



# УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ - ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Булевар краља Александра 73, 11000 Београд, Србија

Тел. 011/324-8464, Факс: 011/324-8681

## КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 29.06.2021. године именовала нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Николе Мирковића под насловом „Пројекат и реализација трофазног активног исправљача“. Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. Биографски подаци кандидата

Никола Мирковић рођен је 14.12.1997. године у Београду. Завршио је основну школу "Уједињене нације" као ђак генерације и носилац Вукове дипломе и "Математичку гимназију" у Београду као носилац Вукове дипломе. Дипломирао је на Одсеку за енергетику 2020. године са просечном оценом 9.94. Дипломски рад "Софтверско прорачунавање сила које напрежу намотаје трансформатора у кратком споју" одбранио је у августу 2020. године са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за енергетску ефикасност уписао је у октобру 2020. године.

#### 2. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 70 страна са укупно 49 слика, 1 прилог и 14 референци. Рад садржи 7 поглавља и списак коришћене литературе. Прво поглавље представља увод у тему мастер рада. У другом поглављу је објашњен принцип рада активног исправљача, изведен је математички модел, пројектован је LCL филтар, подешени аналогни напонски и струјни регулатори и испитине перформансе активног исправљача на рачунарској симулацији са имплементираним аналогним регулаторима. У трећем поглављу је извршена трансформација из аналогног у дигитални домен и примењени су дигитални регулатори у рачунарској симулацији. У четвртном поглављу је извршен избор компонената за активни исправљач на основу одговарајућих прорачуна, да би у петом поглављу била објашњена имплементација управљачког алгоритма у одговарајући процесор (DSP). Провера исправности управљачког алгоритма извршена је експериментално на лабораторијској поставци са активним исправљачем и отпорничким оптерећењем, а описана је у шестом поглављу. На основу добијених резултата мерења изведени су одговарајући закључци у последњем, седмом поглављу.

#### 3. Анализа рада са кључним резултатима

Одговарајућа пажња у раду је посвећена теоријској основи на којој се базира динамички модел активног исправљача подизача напона са импулсно ширинском модулацијом (ИШМ), познатог још и као активни исправљач. Једна од главних особина активног исправљача јесте да из мреже узима струје које су готово синусоидалне, захваљујући начину управљања и високој фреквенцији прекидања транзистора и тако доприноси смањењу запрљаности мреже вишим хармоницима напона и струја, што је у складу са све строжим стандардима којима се дефинише захтевани квалитет напона и струје. Активни исправљачи су нашли широку примену у области савремених регулисаних електромоторних погона велике снаге, где се налазе у склопу фреквентног претварача уколико су у погону чести кочни режими рада, па је енергетски ефикасно енергију генерисану у тим режимима рекуперирати у мрежу. Ово је последица њихових повољних карактеристика које омогућавају четвороквадрантни рад погона, као и висок једносмерни напон на излазу, што погодује раду инвертора који се налази у склопу фреквентног

претварача. Додатно, управљачким алгоритмом је могуће постићи рад овог исправљача са јединичним фактором снаге. Циљ овог мастер рада је био да пружи увид у пројектовање и израду једног функционалног трофазног транзисторског активног (ИШМ) исправљача, што је и постигнуто. Сви закључци који су изведени у раду темеље се на примени одговарајућих аналитичких метода. Симулацијама на динамичком моделу је тестиран примењени управљачки алгоритам, док је на лабораторијској поставци експериментално потврђено функционисање реализованог управљачког алгоритма активног исправљача.

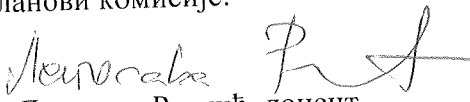
#### 4. Закључак и предлог

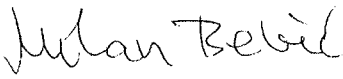
Кандидат Никола Мирковић је у свом мастер раду одговарајућу пажњу посветио теоријској основи на којој се базира рад једне од најчешће коришћених топологија енергетских претварача да би развио динамички модел у одговарајућем софтверу. Затим је одредио параметре регулатора задужених за регулацију струје и једносмерног напона, а у циљу имплементације управљачког алгоритма у динамички модел, тако да су симулацијама на моделу тестиране перформансе исправљача. Након тога, извршио је прорачун величина релевантних за димензионисање компоненти исправљача, као и одабир истих. У оквиру лабораторијског модела активног исправљача, реализовано је управљање помоћу дигиталног сигналног процесора F28335, при чему је код генерисан у софтверском алату PSIM, у коме је претходно била реализована детаљна симулација активног исправљача са примењеним алгоритмом управљања. На крају, функционалност и перформансе активног исправљача, пројектованог и реализованог у току израде мастер тезе, испитане су мерењима на експерименталној поставци у лабораторији.

Кандидат Никола Мирковић је исказао високи степен самосталности, систематичности и креативности у решавању проблематике изложене у свом раду, као и аналитичност и инжењерску зрелост. На основу горе наведеног, Комисија за преглед и оцену мастер рада Николе Мирковића предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета у Београду да прихвати рад „Пројекат и реализација трофазног активног исправљача“ дипл. инж. Николе Мирковића као мастер рад и одобри јавну усмену одбрану.

Београд, 01.07.2021. год.

Чланови комисије:

  
др Лепосава Ристић, доцент

  
др Милан Бебић, ванредни професор

  
др Драган Микић, доцент

## ИЗВЕШТАЈ О УРАЂЕНОМ СТУДИЈСКОМ ИСТРАЖИВАЧКОМ РАДУ

Кандидат Никола Мирковић (3097/2020) је као припрему за израду мастер рада „Пројекат и реализација трофазног активног исправљача” урадио истраживање релевантне литературе која се односи на област којој припада пријављена тема мастер рада. Конкретно, анализирано је актуелно стање у области регулисаних електромоторних погона са аспекта примене активних енергетских претварача на страни мреже. У оквиру истраживања коришћено је следећих 14 референци:


- [1] Милош Недељковић, "Мрежом вођени претварачи", Академска мисао, 2002
- [2] IEEE 519, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014
- [3] Marian P. Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan: "Control in Power Electronics Selected Problems", Academic Press, 2002, ISBN 9780080490786.
- [4] Slobodan N. Vukosavić, "Grid-Side Converters Control and Design", Springer, 2018, ISBN 9783319732787
- [5] Robert W. Erickson, Dragan Maksimović, "Fundamentals of Power Electronics Third Edition", Springer, 2020, ISBN 9783030438791
- [6] Wang Xu, Huang Kaizeng, Yan Shijie, Xu Bin: "Simulation of Three-phase Voltage Source PWM Rectifier Based on Direct Current Control", 2008 Congress on Image and Signal Processing, 2008
- [7] Roland E. Best, "Phase-Locked Loops Sixth Edition: Design, Simulation and Applications", McGraw-Hill Education, 2007, ISBN 9780071493758
- [8] L. N. Arruda, S. M. Silva, B. J. C. Filho, "PLL Structures for Utility Connected Systems", Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting, 2001
- [9] Xinbo Ruan, Xuehua Wang, Donghua Pan, Dongsheng Yang, Weiwei Li, Chenlei Bao: "Control Techniques for LCL-Type Grid-Connected Inverters", Springer, 2018, ISBN 9787030438102
- [10] Mustafa Dursun, M. Kenan DÖŞOĞLU, "LCL Filter Design for Grid Connected Three-Phase Inverter", 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 2018
- [11] PSIM User's Guide, Release 1, Powersim Inc., 2020
- [12] Slobodan N. Vukosavić, "Digital Control of Electrical Drives", Springer, 2007, ISBN 9780387485980
- [13] Chi-Tsong Chen, "Analog and Digital Control System Design", Oxford University Press, USA, 2006, ISBN 9780195310467
- [14] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", SEMIKRON International GmbH, 2015, ISBN 9783938843833

Проучавањем референци [1] и [2] може се стећи увид у значај примене активног исправљача у регулисаним електромоторним погонима са аспекта рада са јединичним фактором снаге и ниским садржајем виших хармоника у мрежној струји, што ће бити елаборирано у уводном делу мастер рада. У референцама [3-5] дат је детаљан преглед начина рада, моделовања и управљања активним претварачем. Наведена литература треба да омогући синтезу симулационог модела и избор одговарајућег управљачког алгоритма. У циљу испитивања перформанси изабраног управљачког алгоритма (VOC -Voltage Oriented Control) који представља најбоље решење на основу постављених критеријума, потребно је прецизно подесити одговарајуће регулаторе напона и струје што ће бити остварено применом изабране методе на основу приказаних метода у [6]. Преглед начина за реализацију фазне синхронизације енергетског претварача са мрежом дат је у референцама [7] и [8]. Анализом приказаних метода извршиће се избор оптималног решења у погледу

тачности и једноставности за реализацију. Анализом метода за прорачун компоненти LCL филтра које су приказане у литератури [9] и [10], извршиће се и образложити селекција одговарајуће, на основу које ће бити извршен прорачун и избор компоненти за реализацију прикључења активног исправљача на мрежу. За испитивање перформанси активног исправљача са изабраним напонски оријентисаним управљањем (VOC) на симулационом моделу изабран је софтвер PSIM. У њему је могуће извршити симулацију применом компоненти које имају карактеристике реалних компоненти које ће бити коришћене у хардверској реализацији претварача. У циљу напредног коришћења софтвера и добијања што вернијих резултата користиће се литература [11]. За имплементацију дигиталних регулатора користиће се литература [12] и [13]. Како се у оквиру мастер рада планира реализација активног исправљача са дигиталним управљањем применом DSP процесора биће коришћена литература [11] у циљу упознавања могућности овог софтвера за генерисање кода на основу симулационог модела. Пројектовање претварача, одговарајући прорачун и избор компоненти ће бити комплетиран на основу литературе [14].

Београд, 01.07.2021. године

Руководилац студијског истраживачког рада:

  
Др Лепосава Ристић, доцент