и електрана без аерозагађења*, Министарство науке и технологије (2011-2015), руководилац пројекта проф. др. Слободан Н. Вукосавић,
- *Развој и примена високонапонске високофреквентне еколошке опреме за уклањање аерозагађења у индустрији и електропривреди*, Министарство науке и технологије (2009-2010), руководилац пројекта проф. др. Слободан Н. Вукосавић,
- *Анализа стања еес мреже високог напона у гтс-1*, US Steel Смедерево, 2009.
- *Анализа стања еес мреже високог напона у гтс-3*, US Steel Смедерево, 2009.
- *Развој уређаја за детекцију редног електричног лука у нисконапонским електроенергетским инсталацијама*, Министарство науке и заштите животне средине (ТР-17006, 2008–2009), руководилац пројекта проф. др. Зоран Радаковић.

1.4. Учешће на међународним пројектима

- ТЕМПУС пројекат (ЈЕР-41029-2006) „Развој хардвера, софтвера и упутства за радне станице у оквиру лабораторије за дигитално управљање претварачима и погонима и дигитално управљање кретањем”.

1.5. Списак објављених радова и других релевантних резултата и активности

Области интересовања кандидата су енергетски трансформатори, електричне машине и испитивање електричних машина. До сада има неколико објављених радова у домаћим часописима и конференцијама:

- *Одређивање зависности губитака у гвожђу СМСМ од брзине у празном ходу коришћењем методе коначних елемената*, **Младен Терзић**, Драган Мухић, Слободан Вукосавић, ETRAN 2012, Златибор 11-14. јуна 2012.
- *Алгоритам за естимацију фреквенције применом Фуријеове методе и њутновог итеративног поступка*, **Младен Терзић**, Миленко Ђурић, CIGRE SRBIJA 2011, Златибор 2011.
- *Оптимизација синхроних машина са сталним магнетима на ротору за примене у возилима*, Драган Мухић, **Младен Терзић**, Никола Попов, Слободан Вукосавић, ETRAN 2010, Доњи Милановац 7-10. јуна 2012.
- *Компатибилност процене остарелости изолације енергетских трансформатора преко савремених дијагностичких техника и прорачуна на бази температурних мерења и историјата терећења*, Р. Радосављевић, З. Радаковић, **М. Терзић**, Ј. Лукић и А. Бојковић, Електропривреда, бр.3. јул-септембар, 2009.

Тренутно је у фази израде научног рада из области дисертације за међународни часопис.

На основу наведених података о кандидату и активности на научним и комерцијалним пројектима као и у оквиру докторских студија Комисија је закључила да је кандидат Младен Терзић подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет научне расправе у оквиру тезе је пројектовање и оптимизација асинхроних машина за велике брзине обртања, у условима који једновременно траже мале губитке у претварању и малу инерцију. Потребно је анализирати геометрије магнетског кола и феромагнетске материјале који омогућују рад са великим фреквенцијама напајања уз прихватљиве губитке у магнетском колу. Анализу је потребно спровести за магнетско коло међусобног флукса, који постоји у ваздушном зазору и спреже струјна кола статора и ротора машине, као и за кола статорског и роторског расипног флукса. На основу теоријске анализе потребно је начинити одговарајуће моделе губитака у магнетским колима, примерене потребама оптималног пројектовања асинхроне машине. У циљу моделовања губитака у струјним колима, потребно је анализирати расподелу магнетског поља у жлебовима и зупцима као и површински ефекат у струјним колима статора и ротора.

Магнетско коло ротора доприноси смањењу расипања и увећању спреге статорских и роторских струјних кола, чиме се увећава средња и вршна снага електромеханичког претварања. С друге стране, масивно магнетско коло ротора увећава момент инерције ротора, што продужава време залетања и ограничава максималну дозвољену брзину обртања. Зато је потребно проучити алтернативне геометрије магнетског кола ротора које омогућују смањење масе и момента инерције задржавајући при томе задовољавајући коефицијент спреге статорског и роторског намотаја. Потребно је проучити процес генерисања електромагнетског момента, флукс расипања и губитке у случају да се магнетско коло ротора уклони, а струјна кола ротора доведу у положај који ублажава пад коефицијента спреге. На исти начин треба проучити и могућност да се део роторског магнетског кола задржи, али да механичка конструкција машине буде решена тако да делови феромагнетика који чине роторско магнетско коло буду учвршћени за механичку потпору статора. Електромагнетски моменат се тада генерише дејством сила на роторска струјна кола која остају спрегнута са вратилом. Роторско магнетско коло тада омогућује усмеравање магнетског флукса и увећава коефицијент спреге, али не доприноси увећању обртних маса и момента инерције.

Полазећи од геометрије магнетских кола и начина извођења струјних кола асинхроних машина за велике брзине обртања, потребно је начинити оцену параметара заменских кола и одредити специфичности енергетских претварача за напајање. Из анализе система претварач-машина треба начинити пројекцију остваривих експлоатационих и транзијентних карактеристика. Резултати треба да послуже као основа за нови приступ пројектовању и коришћењу асинхроних машина за велике брзине обртања.

3. Методологија

На основу расположиве литературе и података биће извршена класификација типичних примена асинхроних машина где је од значаја остварити рад са великим брзинама обртања. Биће одређене карактеристичне вредности електромагнетског момента, снаге, фреквенције напајања и услова рада у карактеристичним применама. У оквиру теоријске анализе биће проучен утицај броја полова, фактора облика и тежинског односа магнетских и струјних кола на специфични моменат и губитке у асинхроним машинама за велике брзине обртања. Анализа ће обухватити експлоатациону и транзијентну механичку карактеристику, оцену параметара заменских кола као и топологију и укупни VA индекс полупроводничких прекидача за напајање статорског намотаја. После увођења полазних хипотеза у погледу редукције обртних делова магнетског кола, биће развијени нови теоријски модели који омогућују оцену утицаја геометрије магнетских кола на коефицијент спреге, средњу снагу претварања, вршни моменат и моменат инерције обртних маса. Коришћењем програмских алата базираних на примени методе коначних елемената (*finite element method* - FEM), биће спроведена компаративна анализа решења са конвенционалним извођењем струјних кола ротора и решења са

ротором начињеним од хомогеног комада алуминијума и/или бакра. Засебна анализа ће сумирати ефекте новог приступа на топологију енергетског претварача и његов VA индекс.

Кључни резултати добијени теоријским разматрањима и симулацијама биће проверени експериментално.

4. Осврт на релевантне библиографске изворе

Област пројектовања електричних машина за велике брзине обртања односно машина са великом специфичном снагом и малим губицима, данас је веома актуелна о чему говори опсежна литература:

1. Matthias Centner, Uwe Schäfer, „Optimized Design of High-Speed Induction Motors in Respect of the Electrical Steel Grade“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, No.1, 2009
2. Juha Pyrhönen, Janne Nerg, Panu Kurronen, Uwe Lauber, „High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, No.1, 2010
3. Wen L. Soong, Gerald B. Kliman, Roger N. Johnson, Raymond A. White, Joseph E. Miller, „Novel High-Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor“, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 36, No. 3, 2000
4. Christof Zwyssig, Simon D. Round, Johann W. Kolar, „An Ultrahigh-Speed, Low Power Electrical Drive System“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, 2008
5. Fabio Crescimbeni, Alessandro Lidozzi, Luca Solero, „High-Speed Generator and Multilevel Converter for Energy Recovery in Automotive Systems“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 59, No.6, 2012
6. Kazimierz Ziółko, „Basic Problems of Increasing the Density of Unit Power of Electric Machines“, EUROCON 2007 The International Conference on “Computer as a Tool” Warsaw, September 9-12
7. Karina Velloso Rodrigues, Jean François Pradurat, „Design of high-speed induction motors and associate inverter for direct drive of centrifugal machines“, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines

Такође постоји велики број радова на тему прорачуна губитака и оптимизације асинхроних машина за вискобрзинске апликације као и на тему утицаја начина и режима рада напајања на губитке и перформансе оваквих машина:

1. A.Boglietti, A. Cavagnino, A.M. Knight, Y.Zhan, „Factors Affecting Losses in Induction Motors with Non-Sinusoidal Supply“, Industry Applications Conference, 2007
2. Y.Wu, R.A. McMahon, Y. Zhan, A.M. Knight, „Impact of PWM Schemes on Induction Motor Losses“, Industry Applications Conference, 2006.
3. D. M. Ionel, M. Popescu, M. McGilp, TJE Miller, S. Dellinger, R. J. Heideman, „Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel“, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 43, No. 6, 2007.
4. Zbigniew Gmyrek, Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, „Estimation of Iron Losses in Induction Motors: Calculation Method, Results, and Analysis“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, No.1, 2010.
5. Isao Hirotsuka, Kazuo Tsuboi, Kunihiro Kawakami, Hidemi Matsuura, Takayuki Mizuno, „Experimental Study on Stray Load Loss during High-speed Constant-voltage Operation of Squirrel-cage Induction Motors - The Influence of Gap Length on 4- and 8-pole Induction Motors“, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
6. Katsumi Yamazaki, Akihiro Suzuki, Motomichi Ohto, Teruyuki Takakura, “Harmonic Loss and Torque Analysis of High Speed Induction Motors”, Transactions on Industry Applications, Volume: PP, No. 99, 2012.

7. H. Bulent Ertan, Kemal Leblebicioglu, Bulent Avenoglu, Murat Pirgaip, „High-Frequency Loss Calculation in a Smooth Rotor Induction Motor Using FEM“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 3, 2007.
8. Guillaume Mogenier, Régis Dufour, Guy Ferraris-Besso, Lionel Durantay, and Nicolas Barras, „Identification of Lamination Stack Properties: Application to High-Speed Induction Motors“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, No.1, January 2010.
9. Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Luca Ferraris, Mario Lazzari, „Impact of the Supply Voltage on the Stray-Load Losses in Induction Motors“, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 46 , No. 4, 2010.
10. Zbigniew Gmyrek, Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, „Iron Loss Prediction With PWM Supply Using Low- and High-Frequency Measurements: Analysis and Results Comparison“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 55, No.4, 2008.
11. Wenping Cao, K. J. Bradley, H. Zhang, I. French, „Experimental Uncertainty in Estimation of the Losses and Efficiency of Induction Motors“, Industry Applications Conference, 2006.

Пронађени су и радови који уводе нове приступе у одређивању параметара асинхроних машина:

1. Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Mario Lazzari, „Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part I: Resistances and Leakage Reactances, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 58, No.9, 2011.
2. Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Mario Lazzari, „Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination Part II: Skin Effect and Magnetizing Characteristics, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 58, No.9, 2011.
3. Katsumi Yamazaki, Akihiro Suzuki, Motomichi Ohto, Teruyuki Takakura, Satoshi Nakagawa, „A Novel Equivalent Circuit Involving Stray Load Loss and Harmonic Torques for High Speed Induction Motors Driven by Inverters, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011

5. Циљеви истраживања

Предложена докторска дисертација има следеће циљеве:

- Анализу утицаја броја полова, фактора облика и тежинског односа магнетских и струјних кола на перформансе асинхроних машина за велике брзине обртања.
- Анализу утицаја геометрије магнетских кола на експлоатациону и транзијентну карактеристику асинхроних машина за велике брзине обртања као и на укупни VA индекс полупроводничких прекидача за напајање статорског намотаја.
- Упоредну анализу решења са конвенционалним струјним колима ротора и ротором начињеним од хомогеног комада алуминијума и/или бакра базирана на примени FEM програмских алата.
- Израда новог приступа пројектовању ротора асинхроних машина за велике брзине обртања на бази смањења или елиминације обртних делова магнетског кола уз примену нових феромагнетских материјала.
- Оптимизација струјних кола ротора за велике брзине обртања у условима задате средње и вршне вредности момента.

6. Очекивани научни доприноси

- Анализа основних и секундарних ефеката повећане учестаности напајања на губитке у магнетским и струјним колима асинхроних машина за велике брзине обртања.
- Анализа утицаја карактеристика феромагнетских материјала на параметре заменског кола асинхроних машина које раде са великим брзинама и великим фреквенцијама напајања.

Одређивање заменских кола и модела струјних кола ротора који је начињен од хомогеног комада алуминијума и/или бакра.

- Израда модела губитака који обухвата основне и секундарне ефекте и кључне нелинеарности и који се може применити за интерактивну оптимизацију поступка пројектовања асинхроних машина за задате услове рада. Оптимизација струјних кола ротора са циљем да се умањи моменат инерције и очува задовољавајућа вредност коефицијента спреге. Алгоритам оптимизације броја полова, фактора облика и геометрије магнетских кола асинхроних машина са смањеним моментом инерције ротора и великим брзинама обртања.
- Поређење са досадашњим решењима, критички осврт и анализа ограничења предложеног приступа пројектовању асинхроних машина.

7. Закључак и предлог

На основу свега изложеног, комисија сматра да кандидат М.Сс. Младен Терзић испуњава све формалне и суштинске услове да приступи изради докторске дисертације. Резултати до којих ће кандидат доћи у току израде тезе, имаће значајан допринос у области пројектовања и моделовања вискобрзинских асинхроних мотора као и одговарајућих претварача за њихово напајање. Због тога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату М.Сс. Младену Терзићу одобри израду докторске дисертације под насловом „Пројектовање асинхроних машина са малом инерцијом и великом брзином обртања“.

Београд

6.07.2012. године

Чланови комисије:

др. Слободан Н. Вукосавић, редовни проф., ментор
Електротехнички факултет, Београд

др. Радован Радосављевић, ванредни проф.
Електротехнички факултет, Београд

др. Жељко Деспотовић, научни сарадник
Институт Михаило Пупин, Београд

др. Бранко Колунџија, редовни проф.
Електротехнички факултет, Београд

Проф. др. Зоран Лазаревић, ред. проф.
Електротехнички факултет, Београд