

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Александра Аце Марковића.

Одлуком Наставно-научног већа бр. 75-29 од 16.01.2024 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Александра Аце Марковића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александар Ацо Марковић рођен је 6. новембра 1991. године у Завидовићима у Босни и Херцеговини. Основну школу у Шамцу (Република Српска) завршио је 2006. године као ученик генерације и носилац Вукове дипломе. Гимназију у Шамцу завршио је 2010. године такође као ученик генерације у носилац Вукове дипломе. У основној и средњој школи учествовао је и освајао награде на бројним такмичењима из математике и физике као и на спортским такмичењима у фудбалу, одбојци и кошарци.

Основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци уписао је 2010. године на одсеку за Електроенергетске и индустријске системе. Током студија више пута је награђиван за најбољег студента у генерацији на поменутом одсеку. Дипломски рад под насловом „Развој алгоритма модулације просторног вектора напона за примјену у електромоторним погонима“ одбранио је 2014. године са оценом 10. На основним студијама остварио је просечну оцену 9,43.

Мастер студије уписао је 2014. године на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци. Остварио је просечну оцену 10 током мастер студија а истом оценом одбранио је 2016. године и мастер рад под насловом „Алгоритми за директну контролу момента шестофазне асиметричне асинхроне машине“.

Докторске студије уписао је 2019. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на модулу Енергетски претварачи и погони. До сада је положио све испите као и друге обавезе предвиђене планом докторских студија са просечном оценом 10, сакупивши 120 ЕСПБ.

У периоду од 2015. до 2016. године радио је у предузећу „Институт за грађевинарство – ИГ“ Бања Лука на пословима пројектовања надземних водова и електричних инсталација у објектима. Од 2016. до 2017. радио је у ЈУ „Техничка школа“ Бања Лука као наставник стручно теоријске наставе. Од 2017. године запослен је у предузећу „Електропренос – Електропријенос БиХ“ а.д. Бања Лука на пословима испитивања енергетских и мерних трансформатора, уземљивачких система, термовизијским испитивањима као и другим видовима испитивања у трансформаторским станицама називних напона 110kV и већим где ради и данас. Године 2018. биран је у звање асистента на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци на Катедри за аутоматику. На студентским анкетама за период од 2018. до 2022. године оцењен је просечном оценом 4,7/5. Тренутно у допунском радном односу на Електротехничком факултету у Бањој Луци изводи вежбе на предметима Системи аутоматског управљања и Основи система аутоматског управљања. Године 2022. биран је у звање вишег асистента на Електротехничком факултету у Бањој Луци.

Аутор је четири научна рада, од којих је један рад објављен на међународној научној конференцији, један рад на домаћем стручном савјетовању, један рад у националном часопису међународног значаја (M24), те један рад у врхунском међународном научном часопису (M21).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је у току докторских студија положио следеће испите:

1. Микропроцесорско управљање електромоторним погонима (9 ЕСПБ) – оцена 10
2. Општа теорија електричних машина (9 ЕСПБ) – оцена 10
3. Микропроцесорско управљање енергетским претварачима (9 ЕСПБ) – оцена 10
4. Математичко моделовање физичко – техничких процеса (9 ЕСПБ) – оцена 10
5. Линеарна алгебра (9 ЕСПБ) – оцена 10
6. Стабилност електроенергетских система (9 ЕСПБ) – оцена 10
7. Електромагнетни прелазни процеси у електроенергетским системима (9 ЕСПБ) – оцена 10
8. Увод у научни рад (6 ЕСПБ) – оцена 10
9. Прелазне појаве у електричним машинама (9 ЕСПБ) – оцена 10
10. Енергетски претварачи (9 ЕСПБ) – оцена 10.

Кандидат је 2018. године изабран у звање асистента на Електротехничком факултету универзитета у Бањој Луци, где је изводио аудиторне и лабораторијске вежбе на следећим предметима: Системи аутоматског управљања, Основи система аутоматског управљања, Синтеза система аутоматског управљања, Нелинеарни системи, Управљање у реалном времену и уграђени рачунарски системи, Управљање у реалном времену, Увод у теорију система, Идентификација система, те на предмету Мултиваријабилни системи на мастер студијама.

Године 2022. биран је у звање вишег асистента на Електротехничком факултету универзитета у Бањој Луци где данас хонорарно изводи аудиторне и лабораторијске вежбе на предметима Системи аутоматског управљања и Основи система аутоматског управљања.

Дана 13.02.2024. године, кандидат је приступио одбрани рада за израду дисертације где је показао изузетно познавање проблематике у оквиру предложене области докторске дисертације. У склопу одбране приступног рада за израду дисертације, кандидат је изложио и резултате научно истраживачког рада проистеклог из истраживања везаног за тему докторске дисертације, а који су изложени у виду следећих научних чланака:

1. A. A. Markovic, S. Vukosavic, "Control of Series Impedance of Power Lines Using Power Flow Controller", *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, Vol 35, No 3, 2022, pp. 421-435.
2. A. A. Markovic, S. Vukosavic, "Novel Approach for Modeling and Attenuation of Power Waves in Large – Scale Power Systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol 155, Part B, 2024. (IF 5.2)
3. A. A. Марковић, М. Жарковић, Д. Милијевић, "Анализа простирања електромеханичких таласа у електроенергетском систему коришћењем софтвера АТР-ЕМТР", 36. Саветовање Cigre Србија, Златибор, Србија 2023, стр. 1596-1609.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу биографских података и изнесеног научноистраживачког рада кандидата може се закључити да је кандидат поред држања наставе на Електротехничком факултету у Бањој Луци, обављао и практичне послове везане за испитивање одређених елемената електроенергетског система и тако поред теоријског стекао и практично знање у вези са тематиком којом се бави предложена тема дисертације. На бази објављених научних чланака у вези са темом предложене докторске дисертације, закључује се да је кандидат обавио значајан научноистраживачки рад у овој области што је потврђено и репомеом научних часописа у којима су публиковани резултати истраживања. Будући да је кандидат положио све испите и успешно окончао све ваниспитне обавезе предвиђене планом и програмом докторских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, тиме су испуњени и формални услови за приступање изради докторске дисертације.

На основу наведеног, Комисија констатује да је кандидат у потпуности оспособљен и компетентан, као и да задовољава и све формалне услове за израду докторске дисертације под насловом „Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима“.

2. Предмет и циљ истраживања

Докторска дисертација се бави проблематиком електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима. Електромеханички таласи представљају феномен осциловања угла оптерећења синхроних генератора након поремећаја у електроенергетском систему [1-4]. Овакав приступ анализи електроенергетских система, те синтези одређених управљачких система као и подешавању електричних заштита је релативно нов [5-7]. Према томе, дисертација је савремена и бави се проучавањем модерних трендова у електроенергетским системима који су непрестано изложени кореним променама условљеним целокупним научно – техничким развојем друштва.

Предложено истраживање засновано је у намери да се остваре два основна циља. Први циљ је да се изложи нов приступ математичком моделовању електромеханичких таласа у односу на постојеће математичке моделе, при чему је такав приступ неопходан у новим, измењеним условима рада система. Идеја је да се до математичког модела дводимензионалног електромеханичког таласа дође употребом Ојлер – Лагранжове једначине са погодном изабраном Лагранжовом функцијом, по узору на класично математичко моделовање у временском домену [8-10]. Треба нагласити да се овакав приступ никада раније није користио у сврху извођења дводимензионалних таласа у електроенергетском систему, што представља додатни мотив за његово темељно изучавање. Нарочит акценат се ставља на универзалност приступа при извођењу математичког модела и могућност примене овог приступа на друге техничке системе. За разлику од наведеног, универзалног, приступа, постојећи математички модели у литератури базирани су стриктно на проучавању електроенергетских система [11],[12] или успостављању аналогија између електричних и

механичких система [13],[14], што у оба случаја резултује компликованим и неинтуитивним моделима. Предложени модел би требало да превазиђе ове недостатке.

Други циљ дисертације јесте да се пронађу адекватни механизми за сузбијање ширења електромеханичких таласа, као нежељене појаве, у великим електроенергетским системима и то са аспекта системског феномена а не са одговарајућег локалног аспекта како је то уобичајено [15-20]. Ово подразумева да се, анализом коефицијената рефлексије и трансмисије таласа, изведених на бази предложеног математичког модела, пронађу адекватне управљачке величине помоћу којих би се на, релативно једноставан и практично остварив начин, дејство поремећаја на остатак система могло сузбити или потпуно елиминисати. Након тога, циљ је да се дефинише функционалност и управљачко дејство уређаја који би био у стању да испуни тражене захтеве. Коначно, неопходно је извршити синтезу структуре и параметара управљачког система који би на адекватан начин испунио управљачке захтеве. Значај дисертације огледа се у чињеници да се примењује нов приступ моделовању и синтези управљачких дејстава неопходних у новим, измењеним условима рада електроенергетског система, што за крајњи циљ има увођење корективних дејстава заснованих на актуаторима који користе енергетске претвараче како би се сузбиле нежељене осцилације у систему, а самим тим повећала маргина стабилности система, његова поузданост и одрживост. Све ово директно утиче на побољшање квалитета испоруке електричне енергије потрошачима. Додатно, предложени начин извођења таласне једначине је нов у области анализе и синтезе електроенергетских система. То за последицу има могућност сагледавања одговарајућих системских феномена из другачијег угла, као и могућност коришћења сазнања из других научних и техничких области које се баве таласима.

Литература

- [1] D. Wang, N. Ma, C. Guo, "Characteristics of electromechanical disturbance propagation in non-uniform power systems," *IET Generation, Distribution and Transmission*, vol. 11, no. 8, pp. 1919-1925, May 2017.
- [2] Y. Xu, F. Wen, G. Ledwich, Y. Xue, "Electromechanical wave in power systems: theory and applications," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 163-172, 2014.
- [3] J. S. Thorp, C. E. Seyler, A. G. Phadke, "Electromechanical wave propagation in large electric power systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 614-622, Jun. 1998.
- [4] D. Wang, X. Wang, J. S. Thorp, "Study on electromechanical wave continuum model for power systems in mechanics," *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, QC, Canada, pp. 9, 2006
- [5] G. Tzounas, I. Dassios, F. Milano, "Frequency Divider as a Continuum," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 6, pp. 4970-4973, Nov. 2022.
- [6] A. Esmaeilian, M. Kezunovic, "Impact of electromechanical wave oscillations propagation on protection schemes," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 85-91, Januray 2016.
- [7] D. Huang, J. Qin, H. Liu, J. H. Chow, J. Zhao, T. Bi, L. Mili, Q. Yang, "An Analytical Method for Disturbance Propagation Investigation Based on the Electromechanical Wave Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 991-1001, March 2021.
- [8] D. Cline, "Variational Principles in Classical Mechanics – Third edition," University of Rochester, USA, August 2021.
- [9] J. Scherpen, D. Jeltsema, J. B. Klaassens, "Lagrangian modeling of switching electrical networks," *Systems & Control Letters*, vol. 48, pp. 365-374, 2003.

- [10] Z. Biolek, D. Biolek, "Euler-Lagrange Equations of Networks with Higher-Order Elements," *Radioengineering*, vol. 26, no. 2, pp. 397-405, June 2017.
- [11] D. Wang, X. Wang, Y. Fang, W. Hao, "Study on Dynamic Characteristics of Electromechanical Wave in the Continuum Model for Power System," *2006 International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China, pp. 1-7, 2006.
- [12] D. Wang, X. Wang, "Analysis on Electromechanical Disturbance Propagation in a Finite Length Uniform Chain Discrete Power System," *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, China, pp. 1-4, 2010.
- [13] M. Parashar, J. S. Thorp, C. E. Seyler, "Continuum Modeling of Electromechanical Dynamics in Large-Scale Power Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers*, vol. 51, no. 9, pp. 1-7, 2004.
- [14] A. J. Thomas, S. M. Mahajan, "Electromechanical Wave Analysis Through Transient Magnetic Modeling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2336-2343, Oct. 2009.
- [15] B. C. Lesieutre, E. Scholtz, G. C. Verghese, "Impedance matching controllers to extinguish electromechanical waves in power networks," *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, pp. 25-30 vol.1, 2002.
- [16] O. Agamalov, "Power Systems Oscillations Damping with Regard the Finite Speed of Propagation the Electromechanical Waves," *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 71-82, 2015.
- [17] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, J. H. Chow, A. Vahidnia, "Wave Aspect of Power System Transient Stability—Part I: Finite Approximation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2493-2500, July 2017.
- [18] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, J. H. Chow, A. Vahidnia, "Wave Aspect of Power System Transient Stability—Part II: Control Implications," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2501-2508, July 2017.
- [19] A. M. Shotorbani, A. Ajami, M. P. Aghababa, S. H. Hosseini, "Direct Lyapunov theory-based method for power oscillation damping by robust finite-time control of unified power flow controller", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 7, Issue: 7, July 2013
- [20] N. Tambey, M. L. Kothari, "Damping of power system oscillations with unified power flow controller (UPFC)", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, Issue 2, March 2003

3. Полазне хипотезе

Докторска дисертација полази од почетне претпоставке да је могуће извести математички модел дводимензионалног електромеханичког таласа на бази Ојлер – Лагранжове диференцијалне једначине другог реда, где се као лагранжијан користи разлика кинетичке и потенцијалне енергије у систему. Уколико би се хипотеза испоставила као тачна, тада би било могуће истом методом моделовати и друге таласне феномене који немају директну везу са електричним системима.

Додатно, на бази постојећих математичких модела електромеханичког таласа могуће је поставити хипотезу да се потискивање електромеханичког таласа може извести модулацијом коефицијената рефлексије и трансмисије таласа. Уколико би се у одговарајућу тачку електроенергетског система поставио адекватан уређај који би имао могућност смањења коефицијента трансмисије таласа, тада би се талас у значајно мањој мери пропагирао кроз остатак система. Другим речима, утицај поремећаја који је узроковао настанак таласа би се теоријски могао елиминисати у деловима система који се условно налазе иза уређаја

задуженог за модулацију коефицијента трансмисије таласа, посматрано у односу на тачку настанка таласа.

4. Научне методе истраживања

Доказивање полазне хипотезе везане за извођење математичког модела електромеханичког таласа на бази Ојлер – Лагранжове једначине могуће је обавити егзактним математичким методама. Овај приступ подразумева да се утврди разлика кинетичке и потенцијалне енергије разматраног дела електроенергетског система како би се формирала Лагранжова функција. Тако формирана Лагранжова функција треба да задовољи одговарајућу Ојлер – Лагранжову једначину. Као резултат ове математичке процедуре треба да се добије математички модел електромеханичког таласа. Провера добијеног резултата треба да се изврши директним упоређивањем добијеног математичког модела са постојећим, те да се на недвосмислен начин утврде сличности и евентуалне разлике. Даље је неопходно, повезивањем математичких резултата са знањима о реалном техничком систему, утврдити предности и евентуалне недостатке добијеног математичког модела, као и могућност примене овако добијеног модела за потребе формирања управљачког закона.

Са друге стране, методе истраживања везане за могућности потискивања електромеханичког таласа су базиране на принципима индукције и дедукције. Наиме, на бази дедуктивног метода могуће је извести закључак да електромеханички талас има могућност рефлексije и трансмисије будући да и сви други таласи имају ова својства. Са друге стране, коришћењем индуктивног метода заједно са математичким методама потребно је довести у везу коефицијенте рефлексije и трансмисије са одговарајућим величинама у електроенергетском систему. Овај поступак је сложен и захтева повезивање знања из различитих области електроенергетике као што су анализа електроенергетских система, управљање у електроенергетским системима, енергетска електроника и сл. Управљачки алгоритам који је резултат овог процеса треба да се провери путем рачунарских симулација. Сама методологија формирања рачунарских симулација треба да буде конципирана тако да се најпре симулирају једноставни феномени са поједностављеним деловима система. Уколико се на тај начин добију резултати који потврђују теоријска очекивања, тада је могуће формирати компликованије симулационе моделе који за циљ имају да симулирају, у што је могуће већој мери, делове реалних електроенергетских система у којима је могуће уочити појаве од интереса. Треба приметити да се због комплексности проблема и чињенице да се појава електромеханичких таласа може детектовати само у оквиру великих електроенергетских система, није могуће спровести експериментални метод верификације резултата.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће бити потврђена могућност извођења математичког модела дводимензионалног електромеханичког таласа на бази Ојлер – Лагранжове једначине, те да ће тако добијен модел бити упоредив са постојећим математичким моделима електромеханичког таласа, као и да ће предложени поступак извођења математичког модела бити једноставнији и интуитивнији у односу на постојеће методе. Додатно, очекује се да се овако установљена процедура математичког моделовања може лако применити и на друге системе, што би допринело једноставнијем и интуитивнијем извођењу математичког модела таласа у разним сферама науке.

Са аспекта могућности потискивања електромеханичких таласа, очекује се да предложени начин потискивања таласа да значајно боље резултате у односу на постојеће системе који се баве овом проблематиком. Ово очекивање је оправдано због свеобухватности метода

извођења управљачког закона који је базиран на управљању таласом за разлику од свих постојећих метода који су базирани на управљању само једном електричном величином у електроенергетском систему, а требало би да буде потврђено адекватним рачунарским симулацијама на погодним IEEE тестним системима. Очекује се да се предложени управљачки алгоритам може једноставно имплементирати у оквиру постојећих уређаја за контролу токова снага у електроенергетском систему што је веома битно са становишта изводљивости и смањења цене имплементације оваквог система.

6. План истраживања и структура рада

Истраживање се може спровести у неколико етапа. Пре свега потребно је доћи до математичког модела електромеханичког таласа примереном савремених мрежа. Добијени модел је неопходно упоредити са постојећим математичким моделима, те на основу тога доћи до закључка о предностима и недостацима предложеног модела.

На бази изведеног математичког модела потребно је одредити коефицијенте рефлексије и трансмисије електромеханичког таласа, будући да је коначан циљ спречавање ширења таласа кроз већи део електроенергетског система. Затим је неопходно повезати коефицијент трансмисије са реалним физичким величинама у електроенергетском систему, којима је могуће управљати на релативно једноставан и физички остварив начин. Потом је потребно дефинисати уређај који има могућност управљања датим физичким величинама у систему. Пожељно је да то буде неки од постојећих *FACTS* (енгл. *Flexible Alternating Current Transmission Systems*) уређаја. Коначно, потребно је формирати одговарајући управљачки закон како би се посредством адекватног уређаја постигао жељени коефицијент трансмисије који би као коначан циљ дао смањење амплитуде електромеханичког таласа у великом делу посматраног система.

Након што се математички опишу и изведу претходни кораци, приступа се изради одговарајућих симулационих модела којим би се потврдила теоријска очекивања. Симулационе моделе је прво потребно формирати за поједностављен систем како би се показали основни феномени и поткрепила теоријска очекивања. Након тога потребно је приступити изради сложеног симулационог модела за велики електроенергетски систем, пожељно на неком стандардном IEEE тестном систему, како би се на реалистичном систему показало функционисање предложеног управљачког алгоритма. Добијене резултате је неопходно упоредити са постојећим резултатима у литератури са критичким освртом.

Структуру рада потребно је усагласити са наведеним планом. С тим у вези, рад треба да буде подељен у засебне тематске и логичке целине кроз које је јасно могуће уочити имплементацију плана истраживања.

7. Закључак и предлог

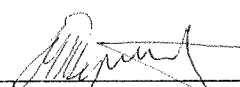
Предложена докторска дисертација кандидата Александра Аце Марковића представља веома изазовну и актуелну научну тематику. Потреба за повећавањем поузданости, флексибилности те повећањем маргина стабилности електроенергетског система је тренутно веома изражена а очекује се да ће у будућности бити још наглашенија. Стога, предложена тема је изузетно комплексна и истовремено савремена, тако да захтева повезивање знања и вештина из различитих области као што су електроенергетика, аутоматика и математика.

Увидом у биографске и библиографске податке кандидата, као и прегледом реализованих обавеза на докторским студијама, али и на бази излагања кандидата у оквиру приступног испита за одабрану теме дисертације, може се недвосмислено закључити да кандидат поседује широк дијапазон знања и вештина неопходних за успешну реализацију предложене теме дисертације. На основу досадашњег научноистраживачког и професионалног рада

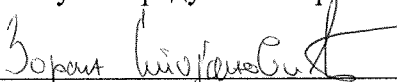
кандидата стиче се чврст утисак да је кандидат потпуно оспособљен и компетентан да одговори на све изазове писања докторске дисертације на предложеној тему.

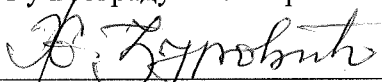
На основу наведеног, Комисија констатује да је тема докторске дисертације кандидата Александра Аце Марковића под насловом „Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима“ научно утемељена и предлаже Наставно научној већи Електротехничког факултета Универзитета у Београду да исту усвоји. Тема дисертације се може сврстати у ужу научну област управљање у електроенергетским системима. За ментора за израду теме докторске дисертације Комисија предлаже академика проф. др Слободана Вукосавића.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Младен Терзић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

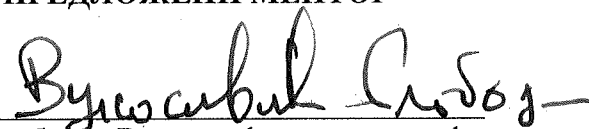

др Братислав Иричанин, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


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


др Жељко Ћуровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


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

ПРЕДЛОЖЕНИ МЕНТОР


академик др Слободан Вукосавић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
Српска академија наука и уметности