

## ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА НОВИ САД

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовоа комисију</p> <p>Решењем бр. 012/199/1-2017, од 27. 04. 2017. године, декан Факултета техничких наука, именовоа је комисију за оцену и одбрану докторске дисертације.</p> <p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. др <b>Раде Дорословачки</b>, редовни професор, математика, 01. 04. 2000, Факултет техничких наука, Нови Сад, председник,</li> <li>2. др <b>Драган Поповић</b>, редовни професор, електроенергетика, 13. 10. 2004, Факултет техничких наука, Нови Сад, члан,</li> <li>3. др <b>Душко Бекут</b>, редовни професор, електроенергетика, 13. 10. 2004, Факултет техничких наука, Нови Сад, члан,</li> <li>4. др <b>Владимир Катић</b>, редовни професор, енергетска електроника, машине и погони и обновљиви извори електричне енергије, 30. 10. 2002, Факултет техничких наука, Нови Сад, члан,</li> <li>5. др <b>Драган Тасић</b>, редовни професор, електроенергетика, 20. 3. 2007, Електронски факултет, Ниш, члан,</li> <li>6. др <b>Марија Прица</b>, доцент, електроенергетика, 01. 06. 2014, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA, члан,</li> <li>7. др <b>Андреја Сарић</b>, редовни професор, електроенергетика, 01. 01. 2015, Факултет техничких наука, Нови Сад, ментор.</li> </ol>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Име, име једног родитеља, презиме: Лука, Владимир, Стрезоски.</li> <li>2. Датум рођења, општина, држава: 02.02.1990, Нови Сад, Србија.</li> <li>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив: Факултет техничких наука, Нови Сад, Енергетика, електроника и телекомуникације, Електроенергетика – системи, дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства – мастер</li> <li>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:</li> </ol>

2014, Енергетика, електроника и телекомуникације

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: /

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: /

### **III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Прорачун комплексних кратких спојева неуравнотежених дистрибутивних мрежа са дистрибуираним енергетским ресурсима

### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графика и сл.

У дисертацији је предложен нов метод за прорачун комплексних кратких спојева у активним, неуравнотеженим дистрибутивним мрежама великих димензија. Предложеним методом је могуће прорачунавати комплексне кратке спојеве са произвољно изабраним бројем чворова и бројем фаза захваћених кратким спојевима, без претходног извођења услова комплексног кратког споја. Различити кратки спојеви дефинишу се једноставном инспекцијом комплексног кратког споја. Поред тога, сви елементи дистрибутивне мреже моделовани су довољно прецизним моделима, укључујући и савремене дистрибуиране енергетске ресурсе (ДЕР). Посебна пажња посвећена је овим елементима и извођењу њихових модела погодних за прорачуне кратких спојева мрежа великих димензија, с обзиром да ти модели до сада нису били развијени, а број ових уређаја у дистрибутивним мрежама је све већи. Предложеним методом могуће је прорачунавати неуравнотежене системе у несиметричним режимима пре кратког споја, а прорачун се врши у домену симетричних компоненти. Ова чињеница чини предложени метод изузетно брзим и погодним за "on-line mode" дистрибутивног менаџмент система (ДМС). Нумерички резултати на неколико репрезентативних мрежа јасно приказују предност предложеног метода у односу на постојеће методе за прорачуне кратких спојева дистрибутивних мрежа.

Дисертација се састоји из следећих поглавља:

1. Увод
2. Активне дистрибутивне мреже
3. Модели елемената традиционалних дистрибутивних мрежа за прорачун кратких спојева
4. Модели ДЕР за прорачун режима дистрибутивних мрежа с кратким спојевима
5. Општа разматрања дистрибутивних мрежа с комплексним кратким спојевима
6. Преглед постојећих репрезентативних поступака за прорачун кратких спојева
7. Прорачун генерализованог  $\Delta$ -кола
8. Ток прорачуна режима неуравнотежене дистрибутивне мреже с комплексним кратким спојем
9. Нумеричка верификација предложеног поступка за прорачун комплексних кратких спојева
10. Закључак и предлози за нова истраживања
11. Прилог
12. Литература

Физички опис рада: 12 поглавља, 110 страна, 70 цитата, 11 табела, 44 слике, 0 графика, 1 прилог

## V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У уводу (глава 1) сажето је дат преглед истраживане области и садржаја докторске дисертације на основу којег читалац може да стекне знања потребна за разумевање материје којом се кандидат бави у докторској дисертацији.

У глави 2 описана је структура активних дистрибутивних мрежа, а посебна пажња је посвећена сажетом опису начина рада различитих дистрибуираних енергетских ресурса (ДЕР).

У глави 3 дати су математички модели елемената традиционалних дистрибутивних мрежа.

У глави 4 дати су математички модели свих врста ДЕР. Посебна пажња је посвећена извођењу математичких модела савремених ДЕР, као што су ДЕР двоструког напајања – "*Doubly Fed Induction Machine*" (ДФИМ) и ДЕР повезани на мрежу преко уређаја енергетске електронике "*Inverter Based Distributed Energy Resource*" (ИБДЕР), с обзиром да ови модели до сада нису били развијени.

У глави 5 дат је општи опис прорачуна режима дистрибутивних мрежа с комплексним кратким спојевима, који се ради принципом декомпозиције/суперпозиције и састоји се од четири декомпозиције.

У глави 6 дат је преглед четири репрезентативна поступка за прорачун кратких спојева. Први поступак заснован је на моделовању мреже матрицом адмитанси – на чворовима заснован поступак; други поступак заснован је на процедури сумирања струја и корекција напона (ССКН) – на гранама заснован поступак; трећи поступак заснован је на моделовању мреже методом контурних струја, док је четврти поступак заснован на "*Equivalent Voltage Source – EVS*" процедури предложеној у међународном стандарду за прорачун кратких спојева. Такође, укратко су описане предности и мане сваког од ових поступака.

У глави 7 предложен је нови концепт генерализованог  $\Delta$ -кола, које омогућује интеграцију савремених ДЕР у прорачун кратких спојева. Затим је дат и поступак за прорачун неуравнотежених дистрибутивних мрежа с комплексним кратким спојевима које садрже савремене ДЕР.

У глави 8 дат је блок-дијаграм који представља ток прорачуна неуравнотежених дистрибутивних мрежа с комплексним кратким спојевима које садрже савремене ДЕР.

У глави 9 дата је нумеричка верификације предложеног поступка, на неколико тест мрежа, чији је број чворова у распону од 13 до 10000. Резултати показују велике предности предложеног поступка у односу на све до сада развијене поступке.

У глави 10 дати су закључци докторске дисертације и могући правци будућег рада у предметној области.

У глави 11 дат је прилог којим се није желео оптерећивати основни текст докторске дисертације.

У глави 12 дат је списак литературе коришћене за израду докторске дисертације.

## VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРској ДИСЕРТАЦИЈИ

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

1. Luka V. Strezoski, M. Prica, and K.A. Loparo, "Generalized  $\Delta$ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generators in Real-Time Short-Circuit Calculations", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PP, No. 99, pp. 1-9, October 2016, DOI 10.1109/TPWRS.2016.2617158. (M21)
2. Luka V. Strezoski and M. D. Prica, "Real-Time Short-Circuit Analysis in Large-Scale Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 4, No. 2, April 2017, pp.243-251. (M51)
3. Luka V. Strezoski, V.C. Strezoski, M. Prica, and K.A. Loparo, "The Need for Advanced Modeling and Calculations of Basic EMS and DMS Applications for Electronically Coupled Energy Resources", *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Champagne, IL, USA, Feb. 23-24, 2017. (M33)

4. Luka V. Strezoski, M. Prica, and K.A. Loparo, "Emerging Distribution Systems: Modeling Challenges in Faulted Conditions", *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, Feb. 9-11, 2017. (M33)
5. Luka V. Strezoski, A. Sajadi, M. Prica, and K.A. Loparo, "Distribution System Operational Challenges Following Integration of Renewable Generation", *IEEE Energy Tech*, Cleveland, OH, USA, Nov. 28-30, 2016. (M33)
6. A. Sajadi, Luka V. Strezoski, R.M. Kolacinski, and K.A. Loparo, "Transmission System Planning for Integration of Renewable Electricity Generation Units" *IEEE Energy Tech*, Cleveland, OH, USA, Nov. 28-30, 2016. (M33)
7. Luka V. Strezoski, V. A. Katic, B. Dumnic, and M. Prica, "The Sub-Transient, Transient and Steady-State Models for Three-Phase Inverter Based Distributed Generators for the Purpose of Real-Time Short-Circuit Analysis", *The 10<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution, and Energy Conversion (MEDPOWER 2016)*, Belgrade, Serbia, Nov. 6-9, 2016. (M33)
8. Luka V. Strezoski, V. A. Katic i B. Dumnic, "Modelovanje i proračun kratkih spojeva distributivnih mreža sa distribuiranim generatorima zasnovanim na trofaznim invertorima", *X Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učesćem*, CIRED Srbija, Vrnjacka Banja, Serbia, 26-30 Sept. 2016. (M63)
9. Luka V. Strezoski, V. A. Katic, B. Dumnic, and M. Prica, "Short-Circuit Modeling of Inverter Based Distributed Generators Considering the FRT Requirements", *IEEE North American Power Symposium (NAPS 2016)*, Denver, CO, USA, Sept. 18-20, 2016. (M33)
10. Luka V. Strezoski and M. Prica, "Calculation of Relay Currents in Active Weakly-Meshed Distribution Systems", *IEEE Clemson University Power System Conference*, Clemson, SC, USA, 2016. (M33)
11. Luka V. Strezoski and M. Prica, "Real-Time Short-Circuit Analysis of Active Distribution Systems", *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Champagne, IL, USA, 2016. (M33)
12. Luka V. Strezoski and M. Prica, "The Influence of Load Modeling on Distribution Protective Relay Current", *GEARED Student Workshop*, Charlotte, NC, USA, 2015. (M33)

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Сви до сада развијени поступци за прорачун кратких спојева дистрибутивних мрежа имају следећа три недостатка:

1. Не постоје јасно утврђени и опште прихваћени модели за ДФИМ и ИБДЕР, погодни за прорачуне кратких спојева дистрибутивних мрежа великих димензија;
2. С обзиром на природу ДФИМ и ИБДЕР, они не могу бити интегрисани у традиционалне прорачуне кратких спојева, засноване на концепту традиционалног  $\Delta$ -кола;
3. Свим до сада развијеним поступцима за прорачун кратких спојева дистрибутивних мрежа потребно је предефинисати, односно унапред изводити услове квара врло сложеним поступцима (у виду комплексних формула) за сваки кратак спој.

Да би се успешно превазишли ови недостаци, следећи циљеви су постигнути у овој дисертацији:

1. Развијени су математички модели за ДФИМ и ИБДЕР за потребе прорачуна кратких спојева дистрибутивних мрежа великих димензија;
2. Развијен је нови концепт генерализованог  $\Delta$ -кола који омогућује интеграцију модела ДФИМ и ИБДЕР у прорачуне кратких спојева;
3. Унапређена је идеја каноничног модела за опис комплексних кратких спојева за потребе активних дистрибутивних мрежа великих димензија;
4. Коришћена је унапређена верзија поступка ССКН (УССКН) за прорачун стања вишефазног, неуравнотеженог генерализованог  $\Delta$ -кола и у њега је интегрисан опис комплексног кратког споја из тачке 3.

Реализацијом ових циљева, развијен је један ригидан, робустан и брз поступак за прорачун комплексних кратких спојева у неуравнотеженим дистрибутивним мрежама великих димензија, са интегрисаним ДЕР савремених технологија.

Ригидност предложеног поступка потврђена је тиме што је он тестиран на врло сложеном моделу дистрибутивне мреже, односно сваки елемент мреже је уважен и моделован прецизним математичким моделом. Нарочито су наглашени модели савремених ДЕР, као што су ДФИМ и ИБДЕР, који су моделовани довољно прецизно, али у исто време и довољно једноставно, што чини предложени поступак погодним за прорачуне дистрибутивних мрежа великих димензија, које садрже и велики број ДЕР модерних технологија. Ови модели изведени су на основу захтева ("*Fault Ride-Through – FRT*") ФРТ датих у Правилима о погону дистрибутивних мрежа, па су тиме испуњени сви захтеви које та правила налажу.

Робусност развијеног поступка огледа се у томе да се њиме могу прорачунавати најједноставније до најсложенијих мрежа с подједнаком лакоћом. Такође, сложеност кратког споја не утиче на ефикасност и прецизност прорачуна. Користећи поступак предложен у овој докторској дисертацији, било како сложен комплексни кратак спој могуће је решити са подједнаком лакоћом и конзистентношћу, без претходног сложеног предефинисања услова квара. Предложеним поступком комплексни кратки спојеви дефинишу се једноставном инспекцијом.

Брзина прорачуна предложеним поступком тестирана је на неколико дистрибутивних мрежа врло великих димензија. У докторској дисертацији је показано да се читаво стање дистрибутивне мреже

са преко 10000 трофазних чворова, с комплексним кратким спојем, прорачунава за мање од 70 милисекунди. Ово време упоређено је с временом прорачуна потребним коришћењем поступка ("Hybrid Compensation Method") ХКМ. Показано је да је предложени поступак скоро два пута бржи. Поступак ХКМ је изабран за ово поређење као најбржи међу свим постојећим поступцима за прорачун кратких спојева дистрибутивних мрежа.

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Докторском дисертацијом су свеобухватно, систематично и коректно:

- 1) описани постојећи методи за прорачун режима мрежа с кратким спојевима и детаљно су описане њихове предности и недостаци у случају примене на савременим дистрибутивним мрежама;
- 2) предложени нови модели за представљање савремених ДЕР за потребе прорачуна кратких спојева у дистрибутивним мрежама великих димензија;
- 3) предложен нови концепт генерализованог  $\Delta$ -кола који омогућује интеграцију савремених ДЕР у прорачуне кратких спојева;
- 4) унапређена идеја каноничног модела и примењена за прорачун савремених, активних дистрибутивних мрежа с комплексним кратким спојевима;
- 5) развијен ригидан, робустан и брз поступак за прорачун комплексних кратких спојева у неуравнотеженим дистрибутивним мрежама великих димензија, са интегрисаним ДЕР савремених технологија;
- 6) развијени поступак је успешно примењен на неколико тест мрежа, у којима је број чворова у распону од 13 до 10000. Показане су велике предности предложеног метода у односу на све до сада развијене методе;
- 7) дати закључци и предлози за даља истраживања.

Тумачење закључака је јасно, недвосмислено и истраживачки коректно. Сви добијени резултати су стављени у добар контекст и приказани прегледно.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме  
Докторска дисертација је у потпуности написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе  
Докторска дисертација садржи све битне елементе.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци  
У докторској дисертацији су прво предложени модели погодни за представљање савремених ДЕР, као што су ДФМ и ИБДЕР, у прорачунима кратких спојева. Ови модели, погодни за дистрибутивне мреже великих димензија до сада нису постојали. Затим је предложен нови концепт генерализованог  $\Delta$ -кола које омогућује интеграцију савремених ДЕР у прорачуне кратких спојева. Ова интеграција није могућа коришћењем традиционалног  $\Delta$ -кола. На крају је предложен нови поступак за прорачун неуравнотежених дистрибутивних мрежа великих димензија које садрже савремене ДЕР. У докторској дисертацији је показано да је овај поступак много ефикаснији од свих до сада развијених поступака за прорачун кратких спојева дистрибутивних мрежа, како по прецизности прорачуна, тако и по времену потребном за прорачун.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања  
Докторска дисертација нема недостатака који би имали утицај на остварене резултате истраживања.

<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
<p>- <b><u>Да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана</u></b></p> <p>На основу претходно изнетих чињеница, Комисија предлаже да се докторска дисертација под називом „Прорачун комплексних кратких спојева неуравнотежених дистрибутивних мрежа са дистрибуираним енергетским ресурсима“ кандидата Луке Стрезоског прихвати и кандидату одобри одбрана.</p>

У Новом Саду

31.05.2017.

---

др Раде Дорословачки, ред. проф. – председник

---

др Драган Поповић, ред. проф. – члан

---

др Душко Бекут, ред. проф. – члан

---

др Владимир Катић, ред. проф. – члан

---

др Драган Тасић, ред. проф. – члан

---

др Марија Прица, доцент – члан

---

др Андрија Сарић, ред. проф. – ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.