

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Јелене Стојковић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком бр. 5024/15-3 од 24.12.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Јелене Стојковић под насловом

**„Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“**

**“A novel decentralized approach for implementation of fast frequency control in low-inertia power systems”**

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 Јелена Стојковић је 10.11.2015. године уписала докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Електроенергетске мреже и системи. Током студија положила је све испите са просечном оценом 10 и одрадила све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене планом и програмом.

Тему докторске дисертације под насловом „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ је пријавила Комисији за студије трећег степена на Електротехничком факултету у Београду 23.06.2021. године.

Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог за израду докторске дисертације на својој седници одржаној 29.06.2021. године и предлог комисије за оцену подобности теме и кандидата упутила Наставном-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће је именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5024/15-1 од 16.07.2021. године) у саставу:

1. др Жељко Ђуришић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
2. др Андрија Сарић, редовни професор (Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука),
3. др Томислав Шекара, редовни професор, (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Кандидат Јелена Стојковић је полагала јавну усмену одбрану теме докторске дисертације и успешно положила докторски испит, одржан 07.09.2021. године.

Наставно-научно веће је 13.10.2021. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. За ментора дисертације именован је др Предраг Стефанов, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет). Веће научних области је 04.12.2021. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Јелена Стојковић је 02.12.2021. године предала докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена је 07.12.2021. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно – научно већу Електротехничког факултета. Наставно – научно веће именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ (Одлука бр 5024/15-3. од 24.12.2021. године) у саставу:

1. др Предраг Стефанов, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
2. др Жељко Ђуришић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
3. др Драган Тасић, редовни професор (Универзитет у Нишу – Електронски факултет),
4. др Томислав Шекара, редовни професор, (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
5. др Јован Микуловић, редовни професор, (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ кандидата Јелене Стојковић припада научној области Електротехника и рачунарство, ужа научна област Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Предраг Стефанов, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Предраг Стефанов се дуги низ година бави научноистраживачким радом у области управљања и динамике електроенергетских система, што је потврђено релевантним радовима којима су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Јелена Стојковић је рођена 19.08.1991. године у Врању, а одрасла у Владичином Хану где је завршила основну школу као ђак генерације. Завршила је Рачунарску гимназију у Београду,

гимназију за талентоване ученике, као носилац Вукове дипломе. На државним такмичењима ученика средњих школа освајала је награде из математике и физике. 2010. године је награђена за најбољи матурски рад под називом „Лабораторија за електронику у С#-у”.

Основне студије на Електротехничком факултету у Београду, Одсек за енергетику, смер Електроенергетски системи, уписала је 2010. године и завршила са просечном оценом 10, 2014. године. За дипломски рад на тему „Примена генетског алгорита за одређивање оптималне расподеле токова снага у ЕЕС-у”, под менторством проф. др Николе Рајаковића, награђена је првом наградом ЕТФ БАФА УСА за најбољи дипломски рад на основним академским студијама на Електротехничком факултету Универзитета у Београду у школској 2013/14 години. Мастер студије је уписала 2014. године на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Електроенергетски системи. Мастер студије је завршила са просечном оценом 10, а мастер рад под називом „Одзив потрошње као подршка примарној регулацији фреквенције”, под менторством проф. др Николе Рајаковића, је проглашен за најбољи мастер рад из области енергетике у 2014/15 години од стране ПУ Машиноградња. Докторске студије је уписала 2015. године на Електротехничком факултету у Београду, модул Електроенергетске мреже и системи, где је положила све испите са просечном оценом 10.

2013. године је добила награду Фондације проф. Мирка Милића за најбољег студента завршне године Електротехничког факултета. Од 2011. до 2014. године је била изабрана за најбољег студента Одсека за енергетику. Током студија је завршила три курса у иностранству: у Турској, Француској и Румунији. Учествовала је на летњим школама у Словенији, Немачкој, Пољској, Македонији и Босни и Херцеговини. Као гостујући истраживач, усавршавала се на Техничком универзитету у Дрездену, Техничком универзитету у Бечу и Факултету за електротехнику у Љубљани. У оквиру европског пројекта ERIGrid била је на истраживачком боравку у Холандији и Италији.

Од фебруара 2015. запослена је на Електротехничком факултету у Београду као сарадник у настави. Фебруара 2016. је унапређена у звање асистент. Ангажована је на више предмета из области електроенергетских система.

Области њеног интересовања су: регулација фреквенције, интелигентне мреже, интеграција обновљивих извора енергије у ЕЕС и е-мобилност са фокусом на изазове и препреке за интеграцију електричних аутомобила у постојећи електроенергетски систем. Аутор је више радова публикованих у међународним и домаћим часописима, као и зборницима међународних, регионалних и домаћих конференција. Течно говори енглески језик, а служи се немачким и шпанским.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ написана је на 97 страна (114 страна са прилозима), организована је у 6 поглавља, има 95 слика, 15 табела и листу од 168 референци.

Наслови поглавља су:

1. Увод
2. Регулација фреквенције
3. Вишестепена брза регулација фреквенције базирана на локалним мерењима
4. Управљање HVDC система за пружање услуге брзе регулације фреквенције

5. Методологија за квантификацију вредности ресурса за брзу регулацију фреквенције у зависности од локације у ЕЕСу
6. Закључак

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је дат увод и детаљно објашњена мотивација и потреба за истраживањем које је предмет ове докторске дисертације. Затим је дат преглед различитих ресурса који могу да пруже услугу брзе регулације фреквенције (БРФ) и представљене су њихове предности и ограничења. У наставку су приказани различити начини имплементације услуге БРФ у различитим преносним система у свету.

Друго поглавље даје теоријску основу регулације фреквенције и формулацију проблема на систему од две области. Понашање фреквенције за различиту дистрибуцију инерције и различиту удаљеност од локације поремећаја је приказано у аналитичкој форми и потврђено симулацијама на тест систему од две области.

Главни доприноси дисертације су садржани у поглављима 3-5. У трећем поглављу је предложена управљачка стратегија за брзу вишестепену регулацију фреквенције која се активира у временском интервалу до једне секунде након поремећаја и има за циљ да смањи пад фреквенције пре него што она достигне минимум. Различити степени регулационе резерве се активирају при различитим вредности RoCoFa (Rate of Change of Frequency – брзина промене фреквенције) и на тај начин је омогућено да активирана резерва буде сразмерна поремећају. Предложена управљачка стратегија не захтева телекомуникациону инфраструктуру и једноставна је за имплементацију. Као таква, представља јефтино решење док су истовремено избегнута временска кашњења услед преноса података. Вишестепена регулација даје могућност да се јефтинија (спорија) резерва користи у случају мање критичних поремећаја и на тај начин смањује трошак оператора при коришћењу ове корективне услуге. Изведене симулације потврђују да овако дефинисана управљачка стратегија омогућава да већа количина резерве буде активирана ближе локацији поремећаја и на тај начин највише доприноси деловима система који су највише погођени поремећајем. Поред тога, у овом поглављу је предложен потенцијални оквир тржишта за БРФ којим се обухвата економски аспект ове сервисне услуге.

У четвртном поглављу је предложено управљање HVDC система за подршку фреквенцијској стабилности у системима мале инерције. HVDC системи могу брзо да промене активну снагу и због тога представљају јако значајне ресурсе који могу да пруже услугу БРФ с једне стране, док је њихова употреба у сталном порасту нарочито у системима са високом пенетрацијом обновљивих извора енергије (ОИЕ). У дисертацији је представљена управљачка стратегија која је базирана на локалном мерењу фреквенције и брзине промене фреквенције под претпоставком да HVDC систем нема никакву информацију о електроенергетском систему (ЕЕСу) и види га као “црну кутију”. Одзив HVDC система се састоји из два корака где је промена активне снаге у првом кораку константна, док је у другом кораку одзив HVDC система прилагођен величини поремећаја и инерцији ЕЕСа. Користећи промену фреквенције након деловања HVDC у првом кораку, процењује се величина поремећаја и одзив HVDC система је адаптиран да адекватно одговори насталом поремећају. Предложена адаптивна контрола HVDC система верификована је симулацијама у MATLAB/Simulink-у за различите величине поремећаја и различите инерције ЕЕСа. Резултати симулација потврђују да предложена регулација пружа бољи фреквенцијски одзив у поређењу са једноступеном регулацијом и даје одговарајући одзив за различите величине поремећаја и различите вредности инерције система.

Локација ресурса за БРФ се показала као изразито битна у погледу доприноса побољшању фреквенције у систему са хетерогеном расподелом инерције и у петом поглављу је развијен квантификатор којим се валоризује вредност ресурса за БРФ у зависности од локације.

Помоћу овог квантификатора се могу поредити различите локације ресурса за БРФ са аспекта доприноса фреквенцијској стабилности за различите поремећаје. Поред тога, дефинисана је и процедура којом се одређују најбоље локације ресурса за БРФ за листу дефинисаних поремећаја у систему и одређено радно стање. Резултати ове процедуре могу бити значајни оператору преносног система приликом планирања рада система дан унапред. Ова процедура је проширена на велики број радних стања уважених помоћу Monte-Carlo симулација која даје одговор која локација ресурса за БРФ је од највеће вредности са аспекта планирања будућих ресурса за БРФ.

У шестом поглављу су сумирани основни закључци докторске дисертације и наглашени њени главни доприноси.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Тренд декарбонизације електроенергетских система је наметнуо пораст удела обновљивих извора енергије у производњи електричне енергије и постепено гашење електрана на фосилна горива. ОИЕ су на мрежу повезани преко уређаја енергетске електронике и распрегнути су од система, што значајно смањује њихов допринос инерцији обртних маса у ЕЕСу. Системи мале инерције су мање отпорни на поремећаје у погледу фреквенцијске стабилности и бележе брже и веће промене фреквенције након поремећаја које могу да изазову каскадне испаде. Проблеми смањене инерције су већ данас нарочито изражени у изолованим или слабо повезаним системима са великим уделом ОИЕ, а биће још више заступљени и у повезаним системима са повећањем удела ОИЕ. Потенцијално решење је виђено у брзој регулацији фреквенције које ће се активирати непосредно након поремећаја и успорити пад фреквенције.

Предмет истраживања докторске дисертације је развој методологије за брзу регулацију фреквенције која је базирана на локалним мерењима и примењива у електроенергетским системима мале инерције. Велики број радова из ове области упућују на актуелност тематике коју обрађује докторска дисертација. Предложена решења у дисертацији представљају оригинална и иновативна решења, која до сада нису изложена у постојећој литератури. Научни значај и допринос ове дисертације састоји се у развоју оригиналне управљачке стратегије за БРФ која је једноставна и лака за имплементацију, и обезбеђује да највише резерве буде активирано у деловима система који су највише угрожено након поремећаја у погледу фреквенцијске стабилности. Истовремено, научни допринос се огледа и у анализи могућности HVDC система да учествују у БРФ као и у дефиницији квантификатора којим се валоризују вредност резерве у погледу доприноса фреквенцијској стабилности.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је цитирано 168 референци које су наведене по редоследу цитирања у тексту дисертације. Цитирана литература обухвата најновије радове релевантне за анализирану проблематику, али исто тако и референце старијег датума које су значајне за предметна истраживања. Приказана литература даје комплетну анализу тренутних достигнућа у областима које покрива тема дисертације, док су у дисертацији наведене предности предложених управљачких стратегија у односу на предложена у постојећој литератури. На основу свеобухватности референци које су наведене на крају дисертације јасно је да је кандидат детаљно и темељно истражио ширу научну област којој дисертација припада.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у докторској дисертацији укључује анализе, моделовање и симулације. Аналитичком и нумеричком анализом фреквенцијског одзива динамичког модела система са нехомогеном расподелом инерције добијена је теоријска потпора за дефинисање управљачке стратегије за брзу регулацију фреквенције. Испитивање и верификација предложене управљачке стратегије је извршено на једноставним системима са више области и IEEE тест системима. Имплементација, моделовање и симулирање процеса у електроенергетском систему је извршено у софтверском пакету MATLAB/Simulink, где су анализирани фреквенцијски одзиви након поремећаја у циљу детаљне анализе фреквенцијске стабилности и верификације ефикасности развијене управљачке стратегије. За валоризацију ресурса за брзу регулацију фреквенције је примењена метода Monte Carlo симулација чиме се обухватио пробабилистички утицај великог броја радних стања и топологија мреже.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у оквиру дисертације имају и практичну примену. У дисертацији су приказане управљачке стратегије и методе са предлогом како оне могу бити практично имплементирани. На овај начин, пружају се основе за развој софтвера који ће операторима преносног система дати додатни простор за сигурнију и економичнију експлоатацију ЕЕСа како у нормалним условима тако и у условима поремећених радних режима. Резултати дисертације могу бити од интереса оператору преносног система при експлоатацији у реалном времену, планирању рада за дан унапред, као и при планирању инвестиција у ресурсе за БРФ.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Јелена Стојковић је систематично проучила релевантну литературу, успешно идентификовала отворене проблеме у области и предложила конкретна решења за њихово превазилажење чиме је показала способност за самосталан научно-истраживачки рад. Израда докторске дисертације је укључивала и развој нових метода за решавање актуелних проблема у електроенергетском систему, верификацију развијених модела кроз рачунарске симулације као и анализу резултата које указују на зрелост кандидата за независни научно-истраживачки рад. Доприноси дисертације су оригинални и савремени, а резултати су објављени у часопису са SCI листе и кроз већи број радова на домаћим и међународним конференцијама.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Главни научни доприноси који су остварени у оквиру докторске дисертације су следећи:

- развијена је нова формулација проблема за БРФ која уважава нехомогену дистрибуцију инерције у систему,
- развијена је оригинална управљачка стратегија за вишестепену брзу регулацију фреквенције која обезбеђује да више резерве буде активирани у деловима система који су више угрожени од стране поремећаја уважавајући и трошкове услуге,
- предложено је управљање HVDC система за пружање услуге БРФ,
- развијена је методологија којом се квантификује вредност ресурса за БРФ у зависности од локације у ЕЕСу,
- предложен је оквир тржишта за БРФ.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Научни доприноси наведени у тачки 4.1 представљају унапређење научних знања доступних у литератури јер су предложена нова решења за брзу регулацију фреквенције која је базирана само на локалним мерењима. Управљачка стратегија предложена у дисертацији не захтева постојање телекомуникационе инфраструктуре, те представља једноставно и економично решење. Предложени вишестепени дизајн омогућава да активирана резерва буде сразмерна поремећају, уз уважавање просторних карактеристика, како расположиве резерве, тако и система у целини. Постојање више степени, који се активирају при различитим вредностима брзине промене фреквенције, омогућава да највише резерве буде активирано ближе поремећају, а првенствено у деловима система са малом инерцијом. У дисертацији је предложено и адаптивно управљање HVDC система које узима у обзир величину поремећаја и инерцију система у ком се десио поремећај. Новина предложеног решења је у примени адаптивног корака којим је омогућено да HVDC систем, иако нема информације о електроенергетском систему и поремећају, ефикасно процени поремећај и активира довољне резерве којом се обезбеђује стабилност система. Такође, у овој дисертацији су дефинисане процедуре помоћу којих се могу поредити различите локације ресурса за пружање услуге брзе регулације фреквенције. Ове процедуре могу бити од значаја оператору преносног система као средство поређења ресурса на различитим локацијама са аспекта експлоатације и планирања система.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Јелена Стојковић је до сада објавила следеће радове релевантне за докторску дисертацију:

##### *Радови публиковани у научним часописима међународног значаја*

###### **M22**

- **J. Stojković, A. Lekić, P. Stefanov, Adaptive Control of HVDC Links for Frequency Stability Enhancement in Low-Inertia Systems, ENERGIES, Vol. 13, pp. 1 - 21, 2020, DOI: 10.3390/en13236162, ISSN: 1996-1073, IF: 3.004<sub>2020</sub> (M22<sub>2019</sub>)**

##### *Радови објављени у домаћим часописима*

###### **M51**

- **J. Stojković, P. Stefanov, Višestepena brza regulacija frekvencije u elektroenergetskim sistemima sa neravnomernom distribucijom inercije, ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA, pp. 1 - 2, Jun, 2021.god.**
- **J. Stojković, P. Stefanov, Brza regulacija frekvencije u sistemima male inercije, ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 1-2, 2020.god.**

##### *Зборници скупова националног значаја*

###### **M63**

- **J. Stojković, P. Stefanov: Kvantifikacija prostornog rasporeda resursa za brzu regulaciju frekvencije, 35. Savetovanje CIGRE Srbija, STK C2, Zlatibor, 03.10-07.10. 2021.god.**

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ кандидата Јелене Стојковић представља оригинални научни допринос научној области Електротехника и рачунарство (ужа научна област Електроенергетски системи). Дисертација садржи све елементе наведене у образложењу приликом пријаве и испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Правилником од докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.


У дисертацији је детаљно изложена оригинална управљачка стратегија за вишестепену брзу регулацију фреквенције која обезбеђује да више резерве буде активирано у деловима система који су више угрожени поремећајем, а истовремено уважава и трошкове услуге. Такође је развијено управљање HVDC система за пружање услуге брзе регулације фреквенције које узима у обзир величину поремећаја и инерцију система у ком се десио поремећај. У дисертацији је дефинисан квантификатор и процедуре помоћу којих се могу поредити различите локације ресурса за пружање услуге брзе регулације фреквенције. Предложене управљачке стратегије и процедуре, поред научног доприноса, имају и практичну примену у области регулације фреквенције како у експлоатацији, тако и у планирању.

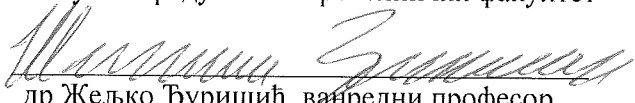
Уважавајући чињеницу да је анализирана проблематика актуелна, а предложена решења у оквиру докторске дисертације оригинална, Комисије констатује да је кандидат Јелена Стојковић показала способност за самостални научни рад и да је задовољила све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником од докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

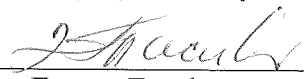
Имајући у виду наведено, Комисије предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ кандидата Јелене Стојковић прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

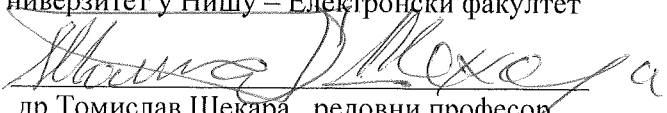
У Београду, 01.02.2022.године

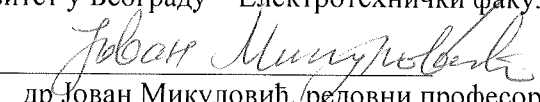
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Предраг Стеванов, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Жељко Ђуришић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Драган Тасић, редовни професор  
Универзитет у Нишу – Електронски факултет

  
др Томислав Шекара, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Јован Микуловић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет