

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Милована Мајсторовића за израду докторске тезе.

Одлуком бр. 1177/11 од 08.07.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Милована Мајсторовића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Предиктивно управљање модуларним претварачима са више напонских нивоа”, односно на енглеском „Predictive control of modular multilevel converters”.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милован Мајсторовић је рођен 21. децембра 1993. године у Милићима (РС-БиХ). Завршио је основну школу у Власеници као носилац Вукове дипломе и ђак генерације, а потом је завршио Математичку гимназију у Београду.

Електротехнички факултет у Београду уписао је школске 2012/2013. године. Дипломирао је на смеру за Енергетске претвараче и погоне одсека за Енергетику у септембру 2016. године са просечном оценом 9,27. Дипломски рад из области Енергетских претварача на тему „Топологија и спрезање групе инвертора у мобилном "OFF-grid" соларном систему излазног напона 230V, 50Hz и излазне снаге 5kVA“ одбранио је са оценом 10. Ментор при изради дипломског рада био је др Милош Недељковић, доцент. Током основних студија, провео је десет месеци у Институту „Михајло Пупин” као студент сарадник.

Школске 2016/2017. године уписао је мастер студије на Електротехничком факултету у Београду на модулу Енергетска ефикасност и положио све предмете са просечном оценом 9.80. Мастер рад из области Енергетски претварача на тему „Синхронизација излазног напона трофазног инвертора са мрежним напоном применом фазно затворене петље“ одбранио је у јуну 2018. године са оценом 10. Ментор при изради мастер рада био је др Милош Недељковић, доцент.

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 1. маја 2017. године запослен је на Катедри за енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета у Београду, у звању сарадника у настави, а од 1. марта 2019. године у звању асистента. Ангажован је на извођењу рачунских и лабораторијских вежби из следећих предмета:

- Енергетски претварачи 1
- Енергетски претварачи 2
- Пројекат из енергетских претварача
- Управљање енергетским претварачима
- Претварачка кола за обновљиве изворе енергије
- Управљање електро моторним погонима

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Милован Мајсторовић положио је следеће испите на докторским студијама:

Р.бр.	Шифра	Назив предмета	Оцена	ЕПСБ	Датум
1	19Д051НМ	Неуралне мреже	10 (десет)	9	07.07.2021.
2	19Д011ЕЕФ	Електро моторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије	10 (десет)	9	19.02.2021.
3	19Д011ИЕМ	Испитивање и одржавање електричних машина	10 (десет)	9	27.01.2021.
4	19Д011ОПЕ	Одабрана поглавља из електро моторних погона	10 (десет)	9	27.01.2021.
5	19Д091ЕЈ	Енглески језик	10 (десет)	9	25.01.2021.
6	13Д011МУЕ	Микропроцесорско управљање енергетским претварачима	10 (десет)	9	18.09.2020.
7	13Д081СФ	Специјалне функције	10 (десет)	9	02.07.2020.
8	13Д011ЕП	Енергетски претварачи	10 (десет)	9	31.01.2020.
9	13Д011УЕП	Управљање енергетским претварачима	10 (десет)	9	29.01.2020.
10	13Д051УСС	Управљање сложеним системима	10 (десет)	9	29.01.2020.
Р.бр.		Назив обавезе		ЕПСБ	
1		Научно-стручни рад		3	
2		Студијско истраживачки рад I		15	
3		Студијско истраживачки рад II		15	
		Укупно остварено		120	

Кандидат је аутор осамнаест научних радова, од којих два објављена у часопису са SCI листе, један објављен у домаћем часопису, са два рада је учествовао на домаћој конференцији, од чега један по позиву, док је са осталих тринаест учествовао на међународним конференцијама. Списак радова је дат у наставку у складу са важећом категоризацијом.

Категорија М20 – Радови објављени у научним часописима од међународног значаја:

1. M. Majstorović, M. Rivera, L. Ristić, P. Wheeler, Comparative Study of Classical and MPC Control for Single-Phase MMC Based on V-HIL Simulations, ENERGIES, Vol. 14, No. 11, pp. 1 - 17, May, 2021 (M22, ИФ 3.252)

2. M. Majstorović, V. Nougain, L. Ristić, A. Lekić, Deadbeat-based control for MMC-HVDC power systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 167, Jun, 2025 (M21, ИФ 5.0)

Категорија М30 – Радови објављени у зборницима конференција од међународног значаја:

1. N. Cherat, V. Nougain, M. Majstorović, P. Palensky, A. Lekić, Event-Triggered Non-Linear Control of Offshore MMC Grids for Asymmetrical AC Faults, 2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), pp. 1 - 5, IEEE, Dubrovnik, Oct, 2024 (M33)
2. A. Gross-Muresan, M. Majstorović, F. Matas-Díaz, G. Dobrić, M. Barragán-Villarejo, J. Maza-Ortega, Independent Per-Phase Power Control in Four-Leg Grid-Following Voltage Source Converters, 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), IEEE, Napoli, Italy, Aug, 2024 (M33)
3. L. Lukić, M. Majstorović, L. Ristić, Francisco de Paula Garcia Lopez, Solar Charger for Mobile Applications, 11th International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (IcETRAN), pp. 1 - 6, ETRAN Society, Niš, Jun, 2024 (M33)
4. M. Majstorović, B. Brković, N. Vojvodić, L. Ristić, A. Stanković, Three-Phase Boost Rectifier Control Implemented Using Hardware-in-the-Loop, 2023 IEEE Belgrade PowerTech, pp. 01 - 06, IEEE, Belgrade, Serbia, Jun, 2023 (M33)
5. M. Tanasić, B. Brković, M. Majstorović, L. Ristić, Hardware-in-the-Loop Simulation of a Virtual Synchronous Motor, 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee2023), pp. 1 - 6, Power Electronics Society, Serbia, Novi Sad, Serbia, Oct, 2023 (M33)
6. M. Majstorović, Ž. Despotović, D. Mršević, B. Đurić, Implementation of MPPT Methods with SEPIC Converter, 2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, IEEE, Jahorina, Istočno Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Mar, 2020 (M33)
7. A. Lekić, M. Majstorović, L. Ristić, D. Stipanović, Hysteresis Control of the Pseudo Boost PFC Converter, 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 731 - 735, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands., Jun, 2020 (M33)
8. M. Majstorović, M. Milešević, M. Stević, Z. Stević, Ž. Ševaljević, Ogledni PV sistem napajanja u laboratoriji za električne pretvarače ETF u Beogradu, 7. Međunarodna konferencija o obnovljivim izvorima električne energije 2019, pp. 147 - 150, Zbornik Međunarodne konferencije o obnovljivim izvorima električne energije – MKOIEE, Beograd, Oct, 2019 (M33)
9. M. Majstorović, M. Rivera, L. Ristić, Review of MPC Techniques for MMCs, XX International Symposium on Power Electronics - Ee 2019, pp. 1 - 6, Društvo za energetske elektroniku Novi Sad, Novi Sad, Oct, 2019 (M33)
10. L. Ristić, B. Brković, M. Majstorović, U. Milović, T. Taluo, M. Bebić, Electrical Drives with Active Rectifiers Connected to Distorted Utility Grid, 5th International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, EFEA 2018, Rome, Italy, Sep, 2018 (M33)
11. M. Majstorović, Ž. Despotović, B. Brković, Synchronization of the Output Voltage of the Three-Phase Photovoltaic Inverter with a Power Network Applying PLL Circuit, International Conference Power Plants 2018, Zlatibor, Serbia, Nov, 2018 (M33)
12. M. Majstorović, Ž. Despotović, L. Ristić, Application of Mobile Solar OFF-grid Generator in Irrigation System - Case Study, 19th International Symposium on Power Electronics Ee 2017, pp. 1 - 1, Novi Sad, Serbia, Oct, 2017 (M33)
13. Ž. Despotović, M. Majstorović, Voltage Stabilisation and Synchronisation of DC/AC Power Converters in Mobile OFF-GRID Solar Power, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2016", 23-27.November 2016, Zlatibor Serbia, E2016-082, pp. 1 - 11, Zlatibor, Serbia, Nov, 2016 (M33)

Категорија М50 – Радови објављени у научним часописима од националног значаја:

1. Ž. Despotović, M. Jovanović, I. Stevanović, M. Majstorović, Sprezanje i sinhronizacija grupe invertora u OFF-grid mobilnom solarnom sistemu, ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA, Vol. 3-4, pp. 252 - 260, Mar, 2016 (M51)

Категорија М60 – Радови објављени у зборницима конференција од националног значаја:

1. А. Мијајловић, М. Мајсторовић, Б. Брковић, Моделовање модуларног вишенивовског претварача са реалним прекидачким компонентама, 37. Саветовање Cigre Србија, Копаоник, Мај 2025. (M63)
2. В. Brković, М. Majstorović, М. Ivanović, М. Terzić, Switched reluctance motor drive simulation using open-source software, Primena slobodnog softvera i otvorenog hardvera (PSSOH), pp. 1 - 18, Beograd, Oct, 2024 (M61)

Милован Мајсторовић је учествовао на следећим пројектима:

Међународни:

1. Младен Терзић, Високобрзински синхрони мотор са намотаним ротором и бесконтактним напајањем ротора
2. Предраг Стефанов, SUNRISE- Setting up green energy research in Serbia HORIZON EUROPE

Научни:

1. Томислав Шекара, Повећање енергетске ефикасности ХЕ и ТЕ ЕПС-а развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију
2. Младен Терзић, Лабораторијска платформа за испитивање енергетског претварача и батерије у склопу савременог е-мобилити електричног погона (ЛПИЕП)

Комерцијални:

1. Младен Терзић, Дизајн електричног мотора за нову генерацију ЕЦФ
2. Милан Бебић, Израда техничке документације електричних инсталација и рачунаског управљања оклопног борбеног возила Лазар 3
3. Милан Бебић, ТЕКО БЗ : Консултантске услуге из електроенергетике, телекомуникација и система управљања
4. Горан Квашчев, Израда техничке документације електричних инсталација и рачунаског управљања вишенаменог оклопног борбеног возила Лазар
5. Горан Квашчев, Израда документације електричних инсталација БОВ М16 Милош

Дана 29.07.2025. године кандидат Милован Мајсторовић је на Електротехничком факултету у Београду успешно одбранио тему докторске дисертације на усменој одбрани пред Комисијом:

1. др Зоран Радаковић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет (председник Комисије)
2. др Жељко Деспотовић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт „Михајло Пупин“
3. др Предраг Пејовић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет
4. др Предраг Стефанов, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет
5. др Богдан Брковић, доцент, 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 система управљања модуларним претвараачима са више напонских нивоа (*Modular Multilevel Converters – MMC*) [1] коришћењем метода предиктивног управљања унапређених применом алгоритама заснованих на неуралним мрежама. Фокус је на побољшању квалитета излазне наизменичне струје, тј. смањењу укупног хармонијског изобличења (*Total Harmonic Distortion - THD*) у системима средњег и високог напона, при чему се задржава робусност система.

MMC претварачи, у поређењу са конвенционалним топологијама претварача са више напонских нивоа попут NPC (*Neutral Point Clamped*), NNPC (*Nested Neutral Point Clamped*) и FC (*Flying Capacitor*), нуде значајне предности при напонским нивоима изнад 10 kV – нижи напон блокирања по прекидачу и већу флексибилност услед редундантности [2,3]. Са друге стране, њихова сложена структура намеће захтевне управљачке задатке, укључујући регулацију излазне наизменичне струје, балансирање напона кондензатора модула, управљање циркулационим струјама, као и расподелу губитака.

У високонапонским апликацијама, MMC представља супериорно решење у односу на традиционално коришћене тиристорске мрежом вођене претварааче (*Line Commutated Converter – LCC*), пре свега захваљујући могућности рада са једносмерним напонам у широком опсегу, без утицаја на фактор снаге [4]. Док тиристорски претварачи изазивају велико изобличење струје (висок THD), MMC омогућава готово синусоидални облик струје са ниском вредношћу THD-а и приближно јединичном вредношћу фактора снаге [5].

У оквиру ове тезе биће анализирани различити алгоритми управљања, сврстани у две основне категорије: класичне методе управљања, базиране на пропорционално-интегрално-диференцијалним (ПИД) регулаторима, и предиктивне методе управљања [2]. Класичне структуре управљања захтевају примену већег броја међусобно повезаних регулатора, док предиктивне структуре омогућавају симултану регулацију већег броја променљивих на основу јединствене критеријумске функције [6,7]. Такође ће бити обрађени и директни и индиректни приступи предиктивном управљању [8-11], уз извршено поређење и међусобно, и са класичним алгоритмима заснованим на ПИД регулаторима [7].

Посебна пажња у оквиру истраживања биће посвећена анализи *deadbeat* управљачке стратегије [12-17], са фокусом на изазове који се јављају при њеној практичној имплементацији. Посебно ће бити разматрана осетљивост ове методе на промене параметара система, као и на кашњења која настају услед мерења и обраде података [18]. Биће спроведена детаљна анализа стабилности у присуству наведених поремећаја, као и у сценаријима у којима се примењују одговарајуће контрамере, као што су адаптивна идентификација параметара [19-21] и компензација кашњења [22,23].

Захваљујући својој способности да обезбеди праћење референтне вредности у једном кораку, *deadbeat* стратегија може бити искоришћена као унутрашња (брза) регулациона петља у хијерархијским структурама управљања, где се надређена (спољна) петља односи на „спорије“ променљиве попут активне снаге или једносмерног напона [18]. На тај начин, унутрашња *deadbeat* петља не само да омогућава брз одзив, већ и побољшава динамику и

стабилност целокупне структуре управљања. У оквиру ове докторске дисертације биће анализирани перформансе управљачке *deadbeat* стратегије примењене у оквиру унутрашње петље у сложенијим апликацијама ММС-а, са посебним освртом на примену у *HVDC* (енг. *High-Voltage Direct Current*) системима [24].

Имајући у виду ограничења предложеног *deadbeat* алгоритма при већем уделу отпорности у импеданси система, истраживање ће обухватити и интеграцију неуралних мрежа ради побољшања праћења референтних сигнала. Предложени приступ не подразумева потпуну замену *deadbeat* алгоритма неуралном мрежом, већ подразумева формирање паралелне архитектуре у којој неурална мрежа асистира *deadbeat* алгоритму, чиме се постиже већа прецизност и смањује сложеност алгоритма.

Циљ ове докторске дисертације је развој унапређеног алгоритма управљања за ММС, који омогућава:

- смањење укупног хармонијског изобличења (*THD*) наизменичне струје,
- очување робусности система управљања у условима променљивих параметара и системских кашњења,
- ограничење броја прекидања у циљу смањења губитака,
- унапређење перформанси *deadbeat* управљања уз помоћ неуралних мрежа, нарочито у условима повећане отпорности у импеданси система.

Значај ове дисертације огледа се у практичној применљивости резултата у напредним електроенергетским системима средњег и високог напона, као што су електричне мреже, *HVDC* системи и електромоторни погони. Унапређење квалитета излазне наизменичне струје доприноси смањењу димензија и трошкова израде филтера претварача, док робусно и ефикасно управљање смањује губитке и продужава радни век система. Додатно, употреба неуралних мрежа је у складу са актуелним трендовима примене машинског учења у управљању енергетским претварачима. Такође, планиран је и развој експерименталне поставке ММС-а која ће представљати значајну основу за даља истраживања у овој области.

Литература

- [1] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," in 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,, vol. 3, 2003, p. 6 pp. Vol.3.
- [2] S. Du, A. Dekka, B. Wu, and N. Zargari, Modular multilevel converters: analysis, control, and applications. John Wiley & Sons, 2017.
- [3] K. Sharifabadi, L. Harnefors, H. Nee, S. Norrga, and R. Teodorescu, Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems. John Wiley & Sons, 2016.
- [4] Q. Sun, Q. Song, J. Meng, B. Cui, G. Li, F. Cheng, and K. Wang, "Flex-lcc: A new grid-forming hvdc rectifier for collecting large-scale renewable energy," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 8, pp. 8808–8818, 2024.
- [5] M. Ashraf, Y. Nazih, F. Alsokhry, K. H. Ahmed, A. S. Abdel-Khalik, and Y. Al- Turki, "A new hybrid dual active bridge modular multilevel based dc–dc converter for hvdc networks," IEEE Access, vol. 9, pp. 62 055–62 073, 2021.
- [6] Z. Wu, C. Lu, Z. Zhou, and Y. Han, "Controller design and performance evaluation of the three-phase mmc for statcom and active rectifier applications," in 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2017, pp. 187–191.
- [7] M. Majstorović, M. Rivera, L. Ristić, and P. Wheeler, "Comparative study of classical and mpc control for single-phase mmc based on v-hil simulations," Energies, vol. 14, no. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3230>

- [8] M. Vatani, B. Bahrani, M. Saeedifard, and M. Hovd, "Indirect finite control set model predictive control of modular multilevel converters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1520–1529, 2015.
- [9] M. Majstorović, M. E. R. Abarca, and L. Ristić, "Review of mpc techniques for mmcs," in *2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2019, pp. 1–7.
- [10] A. Dekka, B. Wu, V. Yaramasu, R. L. Fuentes, and N. R. Zargari, "Model predictive control of high-power modular multilevel converters_an overview," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 168–183, 2019.
- [11] R. K. Tarcar, A. Shetgaonkar, M. Popov, and A. Lekić, "Large signal stability assessment of mpc-based control for hvdc electrical grid," in *2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, 2024, pp. 1–6.
- [12] L. Xi-mei, Z. Qun, Z. Qian, and Y. Zhi-qing, "Research on deadbeat control strategy of modular multilevel converter," in *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, 2011, pp. 621–624.
- [13] C. Wang and B. T. Ooi, "Protecting modular multilevel converters (mmc) against ac fault by deadbeat control," in *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2013, pp. 1–6.
- [14] J. Wang, Y. Tang, P. Lin, X. Liu, and J. Pou, "Deadbeat predictive current control for modular multilevel converters with enhanced steady-state performance and stability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 6878–6894, 2020.
- [15] J. Wang, Y. Tang, Y. Qi, P. Lin, and Z. Zhang, "A unified startup strategy for modular multilevel converters with deadbeat predictive current control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6401–6411, 2021.
- [16] R. Chakraborty, P. M. Gajare, R. Chaki, and A. Dey, "A simplified dualstage model predictive controller for modular multilevel converters," *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109525, 2023.
- [17] W. Zhang, J. Zhang, Q. Wang, Y. Jiang, and G. Tan, "Dual-vector model predictive control for modular multilevel converter with low calculation burden," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 28 520–28 530, 2024.
- [18] M. Majstorović, V. Nougain, L. Ristić, and A. Lekić, "Deadbeat-based control for mmc-hvdc power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 167, p. 110583, 2025.
- [19] S. N. Vukosavić and A. M. Stanković, "Non-intrusive estimation of single-port thevenin equivalents in ac grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 5, pp. 2794–2803, 2021.
- [20] S. Wang, T. Dragicevic, Y. Gao, and R. Teodorescu, "Neural network based model predictive controllers for modular multilevel converters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 2, pp. 1562–1571, 2021.
- [21] Y. Liao, Y. Li, M. Chen, L. Nordström, X. Wang, P. Mittal, and H. V. Poor, "Neural network design for impedance modeling of power electronic systems based on latent features," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 5968–5980, 2024.
- [22] Z. Feng, R. Pena-Alzola, M. H. Syed, P. J. Norman, and G. M. Burt, "Adaptive smith predictor for enhanced stability of power hardware-in-the-loop setups," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 10, pp. 10 204–10 214, 2023.
- [23] Z. Feng, R. Pena-Alzola, P. Seisopoulos, E. Guillo-Sansano, M. Syed, P. Norman, and G. Burt, "A scheme to improve the stability and accuracy of power hardware-in-the-loop simulation," in *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2020, pp. 5027–5032.
- [24] A. Shetgaonkar, T. Karmokar, M. Popov, and A. Lekić, "Enhanced real-time multi-terminal hvdc power system benchmark models with performance evaluation strategies," *CIGRE Science & Engineering*, vol. 32, pp. 1–29, 2024.

- [25] X. Liu, L. Qiu, Y. Fang, K. Wang, Y. Li, and J. Rodríguez, "Predictive control of voltage source inverter: An online reinforcement learning solution," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 7, pp. 6591–6600, 2024.
- [26] —, "Finite control-set learning predictive control for power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 7, pp. 8190–8196, 2024.

3. Полазне хипотезе

- *Примена deadbeat алгоритма у комбинацији са предиктивним управљањем може допринети смањењу THD фактора излазне наизменичне струје.* Док класично предиктивно управљање углавном оптимизује управљачку акцију на основу критеријумске функције узимајући у обзир више променљивих стања којима се управља, *deadbeat* приступ има за циљ да доведе једну управљану величину, у овом случају наизменичну струју, на референтну вредност у минималном броју корака, теоретски у једном дискретном временском интервалу. Ова стратегија омогућава веома брз одзив и високу прецизност праћења основног хармоника струје.
- *Коришћење алгоритама за идентификацију параметара система као што је псеудо-инверзија и Смитовог предиктора за сузбијање грешака услед кашњења система доприноси бољим перформансама deadbeat управљања.* Коришћењем метода псеудо-инверзије, могуће је у реалном времену процењивати електричне параметре као што су индуктивност и отпорност, који директно утичу на тачност математичког модела претварача. Увођењем Смитовог предиктора, који представља технику за компензацију константних и познатих кашњења у системима са повратном спрегом, могуће је превазићи негативне ефекте узроковане кашњењем због времена потребног за прорачуне и активирање управљачких сигнала.
- *Предложени систем управљања може задржати робусност и стабилност у присуству кашњења и поремећаја у моделу без значајног повећања прекидачке учестаности.* Употребом адаптивних техника и увођењем предиктора, систем постаје способан да реагује проактивно на изазове реалног окружења без потребе за значајним повећањем фреквенције прекидања. Ово је од посебног значаја, јер задржавање ниске фреквенције прекидања смањује укупне комутационе губитке и повећава ефикасност претварача. Такође, са смањењем прекидачке фреквенције смањује се удео трајања израчунавања у оквиру предиктивног алгоритма у односу на један прекидачки период.
- *Интеграцијом неуралних мрежа уз deadbeat управљање могуће је побољшати тачност праћења референтних сигнала у условима повећаног удела активног отпора у импеданси и варијација параметара система.* Код модуларних претварача са више напонских нивоа, повећана вредност активног отпора у линијској импеданси доводи до фазног помераја и разлике у амплитуди основног хармоника наизменичне струје у односу на референцу, што директно утиче на квалитет излазне снаге и доводи до повећавања THD-а. Неуралне мреже се, на основу података из симулација и *C-HIL* (*Control-Hardware-in-the-Loop*) тестова, могу обучити да компензују ове негативне ефекте препознавањем образаца у динамици система који нису експлицитно моделовани. На тај начин се побољшава тачност прорачуна управљачких сигнала, посебно у режимима рада где класичне аналитичке методе показују ограничења.

4. Научне методе истраживања

- Развијање математичког модела ММС-а. Дефинисање дискретног модела за имплементацију предиктивног и *deadbeat* управљања.
- Имплементација предиктивног управљања са и без *deadbeat* управљања у симулационом окружењу и њихово поређење.

- Имплементација предиктивног са *deadbeat* управљањем у експерименталном окружењу.
- Примена псеудо-инверзије за идентификацију параметара система и Смитовог предиктора за сузбијање грешака услед кашњења. Анализа стабилности система.
- Тренирање и имплементација неуралних мрежа, поготово у системима са повећаним уделом активног отпора у импеданси система.
- Тестирање алгоритма управљања уз помоћ *C-HIL* симулације.
- Развој лабораторијске поставке *MMC*-а на основу електрично-термичких симулација овог претварача и експериментална верификација управљачког система.

5. Очекивани научни допринос

- Развој алгоритма предиктивног у комбинацији са *deadbeat* управљањем за *MMC* са побољшаним *THD* карактеристикама и бржим одзивом на промене референце.
- Смањење утицаја промене параметара система на перформансе управљања.
- Комбинација *deadbeat* управљања и неуралне мреже у реалном времену као допринос повећању тачности праћења референце наизменичне струје уз прихватљиво повећање сложености алгоритма.
- Развој лабораторијске поставке *MMC*-а, верификација предложеног алгоритма управљања и потврда ефикасности алгоритма у реалним условима.

6. План истраживања и структура рада

- У првој фази биће извршено математичко моделовање *MMC* претварача са тестирањем различитих метода управљања попут примене класичних ПИД регулатора, као и основних предиктивних метода управљања.
- У другој фази биће реализована *C-HIL* симулација за проверу метода управљања развијених у првој фази.
- У трећој фази биће тестиран *deadbeat* алгоритам у комбинацији са предиктивним управљањем, и то у симулацијама на рачунару и *C-HIL* платформи. Такође ће бити имплементиране методе за процену вредности параметара система и компензацију кашњења у управљачком систему.
- У четвртој фази биће обучена неурална мрежа на основу резултата из претходне фазе. Тако формирана неурална мрежа ће затим бити интегрисана у постојећи управљачки алгоритам.
- Пета фаза биће посвећена дизајну и реализацији прототипа *MMC* претварача, његовом функционалном тестирању и експерименталној верификацији развијене структуре управљања.

На основу истраживања спроведеног у оквиру предложене методологије, у дисертацији ће бити истакнути кључни научни доприноси, са акцентом на њихов научни значај. Посебна пажња биће посвећена интеграцији *deadbeat* контроле са неуралним мрежама, чиме се тежи постизању вишеструких побољшања у раду модуларних претварача са више напонских нивоа, укључујући значајно смањење хармонијског изобличења излазне наизменичне струје.

Предложена решења имају велики потенцијал примене у реалним условима, пре свега у системима за пренос електричне енергије (нпр. *HVDC* мреже), као и у индустријским погонима који користе средњенапонске и високонапонске претвараче. У овим апликацијама, где су висок квалитет електричне енергије, ефикасност и поузданост рада од суштинског значаја, развијени алгоритми омогућавају прецизну регулацију активне и реактивне снаге засновану на тачном праћењу струје и брзом динамичком одзиву. На тај начин, резултати

овог истраживања не само да доприносе теоријском развоју управљачких стратегија, већ отварају простор за њихову практичну имплементацију.

7. Закључак и предлог

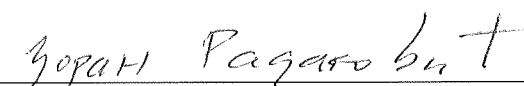
На основу приложене документације, усмене одбране теме докторске дисертације, као и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Милована Мајсторовића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

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 „Предиктивно управљање модуларним претварачима са више напонских нивоа”, односно на енглеском „Predictive control of modular multilevel 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 Миловану Мајсторовићу одобри израду докторске дисертације која ће бити написана на српском језику, а под називом „Предиктивно управљање модуларним претварачима са више напонских нивоа”, односно на енглеском језику „Predictive control of modular multilevel converters”, под менторством др Лепосаве Ристић, ванредног професора.

У Београду, 29. 7. 2025. год.

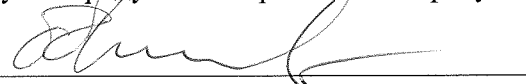
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Жељко Деспотовић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт „Михајло Пупин“


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


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


др Богдан Брковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет