

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата  
мр Бранка Максимовића, дипл. инж. електротехнике**

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 24-173/9 од 12. фебруара 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Бранка Максимовића, дипл. инж. електротехнике, под насловом **“Статичка естимација експлоатационих радних режима делимично мониторисаних несиметричних електроенергетских мрежа”**.

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија подноси Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку следећи

### **ИЗВЕШТАЈ**

#### **1. ЗНАЧАЈ И ДОПРИНОС ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ СА СТАНОВИШТА АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОДРЕЂЕНОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ**

Статичка естимација стања је основна функција која одређује експлоатациони радни режим електроенергетске мреже (преносне, дистрибутивне или микро), а који даље служи као основа за проблеме анализе, експлоатације, управљања и регулације тих мрежа. То значи да је и квалитет решавања тих проблема доминантно одређен квалитетом добијеног актуелног радног режима, што указује на велики значај статичке естимације стања.

Основни доприноси докторске дисертације у овој области су:

- Доказана могућност примене (са становишта функционалности и нумеричке ефикасности) метода суме отежаних средње-квадратних одступања (WLS – "Weighted Least Square") за статичку естимацију стања у несиметричним мрежама, какве су по правилу дистрибутивне и микро мреже.
- Предложен и доказан ефикасан начин генерисања минималног броја псеудо мерења у ситуацијама када мерења у реалном времену нису расположива, а у циљу постизања минималне обсервабилности електроенергетске мреже. Такве ситуације се најчешће јављају у случају немониторисаних потрошача и дистрибуираних извора електричне енергије (као што су ветро генератори, соларни панели, мини/микро хидроелектране и други).
- Интегрисан модел за реалокацију псеудо мерења у статичку естимацију стања кроз јединствен конвергециони процес.

- Предложене потребне модификације стандарних алгоритама заснованих на WLS критеријуму за примене у несиметричним (трофазним) радним режимима. Такође, предложени су робусни конвергентни алгоритми, где утицај нивоа несиметрије не деградира глобалне перформансе трофазног статичког естиматора стања.
- Предложен ефикасан начин уважавања утицаја корелираних мерења у реалном времену и псеудо мерења у алгоритму статичке естимације стања. Коefицијенти корелације се израчунавају на основу расположивих података из историјске базе података (или подаци из временске прогнозе), при чему је њихова класификација у карактеристичне кластере извршена применом вештачких неуралних мрежа. Такође, прогнозе потрошње/генерисања активне и реактивне снаге се добијају из екстерних улаза применом вештачких неуралних мрежа.

## 2. ОЦЕНА ДА ЈЕ УРАЂЕНА ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА РЕЗУЛТАТ ОРИГИНАЛНОГ НАУЧНОГ РАДА КАНДИДАТА У ОДГОВАРАЈУЋОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ

Имајући увид у актуелно стање у изучавању проблема статичке естимације стања електроенергетских система, Комисија констатује да је докторска дисертација кандидата мр Бранка Максимовића резултат оригиналног научног рада и да садржи оригиналне научне резултате који нису били предмет до сада објављених радова у овој области.

## 3. ПРЕГЛЕД ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА РАДА КАНДИДАТА У ОДРЕЂЕНОЈ НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ

Резултати докторске дисертације презентовани су у два рада, и то један у водећем међународном часопису са SCI листе и један на домаћој конференцији са међународним учешћем, респективно:

1. A. Ranković, **B. M. Maksimović** and A. T. Sarić, "A Three-Phase State Estimation in Active Distribution Networks", *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, No. 1, pp. 154-162, January 2014. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.07.001 [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.001> (**M21, 8 бодова**, ранг часописа у области Engineering, Electrical & Electronic: **14/243**, Impact Factor за 2012. годину: **3,432**).
2. А. Ранковић и **Б. М. Максимовић**, "Естимација стања у микро мрежама са ветрогенераторима и фотонапонским електранама", *Зборник радова 57. конференције ЕТРАН-а*, Секција за електроенергетику, Рад ЕЕ 2.6, стр. 1-6, Златибор, Србија, Јун 3-6, 2013. (**M63, 0,5 бодова**).

## 4. ОЦЕНА О ИСПУЊЕНОСТИ ОБИМА И КВАЛИТЕТА У ОДНОСУ НА ПРИЈАВЉЕНУ ТЕМУ

Докторска дисертација кандидата мр Бранка Максимовића написана је на IX+122 стране, и обухвата увод, шест глава, закључак, литературу и додатак. У оквиру литературе наведено је 137 библиографских јединица, укључујући и радове аутора. У докторској дисертацији има 37 слика и 18 табела.

У уводу је изложен значај проблема трофазне статичке естимације стања у анализи, експлоатацији и управљању електроенергетских мрежа. Дат је преглед садржаја докторске дисертације.

У другој глави изложен је проблем статичке естимације стања. Обрађени су основни појмови, као што су: вектори променљивих стања и мерења, редунданса мерења,

обсервабилност електроенергетске мреже, формулација и основни алгоритми за решавање проблема минимума WLS критеријума и други.

Трећа глава приказује моделе појединих елемената електроенергетских мрежа у несиметричним режимима, при чему су обрађени основни трофазни модели типичних елемената који се срећу у дистрибутивним и микро мрежама, као што су: трансформатори, монофазни и трофазни преносни водови, потрошачи и различити типови дистрибуираних генератора.

Четврта глава бави се генерисањем псеудо мерења. Разматране су могућности естимације радног режима дистрибутивних и микро мрежа на основу расположивих података из реалног времена, као и на основу резултата релативно малог броја мерења обављених у реалном времену. Посебно је анализиран начин генерисања псеудо мерења активне и реактивне снаге код потрошача и дистрибуираних генератора, као што су ветро турбине, фотонапонски панели, мини/микро хидроелектране и други.

У петој глави предложен је алгоритам статичке естимације стања у несиметричним електроенергетским мрежама. Прво је дат историјски преглед развоја методологија за решавање проблема у преносним, дистрибутивним и микро мрежама. Детаљно су обрађени поједини кораци кроз које се алгоритам спроводи.

У шестој глави предложена је интеграција корелисаних мерења у алгоритам статичке естимације стања у несиметричним електроенергетским мрежама. Посебно су разматрани најважнији типови корелације мерења, односно корелације између појединачних псеудо мерења и мерења у реалном времену. Да би се корисно искористиле различите групе псеудо мерења које се могу јавити у овом проблему, било је неопходно формирање новог алгоритма за трофазну статичку естимацију стања који уважава корелисаност мерења, што је кроз поједине кораке такође детаљно објашњено у овој глави. Посебно су обрађени проблеми груписања (кластеровања) временских података и података о оптерећењу, прорачун излазних снага ветроелектрана и фотонапонских панела, прорачун варијансе и корелације мерења. Дат је и један мали илустративни пример, који има за циљ демонстрацију значаја корелације мерења на решење статичке естимације стања.

У седмој глави напред предложени поступци и алгоритми статичке естимације стања примењени су на реалним електроенергетским (дистрибутивним и микро) мрежама, како би се извршила њихова квалитетна нумеричка верификација. Приказани резултати су доказали применљивост предложених алгоритама.

У осмој глави дати су основни закључци који су изведени током израде докторске дисертације.

У деветој глави дат је списак референци коришћених приликом израде докторске дисертације.

У десетој глави (*Додатак*) дати су неки допунски материјали који прате основно излагање из претходних глава, као што су опис нормалне (Gauss-ове) расподеле и улазни подаци за поједине тест електроенергетске (дистрибутивне и микро) мреже, као и најважнији резултати статичке естимације стања за реалну дистрибутивну мрежу од 322 чвора.

Докторска дисертација у потпуности испуњава обим и квалитет у односу на пријављену тему, с обзиром да су достигнути постављени циљеви и доказане полазне хипотезе истраживања.

## 5. НАУЧНИ РЕЗУЛТАТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Више од три деценије се алгоритми за статичку естимацију стања производно-преносних мрежа теоријски развијају, имплементирају и верификују у електроенергетској пракси. Међутим, технички проблеми примене статичких естиматора стања у дистрибутивним и микро мрежама су значајно већи (несиметричне мреже, недостатак

мерења из реалног времена, тешкоће у генерисању псеудо мерења, корелација псеудо и мерења у реалном времену и други), што је показано у овој дисертацији.

Докторска дисертација предлаже систематичан приступ третману и класификацији расположивих мерења (псеудо, виртуелна и мерења из реалног времена) у циљу постизања минималне обсервабилности оригинално необсервабилних делова електроенергетске (дистрибутивне и микро) мреже, пошто је позната особина ових мрежа да оне из економских разлога нису (и сасвим је сигурно неће бити у догледној будућности) комплетно мониторисане. То значи да је у њима дефицит мерења у реалном времену евидентан. Тиме се омогућава потребна редуданса мерења и спровођење статичке естимације стања применом критеријума минимума средње-квадратних одступања (WLS) измерених и естимираних величина. У дисертацији су детаљно разрађени алгоритми додавања псеудо мерења у случају различитих структура дистрибутивних и микро мрежа, односно уважавајући различите типове потрошача и дистрибуираних генератора који у њима постоје. Такође, укључен је и алгоритам реалокације псеудо мерења у циљу постизања њихове максималне сагласности са расположивим мерењима у реалном времену (мерења значајно веће тачности).

У докторској дисертацији су изложене потребне модификације алгоритама за примене минимума WLS критеријума у несиметричним активним (са значајном пенетрацијом дистрибуираних генератора) дистрибутивним и микро мрежама. Због недовољне обсервабилности ових мрежа, овај критеријум који је стандардан алат у преносним мрежама до сада није било (или је било врло тешко) могуће применити. Анализа на карактеристичним тест примерима, уз уважавање различитих конфигурација трофазних трансформатора, водова, потрошача и дистрибуираних генератора, доказала је могућности примене статичке естимације стања у овим типовима мрежа. Робусност предложених алгоритама верификована је кроз анализу различитог броја, типа и локација виртуелних, псеудо и мерења у реалном времену, из чега се може извести закључак да би они могли да буду врло корисно примењени у реалним системима за управљање дистрибутивним (уједно и микро) мрежама ("Distribution Management System"). Такође, нумеричке симулације су показале да асиметрија дистрибутивних и микро мрежа, која често може бити значајна у реалним условима, мора бити уважена у статичкој естимацији стања, пошто претпоставка симетричне мреже може бити врло груба апроксимација у појединим фазама. Предложени су и укључени детаљни модели који уважавају начин и опрему за прикључење дистрибуираних генератора, као и губици активне/реактивне снаге који се јављају при конверзији примарне енергије до електричног инјектирања у мрежу.

Значајан научни допринос докторске дисертације односи се на корелацију мерења (псеудо и мерења у реалном времену), што је до сада углавном занемаривано у истраживањима статичке естимације стања. Овај проблем је посебно интересантан у микро мрежама, пошто су оне лоциране на малим географским просторима, где је таква корелација јако изражена. Показано је да ниво корелације мерења може значајно утицати на резултате статичке естимације стања, па самим тим и на њихов квалитет и применљивост у оперативној пракси диспечерског управљања. Да би се дошло до реалних вредности корелационих коефицијената, предложена је класификација историјских података у сличне кластере помоћу вештачких неуралних мрежа (ANN – "Artificial Neural Network"), на основу којих су израчунати елементи матрице варијанси/коваријанси (дијагонални/вандијагонални елементи). При томе, предложено је коришћење две структуре вештачких неуралних мрежа (SOM ANN и FF ANN) за класификацију временских (историјских и/или прогнозираних) података и естимацију излазних снага немониторисаних дистрибуираних генератора и потрошача, респективно. Доказана је робусност предложеног алгорита, па се на улазима вештачке неуралне мреже могу користити комплетни или делимично измерени и/или прогнозирани временски подаци. Такође, доказано је да се WLS критеријум може применити и у случају адаптивног подешавања корелације мерења током самог итеративног процеса.

## **6. ПРИМЕЊИВОСТ И КОРИСНОСТ РЕЗУЛТАТА У ТЕОРИЈИ И ПРАКСИ**

Општи закључак ове докторске дисертације јесте да будућност пред статичке естиматоре стања поставља нове техничке и истраживачке изазове (нарочито у дистрибутивним и микро мрежама), који морају да прате развој нових технологија у електроенергетским мрежама. У том смислу, нарочито је важно укључивање у моделовање уређаја енергетске електронике и дистрибуираних генератора прикључених у дистрибутивне и микро мреже (фарме ветрогенератора, соларне електране, когенерациона постројења и други). Докторска дисертација предлаже теоријске трофазне моделе ових јединица и начин њиховог укључивања у WLS типове алгоритама трофазне статичке естимације стања.

Поред теоријског значаја, истраживања спроведена у докторској дисертацији имају и практичан допринос, који се огледа у имплементацији значајних алгоритамаских побољшања у трофазну статичку естимацију стања. Пошто се на њеним резултатима заснивају многе друге функције система управљања у дистрибутивним и микро мрежама (токови снага, Volt/Var координација, реконфигурација мреже, индекси перформанси и многе друге), то овај проблем захтева велику пажњу у експлоатацији електроенергетских мрежа. У том смислу ова докторска дисертација даје одговарајућа практична решења која могу бити примењена у пракси интелигентних електроенергетских мрежа ("Smart Grid"), пошто су предложени алгоритми примењени на реалним примерима из праксе електропривреде Србије.

## **7. НАЧИН ПРЕЗЕНТИРАЊА РЕЗУЛТАТА НАУЧНОЈ ЈАВНОСТИ**

Резултати добијени истраживањем у докторској дисертацији су презентовани научној јавности кроз рад објављен у водећем међународном часопису и излагањем на домаћој конференцији са међународним учешћем.

