

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Станка Јанковића**.

Одлуком бр. 5032/07-3 од 3. новембра 2015. именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Станка Јанковића под насловом: **„Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“**.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је уписан на докторске студије 13. марта 2008. На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 2944/2 од 11. октобра 2007. Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/13-2007/5032.

Тему за израду докторске дисертације под насловом: *„Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“* и пријавио је 29. јануара 2015. На својој седници од 3. фебруара 2015. Комисија за студије трећег степена сагласила се са предлогом Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата и именовала за чланове проф. др Ивана Шкоклјева, проф. др Андрију Сарића и проф. др Дејана Тошића. На својој седници од 24. фебруара 2015. Наставно-научно веће (одлуком бр. 5032/07-1 од 4. марта 2015.) именовало је чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата, у саставу др Иван Шкоклев, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Андрија Сарић, редовни професор (Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука), др Дејан Тошић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет). Јавном усменом одбраном предложене теме докторске дисертације, одржаном 1. јула 2015. Комисија је закључила да се кандидат квалификовао за научно-истраживачки рад на предложеној теми и одобрила наслов теме: *„Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“*. На својој седници од 6. јула 2015. Комисија за студије трећег степена разматрала је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске

дисертације кандидата сагласила се и упутила га уз сугестије на усвајање Наставно-научном већу. На својој седници од 15. септембра 2015. (одлуком бр. 61206-3788/2-15) Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предложеној тему.

Кандидат је 8. октобра 2015. поднео докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена на својој седници од 13. октобра 2015. именовала је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације. На седници Наставно-научног већа од 27. октобра 2015. (одлуком бр.5032/07-3 од 3. новембра 2015.) именовало је чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Станка Јанковића под насловом „Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“, у саставу др Никола Рајаковић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Иван Шокљев, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Андрија Сарић, редовни професор (Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука), др Дејан Тошић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Предраг Стефанов, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

1.2. Научна област дисертације

Предложена тема: „Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“ спада у научну област „Електротехника и рачунарство“ и у ужу научну област „Електроенергетски системи“ за које је Електротехнички факултет - Универзитета у Београду матичан.

Предложени ментор, редовни професор др Никола Рајаковић испуњава све потребне услове и поседује све потребне компетенције за вођење предложене дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Станко Јанковић рођен је 1980. у Ужицу, где је завршио основну и средњу електротехничку школу. Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 1999. где је и дипломирао 2006. на Енергетском одсеку – смер за Електроенергетске системе са просечном оценом 8,14. Докторске студије уписује 2008. на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер Електроенергетске мреже и системи, где је положио све предвиђене испите са просечном оценом 9,9.

Од 2006. до 2015. био је запослен је у Јавном предузећу Електромрежа Србије где је обављао послове из области електроенергетских анализа у више различитих организационих јединица. Од 2015. запослен је у међународној консултанској компанији GORA-intec на позицији специјалисте за електроенергетске анализе, Бад Хомбург, Немачка.

За време трајања докторских студија објавио осам стучних радова на домаћим и међународним конференцијама и три научна рада у међународним журналима.

По позиву IEEE PES секције, подружнице за Србију и Црну Гору одржао је 27. децембра 2012. предавање на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на тему „Прорачун токова снага на великим рачунарским моделима - Токови снага кроз мале или нулте импедансе“ и 3. априла 2015. на тему: „Прорачун токова снага на великим рачунарским моделима – Примена комбиноване Newton-Raphson методе“.

Члан је међународних асоцијација IEEE и CIGRE где учествује у више радних група за писање техничких брошура. Сталани члан је Националног комитета CIGRE Србија.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Предложена дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, захвалницу, резиме на српском и енглеском језику, садржај, индексе табела и слика, списак скраћеница, десет поглавља, литературу, четири прилога и податке о аутору. Наслови поглавља су: 1. Увод, 2. Непотпуна LU декомпозиција Јacobian матрице, 3. Генеричка Newton-Raphson метода, 4. Комбинована Newton-Raphson метода, 5. Стопа конвергенције, 6. Поређење резултата прорачуна различитих Newton-Raphson метода, 7. Решавање прорачуна токова снага кроз кратке водове, 8. Генерални приступ прорачуна токова снага кроз кратке водове, 9. Имплементација алгорита за прорачун токова снага кроз кратке водове, 10. Закључак. Дисертација садржи 136 страница, 9 табела и 21 слику.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дата су уводна разматрања у актуелну порблематаку прорачуна токова снага на великим рачунарским симулационим моделима дефинисањем проблема који настају спајањем националих модела електроенергетских система. Досадашњи начини превазилажења дефинисане проблематике као и увођење нових решења су формулисани кроз три хипотезе:

- *Могућност убрзавања прорачуна тока снаге уз задржавање жељеног степена конвергенције.*
- *Претпоставља се да се уклањањем елемената са малим и нултим вредностима импенданси из прорачуна побољшава степен конвергенције.*
- *Прорачун токова снаге кроз елементе са малим или нултим вредностима импенданси.*

Даља разматрања актуелних проблема у циљу решавања истих, настављају у правцу увођења у научни приступ кроз писање докторске дисертације.

У другом поглављу дата су објашњења везана за постојање непотпуне LU (акроним, енг. lower upper) декомпозиције (позната као и LU факторизација) услед ограничености приказивања реалних бројева у рачунару. У овом поглављу дата је сугестија које елементе треба задржати приликом непотпуне LU декомпозиције помоћу дефинисаног производа специфицираног прелазног прага занемарења и норме реда. На овакав начин се постиже већа прецизност у прорачуну која је битна када се декомпонује матрица великих димензија.

У трећем поглављу је дат опис генеричке Newton-Raphson методе који укључује једначине за прорачун токова снага као и опис тока прорачуна користећи се овом нумеричком методом. У овом поглављу је наговештен проблем везан за време трајања прорачуна на симулационим моделима који садрже више од 5000 чворова.

У четвртом поглављу дат је опис комбиноване Newton-Raphson методе која представља увођење активне контроле у прорачуну LU декомпозиције и Јacobian матрице поредећи добијене резултате са специфицираним ограничењем стопе конвергенције (λ) и релативне грешке толеранције (ϵ).

У петом поглављу су дата објашњење и препоруке око одабира стопе конвергенције као и могуће последице које могу настати услед погрешног одабира стопе конвергенције. Такође је и дат илустративни пример са објашњењима тока прорачуна на моделу од 9189 чворова и специфицираним прелазним прагом занемарења 10^{-7} .

У шестом поглављу је седам модела електроенергетског система за прорачун токова снага, у распону од 100 до 20000 чворова, употребљено у компаративној анализи комбиноване, Shamanskii, генеричке (опште) и модификоване Newton-Raphson методе. Резултати поређења су дати табеларно и помоћу графика. Табеларно је приказано време потребно за прорачун Јacobian матрице и извођење LU декомпозиције у иницијалној итерацији као и укупно време итерације.

У седмом поглављу су кроз два илустративна примера систематично приказани прорачуни токова снага кроз кратке водове. Први пример показује прорачун токова снага кроз елементе мале или нулте импедансе на моделу система са четири чвора. Други илустративни пример се састоји од девет чворова и представља општији случај него први пример.

У осмом поглављу је дат генерализовани приступ прорачуна токова снага за кратке водове. Расподела генерисане реактивне снаге за еквивалентни генератор је описана у овом поглављу за случај да еквивалентни генератор обухвата више од једног PV чвора (слово P у ознаци PV представља ознаку за активну снагу, док слово V означава напон; тако да PV чвор представља сабирнице код којих је позната активна снага инјектирања и напон).

У деветом поглављу је приказана имплементација алгоритма за прорачун токова снага кроз кратке водове на моделу од 7000 чворова. При том је дата компаративна анализа губитака активне снаге електроенергетског система и зависност броја Newton-Raphson итерација за различите вредности прелазног прага за кратке водове.

Последње, десето поглавље, упоређује добијене резултате и полазне претпоставке на основу чега се потврђују полазне хипотезе и доносе закључци уз ограничавајуће факторе.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Предмет дисертације је отворено и актуелно питање оперативног планирања и планирања развоја електроенергетских система на бази симулација на компјутерским моделима електроенергетских система различитих величина, постављено у виду прорачуна токова снага који се решава оригиналним методама. Дисертација обухвата савремене аспекте на којима се заснивају прорачуни токова снага на симетричним моделима преносних система.

Поред оригиналности развијене методе, посебност даје и могућност лаке имплементације и примене чиме се омогућава лакша аутоматизација прорачуна токова снага на великим симулационим моделима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена при изради дисертације обухвата 46 библиографских јединица које су референтне и којима су обухватањени сви објављени научни радови кандидата.

У дисертацији је дат хронолошки ток најчешће употребљиване итеративне процедуре у прорачуну токова снага. Решење прорачуна тока снаге базираног на Newton-Raphson методи је дефинисано у касним шездесетим годинама прошлог века. До сада је публикован велики број различитих студија повезаних са решавањем прорачуна токова снага (Tinney W F; Hart C E; Power Flow Solution by Newton's Method; 1967.). Даља хронологија развоја Newton-Raphson методе реферише се на студије које имају везе са применом технике фиксне тачке (Meisel, J; Bernard, R D; Application of Fixed-Point Techniques to Load-Flow Studies; 1970.) и упрошћени Newton-Raphson метод у циљу редукације времена које је захтевано за ажурирање Jacobian матрице и LU декомпозиције, као што је распрегнути (Stott, B; Decoupled Newton Load Flow; 1972.) и брзи распрегнути (Stott B, Alsac O, Fast Decoupled Load Flow, 1974.) Newton метод. Почетком седамдесетих година прошлог века публикован је Newton-Raphson метод почетне тачке (Stott B, Effective starting process for Newton-Raphson load flows, 1971.). Са развојем рачунарске технике долази до публикације радова који се баве случајевима немогућности да се дође до решења услед лоших услова конвергенције (Iwamoto, S; Tamura, Y; A Load Flow Calculation Method for Ill-Conditioned Power Systems; 1981.), (Tripathy, S C; Prasad, G D; Malik, O P; Hope, G S; Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method; 1982.), (Overbye, T J; A power flow measure for unsolvable cases; 1994.), (Malcom, I; Pseudo-loadflow formulation as a starting process for the Newton Raphson algorithm, 2010.). У циљу минимизације времена потребног за прорачун долази до развоја нових метода за унапређени распрегнути прорачун тока снаге и упрошћени Newton-Raphson метод (Lee, S C; Park, K B; Flexible alternatives to decoupled load flows at minimal computational costs; 2002.). У најновијим истраживањима током 2013. публикује се модификација Newton-Raphson методе где су коришћени несклади у инјекцијама струја за PQ чворове (сабирнице са познатом вредности инјекције активне и реактивне снаге у прорачуну токова снага), док су несклад инјекција снаге коришћени за PV чворове (Kamel, S; Abdel-Akher, M; Jurado, F; Improved NR current injection load flow using power mismatch representation of PV bus; 2013.). Поређење распрегнутог прорачуна токова снага и Newton-Raphson методе са константним матрицама је публиковано 2013. (Ailson, P M; Adriano, F M; Newton-Raphson power flow with constant matrices: A comparison with decoupled power flow methods; 2013.). Током 2014. публикована је модификација Newton-Raphson методе која разматра ограничења генерације реактивне снаге (Lakshmi, S; Nagendra Rao, P S; A modified Newton-Raphson load flow scheme for directly including generator reactive power limits using complementarity framework; 2014.). Активна контрола стопе конвергенције, тј. задржавање стопе конвергенције изнад специфицираног ограничења током процедуре представља иновацију предложене комбиноване Newton-Raphson методе (Janković, S; Ivanović, B; Application of combined Newton-Raphson method to large load flow models; 2015.).

Кратки водови могу бити моделовани као водови чије реактансе су блиске нултој вредности. Овакво моделовање води у лоше нумеричко стање током LU декомпоновања Jacobian матрице великог електроенергетског система. Активни и реактивни токови снага кроз кратке водове могу бити представљени као непознате променљиве узимајући у обзир да је разлика између углова и падова напона између сабирница кратког вода једнака нули. Овакав приступ је препоручен у радовима који разматрају проблеме кратких водова у естимацијама стања (Monticelli, A; Garcia, A; Modeling zero impedance branches in power system state estimation; 1991.), (Monticelli, A; Electric power system state estimation; 2000.). У раду кандидата (Ivanovic, B; Jankovic, S; An approach to power flow calculation through small or zero impedance lines; 2012.) презентује приступ помоћу кога се чворови кратких водова спајају у један чвор чиме се избегава моделовање кратких водова као водови чија је реактанса блиска нултој вредности и као представљање токова активне и реактивне снаге кроз кратке водове као непознате променљиве. Углови и напони се рачунају са овако спојеним чворовима помоћу прорачуна нелинеарног система једначина. Користећи се оваквим приступом, редукован је број

променљивих који се прорачунава у Newton-Raphson итеративној методи у поређењу са приступом кој је дат у (Monticelli, A; Garcia, A; Modeling zero impedance branches in power system state estimation; 1991.). У овом случају Newton-Raphson итеративни прорачун је стабилнији услед редукције броја непознатих променљивих.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Највећи захтев у времену приликом прорачуна токова снага користећи се Newton-Raphson методом је LU декомпозиција Jacobian матрице. Циљ примењене комбиноване Newton-Raphson методе је да оптимизује број LU декомпозиција Jacobian матрице током итеративне процедуре узимајући у обзир степен конвергенције и време трајања прорачуна. Степен конвергенције се проверава током итеративне процедуре и ако је степен испод прописане вредности, Jacobian матрица се прорачунава и њена LU декомпозиција се изводи. Иначе, ако степен конвергенције остане изнад специфициране вредности, употребљава се иста декомпонована Jacobian матрица у кораку замене напред-назад. На овакав начин је контролисан степен конвергенције. Активна контрола стопе конвергенције, тј. задржавање стопе конвергенције изнад специфицираног ограничења током процедуре представља иновацију предложене комбиноване Newton-Raphson методе.

Мале или нулте импедансе водова често узрокују дивергенцију или погрешну конвергенцију у прорачуну токова снага. Импеданса спојних поља је скоро увек једнака нултој вредности, док је импеданса водова који повезују генераторске јединице са високонапонским сабирницама у суседним постројењима обично веома мала. Метода прорачуна токова снага кроз кратке водове има за циљ да представи приступ у коме се чворови повезани малим или нултим импедансама спајају у један чвор, а затим се решава систем нелинеарних једначина за прорачун токова снага без ових водова. Након успешног решења нелинеарног система једначина у прорачуну токова снага израчунавају се токови снаге кроз мале или нулте импедансе помоћу система линеарних једначина. Главна предност решавања система линеарних једначина у поређењу са решавањем система нелинеарних једначина је та што се линеарни систем решава у једном кораку без итеративне процедуре.

3.4. Применљивост остварених резултата

Применљивост остварених резултата на смањење времена потребног за прорачун токова снага представља ефикасно средство у оперативном планирању рада електроенергетског система на симулационим моделима који садрже више од 5000 чворова. Време прорачуна токова снага постаје веома битно у анализама рада електроенергетских система са великим утицајем обновљивих извора.

Резултати истраживања чине прорачун токова снага више отпорнијим на проблеме дивергенције узрокованих кратким водовима. Ово је веома погодно за DACF моделе (модел за анализу загушења за дан унапред, енг. Day Ahead Congestion Forecast, акроним DACF) за прорачун токова снага који се праве на свакодневном нивоу, нарочито због DACF модела за прорачун токова снага који ће бити прављени за свих 24 сата током дана.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је достигао ниво оспособљености за научни рад. Кандидат је способан да самостално прати актуелну и референтну научну литературу, да предлаже и реализује истраживања са научним доприносом.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Кандидат је постигао следеће научне доприносе у области истраживања токова снага на великим симулационим моделима:

- развијена је нова метода за прорачун токова снага која је базирана на активној контроли LU декомпозиције у Newton-Raphson итеративној процедури,
- развијена је нова метода за прорачун токова снага кроз мале или нулте импедансе.

За разлику од досадашњих метода помоћу нових метода могуће је скратити потребно време за прорачун токова снага и при том не нарушити степен конвергенције. Развојем нове методе за прорачун токова снага кроз мале или нулте импедансе омогућено је да се добију вредности активних и реактивних снага кроз петљасту мрежу сачињену од чворова који су повезани кратким водовима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Комисија констатује да је кандидат коришћењем научних доприноса у тачки 4.1 потврдио полазне хипотезе истраживања из тачке 2.2 у смислу да је:

- увођењем активне контроле у прорачуну LU декомпозиције и Jacobian матрице остварено убрзање прорачуна токова снага,
- сажимањем чворова који су повезани кратким водовима у еквиваленти чвор побољшава се степен конвергенције нелинеарног система једначина у прорачуну токова снага и
- помоћу решавања линеарног система једначина могуће је доћи до вредности активних и реактивних токова снага кроз мале или нулте импедансе

чиме је унапредио ниво досадашњих научних знања.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси дисертације верификовани су публикацијама разврстаним према категоријама:

Категорија M21:

1. **Stanko Janković**, Bojan Ivanović, *Application of combined Newton–Raphson method to large load flow models*, Electric Power Systems Research, vol. 127, pp. 134-140, 2015, **IF: 1.749**, ISSN: 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.05.024>

Категорија M23:

1. Војан Ivanović, **Stanko Janković**, Cvijetko Zepinić, *Wind power plant energy control and evacuation in Eastern Herzegovina*, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 5, Iss. 4, pp. 041808, 2013, **IF: 0.904**, ISSN 1941-7012, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4813063>

Категорија M51:

1. **Станко Јанковић**, Дејана Поповић Миловановић, Владимир Милић, *Примена Q-V модалне анализе у испитивању стабилности напона електроенергетског система*, Енергија, економија, екологија, година 17, број 3-4, стр. 48-55, 2014, ISSN: 0354-8651

Категорија M52:

1. **Станко Јанковић**, Драгутин Саламон, *Утицај земљоводног ужета у прорачуна струје једнополног земљоспоја*, Електропривреда, година 63, број 3, стр. 235-240, 2011, ISSN 0013-5755

Категорија M63:

1. **Станко Јанковић**, Владимир Ђикић, Дејан Кнежевић, Александар Марјановић, Бранка Костић, Александар Николић, Саша Минић, *Мониторинг квалитета електричне енергије преносног система Републике Србије*, 32. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 2015, ISBN: 978-86-82317-77-7
2. **Станко Јанковић**, Владимир Ђикић, Лидија Коруновић, Бранка Костић, Предраг Стефанов, Жељко Ђуришић, *Оцена квалитета електричне енергије код ветрогенератора везаних на електроенергетски систем*, 16. симпозијум CIGRE Србија „Управљање и телекомуникације у електроенергетском систему“, Кладово, 2014, ISBN: 978-86-82317-75-3
3. Владимир Милић, Срђан Суботић, Исмар Синановић, Душко Аничкић, **Станко Јанковић**, Милош Ракић, *Имплементација WAMS уређаја у ЕЕС Србије*, 16. симпозијум CIGRE Србија „Управљање и телекомуникације у електроенергетском систему“, Кладово, 2014, ISBN: 978-86-82317-75-3
4. **Станко Јанковић**, Драгутин Саламон, *Утицај земљоводног ужета у прорачуна струје једнополног земљоспоја*, 30. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 2011, ISBN: 987-86-82317-69-2
5. **Станко Јанковић**, Милан Савић, *Употреба програмског пакета DigSILENT PowerFactory за прорачун пренапона услед атмосферског пражњења*, 30. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 2011, ISBN: 987-86-82317-69-2
6. **Станко Јанковић**, Дејана Поповић Миловановић, Владимир Милић: *Утицај терцијера у прорачуну струје кратког споја у рачунарском моделу*, 29. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 2009, ISBN: 978-86-82317-67-8

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Након детаљног прегледа ове дисертације Комисија је констатовала да су у њој постигнути нови научни доприноси и да је проблематика у својој суштини савремена и оригинална. Поред тога Комисија је констатовала да је дисертација заснована на референтним библиографским јединицама, да је коришћена метода адекватна и да резултати доприносе научној области "Електротехника и рачунарство" и ужој научној области "Електроенергетски системи" и да су применљиви у пракси. Комисија оцењује да је кандидат способан за самостални научни рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Алгоритми за унапређење конвергенције у прорачуну токова снага на великим симулационим моделима“ кандидата **Станка Јанковића** прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 10. новембар 2015.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



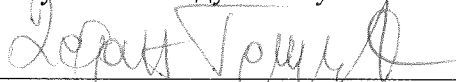
др Никола Рајаковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Иван Шкокљев, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Андрија Сарић, редовни професор
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука



др Дејан Тошић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Стефанов, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет