

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата  
мр Алексе Бабића, дипл. инг. електротехнике**

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 21-2056/5 од 27. новембра 2013. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Алексе Бабића, дипл. инг. електротехнике, под насловом **“Нелинеарна оптимизација планирања и експлоатације електроенергетских система применом Interior Point алгоритама”**.

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

## ИЗВЕШТАЈ

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

Велике промене у електроенергетском сектору које се догађају последњих деценија у свету довеле су до дерегулације и структурне реорганизације електропривреда многих земаља и увођења конкуренције и у овом енергетском сектору. Све то доводи до тога да се електроенергетски системи све више експлоатишу на границама својих оперативних могућности, што захтева њихово прецизније моделовање и поступке робусне оптимизације. Процеси дерегулације и структурне реорганизације електропривреде још увек нису завршени у нашој земљи, тако да су њихова изучавања суштински неопходна.

Основни алат за оптимизацију електроенергетских система у стационарном стању су оптимални токови снага ("Optimal Power Flow"), којима се врши глобална оптимизација система, уз уважавање ограничења потрошње, односно биланса снага (типа једнакости) и погонских и сигурносних ограничења (типа неједнакости). Електроенергетски системи су по својој природи изразито нелинеарни, и то по обе своје основне функционалне везе: 1) активне снаге-углови фазора напона ( $P-\theta$ ) и 2) реактивне снаге-модули фазора напона ( $Q-V$ ). Пратећи ову аналитичку декомпозицију и оптимални токови снага најчешће се у поступку решавања декомпоњују на  $P-\theta$  и  $Q-V$  потпроблеме.

Основна доказана хипотеза у истраживању јесте да се нелинеарни глобални проблем оптималних токова снага може успешно решити и без стандардне декомпозиције на  $P-\theta$  и  $Q-V$  потпроблеме. Такође, доказано је да се укључивањем једначина оптимизационог критеријума и техничких и економских ограничења у сам примално-дуални Interior Point алгоритам могу постићи задовољавајуће перформансе за примене на реалним електроенергетским системима.

Основни научни доприноси докторске дисертације у овој области су:

- Истражена и доказана могућност примене примално-дуалних Interior Point алгоритама за решавање проблема оптималних токова снага са различитим оптимizacionим критеријумима и скуповима билансних, оперативних и сигурносних ограничења.
- Истражена и доказана могућност алокације губитака активне снаге појединим ентитетима (локалним тржиштима електричне енергије) и/или чворовима унутар интерконекције (јединственог регионалног тржишта електричне енергије) у зависности од снаге инјектирања (разлика снага производње и потрошње у чвору).
- Истражена и доказана могућност примене алгоритама оптималних токова снага за прорачун локацијских маргиналних цена у присуству различитих врста ограничења типа једнакости и неједнакости. Предложена је адекватна (математички стриктно дефинисана) декомпозиција локацијске маргиналне цене на поједине компоненте, којима се може квантификовати утицај појединих ограничења на укупну цену електричне енергије. Ова декомпозиција је од изузетног значаја за спровођење превентивно-корективних управљачких акција у експлоатацији електроенергетског система.
- Истражена и доказана могућност примене локацијских маргиналних цена на оптимизацију проширења преносне мреже у случају региона који имају високе локацијске маргиналне цене на глобалном тржишту електричне енергије. Велике неизвесности које се јављају у проблемима дугорочног планирања су уважене кроз дефинисање променљивих у мулти-димензионом хипер-елипсоидном домену.
- Истражена је могућност примене предложених алгоритама на системима реалних димензија, што омогућава њихову примену на европски тип зоналних регионалних тржишта електричне енергије.

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

Имајући увид у актуелно стање у изучавању проблема експлоатације и планирања тржишно оријентисаних електроенергетских система, Комисија констатује да је докторска дисертација кандидата мр Алексе Бабића 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 четири рада, и то: један у водећем међународном часопису са SCI листе, један у међународном часопису са SCI листе и два рада на домаћој конференцији са међународним учешћем, респективно:

1. **A. B. Babić**, A. T. Sarić and A. Ranković, "Transmission Expansion Planning based on Locational Marginal Prices and Ellipsoidal Approximation of Uncertainties", *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, Issue 1, pp. 175-183, December 2013. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.009. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.04.009> (**M21, 8 бодова**, ранг часописа у области Engineering, Electrical & Electronic: **14/243**, Impact Factor за 2012. годину: **3,432**).
2. **A. B. Babić** and A. T. Sarić, "Inter ISO Market Coordination by Calculating Border Locational Marginal Prices", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 13, Issue 2, pp. 47-54, May 2013. DOI: 10.4316/aee. [Online] Available:

<http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2013.02008> (M23, 3 бода, ранг часописа у области Engineering, Electrical & Electronic: **186/243**, Impact Factor за 2012. годину: **0,552**).

3. **A. B. Babić** and A. T. Sarić, "LMP Decomposition with Controlled Net Flow Across Tie Lines Represented by Equality Constraint", *Proc. of the 55-th ETRAN Conference*, Committee for Power Engineering, Paper EE1.10, pp. 1-4, Banja Vrućica (Teslić), The Republic of Bosnia & Herzegovina, June 6-9, 2011 (M63).
4. A. T. Sarić and **A. B. Babić**, "Adaptation of Electric Power Transaction Loss Allocation to System Loss Allocation", *Proc. of the 55-th ETRAN Conference*, Committee for Power Engineering, Paper EE1.9, pp. 1-4, Banja Vrućica (Teslić), Republic of Bosnia & Herzegovina, June 6-9, 2011 (M63).

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

Докторска дисертација кандидата мр Алексе Бабића написана је на XI+119 страна, и обухвата увод, четири главе, закључак, литературу и додатак. У оквиру литературе наведено је 82 библиографске јединице, укључујући и радове аутора. У докторској дисертацији има 40 слика и 17 табела.

У уводној глави дате су основне напомене о значају анализираног проблема, основним коришћеним хипотезама, математичким алатима за његово решавање и могућностима примене.

У првој глави обрађен је примално-дуални Interior Point алгоритам и на том приступу засновани алгоритми за решење општег нелинеарног проблема за избор оптималне радне тачке електроенергетског система у стационарном стању са ограничењима типа једнакости и неједнакости, избор почетне тачке итеративног процеса оптимизације, избор и подешавање дужине корака прималних и дуалних променљивих и ажурирање коефицијента баријере (баријерног параметра). Напони чворова у примално-дуалном Interior Point алгоритму представљени су у правоугаоним координатама. Посебно је извршена спецификација могућих оптимизационих критеријума и ограничења.

У другој глави приказује се адаптација трансакцијског алгоритма за алокацију губитака активне снаге на проблем алокације системских губитака на поједине чворове. Уведене модификације у алгоритму омогућују алоцирање губитака активне (и реактивне) снаге сваком од чворова за које су прикључени потрошачи/генератори и/или тржишних ентитета (зона), чиме се омогућује реалнија оптимизација токова снага, придруживање стварних губитака појединим субјектима у оквиру интерконекције независних електроенергетских система.

У трећој глави приказана је дефиниција локацијских маргиналних цена електричне енергије, која је произашла из примално-дуалног Interior Point алгоритма оптималних токова снага, као и њихова декомпозиција на компоненте на основу конвергентног решења. То решење оптималних токова снага подразумева да су задовољени Karush-Kuhn-Tucker услови оптималности. Такође се даје и начин израчунавања локацијских маргиналних цена на граници два независна електроенергетска система, под надлежношћу два независна оператора система ("Independent System Operator") или оператора преносног система ("Transmission System Operator"), уз унапред утврђену размену активних снага (на пример, кроз тржиште будућих трансакција).

У четвртој глави изложен је нов концепт планирања оптималног проширења електроенергетске преносне мреже, који је заснован на минимизацији трговинског вишка ("Merchandising Surplus"), који практично укључује минимизацију загушења ("Congestion Surplus") преносних капацитета, добијених на основу локацијских маргиналних цена из нелинеарног примално-дуалног Interior Point модела оптималних токова снага. Пошто је глобални модел нумерички сложен и меморијски захтеван, изложена је његова

декомпозиција у дво-нивоску повезану вишекорачну структуру, при чему је у надређеном проблему (“Master Problem”) решаван инвестициони проблем (оптимизација проширења преносне мреже), а у подређеном проблему (“Slave Problem”) решаван експлоатациони проблем за дати сценарио развоја (оптимизација тржишта електричне енергије), при чему се у сваком потпроблему задају ограничења типа једнакости и неједнакости која га одређују. Неизвесност улазних података третирана је применом хипер-елипсоидних трансформација за основне променљиве стања и променљиве одлучивања. Селекција (оптимизација) могућих нових преносних елемената по годинама периода планирања урађена је применом генетског алгоритма (Genetic Algorithm”).

У петој глави дати су основни закључци до којих се дошло током истраживања у докторској дисертацији.

У шестој глави даје се списак коришћења литературе.

У седмој глави (*Додатак*) дати су улазни подаци о тест системима, као и неки (углавном обимнији) нумерички и графички резултати прорачуна.

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

Interior Point методе (методе унутрашње тачке) за решавање линеарних/нелинеарних оптимизационих проблема су још увек у интензивној истраживачкој фази, тако да до сада нису доживеле широку индустријску примену у решавању проблема оптималних токова снага и оптимизације тржишта електричне енергије.

Резултати проширеног економског диспечинга, сигурносног економског диспечинга или сигурносног избора и ангажовања агрегата у погону морају се користити за оптимизацију тржишта електричне енергије, на коме се на основу поднетих понуда за продају и куповину електричне енергије максимизира друштвена добит (“Social Welfare”), која представља разлику између укупних трошкова понуда купаца за куповину и произвођача за продају електричне енергије. Као резултат те сложене нелинеарне (у докторској дисертацији претпостављене квадратне) оптимизације прорачунава се обавезујућа локацијска маргинална цена за купце и за произвођаче електричне енергије. Она је углавном заснована на дуалним променљивим једначина биланса снага (укључујући губитке), увећаним за дуалне променљиве задовољавања сигурносних и других оперативних ограничења. У овој докторској дисертацији је истражен утицај релевантних ограничења која се морају уважити у прорачуну локацијских маргиналних цена оптимизацијом токова снага, као што су: напонска ограничења, ограничења захтеваних размена снаге између ентитета под надлежношћу различитих независних оператора система (у америчкој пракси) или оператора преносног система (у европској пракси) у једној интерконекцији (регионалном тржишту електричне енергије), сигурносних ограничења и других.

Такође, у досадашњим истраживањима локацијске маргиналне цене електричне енергије су врло мало коришћене у планирању проширења преносне мреже. Оне су се, по правилу, користиле за решавање само експлоатационих проблема (најчешће оптимизације тржишта електричне енергије). Таква истраживања у планерским проблемима су захтевала укључивање у прорачун и временске димензије проблема (на вишегодишњем нивоу), уз уважавање неизвесности које тај процес прате.

Докторска дисертација доприноси лакшем разумевању и проучавању проблематике примене техника оптималних токова снага за решавање појединих специфичних проблема, као што су:

1. Оптимизација локацијских маргиналних цена у појединим чворовима унутар и на границама између појединих области под надлежношћу различитих ентитета.
2. Значај квалитетне алокације губитака снаге на поједине чворове (ентитете), односно произвођаче и потрошаче, како би се губици активне (и реактивне) снаге расподелили учесницима на тржишту електричне енергије сразмерно њиховом учешћу у њима.
3. Кроз декомпозицију на компоненте које одређују поједине групе ограничења дата је могућа математичка квантификација удела појединих ограничења на укупну локацијску маргиналну цену електричне енергије. Тиме се омогућава идентификација цене саме електричне енергије, али и цена одржавања појединих ограничења, која се најчешће називају помоћне услуге (“Ancillary Services”), а у које спадају трошкови: одржавања захтеваних вредности напона у чворовима (одржавање напонско-реактивних прилика), спречавања загушења (одржавање дозвољених токова снага у преносној мрежи), одржавања неопходних резерви и друга.
4. Утицај испада на локацијске маргиналне цене електричне енергије, чиме се кроз јединствену оптимизацију одређују и трошкови редукације производње генератора и сечења оптерећења потрошача у поремећеним стањима електроенергетског система.
5. Утицај локацијских маргиналних цена на оптимизацију проширења преносне мреже, чиме се на јединствен начин у проблем планирања укључују трошкови електричне енергије, помоћних услуга и одржавања захтеване сигурности рада електроенергетског система.

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

Општи закључак ове докторске дисертације јесте да будућност пред оптимизацију тржишта електричне енергије поставља нове техничке и истраживачке изазове. У том смислу, нарочито је важно укључивање у моделовање тржишта електричне енергије различитих техничких ограничења (напонска ограничења, ограничења преносних капацитета и друга) и цене која се за то мора платити.

Поред теоријског значаја, истраживања спроведена у докторској дисертацији имају и практичан допринос, који се огледа у имплементацији значајних алгоритамских побољшања у проблем оптималних токова снага дерегулисаних електроенергетских система, генерализацију оптимизације тржишта електричне енергије и помоћних услуга, као и у проблем планирања проширења преносних мрежа у дерегулисаним електроенергетским системима. Предложене методологије су примењиве у америчким типовима тржишта (где се цена електричне енергије обрачунава по чворовима) и европским типовима тржишта (где се повезују мања (зонална) локална тржишта у циљу размене електричне енергије између њих, како би се глобално смањила цена електричне енергије у интерконекцији).

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

Резултати добијени истраживањем у докторској дисертацији су презентовани научној јавности кроз радове објављене у међународним часописима и излагањем на домаћој конференцији са међународним учешћем.

## 8. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

На основу претходно изложеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Алексе Бабића, дипл. инг. електротехнике, доноси следећи

### ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

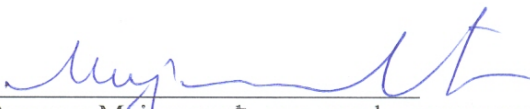
На основу анализе докторске дисертације са аспекта актуелности теме, дефинисаног проблема и циља истраживања, полазних и доказаних хипотеза истраживања, као и научног доприноса и практичне вредности добијених резултата, Комисија позитивно оцењује урађену докторску дисертацију под називом **“Нелинеарна оптимизација планирања и експлоатације електроенергетских система применом Interior Point алгоритама”**, кандидата мр Алексе Бабића, дипл. инг. електротехнике. Комисија истиче да је докторска дисертација резултат самосталног рада кандидата и да постоје нови и оригинални резултати. На основу анализе резултата може се закључити да је кандидат показао смисао за решавање научних проблема у области електроенергетских система. Докторска дисертација представља значајан научни допринос теорији и пракси дерегулисаних тржишта електричне енергије.

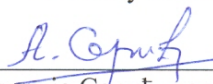
На основу напред изнетих закључака, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације, као и да омогући њену јавну одбрану у складу са Законом и нормативним актима факултета и универзитета.

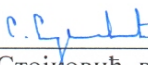
У Чачку и Косовској Митровици,

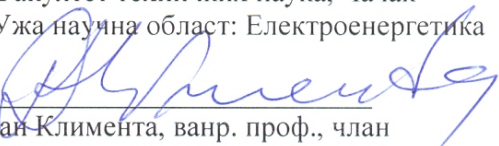
27. јануар 2014. године

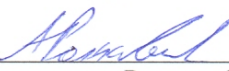
Чланови Комисије:

1.   
Др Владица Мијаиловић, ред. проф., председник  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Електроенергетика

2.   
Др Андрија Сарић, ред. проф., ментор  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Електроенергетика

3.   
Др Саша Стојковић, ванр. проф., члан  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Електроенергетика

4.   
Др Дардан Климента, ванр. проф., члан  
Факултет техничких наука, Кос. Митровица  
Ужа научна област: Електроенергетика

5.   
Др Александар Ранковић, доцент, члан  
Факултет техничких наука, Чачак  
Ужа научна област: Електроенергетика