

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Јелене Стојковић за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, бр. 5024/15-1 од 16.07.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Јелене Стојковић** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“** (енг. “A novel decentralized approach for implementation of fast frequency control in low-inertia power systems”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Јелена Стојковић је рођена 19.08.1991. године у Врању. Завршила је Рачунарску гимназију у Београду, гимназију за талентоване ученике, као носилац Вукове дипломе. На државним такмичењима ученика средњих школа освојила је три прве и једну другу награду из математике и две прве, једну другу и једну трећу награду из физике у периоду од 2006. до 2010. године. Такође је освојила трећу награду на Српској физичкој олимпијади. 2010. године је освојила награду за најбољи матурски рад под називом „Лабораторија за електронику у C#-у”.

Основне студије на Електротехничком факултету у Београду, Одсек за енергетику, смер Електроенергетски системи, је уписала 2010. године и завршила са просечном оценом 10 2014. године. За дипломски рад на тему „Примена генетског алгоритма 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. 2011., 2012., 2013. и 2014. године је 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.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Јелена Стојковић је докторске студије уписала 2015. године и положила све испите који су предвиђени планом докторских академских студија на модулу Електроенергетске мреже и системи на Електротехничком факултету Универзитета у Београду са просечном оценом 10.

Преглед положених испита

	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
1	Методе оптимизације у електроенергетским системима	10	9
2	Увод у научни рад	10	6
3	Управљање електроенергетским системима	10	9
4	Стабилност електроенергетских система	10	9
5	Интеграција обновљивих извора у дистрибутивни систем	10	9
6	Планирање рада електроенергетских система у интерконекцији	10	9
7	Флексибилни регулациони уређаји у електроенергетским преносним мрежама	10	9
8	Поузданост електроенергетских система	10	9
9	Дистрибутивни системи - оптимално планирање и експлоатација	10	9
10	Ветроенергетика и соларна енергетика	10	9

Списак преосталих реализованих обавеза

	Назив предмета	ЕСПБ
1	Научно-стручни рад	3
2	Студијски истраживачки рад I	15
3	Студијски истраживачки рад II	15

Радови публиковани у научним часописима међународног значаја:

M23

1. **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.

Радови саопштени на међународним конференцијама штампаним у целини

M33

1. **J. Stojković**: Multi-Objective Optimal Charging Control of Electric Vehicles in PV charging station, 16th European Energy Market Conference (EEM 2019), Ljubljana, Slovenia, 2019.
2. M. Prokin, **J. Stojković**, M. Čabarkapa, D. Prokin: Optimal control of chargers for electric vehicles, The 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2019), Budva, Montenegro, 2019.
3. M. Prokin, M. Čabarkapa, **J. Stojković**, D. Prokin: Wireless control of chargers for electric vehicles, The 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2019), Budva, Montenegro, 2019.
4. **J. Stojković**, N. Rajaković: Demand response for frequency control in an interconnected power system, MedPower2016. Belgrade, Serbia, November 2016.
5. **J. Stojković**, D. Milošević, D. Šošić: Optimal load management in households equipped with PV systems using genetic algorithm, ICEE 2015, Guimaraes, Portugal, Jun 2015.

Радови објављени у домаћим часописима

M51

1. **J. Stojković**, P. Stefanov, Višestepena brza regulacije frekvencije u elektroenergetskim sistemima sa neravnomernom distribucijom inercije, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 1-2, 2021.
2. **J. Stojković**, P. Stefanov, Brza regulacija frekvencije u sistemima male inercije, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 1-2, 2020.
3. **J. Stojković**, N. Rajaković: Optimalno angažovanje agregata i sistema za skladištenje u mikro-mreži za dan unapred, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 1-2, pp. 296 – 303, 2018.
4. M. Milinić, **J. Stojković**, N. Rajaković: Uticaj integracije električnih vozila u distributivnu mrežu u zavisnosti od načina punjenja, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 1-2, pp. 328 – 332, 2018.
5. Vidaković, **J. Stojković**, A. Savić: Prekogranični prenosni kapacitet u trzisnom okruženju, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 3-4, 2017.
6. B. Škrbić, **J. Stojković**, G. Dobrić: Dekompozicija potrošnje u sektoru domaćinstva primenom tehnike veštačkih neuralnih mreža, Energija, ekonomija, ekologija, ISSN: 0354-8651, UDC: 621.316.1.004, broj 3-4, 2016.
7. **J. Stojković**, D. Šošić, N. Rajaković: Primena konvencionalnog genetskog algoritma za određivanje optimalne raspodele tokova snaga u elektroenergetskom sistemu, Energija,

Зборници скупова националног значаја

M63

1. **J. Stojković**, P.Stefanov: Upotreba električnih vozila u regulaciji frekvencije, 12. Savetovanje CIRED Srbija, Ref. R 4.03, Vrnjačka banja, 30.avgusta –03. septembar 2021.
2. **J. Stojković**, A.Savić: Analiza uticaja integracije vetroelektrana na raspoloživi prenosni kapacitet, 18. međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH® – JAHORINA 2019, Vol. 18, Ref. ENS-3-4, Mart 2019.
3. **J. Stojković**: Optimalan rad poluautonomne punionice za električna vozila, 34. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C6 06, Vrnjačka Banja, 2-6. juna 2019.god.
4. **J. Stojković**, J. Krstivojević: Izbor optimalne lokacije distribuiranog izvora energije u distributivnoj mreži, 11. Savetovanje CIRED Srbija, Ref. R 5.15, Kopaonik, 24. –28. septembar 2018.
5. **J. Stojković**, J. Krstivojević: Minimizacija pokazatelja pouzdanosti u distributivnoj mreži uz uvažanje ograničenih finansijskih sredstava, 17. međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH® – JAHORINA 2018, Vol. 17, Ref. ENS-1-6, Mart 2018.
6. Đ. Lazović, K. Džodić, **J. Stojković**, M. Koprivica, A. Tasić, P. Stefanov, Određivanje skupa sinhronih fazorskih merenja za identifikaciju elektromehaničkih oscilacija, 18. simpozijum: Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, CIGRE Srbija, Zrenjanin, Srbija, Oct, 2018.
7. K. Džodić, Đ. Lazović, **J. Stojković**, M. Koprivica, A. Tasić, P. Stefanov, Primena sinhronizovanih fazorskih merenja u identifikaciji elektromehaničkih oscilacija, 18. simpozijum: Upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, CIGRE Srbija, Zrenjanin, Srbija, Oct, 2018,
8. **J. Stojković**, P.Stefanov: Upravljanje potrošnjom kao podrška regulaciji napona u distributivnim mrežama, 33. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. R C2-05, Zlatibor, 5. – 8. jun 2017.
9. **J. Stojković**, J. Mikulović: Analiza uticaja obnovljivih izvora energije koristeći probabilističke tokove snaga, 16. međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH® – JAHORINA 2017, Vol. 16, Ref. ENS-1-7, Mart 2017.
10. **J. Stojković**, N.Rajaković: Upravljanje potrošnjom kao podrška primarnoj regulaciji frekvencije u izolovanim sistemima, 15. međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH® – JAHORINA 2016, Vol. 15, Ref. ENS-1-7, Mart 2016.
11. **J. Stojković**, D. Šošić: Pomeranje potrošnje po vremenskoj osi u domaćinstvu - analiza uticaja na kupce i sistem, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2015, Vol. 14, Ref. ENS-2-4, Mart 2015, pp. 166-171.
12. D. Šošić, **J. Stojković**: Određivanje optimalne raspodele tokova snaga pomoću modifikovanog genetskog algoritma, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2014, Vol. 13, Ref. ENS-1-1, Mart 2014, pp. 57 - 63.

Пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета, у саставу: др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду-Електротехнички факултет – председник комисије, др Андрија Сарић, редовни професор, Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука – члан комисије који није запослен

на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, др Томислав Шекара, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет – члан комисије, на јавној усменој одбрани, кандидат Јелена Стојковић је **успешно положила докторски испит, одржан 07.09.2021. године.**

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Јелена Стојковић поседује адекватан ниво знања из области које представљају основу неопходну за решавање техничких проблема који се третирају у предложеној докторској дисертацији. До сада је публиковала укупно 25 научних чланака. Објавила је 1 научни чланак у водећем међународном часопису са импакт фактором, као и 3 рада на конференцијама, а сви су у директној вези са темом докторске дисертације. Положила је све испите на докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду са просечном оценом 10. На основу наведених резултата кандидата, наша је процена да је кандидат Јелена Стојковић у стању да успешно реализује израду предметне докторске дисертације.

2. Предмет, циљ и значај истраживања

Тренд декарбонизације електроенергетских система (ЕЕСа) је наметнуо пораст удела обновљивих извора енергије (ОИЕ) 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. С друге стране, гашење електрана на фосилна горива које су директно прикључене на мрежу доприноси смањењу инерције обртних маса. 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 [1][2]. Поред тога, оно што постаје још више изражено јесу различити фреквенцијски одзиви као последица неравномерне расподеле инерције. Промене фреквенције у систему након поремећаја нису униформне и симултане и могу да доведу до великих разлика у угловима појединих делова система, што може резултовати раздвајањем делова система [3][4]. 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.

Традиционална примарна регулација фреквенције од стране синхроних генератора није више довољно брза и ефикасна да спречи смањење фреквенције испод дозвољене границе [2]. Достицањем критичних вредности фреквенције долази или до нежељеног искључивања потрошача или искључивања критичних деоница преносне мреже због промењених токова снага, а тиме и до потенцијалног распада целог система. Један од примера је раздвајање синхроног подручја континенталне Европе на два дела, 8. јануара 2021.године, услед каскадних испада неколико елемената преносне мреже [5]. Из тог разлога је потребно размотрити нове начине регулације фреквенције и активних снага који ће успорити пад фреквенције и бити прилагођене ЕЕСу са великом учешћем уређаја енергетске електронике. Потенцијално решење је виђено у брзој регулацији фреквенције (БРФ) које ће се активирати непосредно након поремећаја и успорити пад фреквенције [6]. Брза регулација фреквенције се дефинише као промена излазне снаге ресурса која је спорија од интерног одзива самих уређаја услед инерције, али бржа од примарне регулације синхроних генератора [7]. Ова фреквенцијска подршка може бити испоручена од стране свих расположивих ресурса који су прикључени на мрежу преко уређаја енергетске електронике и имају способност да брзо одговоре на захтеве за промену излазне снаге као што су ветроелектране [8], HVDC водови

[9], уређаји за складиштење енергије [10], потрошачи [11], итд. Потреба за брзом регулацијом фреквенције је препозната од стране оператора преносних система Велике Британије [12], Ирске [13] и Аустралије [14] и била је предмет истраживања многих истраживача. Већина радова се односе на испитивање потенцијала различитих ресурса да пруже услуге брзе регулације фреквенције [8–11] и не анализирају управљачку стратегију за брзу регулацију фреквенције као додатну системску услугу на нивоу целог ЕЕСа.

Циљ истраживања које је предмет предложене докторске дисертације представља развој управљачке стратегије за брзу регулацију фреквенције која је базирана на локалним мерењима фреквенције и брзине промене фреквенције (Rate of Change of Frequency – RoCoF), која не захтева постојање телекомуникационе инфраструктуре и представља једноставно и економично решење. Истраживање које је најближе тематици ове дисертације и истражује управљачку стратегију и дизајн услуге брзе регулације фреквенције је описано у [15]. У њему аутори предлажу дизајн управљања који се ослања на инфраструктуру централизованог WAMS система што представља сложено и скупо решење. Оптимизација за активирање брзе регулације фреквенције врши се у реалном времену и ослања се на информације о стању система и на телекомуникациону инфраструктуру. Супротно [15], ова дисертација предлаже једноставни дизајн брзе регулације фреквенције која користи искључиво локално мерене вредности фреквенције и RoCoFa. На тај начин је избегнута потреба за скупом и технички захтевном телекомуникационом мрежом и избегнута су кашњења услед преноса управљачких сигнала што доприноси бржем реаговању резерве. Како је RoCoF дефинисан као први извод фреквенције, он омогућава бржу детекцију поремећаја и правовремено активирање брзог фреквенцијског одзива. Предложени дизајн омогућава да активирана резерва буде сразмерна поремећају, уз уважавање просторних карактеристика како расположиве резерве, тако и система у целини, чиме се максимално смањује пропагација утицаја поремећаја на стабилност система.

Претпостављени потенцијали различитих ресурса да пруже услуге брзе регулације фреквенције базирани на доступним анализама [8,10,11] не дају комплетну слику могућности коришћења свих ресурса у БРФ, посебно у случају присуства HVDC водова, односно MTDC система. HVDC системи могу брзо да промене активну снагу и као такви представљају значајан потенцијални ресурс који може да учествује у БРФ, односно пруже фреквенцијску подршку систему непосредно након поремећаја знатно пре него што фреквенција достигне минималну вредност. Због тога је као додатни циљ постављена анализа примене HVDC система у БРФ. Применом управљачке стратегије за БРФ ће бити потврђена њихова применљивост и доказан допринос у децентрализованом управљању за различите топологије и начине повезивања MTDC система.

Иако је локација ресурса који пружа услугу БРФ показана као битна у погледу доприноса побољшању фреквенције у систему са хетерогеном расподелом инерције [16], ниједно истраживање није квантификовало вредност ресурса за БРФ у зависности од локације. Перформансе ресурса за БРФ зависе и од удаљености од места поремећаја и један од циљева ове дисертације је и дефинисање квантификатора којим се могу поредити различите локације ресурса за пружање услуге БРФ за одређени поремећај и дефинисану расподелу инерције. Овај квантификатор може пружити користан податак оператору преносног система у активностима оперативног планирања рада система, чиме би добио информацију која локација резерве највише доприноси побољшању фреквенцијске стабилности система. Поред дефинисања квантификатора, биће предложена и процедура којом се дефинише листа локација ресурса за БРФ која може имати највише доприноса за могуће поремећаје са листе поремећаја за које је везана одговарајућа вероватноћа догађаја (испада) и одређену расподелу инерције. Резултати овог поступка могу бити корисни оператору преносног система приликом поступка алоцирања резерве за БРФ за дан унапред када је познато ангажовање

агрегата у неком временском интервалу и са тим очекивана расподела инерције у систему. Још један од научних доприноса ове дисертације би била и методологија за валоризацију ресурса за БРФ који није ограничен за специфични поремећај и радно стање, као ни за специфичну расподелу инерције у систему. Помоћу Monte-Carlo методе ће се уважити велики број потенцијалних радних стања, расподела инерције и поремећаја са одређеном вероватноћом. Ова процедура може бити значајна операторима преносног система као средство поређења ресурса на различитим локацијама са аспекта планирања развоја система, где су овакви ресурси најзначајнији као и да пружи смернице инвеститорима на којим локацијама постављати ресурсе за БРФ. И на крају, један од циљева ове дисертације је и дефинисање потенцијалног оквира тржишта за БРФ да би се обухватио економски аспект пружаоца услуге БРФ.

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. Поред научног значаја, очекује се да ће резултати који проистекну из израде предложене дисертације имати и практичну применљивост. У дисертацији ће бити приказане управљачке стратегије и процедуре са предлогом како оне могу бити практично имплементиране. На овај начин, пружају се основе за развој софтвера који ће операторима преносног система дати додатни простор за сигурнију и економичнију експлоатације ЕЕСа како у нормалним условима тако и у условима поремећених радних режима.

У наставку су неке од референци које представљају полазну базу за истраживање и потврђују актуелност проблематике која је тема предложене дисертације:

- [1] Fang J, Li H, Tang Y, et al. On the Inertia of Future More-Electronics Power Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 2019;7:2130–46. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2877766>.
- [2] Milano F, Dorfler F, Hug G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems (Invited Paper). 20th Power Systems Computation Conference (PSCC 2018), Dublin, Ireland, June 2018, Dublin, Ireland: IEEE; n.d., p. 1–25. <https://doi.org/10.23919/PSCC.2018.8450880>.
- [3] Adrees A, Milanović J V., Mancarella P. Effect of inertia heterogeneity on frequency dynamics of low-inertia power systems. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2019;13. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6814>.
- [4] Wilson D, Yu J, Al-Ashwal N, Heimisson B, Terzija V. Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response requirements. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2019;113:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.034>.
- [5] ENTSO-E. Continental Europe Synchronous Area Separation on 8 January 2021. 2021.
- [6] Karbouj H, Rather ZH, Flynn D, Qazi HW. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: A critical review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2019;106:488–501. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.046>.
- [7] Eriksson R, Modig N, Elkington K. Synthetic inertia versus fast frequency response: A definition. *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0370>.
- [8] Dakovic J, Ilak P, Baškarad T, Krpan M, Kuzle I. Effectiveness of wind turbine fast frequency response control on electrically distanced active power disturbance mitigation. *IET Conference Publications*, vol. 2018, Institution of Engineering and Technology; 2018. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.1923>.
- [9] Stojković J, Lekić A, Stefanov P. Adaptive Control of HVDC Links for Frequency Stability Enhancement in Low-Inertia Systems. *Energies* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13236162>.

- [10] Zhao T, Parisio A, Milanović J V. Location-dependent distributed control of battery energy storage systems for fast frequency response. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2021;125. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106493>.
- [11] Shi X, Yu J, Cao J, Yong T. Decentralised frequency-based control of a population of heterogeneous ACs without power oscillations. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1213>.
- [12] National Grid. Enhanced frequency response, 2019.
- [13] EirGrid S. DS3 programme operational capability outlook 2016 2015.
- [14] Australian Energy Market Operator. International review of frequency control adaptation. 2016.
- [15] Hong Q, Karimi M, Sun M, Norris S, Bagleybter O, Wilson D, et al. Design and Validation of a Wide Area Monitoring and Control System for Fast Frequency Response. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2020:1–11. <https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2963796>.
- [16] Xu T, Jang W, Overbye TJ. Investigation of inertia's locational impacts on primary frequency response using large-scale synthetic network models. 2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois, PEI 2017, 2017. <https://doi.org/10.1109/PEI.2017.7935742>.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе као предмет истраживања предложене докторске дисертације су:

- Савременим мерним уређајима могуће је са довољном тачношћу естимирати вредности одступања фреквенције и RoCoF у кратком временском интервалу након поремећаја у електроенергетском систему;
- Промене фреквенције након поремећаја у систему са нехомогеном расподелом инерције нису униформне и симултане;
- Делови система који имају мању инерцију и који се налазе ближе поремећају бележе брже и веће промене фреквенције након поремећаја;
- Производни ресурси који су прикључени на мрежу преко уређаја енергетске електронике, системи за складиштење енергије, као и управљива потрошња имају способност да довољно брзо одговоре на захтеве БРФ и да своју подршку у БРФ одржавају у довољно дугом временском интервалу;
- Применом више степени у БРФ који се активирају при различитим вредностима RoCoFa је могуће добити фреквенцијску подршку сразмерну поремећају;
- HVDC системи могу брзо да промене активну снагу након поремећаја и могу да учествују у БРФ;
- Резерва за БРФ која се налази у делу система са мањом инерцијом више доприноси побољшању фреквенције након поремећаја него резерва истих динамичких карактеристика која се налази у делу система са већом инерцијом;
- Резерва за БРФ која се налази ближе поремећају више доприноси побољшању фреквенције након поремећаја него резерва истих динамичких карактеристика која се налази даље од поремећаја.

4. Методе истраживања

У предметној докторској дисертацији истраживања ће бити спровођена кроз анализе, моделовања и симулације.

Аналитичка и нумеричка анализа фреквенцијског одзива динамичког модела система са нехомогеном расподелом инерције пружиће теоријску потпору за дефинисање управљачке стратегије за брзу регулацију фреквенције. Испитивање и верификација предложене управљачке стратегије биће извршено на једноставним системима са више области и IEEE моделима мреже. Имплементација, моделовање и симулирање процеса у електроенергетском систему биће извршено у софтверском пакету MATLAB & Simulink, где ће бити анализирани

фреквенцијски одзиви након поремећаја у циљу детаљне анализе фреквенцијске стабилности и верификације ефикасности развијене управљачке стратегије. За валоризацију ресурса за брзу регулацију фреквенције биће примењена метода Monte Carlo симулација да би се обухватио пробабилистички утицај великог броја радних стања и топологија мреже.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси предложене докторске дисертације су:

- Биће развијена нова формулација проблема за БРФ која уважава нехомогену дистрибуцију инерције у систему;
- Биће развијена оригинална управљачка стратегија за вишестепену брзу регулацију фреквенције која обезбеђује да више резерве буде активирано у деловима система који су више угрожени од стране поремећаја уважавајући и трошкове услуге;
- Биће развијена контрола HVDC система за пружање услуге БРФ;
- Биће развијена методологија којом се квантификује вредност ресурса за БРФ за одређени поремећај у одговарајућем радном стању која је од интереса оператору преносног система при експлоатацији у реалном времену;
- Биће развијена методологија којом се квантификује вредност ресурса за БРФ за листу поремећаја са одговарајућом вероватноћом за планирани радни режим која је од интереса оператору преносног система при планирању рада за дан унапред;
- Биће развијена методологија којом се квантификује вредност ресурса за БРФ за листу поремећаја са одговарајућом вероватноћом и скуп потенцијалних радних режима која је од интереса оператору преносног система при планирању инвестиција у ресурсе за БРФ;
- Биће предложен оквир тржишта за БРФ.

6. План истраживања

Основни кораци истраживања у оквиру предложене докторске дисертације су:

- Преглед и систематизација најновијих достигнућа из области естимације фреквенције и RoCoFa;
- Преглед и систематизација најновијих истраживања расположивости ресурса и управљачких структура за брзу регулацију фреквенције;
- Аналитичка и нумеричка анализа фреквенцијског одзива динамичког модела система са две области;
- Дефинисање управљачке стратегије за БРФ базиране на локалним мерењима фреквенције и брзине промене фреквенције;
- Анализа применљивости развијене управљачке стратегије за БРФ кроз симулације на једноставним системима са више области и IEEE моделима мреже;
- Дефинисање и имплементације управљања HVDC система за пружање услуге БРФ у системима мале инерције;
- Анализа локацијској утицаја ресурса за БРФ у системима са нехомогеном расподелом инерције;
- Развој методологије за валоризацију ресурса за БРФ;
- Анализа применљивости развијене методологије за валоризацију ресурса кроз симулације на једноставним системима са више области и IEEE моделима мреже;
- Дефинисање оквира тржишта за БРФ као додатне системске услуге.

Текст докторске дисертације биће написан на српском језику.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Јелене Стојковић, мастер инжењера електротехнике, Комисија је закључила да:

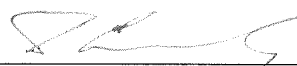
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације;
2. Предложена тема „Нови децентрализовани приступ за примену брзе регулације фреквенције у електроенергетским системима са малом инерцијом“ (енг. “A novel decentralized approach for implementation of fast frequency control in low-inertia power systems”) научно је заснована и припада ужој научној области електроенергетски системи, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос у области предметног истраживања.

Студент докторских студија спроводи истраживања у вези са предложеном темом на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Јелени Стојковић одобри израду докторске дисертације под наведеним називом, а под менторством др Предрага Стефанова, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 27. септембар 2021. године

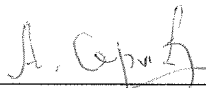
Чланови комисије



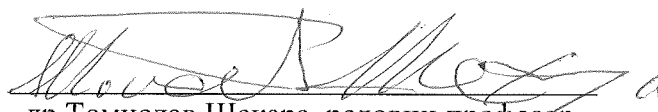
др Предраг Стефанов, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(предложени ментор)



др Жељко Ђуришић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(председник комисије)



др Андрија Сарић, редовни професор,
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука
(члан комисије који није запослен на ЕТФ-у)



др Томислав Шекара, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(члан комисије)