

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Луке Станића за израду докторске тезе.

Одлуком бр. 1530/21 од 9.9.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Луке Станића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Генерализована метода модулације просторно ротирајућих вектора код директног матричног претварача“, односно на енглеском „Generalized Space Rotating Vector Modulation for Direct Matrix Converters“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Лука М. Станић је рођен 25.12.1994. године у Београду. Завршио је основну школу “Јелена Ђетковић” у Београду као вуковац. Уписао је Шесту београдску гимназију у Београду, коју је завршио са одличним успехом.

Електротехнички факултет је уписао 2013. године. Дипломирао је 2017. године на одсеку за енергетику са просечном оценом 8,51. Дипломски рад из области управљања електромоторних погона на тему „Алгоритам векторског управљања асинхроним мотором“ одбранио је са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, завршио је у децембру 2018. године са просечном оценом 10, са мастер радом из области управљања електромоторних погона на тему „Имплементација индиректног векторског управљања асинхроним мотором применом FPGA кола“. Током студија радио је као демонстратор на предметима Електромоторни погони и Регулација електромоторних погона.

Докторске студије на модулу за Енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета у Београду уписао је школске 2018/2019. године. Тренутно је студент треће године докторских студија са 10 положених испита.

Од марта 2019. ради у фирми Ирител као развојни инжењер у сектору енергетске електронике. Учествовао је на многим пројектима од којих је најзначајнији дизајн модуларног система напајања за дата центре.

1.2. Сечено науђноистраживачко искуство

Р.бр.	Шифра	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ	Датум
1	19Д041ОПЕ	Одабрана поглавља из енергетске електронике	10	9	28.08.2023.
2	19Д011МУП	Микропроцесорско управљање електромоторним погонима	10	9	26.06.2023.
3	19Д011ЕЕФ	Електромоторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије	10	9	27.01.2023.
4	19Д011ЕП	Енергетски претварачи	10	9	13.09.2022.
5	19Д011ВЕП	Вишемоторни електрични погони	10	9	06.07.2022.
6	19Д091ЕЈ	Енглески језик	10	6	02.07.2022.
7	19Д011МУЕ	Микропроцесорско управљање енергетским претварачима	10	9	23.09.2021.
8	19Д011УЕП	Управљање енергетским претварачима	10	9	29.06.2021.
9	19Д011ОПЕ	Одабрана поглавља из електромоторних погона	10	9	27.01.2021.
10	13Д021ФВХ	Фактор снаге и методе за поправку фактора снаге у присуству виших хармоника	10	9	22.09.2020.
Р.бр.		Назив обавезе		ЕСПБ	
1		Научно стручни рад		3	
2		Студијско истраживачки рад I		15	
3		Студијско истраживачки рад II		15	
		Укупно остварено		120	

Кандидат је аутор једног рада у часопису са SCI листе (M22), два рада са међународних конференција (M33) и једног рада са домаће конференције (M63).

- **Радови у часописима са импакт фактором:**

1. (M22) L. Stanić, L. Ristić, M. Bebić, and M. Rivera. "Improvement of two grid power factor control methods for matrix converter open-end-winding drive with common-mode voltage elimination supplied by unbalanced grid." *IET power electron.*, Oct. 2022. doi: 10.1049/pel2.12411.

- **Радови са међународних конференција:**

1. (M33) L. Stanić, Ž. V. Despotović, M. Pajnić and M. Skender. "Digital Control Challenges in a Single-Phase CCM Totem-Pole PFC Rectifier with GaN Devices." *2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ie)*, Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/IE59906.2023.10346108.
2. (M33) L. Stanić, L. Ristić, M. Bebić and M. Rivera. "Extended SVM for direct matrix converter based drive operating under unbalanced grid conditions." *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ie)*, Novi Sad, Serbia, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/IE53374.2021.9628195.

- **Радови са домаћих конференција:**

1. (M63) L. Stanić, Ž. Koprivica, N. Vojvodić, D. Pejić, L. Ristić, and M. Bebić. "Energy Optimal Control of Induction Motor Drive-Study of Two Cases." VII Regionalna konferencija – Industrijska energetika i zaštita životne sredine u zemljama jugoistočne Evrope, pp. 365-374, Jun. 2019

Дана 29.9.2025. године кандидат Лука Станић је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду успешно одбранио тему докторске дисертације на усменој одбрани пред Комисијом:

1. др Слободан Вукосавић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет (председник комисије)
2. др Жарко Јанда, виши научни сарадник Универзитет у Београду – Електротехнички институт Никола Тесла
3. др Предраг Пејовић, редовни професор Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је анализирала претходно наведене досадашње резултате рада кандидата. На основу извршене анализе, као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија је формирала позитиван став у вези са способностима кандидата за рад на предложеној теми докторске дисертације. Разлози за то су резултати досадашњег рада и оствареног искуства у области којом се бави докторска дисертација, о чему сведоче објављени радови. Због претходно наведеног, Комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет ове докторске дисертације је унапређење начина управљања матричним претварачима коришћењем комбиноване методе модулације просторно ротирајућих вектора. Предложена комбинована метода модулације користи само прекидачка стања која остварују нулти заједнички напон на излазним прикључцима, уз истовремено омогућавање контроле улазног фактора снаге у ширем опсегу од раније коришћених метода модулације матричних претварача.

Матрични претварач је једностепени енергетски претварач снаге који претвара трофазни систем напона приближно константне амплитуде и фреквенције на свом улазу у трофазни систем излазних напона променљиве амплитуде и фреквенције (користи се ознака 3×3). За разлику од конвенционалног енергетског претварача који се користи у ове сврхе и састоји од исправљача, једносмерног међукола и инвертора, матрични претварачи директно врше конверзију без једносмерног међукола. С тим у вези, ова топологија резултује у већем броју активних полупроводничких компоненти, али мање пасивних компоненти (не користе се кондензатори или пригушнице у једносмерном међуколу и мањи је улазни филтер) [1]. Због тога, топологија матричног претварача се показала као посебно корисна у апликацијама где су величина, тежина и ефикасност претварача битни фактори, као што је примена у ваздухопловству [2].

У скорије време, потенцијална употреба матричних претварача повезаних на мрежу привлачи све већи истраживачки интерес. Услови за повезивање које прописује дистрибутивна мрежа захтева могућност контроле фактора снаге на страни мреже, првенствено због стабилности система и питања квалитета електричне енергије [3], [4]. Постоје два главна разлога зашто фактор снаге мреже треба контролисати:

- 1) Контрола реактивне снаге на страни мреже. У условима симетричног система напајања трофазне енергетске мреже, реактивна снага мреже се контролише постављањем улазног фактора снаге (угла између улазног напона и струје, $\cos \varphi$) на константну вредност (статичка контрола улазног фактора снаге) када се достигне стабилно стање са утврђеном активном и реактивном снагом коју захтева потрошач. У случају матричних претварача, могу се разликовати три општа приступа контроле улазне реактивне снаге [5]. Према првом приступу, улазна реактивна снага се генерише од активне снаге оптерећења [6]–[9]. Другим приступом, улазна реактивна снага се генерише од реактивне снаге оптерећења [10]–[14]. Трећи приступ комбинује оба приступа како би се додатно проширио управљачки опсег улазног фактора снаге [5], [15]–[19].
- 2) Побољшање по питању изобличења мрежне струје у условима несиметричног система напајања трофазне енергетске мреже, [20]–[26]. Динамичка контрола улазног фактора снаге око његове константне вредности омогућава да се хармоници ниске фреквенције, који су последица несиметричних услова мреже, значајно потисну или чак елиминишу из таласних облика струја из мреже.

Предмет истраживања ове докторске дисертације је посебан тип модулације познат под називом модулација просторно ротирајућих вектора (скраћено МПРВ), која користи само прекидачка стања која остварују нулти заједнички напон (енгл. common-mode voltage) на излазним прикључцима. Карактеристика ове модулације је да је усвојено правило да је свака излазна фаза повезана са јединственом улазном фазом матричног претварача, што доводи до преноса заједничког напона са улазних на излазне прикључке матричног претварача. На тај начин заједнички напон на излазним терминалима остаје увек пропорционалан збиру сва три улазна фазна напона, што значи да се самом модулацијом не уноси никаква промена заједничког напона на излазним прикључцима у односу на заједнички напон на улазним прикључцима. Под претпоставком да је збир три улазна фазна напона једнак нули у трофазним мрежним системима, заједнички напон на излазним прикључцима једног 3×3 матричног претварача такође је једнак нули. Високофреквентни заједнички напон на прикључцима машине који стандардна модулација уноси изазива струје лежајева [27], електромагнетне сметње [28] и циркулационе струје [29]. Коришћењем само прекидачких стања која остварују нулти заједнички напон на излазним прикључцима претварача, елиминишу се горенаведени нежељени ефекти, што резултира дужим животним веком и већом поузданошћу погона. Пошто је свака улазна фаза повезана са јединственом излазном фазом у случају изабраног типа модулације 3×3 директног матричног претварача, напони на излазним прикључцима ће генерисати или ко-ротирајући или контра-ротирајући векторе, у зависности од редоследа фаза. Ко-ротирајући вектори ротирају у истом смеру као и вектор улазног напона, док контра-ротирајући вектори ротирају у супротном смеру. Због тога што вектори излазног напона и улазне струје имају временски променљиве правце у просторној равни, они се ретко користе за модулацију излазног напона. Управо због ове сложености, технике модулације често теже да избегну употребу ротирајућих вектора [30], [31]. Генерализација теорије векторске модулације која укључује коришћење ротирајућих вектора до сада није предложена, иако је показано да се они могу искористити ради побољшања робусности комутације бидирекционих прекидача [32]. Последњих година, значајан број истраживања био је усмерен на технике векторске модулације које користе искључиво ротирајуће векторе, при чему је показано да се излазни напон може успешно синтетисати искључиво њиховом применом. Управо ова карактеристика је допринела формирању термина модулација просторно ротирајућих вектора (МПРВ), који представља централну тему многих новијих научних радова [8]–[10], [12], [13], [33]–[41]. Даље истраживање је открило да се улазни фактор снаге такође може контролисати користећи само ротирајуће векторе. Ипак, неопходна је комбинована МПРВ, која користи и ко-ротирајуће и контра-ротирајуће векторе у оквиру једне прекидачке периоде, док се вектор излазног напона може модулисати само коришћењем једне групе ротирајућих вектора [8]–[13], [36]. У литератури није изведен тачан математички модел матричног претварача који користи комбиновану МПРВ. Због непостојања јасног аналитичког модела која описује овај тип модулације, ограничења која дефинишу његов управљачки опсег улазног фактора снаге су остала непозната. Такође, установљени управљачки опсег контроле улазног фактора снаге је далеко испод теоријског максимума. У постојећој литератури није спроведена анализа распрегнутог управљања излазним напонам и улазним фактором снаге. Истраживање спроведено у претходној литератури је ограничено на симетричне услове мреже, док утицај несиметрије у трофазном систему напона мреже на изобличења излазног напона и улазне струје као и методе за њихово смањење нису истраживане.

Циљ ове дисертације је да пружи свеобухватну генерализовану анализу комбиноване МПРВ, која обухвата следеће ставке: 1) извођење математичког модела који описује комбиновану МПРВ 2) анализа распрегнуте контроле улазног фактора снаге и излазног напона коришћењем претходно изведеног математичког модела 3) одређивање ограничења која дефинишу могући опсег улазног фактора снаге 4) извођење аналитичког решења за радну тачку са максималном улазном реактивном снагом 5) анализа утицаја несиметричних мрежних услова на хармонијско изобличење излазног напона и улазне струје матричног

претварача 6) унапређење МПРВ тако да се елиминишу нежељена хармонијска изобличења 7) одређивање утицаја негативне секвенце у улазном напону, која се јавља при несиметричним условима, на максималну вредност амплитуде излазног напона. Анализа у оквиру ове докторске дисертације обухвата све претходно предложене методе везано за овај тип модулације и открива да су то само специјални случајеви универзалне методе предложене у оквиру ове дисертације, која може да постигне много шири управљачки опсег улазног фактора снаге, распрегнуту контролу излазног напона и улазног фактора снаге, и спречава појаву хармонијских изобличења излазног напона и улазне струје при несиметричним условима мреже.

Након верификације научних доприноса на симулационом моделу, као и HiL (енгл. Hardware In the Loop) поставци у реалном времену, уследиће развој експерименталне поставке. Конвенционални 3×3 директни матрични претварач, код којег је примењена МПРВ, у линеарном радном режиму, може да оствари максимално напонско појачање од $q_{max}=0,5$, са деградацијом појачања услед управљања улазним фактором снаге и несиметричних услова мреже [13]. Пошто се ово напонско појачање показало као недовољно за већину практичних примена, у [9], [10] је предложена топологија двоструког матричног претварача у погону са отвореним крајевима трофазног оптерећења, са циљем повећања максималног напонског појачања три пута ($q_{max}=1,5$). Ова топологија подразумева коришћење два 3×3 директна матрична претварача, по један са сваке стране трофазног оптерећења са отвореним крајевима. Из тог разлога, експериментална поставка развијена за потребе ове докторске дисертације, је базирана на топологији двоструког матричног претварача, с тим што се сви теоријски закључци изведени за ову топологију могу применити и на топологију стандардног 3×3 директног матричног претварача.

Релевантни радови из области истраживања:

- [1] T. Friedli, J. W. Kolar, J. Rodriguez, and P. W. Wheeler, "Comparative Evaluation of Three-Phase AC-AC Matrix Converter and Voltage DC-Link Back-to-Back Converter Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4487–4510, Dec. 2012.
- [2] G. Buticchi, S. Bozhko, M. Liserre, P. Wheeler, and K. Al-Haddad, "On-Board Microgrids for the More Electric Aircraft—Technology Review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 7, pp. 5588–5599, Jul. 2019.
- [3] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004.
- [4] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, R. Guzman, and A. Borrell, "Reactive Power Control for Distributed Generation Power Plants to Comply With Voltage Limits During Grid Faults," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6224–6234, Nov. 2014.
- [5] H. Hojabri, H. Mokhtari, and L. Chang, "A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 949–959, Mar. 2011.
- [6] Z. Malekjamshidi, M. Jafari, J. Zhu, and D. Xiao, "Comparative Analysis of Input Power Factor Control Techniques in Matrix Converters Based on Model Predictive and Space Vector Control Schemes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 139150–139160, undefined 2019.
- [7] H. M. Nguyen, H.-H. Lee, and T.-W. Chun, "Input Power Factor Compensation Algorithms Using a New Direct-SVM Method for Matrix Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 232–243, Jan. 2011.
- [8] H.-N. Nguyen and H.-H. Lee, "An Enhanced SVM Method to Drive Matrix Converters for Zero Common-Mode Voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 1788–1792, Apr. 2015.
- [9] R. K. Gupta, K. K. Mohapatra, A. Somani, and N. Mohan, "Direct-Matrix-Converter-Based Drive for a Three-Phase Open-End-Winding AC Machine With Advanced Features," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4032–4042, Dec. 2010.
- [10] S. Tewari and N. Mohan, "Matrix Converter Based Open-End Winding Drives With Common-Mode Elimination: Topologies, Analysis, and Comparison," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8578–8595, Oct. 2018.

- [11] M. Milanovic and B. Dobaj, "Unity input displacement factor correction principle for direct AC to AC matrix converters based on modulation strategy," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 221–230, Feb. 2000.
- [12] R. K. Gupta, A. Somani, K. K. Mohapatra, and N. Mohan, "Space vector PWM for a direct matrix converter based open-end winding ac drives with enhanced capabilities," in *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 901–908.
- [13] J. Lei, S. Feng, B. Zhou, H.-N. Nguyen, J. Zhao, and W. Chen, "A Simple Modulation Scheme With Zero Common-Mode Voltage and Improved Efficiency for Direct Matrix Converter-Fed PMSM Drives," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3712–3722, Dec. 2020.
- [14] A. Alesina and M. G. B. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 101–112, Jan. 1989.
- [15] H. Hojabri, H. Mokhtari, and L. Chang, "Reactive Power Control of Permanent-Magnet Synchronous Wind Generator With Matrix Converter," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575–584, Apr. 2013.
- [16] X. Li, M. Su, Y. Sun, H. Dan, and W. Xiong, "Modulation Strategy Based on Mathematical Construction for Matrix Converter Extending the Input Reactive Power Range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 654–664, Feb. 2014.
- [17] P. Szczepankowski, "An Extended Control of the Input Angle for Matrix Converters Connected with the Non-Unity Power Factor Loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 1–1, undefined 2021.
- [18] F. Schafmeister and J. W. Kolar, "Novel Hybrid Modulation Schemes Significantly Extending the Reactive Power Control Range of All Matrix Converter Topologies With Low Computational Effort," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 194–210, Jan. 2012.
- [19] L. Qiu, Y. Li, X. Huang, L. Wu, and Y. Fang, "Modulation technique for a 3×5 matrix converter achieving a maximum input reactive power range based on load information," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 9, pp. 10409–10419, Sep. 2021.
- [20] X. Wang, H. Lin, H. She, and B. Feng, "A Research on Space Vector Modulation Strategy for Matrix Converter Under Abnormal Input-Voltage Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 93–104, Jan. 2012.
- [21] J. D. Dasika and M. Sacedifard, "An Online Modulation Strategy to Control the Matrix Converter Under Unbalanced Input Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 4423–4436, Aug. 2015.
- [22] J. Lei, B. Zhou, J. Bian, X. Qin, and J. Wei, "A Simple Method for Sinusoidal Input Currents of Matrix Converter Under Unbalanced Input Voltages," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 21–25, Jan. 2016.
- [23] S. Feng, J. Lei, J. Zhao, W. Chen, and F. Deng, "Improved Reference Generation of Active and Reactive Power for Matrix Converter With Model Predictive Control Under Input Disturbances," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97001–97012, undefined 2019.
- [24] W. Xiong *et al.*, "A Cost-Effective and Low-Complexity Predictive Control for Matrix Converters Under Unbalanced Grid Voltage Conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43895–43905, undefined 2019.
- [25] J. Lei *et al.*, "Feedback Control Strategy to Eliminate the Input Current Harmonics of Matrix Converter Under Unbalanced Input Voltages," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 878–888, Jan. 2017.
- [26] M. Hamouda, H. F. Blanchette, and K. Al-Haddad, "Unity Power Factor Operation of Indirect Matrix Converter Tied to Unbalanced Grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1095–1107, Feb. 2016.
- [27] W. Zhu, D. De Gaetano, X. Chen, G. W. Jewell, and Y. Hu, "A review of modeling and mitigation techniques for bearing currents in electrical machines with variable-frequency drives," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 125279–125297, 2022.
- [28] L. Xing and J. Sun, "Conducted common-mode EMI reduction by impedance balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 1084–1089, Mar. 2012.
- [29] A. Somani, R. K. Gupta, K. K. Mohapatra, and N. Mohan, "On the Causes of Circulating Currents in PWM Drives With Open-End Winding AC Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3670–3678, Sep. 2013.
- [30] J. Espina, C. Ortega, L. de Lillo, L. Empringham, J. Balcells, and A. Arias, "Reduction of output common mode voltage using a novel SVM implementation in matrix converters for improved motor lifetime," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 5903–5911, Nov. 2014.

- [31] H.-N. Nguyen and H.-H. Lee, "An effective SVM method for matrix converters with a superior output performance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 6948–6958, Sep. 2018.
- [32] A. D. Arioni, T. S. Padilha, and S. V. G. Oliveira, "Expanded Space Vector Modulation of Direct Matrix Converters Including Hidden Rotating Pairs," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 11, pp. 8296–8307, Nov. 2019.
- [33] W. Xiong, Y. Sun, M. Su, J. Yang, and C. Wang, "A carrier-based modulation strategy for multi-modular matrix converters with zero common-mode voltage," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, pp. 1–6.
- [34] H.-N. Nguyen and H.-H. Lee, "A Modulation Scheme for Matrix Converters With Perfect Zero Common-Mode Voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 8, pp. 5411–5422, Aug. 2016.
- [35] L. Wang *et al.*, "A Finite Control Set Model Predictive Control Method for Matrix Converter With Zero Common-Mode Voltage," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 327–338, Mar. 2018.
- [36] K. K. Mohapatra and N. Mohan, "Open-End Winding Induction Motor Driven With Matrix Converter For Common-Mode Elimination," in *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, 2006, pp. 1–6.
- [37] R. Baranwal, K. Basu, and N. Mohan, "Carrier-Based Implementation of SVPWM for Dual Two-Level VSI and Dual Matrix Converter With Zero Common-Mode Voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1471–1487, Mar. 2015.
- [38] W. Deng, "Maximum Voltage Transfer Ratio of Matrix Converter Under DTC With Rotating Vectors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 6, pp. 6137–6141, Jun. 2021.
- [39] H.-N. Nguyen, M.-K. Nguyen, V.-Q.-B. Ngo, T.-T. Tran, J.-H. Choi, and Y.-C. Lim, "Input power factor compensation strategy for zero CMV-SVM method in matrix converters," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175805–175814, 2020.
- [40] L. Stanić, L. Ristić, M. Bebić, and M. Rivera, "Improvement of two grid power factor control methods for matrix converter open-end-winding drive with common-mode voltage elimination supplied by unbalanced grid," *IET power electron.*, Oct. 2022.
- [41] L. Stanić, L. Ristić, M. Bebić, and M. Rivera, "Extended SVM for direct matrix converter based drive operating under unbalanced grid conditions," in *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2021, pp. 1–6.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Директни 3×3 матрични претварач, модулисан искључиво коришћењем ротирајућих вектора, може да обезбеди непромењен заједнички напон на излазним прикључцима у односу на заједнички напон на улазним прикључцима (укључујући и нулти, под условом да је збир улазних фазних напона једнак нули), истовремено генеришући излазни напон променљиве амплитуде и фреквенције.
- Након што се подеси излазни напон на жељену амплитуду и фреквенцију, преостаје још један степен слободе за контролу (подешавање) улазног фактора снаге, тј. улазне реактивне снаге. За контролу улазног фактора снаге, неопходна је комбинована модулација која користи и ко-ротирајуће и контра-ротирајуће векторе у оквиру једне прекидачке периоде, док се вектор излазног напона може модулисати само коришћењем једне групе ротирајућих вектора.
- Динамичком контролом угла фактора снаге мреже око његове константне вредности могуће је да се хармоници ниске фреквенције значајно потисну или чак елиминишу из таласних облика струја из мрежи.

- Негативна компонента у трофазном систему улазних напона, која се јавља при несиметричним условима мреже, смањује максимално оствариву амплитуду излазног напона.

4. Научне методе истраживања

Током истраживања анализираће се различите методе модулације директног матричног претварача, али пре свега МПРВ. Анализа и поређење публикованих решења служиће за сагледавање простора за научне и стручне доприносе. Током истраживања биће коришћене следеће методе:

- Аналитичка метода. Након моделовања директног матричног претварача код којег је примењена МПРВ, закључци у оквиру ове докторске дисертације биће поткрепљени аналитичким доказима и решењима.
- Симулациона метода. Верификација теоријских закључака на симулационом моделу послужиће приликом развоја управљачких алгоритама за МПРВ.
- Експериментална метода. На развијеном прототипу директног матричног претварача биће извршена коначна експериментална верификација закључака добијених аналитичком и симулационом методом.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси докторске дисертације су:

- Извођење генерализованог аналитичког модела директног матричног претварача управљаног методом МПРВ. Модел је изведен у комплексној форми [40].
- Унапређење методе МПРВ код директног матричног претварача у циљу распрегнутог управљања излазним напонем и улазним фактором снаге.
- Предложена је генерализована метода управљања улазном реактивном снагом заснована на МПРВ, која за разлику од постојећих решења — која се ослањају или на активну или на реактивну снагу потрошача — истовремено узима у обзир обе величине. На тај начин омогућен је проширени управљачки опсег улазног фактора снаге у свим радним условима претварача. Спровођењем аналитичке анализе засноване на изведеном моделу, која први пут у литератури јасно дефинише ограничења управљачког опсега улазног фактора снаге, одређена линеарним режимом рада МПРВ и излазним фактором снаге. Додатно је изведено и аналитичко решење радне тачке са теоријски максималном остваривом улазном реактивном снагом.
- Унапређење методе МПРВ у погледу елиминације нежељених хармонијских изобличења при несиметричним мрежним условима. Спровођењем аналитичке анализе засноване на изведеном моделу, по први пут у литератури анализиран је утицај несиметричних мрежних услова на хармонијско изобличење улазне струје матричног претварача и максималну вредност амплитуде излазног напона и предложена је модификована метода МПРВ која елиминира нежељена изобличења [40], [41].

6. План истраживања и структура рада

План истраживања докторске дисертације обухвата:

- 1) Преглед научно-стручних публикација ради анализе расположивих метода модулације директног матричног претварача и њихових могућности по питању управљања излазним напоном и улазним фактором снаге.
- 2) Извођење аналитичког модела директног матричног претварача управљаног МПРВ.
- 3) Теоријска анализа распрегнуте контроле излазног напона и улазног фактора снаге користећи претходно изведени математички модел.
- 4) Теоријска анализа на основу изведеног модела дефинише ограничења управљачког опсега улазног фактора снаге и даје аналитичко решење радне тачке са максималном улазном реактивном снагом за директни матрични претварач са МПРВ. Овим је формулисана генерализована метода управљања која истовремено узима у обзир и активну и реактивну снагу потрошача, омогућавајући шири и поузданији опсег управљања у свим радним условима у поређењу са постојећим решењима.
- 5) У наставку истраживања испитан је утицај несиметричних мрежних услова на рад претварача. Показано је да несиметрија доводи до појаве нежељених хармоника у улазној струји и смањења амплитуде излазног напона. На основу добијених увида, предложена је модификована МПРВ метода која успешно отклања струјна изобличења и тиме побољшава перформансе претварача у реалним условима.
- 6) Развој и упоређивање два симулациона модела матричног претварача ради верификације изведеног математичког модела. Први симулациони модел је заснован на топологији матричног претварача са идеалним прекидачима, док је други модел заснован на изведеном математичком моделу претварача са усредњеним вредностима улазно/излазних величина (напона и струја).
- 7) Верификација аналитичког модела под тачком 2) упоредном анализом два симулациона модела у различитим радним условима, као и верификација теоријске анализе под тачкама 3), 4) и 5).
- 8) Имплементација МПРВ са свим горенаведеним унапређењима на микроконтролеру са дигиталним сигналним процесором и FPGA (енгл. Field Programmable Gate Array) колом.
- 9) Верификација рада управљачког алгоритма у реалном времену, имплементираног на микроконтролеру, користећи HIL (енгл. Hardware In the Loop) поставку. Потврђивање претходно изведених теоријских закључака на HIL поставци.
- 10) Развој прототипа директног матричног претварача.
- 11) Верификација предложене методе и теоријских закључака на експерименталној поставци.

На основу истраживања спроведеног у оквиру предложене методологије, у дисертацији ће бити истакнути кључни научни доприноси, са акцентом на њихов научни значај. Посебан нагласак биће стављен на комбиновану методу модулације МПРВ, која омогућава како статичку тако и динамичку регулацију улазног фактора снаге. Статичком контролом настоји се постићи теоријски најшири могући опсег управљања овим фактором, док се применом динамичке контроле тежи елиминацији нежељених хармонијских изобличења. Изабраном методом модулације остварује се нулти заједнички напон на излазним прикључцима.

Предложена метода има велики потенцијал примене у реалним условима, пре свега у системима за системима где се предност даје претварачима са мањим габаритом. Претпоставља се да ће развој нових, бидирекционих компоненти енергетске електронике погодних за примену управо у матричним претварачима омогућити већу заступљеност ове врсте претварача у пракси.

7. Закључак и предлог

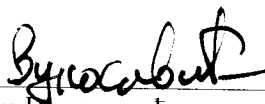
На основу приложене документације, усмене одбране теме докторске дисертације, као и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Луке Станића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема „Генерализована метода модулације просторно ротирајућих вектора код директног матричног претварача“, односно на енглеском "Generalized Space Rotating Vector Modulation for Direct Matrix Converters", је научно заснована, а резултати теме ће представљати значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области „Енергетски претварачи и погони“.

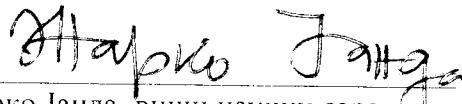
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Луки Станићу одобри израду докторске дисертације која ће бити написана на српском језику, а под називом „Генерализована метода модулације просторно ротирајућих вектора код директног матричног претварача“, односно на енглеском језику "Generalized Space Rotating Vector Modulation for Direct Matrix Converters", под менторством др Милана Бебића, ванредног професора.

У Београду, 29.9.2025.

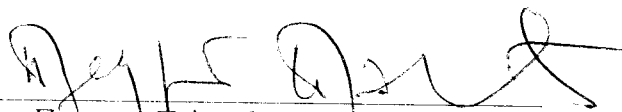
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Жарко Јанда, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Електротехнички институт
Никола Тесла



др Предраг Пејовић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет