

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Тауфика Талуа за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5046/18 од 26.09.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Тауфика Талуа за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Развој алгоритма управљања двострано напајаним релуктантним генератором у условима несиметричног мрежног напона”, односно на енглеском „Development of Control Algorithm of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions”.

Комисија је одлучила да коригује наслов теме у „Алгоритам управљања двострано напајаним релуктантним генератором у условима несиметричног мрежног напона”, односно на енглеском „Control Algorithm of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions”.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Тауфик Талуо је докторски студент из Либије, рођен 21.03.1974. године у Зуари (Zwara), у Либији. Завршио је основну школу у Зуари 1988. године, а средњу школу (General high school, Alniqat Alkhams, Zwara) 1992. године у истом граду. Уписао је Технички факултет Универзитета у АЛ Завии (University of AL Zawia, (7th of April University), Sabrata - Faculty of engineering, department of electrical and electronic engineering), одсек за електротехнику и електронику, 1992. године. Диломирао је 1998. године са просечном оценом 7,00.

Од јуна 2000. године до августа 2006. године био је запослен на пословима електро инжењера у компанији „General Electricity Company of Libya (GECOL), Zwara”. Од децембра 2006. године до јануара 2014. године био је запослен као предавач на Институту за техничко инжењерство у Зуари (Institute of technical engineering, Zwara).

Дипломске академске – мастер студије на енглеском језику на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за енергетску ефикасност уписао је 2014. године. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је у децембру 2016. године са просечном оценом 8,93. Мастер рад под насловом „Моделовање активног исправљача у електромоторном погону са фреквентним претварачем и анализа рада на основу симулација” одбранио је са оценом 10 код ментора др Лепосава Ристић, доцента.

Докторске студије уписао је школске 2018/2019. године, модул Енергетски претварачи и погони. Положио је све испите на докторским студијама са просечном оценом 10.

До сада је објавио 6 радова, од којих су два на регионалној конференцији са међународним учешћем, три на међународним конференцијама и један рад у часопису са SCI листе.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Тауфик Талуо, рођен 21.03.1974. године, у Зуари (Zwara), у Либији, уписан је школске 2018/2019. године на докторске академске студије, на модулу Енергетски претварачи и погони. Током докторских студија положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом и испунио све обавезе и то:

Р.бр.	Шифра	Назив предмета	Оцена	ЕПСБ	Датум
1	13Д021ИОИ	Интеграција обновљивих извора у дистрибутивни систем	10 (десет)	9	09.02.2020.
2	13Д021ВСЕ	Ветроенергетика и соларна енергетика	10 (десет)	9	11.02.2019.
3	13Д011ППМ	Прелазне појаве у електричним машинама	10 (десет)	9	13.02.2019.
4	13Д011ОПЕ	Одабрана поглавља из електромоторних погона	10 (десет)	9	10.07.2019.
5	13Д011ЕП	Енергетски претварачи	10 (десет)	9	20.09.2019.
6	19Д011ИЕП	Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања	10 (десет)	9	30.06.2022.
7	13Д011ИЕМ	Испитивање и одржавање електричних машина	10 (десет)	9	13.07.2020.
8	13Д011ЕЕФ	Електромоторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије	10 (десет)	9	15.07.2020.
9	19Д091ЕЈ	Енглески језик	10 (десет)	9	05.07.2021.
10	19Д011ИТП	Испитивање трансформатора и пригушница у погону	10 (десет)	9	21.02.2022.
Р.бр.		Назив обавезе		ЕПСБ	
1		Научно-стручни рад		3	
2		Студијско истраживачки рад I		15	
3		Студијско истраживачки рад II		15	
		Укупно остварено		120	

Кандидат је аутор 6 радова, од којих су два на регионалној конференцији са међународним учешћем, три на међународним конференцијама и један рад у часопису са SCI листе. Списак радова је дат у наставку у складу са важећом категоризацијом.

Радови у међународним часописима (M23)

1. T. Taluo, L. Ristić, and M. Jovanović, „Dynamic Modeling and Control of BDFRG under Unbalanced Grid Conditions”, *Energies*, vol. 14, p. 4297, 2021, doi:10.3390/en14144297.

Радови на међународним скуповима штампани у целини (M33)

1. L. Ristić, B. Brković, M. Majstorović, U. Milović, T. Taluo, and M. Bebić, „Electrical Drives with Active Rectifiers Connected to Distorted Utility Grid”, 5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA), 2018, pp. 1-6, doi:10.1109/EFEA.2018.8617093.

2. T. Taluo, L. Ristić, M. Jovanović, „Performance analysis of brushless doubly fed reluctance machines”, XX International Symposium on Power Electronics - Ee 2019, pp. 1 - 6, Society for Power Electronics Novi Sad, Novi Sad, Oct, 2019. doi: 10.1109/PEE.2019.8923437.

3. T. Taluo, L. Ristić, M. Jovanović, „Voltage Oriented Control Design for Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines”, 7th international conference IcETRAN 2020, pp. 1 - 6, Novi Sad, Serbia, Sep, 2020.

Радови на домаћим скуповима са међународним учешћем штампани у целини (M63)

1. L. Ristić, M. Bebić, T. Taluo, M. Šinik, I. Mihailović, D. Jevtić, N. Rašić, „Analysis of Energy Efficiency and Influence to the Supply Grid of Electrical Drives with Active Rectifier”, VI Regional Conference: Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern Europe, pp. 1 - 6, Zlatibor, Srbija, Jun, 2017, ISSN/ISBN: 978-86-7877-028-9.

2. T. Taluo, L. Ristić, M. Jovanović, „Performance analysis of doubly fed induction wind generators”, VII Regional Conference - Industrial energy and environmental protection in the countries of Southeast Europe, pp. 336 - 347, Thermic Society of Serbia, Zlatibor, June, 2019, ISSN/ISBN 978-86-7877-033-3.

Дана 28.09.2022. године кандидат Тауфик Талуо је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду успешно одбранио тему докторске дисертације на усменој одбрани пред Комисијом:

1. др Богдан Брковић, доцент, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет (председник Комисије)
2. др Веран Васић, редовни професор, Универзитет у Новом Саду - Факултет техничких наука
3. др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је анализирала претходно наведене досадашње резултате рада кандидата. На основу извршене анализе, као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија је формирала позитиван став у вези са способностима кандидата за рад на предложеној теми докторске дисертације. Разлози за то су резултати досадашњег рада и оствареног искуства у области којом се бави докторска дисертација, о чему сведоче

објављени радови. Због претходно наведеног, Комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Растућа потражња за електричном енергијом, посебно из обновљивих извора, мотивисала је научну заједницу последњих деценија да развија нове технологије за ефикаснију, поузданију и економичнију производњу електричне енергије. Дobar пример за то представља производња електричне енергије из енергије ветра, која је током последњих година у сталном порасту.

Како би се испунили захтеви који се односе на високу поузданост, стабилност интеграције у електроенергетски систем, управљање реактивном енергијом и продужење радног века инсталисане опреме, у савременој ветроенергетици се користе различите врсте и комбинације електричних машина и енергетских претварача. Током година је предложено много различитих системских решења за примену ветроагрегата велике снаге, која се генерално могу сврстати у три категорије: топологије са непроменљивом брзином, топологије са променљивом брзином и енергетским претвараčem парцијалне снаге ветроагрегата и топологије са променљивом брзином и енергетским претвараčem пуне снаге ветроагрегата [1, 2].

Двострано напајани асинхрони генератори (*Doubly-fed Induction Generator*, DFIG) код којих се ротор напаја из енергетског претварача чија снага износи око 25%–30% номиналне снаге генератора, широко су заступљени у системима са ветроагрегатима велике снаге због њихове важне карактеристике да раде са променљивом брзином и независном контролом активне и реактивне снаге на економичан начин [3]. Код типичног DFIG-а чији се ротор напаја из енергетског претварача може се остварити управљање реактивном енергијом при раду са променљивом брзином, због чега овај погон може да одговори на већину постављених захтева [4]. Међутим, основни недостатак примене топологије са DFIG-ом је постојање клизних прстенова и четкица на ротору који су неопходни за његово напајање. С обзиром на то да се конверзија енергије ветра у електричну најчешће користи на удаљеним локацијама, а све више у ветроелектранама на мору, одржавање и поузданост представљају главне факторе при одабиру генератора. Клизни прстенови и намотани ротор могу да удвоструче цену ветрогенератора [4] и да на тај начин имају пресудан утицај на цену целог агрегата за производњу електричне енергије из енергије ветра.

У новије време се двострано напајани релуктантни генератор без четкица на ротору (*Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator*, BDFRG), у даљем тексту само двострано напајани релуктантни генератор јер се код савремених машина са релуктантним ротором подразумева да немају четкице на овом делу машине, предлаже као потенцијална алтернатива постојећим решењима у ветроенергетици. BDFRG, задржавајући већину предности постојећих решења, нуди и високу поузданост у раду [5-8]. BDFRG представља економично решење за проблеме које има класичан DFIG са поузданошћу и одржавањем четкица и клизних прстенова у системима за конверзију енергије ветра у електричну енергију (*Wind Energy Conversion Systems*, WECS) [9-11]. Као што је поменуто, ове особине су од посебног интереса за ветроелектране на мору, код којих су значајни трошкови рада и одржавања четкица ветрогенератора [6]. BDFRG је такође супериоран у односу на DFIG у погледу интеграције у електроенергетски систем, посебно при краткотрајним пропадима мрежног напона. Ово је последица већих релативних вредности индуктивности расипања, мање вредности струје квара и једноставнијег заштитног кола енергетског претварача са стране машине, без потребе за постојањем краткоспојног заштитног прекидача [12].

Концепт двострано напајаних машина без четкица на ротору датира од почетка 20. века [13], и везује се за патент који су регистровала браћа Siemens и Lydall 1902. године [14]. Од тада па до данас, ова врста машине је у свом развоју имала три главне фазе [15, 16]. У

првој фази, између 1910 и 1920.год, Hunt и Creedy су истраживали концепт самокаскадних машина. Овај концепт се састојао од две асинхроне машине са намотаним роторима које су имале заједничко вратило, док су им намотаји ротора били каскадно повезани [17, 18], због чега није било потребе за четкицама или клизним прстеновима. Даља побољшања у вези са двострано напајаним машинама без четкица на ротору (*Brushless Doubly-Fed Machines*, BDFM) извршили су у другој фази Thomas, Kusko, Somuah и други 70-их година прошлог века [19-22]. Они су предложили јединствен статор који је настао спајањем намотаја два одвојена статора, тако што су два нова сета намотаја намотана на заједничко језгро статора. Истовремено су истраживали два различита типа ротора, кавезни ротор са утиснутим проводницима кавеза у тело ротора и релуктантни ротор. Посебно се Broadway бавио овом темом, који је додатно и поставио модел машине у стационарном стању, заједно са еквивалентном електричном шемом. Оно што је заједничко за обе фазе развоја ове машине је да је у погледу анализе и моделовања она и даље посматрана као концепт који се састоји од две засебне машине у заједничком кућишту. У трећој фази, 80-тих година прошлог века, Heyne и El-Antably су представили даљи рад на ову тему, тако што су конструисали тзв. „Broadway”-ову двострано напајану машину без четкица на ротору, али нису постигли значајну густину обртног момента, као ни енергетску ефикасност за практичне примене [22, 23].

Двострано напајана релуктантна машина (*Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine*, BDFRM) је деведесетих година прошлог века привукла велику пажњу, што је углавном било подстакнуто брзим развојем енергетске електронике [16]. Од тада су објављени многи научни радови у којима се представљају и детаљније анализирају принципи рада двострано напајаних машина без четкица на ротору, њихове радне карактеристике, методе управљања и могућности примене. Године 1991, динамички модел двострано напајаног релуктантног мотора у 'abc' референтном систему, као и одговарајући 'dq' модел, представљени су у литератури [24, 25].

Методологија за анализу перформанси у стационарном стању и дизајн двострано напајане релуктантне машине представљени су у [26], а затим је настављена даља анализа у електромагнетном погледу, у области динамичког моделовања и аналитичког прорачуна параметара [27], [28]. У [29] су аутори увели поређење између синхроне релуктантне машине (SyncRM) и BDFRM, где су разматрали неке аспекте као што су капацитети ове две машине у погледу генерисања обртног момента, ефикасности и снаге инвертора. Исти аутори су представили компаративну теоријску анализу и аспекте практичне примене важних стратегија управљања за BDFRM у [5, 30]. Такође су за исти случај дали преглед неопходних компромиса у погледу перформанси машине и снаге енергетског претварача.

Током година, у литератури су представљене различите стратегије управљања. Оне се углавном могу сврстати у: скаларно управљање [31-35], векторско управљање, које може бити оријентисано у односу на вектор напона (VOC) (који се у том случају поклапа са референтном осом), или у односу на вектор флукса (FOC) (који у том случају представља референтну осу) [36-38] и директна контрола момента (*Direct Torque Control*, DTC) [31, 39, 40]. Ове технике управљања могу бити имплементиране уз коришћење сензора положаја ротора или без сензора [41], могу користити различите методе за естимацију (процену) положаја или брзине, укључујући MRAS (*Model Reference Adaptive System*) структуру за процену брзине и флукса ротора [8, 38, 42, 43], а такође могу бити засноване на примени опсервера, нпр. за брзину, или за моменат (и флукс) код директне контроле момента [44]. Различите стратегије управљања имају различите циљеве као што су: јединични фактор снаге (на страни намотаја директно везаног за мрежу) [37, 45], минимална струја енергетског претварача или максимални обртни момент по амперу струје управљачког намотаја (намотај статора који се напаја преко инвертора) (*Maximum Torque per Inverter Ampere*, MTPA), минимални губици снаге у бакру, максимални фактор снаге [37], управљање реактивном енергијом и моментом машине [46] или директна контрола снаге (*Direct Power Control*, DPC) [47-50]. Осим тога, публиковани су и други начини управљања, као што је управљање које се

заснива на примени машине са отвореним (слободним) крајевима намотаја [51, 52], примена побољшане методе за регулацију брзине која се заснива на алгоритму роја честица (Particle Swarm Optimization) [53], [54], итд.

Ветроелектране се често постављају у удаљеним, руралним подручјима, где је очекивано присуство слабих мрежа са несиметричним (неуравнотеженим) напонима [55-57]. Због тога је веома важна анализа рада ветрогенератора у условима несиметричних (неуравнотежених) напона мреже (*Unbalanced Grid Voltage Conditions*, UGVC) и развој и примена адекватне стратегије управљања. У случају несиметричног напајања, у напону мреже су присутне компоненте инверзног система напона, које стварају проблеме у раду ветрогенератора као што су неуравнотежене примарне струје (струје у намотају директно везаном на мрежу), виши хармоници у таласном облику секундарне струје (струје у намотају који се напаја преко енергетског претварача – управљачки или секундарни намотај), неједнако загревање или вруће тачке у намотајима [58] које деградирају изолацију и смањују радни век намотаја и друго. Интеракција између компоненти инверзног система напона и компоненти директног система струја генерише пулсације снаге и пулсирајући обртни момент, што може изазвати додатни стрес у механичким деловима погона, посебно код редуктора [7, 58-62] и чак може учинити да систем не може да одговори на захтеве при важећим ограничењима, која су одређена законском регулативом [63, 64].

Поменути проблеми могу довести до искључења ветроагрегата са мреже. Међутим, одговарајући начин управљања у условима несиметричног напона мреже може решити ове проблеме и спречити непотребна искључења [65]. С друге стране, новија законска регулатива (*grid codes*) у погледу електроенергетске мреже захтева да ветроагрегати издрже максималну вредност несиметрије напона од 2% номиналног напона мреже, а да при томе не испадну из рада [66, 67].

У условима несиметричног мрежног напона, у случају двострано напајаних асинхронних генератора (DFIG) у почетку су коришћене стандардне методе управљања које се користе у нормалним (симетричним) напонским условима, као што је нпр. најчешће коришћено векторско VOC управљање [68]. Стандардно векторско управљање не може да обезбеди адекватно управљање инверзним компонентама струја и последично резултује незадовољавајућим перформансама ветрогенератора [67]. Због тога се морају извршити даља побољшања управљачког алгоритма у смислу регулације компонената роторске струје, како директног, тако и инверзног редоследа, како би се елиминисала таласност обртног момента и осцилације активне снаге [68, 69]. Различите стратегије управљања су предложене у литератури за DFIG у условима несиметричног мрежног напона, при чему су детаљно анализирани перформансе система [64, 66, 69-75]. Упркос томе што су многе студије представиле напредак у овој области током последњих година, још увек недостају публикована истраживања о перформансама BDFRG-а у условима несиметричног мрежног напона. Нови математички модел за BDFRG у условима несиметричног напона мреже је уведен у [7] коришћењем једначина за директан и инверзни систем напона и струја. Моделован је у $d-q$ референтном систему електрични и механички део машине, изведени су изрази за обртни момент и снаге. Такође је уведена метода раздвајања компоненти инверзног система од компоненти директног система за примену у реалном времену.

Аутори [7] дали су додатну верификацију динамичког модела BDFRG-а у условима несиметричног напона мреже у [65]. Једначине математичког модела BDFRG-а у временском домену су коришћене за извођење модела у простору стања, а заједно са применом теорије симетричних компонената и за извођење $d-q$ модела у директном и инверзном референтном систему. Поред тога, вршене су симулације на развијеном моделу у Matlab/Simulink окружењу како би се демонстрирао рад BDFRG-а у условима несиметрије мрежног напона. Исти аутори су користили модел представљен у [7] да би развили предиктивну методу за директно управљање снагом (*Predictive Direct Power Control*, PDPC) BDFRG-а у условима несиметрије мрежног напона у [58]. Предложени PDPC алгоритам заснован на стратегији компензације снаге намењен је постизању два циља: уравнотежавање примарних струја и

ублажавање осцилација електромагнетног момента. Међутим, утицај неуравнотеженог напона мреже на примарну активну снагу и секундарну струју није у потпуности истражен.

Значај предложеног истраживања у овој докторској тези огледа се у чињеници да BDFRG представља обећавајућу алтернативу DFIG-у због својих конкурентних перформанси у односу на стандардне генераторе, због чега је последњих година задобио велику пажњу научне заједнице. Стога је неопходно стално развијати и унапређивати ефикасне алгоритме управљања ветроагрегатима које се заснивају на примени BDFRG-а, како би се обезбедиле жељене перформансе у различитим напонским условима у мрежи и испунили сви захтеви дефинисани важећом законском регулативом. Све наведено чини ову област веома интересантном и атрактивном за будући научно истраживачки рад.

Циљ истраживања у докторској дисертацији је развој алгоритма управљања BDFRG – ом са применом у ветроенергетици, који се заснива на векторском управљању, а чијом употребом би се повећала робусност система на појаву инверзних компоненти мрежног напона и побољшала управљивост у условима са несиметрчним мрежним напонима.

Базна литература

- [1] H. Li and Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 123-138, 2008
- [2] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind energy generation: modelling and control*: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Y. Zhou, P. Bauer, J. A. Ferreira, and J. Pierik, "Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 240-246, 2009, doi:10.1109/TEC.2008.2011833
- [4] E. M. Schulz and R. E. Betz, "Use of Doubly Fed Reluctance Machines in Wind Power Generation," in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, pp. 1901-1906, doi:10.1109/EPEPMC.2006.4778683
- [5] R. E. Betz and M. G. Jovanovic, "Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, pp. 332-339, 2002, doi:10.1109/TEC.2002.801997
- [6] D. G. Dorrell and M. Jovanovic, "On the possibilities of using a brushless doubly-fed reluctance generator in a 2 MW wind turbine," in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1-8
- [7] M. Moazen, R. Kazemzadeh, and M.-R. Azizian, "Mathematical modeling and analysis of brushless doubly fed reluctance generator under unbalanced grid voltage condition," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 547-559, 2016/12/01/ 2016, doi:10.1016/j.ijepes.2016.04.050
- [8] M. R. Agha Kashkooli and M. G. Jovanović, "Parameter independent control of doubly-fed reluctance wind generators without a rotor position sensor," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107778, 2022/05/01/ 2022, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778
- [9] M. Cheng, P. Han, G. Buja, and M. G. Jovanović, "Emerging Multiport Electrical Machines and Systems: Past Developments, Current Challenges, and Future Prospects," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, pp. 5422-5435, 2018, doi:10.1109/TIE.2017.2777388
- [10] M. Jovanović, S. Ademi, and D. X. Llano, "Control of doubly-fed reluctance machines without a shaft position or speed sensor," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2018, pp. 1245-1250
- [11] O. Oualah, D. Kerdoun, and A. Boumassata, "Comparative study between sliding mode control and the vector control of a brushless doubly fed reluctance generator based on wind energy conversion systems," *Electrical Engineering & Electromechanics*, (1), pp. 51-58, 2022
- [12] A. Attya, S. Ademi, M. Jovanović, and O. Anaya-Lara, "Frequency support using doubly fed induction and reluctance wind turbine generators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 403-414, 2018
- [13] P. C. Roberts, "A study of brushless doubly-fed (induction) machines," *PhD, University of Cambridge, Cambridge, UK*, 2004
- [14] F. Lydall, "Improvement in polyphase induction motors," *British Patent*, vol. 16839, 1902

- [15] B. Guan, *Design and control of a high-efficiency doubly-fed brushless machine for power generation applications*: The Ohio State University, 2014.
- [16] L. Xu, B. Guan, H. Liu, L. Gao, and K. Tsai, "Design and control of a high-efficiency Doubly-Fed Brushless machine for wind power generator application," in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 2409-2416, doi:10.1109/ECCE.2010.5617911
- [17] L. J. Hunt, "The "cascade" induction motor," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 52, pp. 406-426, 1914.
- [18] F. Creedy, "Some developments in multi-speed cascade induction motors," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 59, pp. 511-532, 1921.
- [19] A. Broadway and L. Burbridge, "Self-cascaded machine: a low-speed motor or high-frequency brushless alternator," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1970, pp. 1277-1290.
- [20] A. Broadway, "Cageless induction machine," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1971, pp. 1593-1600.
- [21] A. Broadway, B. Cook, and P. Neal, "Brushless cascade alternator," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1974, pp. 1529-1535.
- [22] A. Kusko and C. B. Somuah, "Speed control of a single-frame cascade induction motor with slip-power pump back," *IEEE transactions on industry applications*, pp. 97-105, 1978.
- [23] C. Heyne and A. El-Antably, "Reluctance and doubly-excited reluctance motors," Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, PA (USA). Research and Development ... 1984.
- [24] L. Xu, F. Liang, and T. A. Lipo, "Transient model of a doubly excited reluctance motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, pp. 126-133, 1991, doi:10.1109/60.73799
- [25] F. Liang, L. Xu, and T. A. Lipo, "d-q ANALYSIS OF A VARIABLE SPEED DOUBLY AC EXCITED RELUCTANCE MOTOR," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 19, pp. 125-138, 1991/03/01 1991, doi:10.1080/07313569108909511
- [26] Y. Liao, L. Xu, and L. Zhen, "Design of a doubly fed reluctance motor for adjustable-speed drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1195-1203, 1996, doi:10.1109/28.536883
- [27] R. E. Betz and M. Jovanovic, *Introduction to Brushless Doubly Fed Reluctance Machines – The Basic Equations*, 1998.
- [28] R. E. Betz and M. Jovanovic, "Introduction to the Space Vector Modeling of the Brushless Doubly Fed Reluctance Machine," *Electric Power Components and Systems - ELECTR POWER COMPO SYST*, vol. 31, pp. 729-755, 08/01 2003, doi:10.1080/15325000390219785
- [29] R. E. Betz and M. G. Jovanovic, "The brushless doubly fed reluctance machine and the synchronous reluctance machine-a comparison," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, pp. 1103-1110, 2000.
- [30] M. G. Jovanovic, R. E. Betz, and Y. Jian, "The use of doubly fed reluctance machines for large pumps and wind turbines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 1508-1516, 2002, doi:10.1109/TIA.2002.804749
- [31] M. Jovanovic. (2009, Sensored and sensorless speed control methods for brushless doubly fed reluctance motors. *IET Electric Power Applications* 3(6), 503-513. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2008.0227>
- [32] A. Ibrahim, M. Marei, and H. El-Goharey, "Dynamic Responses Comparison of Control Techniques of BDFRG based WECS," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 9, pp. 1, 672-1, 678, 2018.
- [33] M. Hassan and M. Jovanovic, "Improved scalar control using flexible DC-Link voltage in Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines for wind applications," in *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, 2012, pp. 482-487, doi:10.1109/EFEA.2012.6294037
- [34] M. G. Mousa, S. M. Allam, and E. M. Rashad, "Sensored and sensorless scalar-control strategy of a wind-driven BDFRG for maximum wind-power extraction," *Journal of Control and Decision*, vol. 5, pp. 209-227, 2018/04/03 2018, doi:10.1080/23307706.2017.1353930
- [35] T. Taluo, L. Ristić, and M. Jovanović, "Performance analysis of brushless doubly fed reluctance machines," in *2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 2019, pp. 1-6, DOI: 10.1109/PEE.2019.8923437

- [36] S. Ademi and M. G. Jovanović, "Vector Control Methods for Brushless Doubly Fed Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 96-104, 2015, doi:10.1109/TIE.2014.2327564
- [37] M. G. Mousa, S. M. Allam, and E. M. Rashad, "A comparative study of vector-control strategies for maximum wind-power extraction of a grid-connected wind-driven brushless doubly-fed reluctance generator," *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 14, pp. 1-11, 2017/04/03 2017, doi:10.1080/1448837X.2017.1410964
- [38] M. Kumar, S. Das, and K. Kiran, "Sensorless Speed Estimation of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator Using Active Power Based MRAS," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 7878-7886, 2019, doi:10.1109/TPEL.2018.2882473
- [39] H. Chaal and M. Jovanovic, "Practical Implementation of Sensorless Torque and Reactive Power Control of Doubly Fed Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 2645-2653, 2012, doi:10.1109/TIE.2011.2161065
- [40] H. Chaal and M. Jovanovic, "Toward a Generic Torque and Reactive Power Controller for Doubly Fed Machines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 113-121, 2012, doi:10.1109/TPEL.2011.2160731
- [41] S. Ademi and M. Jovanović, "A novel sensorless speed controller design for doubly-fed reluctance wind turbine generators," *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 229-237, 2016/07/15/ 2016, doi:10.1016/j.enconman.2016.04.084
- [42] K. Kiran and S. Das, "Implementation of reactive power-based MRAS for sensorless speed control of brushless doubly fed reluctance motor drive," *IET Power Electronics*, vol. 11, pp. 192-201, 2018, doi:10.1049/iet-pel.2017.0104
- [43] M. R. Agha-Kashkooli and M. Jovanović, "Sensorless MRAS control of emerging doubly-fed reluctance wind generators," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, pp. 2007-2021, 2021.
- [44] H. Chaal, M. Jovanovic, and K. Busawon, "Sliding Mode Observer based direct torque control of a Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine," in *2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications*, 2009, pp. 866-871, doi:10.1109/ISIEA.2009.5356345
- [45] M. G. Mousa, S. M. Allam, and E. M. Rashad, "Maximum power extraction under different vector-control schemes and grid-synchronization strategy of a wind-driven Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator," *ISA Transactions*, vol. 72, pp. 287-297, 2018/01/01/ 2018, doi:10.1016/j.isatra.2017.10.005
- [46] H. Chaal and M. Jovanovic, "Power control of brushless doubly-fed reluctance drive and generator systems," *Renewable Energy*, vol. 37, pp. 419-425, 2012/01/01/ 2012, doi:10.1016/j.renene.2011.06.011
- [47] M. Moazen, R. Kazemzadeh, and M.-R. Azizian, "Model-based predictive direct power control of brushless doubly fed reluctance generator for wind power applications," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 2497-2507, 2016/09/01/ 2016, doi:10.1016/j.aej.2016.08.004
- [48] F. Zhang, L. Zhu, S. Jin, X. Su, S. Ademi, and W. Cao, "Controller Strategy for Open-Winding Brushless Doubly Fed Wind Power Generator With Common Mode Voltage Elimination," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, pp. 1098-1107, 2019, doi:10.1109/TIE.2018.2811370
- [49] S. Jin, L. Shi, L. Zhu, W. Cao, T. Dong, and F. Zhang, "Dual Two-Level Converters Based on Direct Power Control for an Open-Winding Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 3898-3906, 2017, doi:10.1109/TIA.2017.2693959
- [50] H. Chaal and M. Jovanovic, "Direct Power Control of Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines," in *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*, 2010, pp. 1-6, doi:10.1049/cp.2010.0148
- [51] J. Shi, Z. Fengge, F. Shibo, Z. Liancheng, and C. Wenping, "Power Decoupling Control of Open-Winding Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine for Wind Power Generator Application," *International Journal of Control and Automation*, vol. 8, pp. 173-182, 09/30 2015, doi:10.14257/ijca.2015.8.9.17
- [52] F. Zhang, L. Zhu, S. Jin, W. Cao, D. Wang, and J. L. Kirtley, "Developing a New SVPWM Control Strategy for Open-Winding Brushless Doubly Fed Reluctance Generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4567-4574, 2015, doi:10.1109/TIA.2015.2461614

- [53] A. Sahu, K. Kiran, and S. Das, "Particle Swarm Optimization based tuning of brushless doubly-fed reluctance machine drive for speed control applications," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-6, doi:10.1109/ICPEICES.2016.7853163
- [54] O. Sadeghian, S. Tohidi, B. Mohammadi-Ivatloo, and F. Mohammadi, "A Comprehensive Review on Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine," *Sustainability*, vol. 13, p. 842, 2021, doi:10.3390/su13020842
- [55] E. Muljadi, D. Yildirim, T. Batan, and C. P. Butterfield, "Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation," in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, 1999, pp. 1359-1365 vol.2, doi:10.1109/IAS.1999.801678
- [56] T. Brekken, N. Mohan, and T. Undeland, "Control of a doubly-fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions," in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005, pp. 10 pp.-P. 10.
- [57] R. Cardenas, R. Peña, S. Alepuz, and G. Asher, "Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 2776-2798, 2013.
- [58] M. Moazen, R. Kazemzadeh, and M. R. Azizian, "A model-based PDPC method for control of BDFRG under unbalanced grid voltage condition using power compensation strategy," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 8, pp. 128-140, 2020, doi:10.22098/joape.2020.5286.1392
- [59] Y. El Karkri, A. B. Rey-Boué, H. El Moussaoui, J. Stöckl, and T. I. Strasser, "Improved Control of Grid-connected DFIG-based Wind Turbine using Proportional-Resonant Regulators during Unbalanced Grid," *Energies*, vol. 12, p. 4041, 2019, doi:10.3390/en12214041
- [60] J. Chhor, P. Tourou, and C. Sourkounis, "Mitigation of oscillations in DFIG-based WECS operating in unbalanced networks," in *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2015, pp. 465-471, doi:10.1109/MED.2015.7158792
- [61] I. Khan, K. Zeb, W. U. Din, S. U. Islam, M. Ishfaq, S. Hussain, *et al.*, "Dynamic Modeling and Robust Controllers Design for Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbines under Unbalanced Grid Fault Conditions," *Energies*, vol. 12, p. 454, 2019, doi:10.3390/en12030454
- [62] D. Sun, Y. Wang, T. Jiang, X. Wang, J. Sun, and H. Nian, "Multi-Target Control Strategy of DFIG Using Virtual Synchronous Generator Based on Extended Power Resonance Control under Unbalanced Power Grid," *Energies*, vol. 13, p. 2232, 2020, doi:10.3390/en13092232
- [63] G. F. Gontijo, T. C. Tricarico, B. W. França, L. F. Da Silva, E. L. Van Emmerik, and M. Aredes, "Robust model predictive rotor current control of a DFIG connected to a distorted and unbalanced grid driven by a direct matrix converter," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, pp. 1380-1392, 2018.
- [64] S. Das and B. Singh, "Enhanced Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System Under Unbalanced Grid Voltages Using Mixed Generalized Integrator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 308-320, 2022.
- [65] M. Moazen, R. Kazemzadeh, and M.-R. Azizian, "Mathematical proof of BDFRG model under unbalanced grid voltage condition," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 21, p. 100327, 2020/03/01/ 2020, doi:https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100327
- [66] J. Hu and Y. He, "Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 273-281, 2009/02/01/ 2009, doi:10.1016/j.epsr.2008.06.017
- [67] J. Hu, Y. He, L. Xu, and B. W. Williams, "Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 439-451, 2008.
- [68] A. Luna, K. Lima, F. Corcoles, E. Watanabe, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, "Control of DFIG-WT under unbalanced grid voltage conditions," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 370-377.
- [69] L. Xu and Y. Wang, "Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 314-323, 2007, doi:10.1109/TPWRS.2006.889113

- [70] B. I. Nass, T. M. Undeland, and T. Gjengedal, "Methods for reduction of voltage unbalance in weak grids connected to wind plants," in *IEEE/CIGRE Workshop on Wind Power and the Impacts on Power Systems*, 2002, pp. 1-7.
- [71] M. R. Rathi, P. P. Jose, and N. Mohan, "A novel h/sub/spl infin//based controller for wind turbine applications operating under unbalanced voltage conditions," in *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*, 2005, p. 6 pp.
- [72] T. Brekken and N. Mohan, "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions," in *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC'03.*, 2003, pp. 760-764.
- [73] T. K. A. Brekken and N. Mohan, "Control of a Doubly Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 129-135, 2007, doi:10.1109/TEC.2006.889550
- [74] L. Xu, "Coordinated Control of DFIG's Rotor and Grid Side Converters During Network Unbalance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 1041-1049, 2008, doi:10.1109/TPEL.2008.921157
- [75] L. Xu, "Enhanced control and operation of DFIG-based wind farms during network unbalance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 1073-1081, 2008.

3. Полазне хипотезе

- 1- BDFRG има већу вредност реактансе расипања због слабије магнетне спреге између намотаја у односу на DFIG. Ова карактеристика може да буде корисна при интеграцији у електроенергетску мрежу, јер су резултујуће вредности струје квара пропорционално смањене, обезбеђујући супериорније перформансе у односу на DFIG у случају краткотрајних пропада мрежног напона (LVRT).
- 2- Једначине динамичког модела BDFRG-а су сличне са једначинама DFIG-а, али нису идентичне по форми. Због тога се може извести закључак да стратегије управљања такође могу бити сличне за обе машине.
- 3- Сваки несиметричан трофазни систем се може представити преко три симетрична трофазна система: директног, инверзног и нултог система. Због изоловане неутралне тачке намотаја BDFRG-а, нулти систем напона нема никакав утицај на перформансе BDFRG-а.
- 4- BDFRG представља добар избор за примену у ветроенергетици због своје конструкције, јер не поседује клизне прстенове и четкице на ротору. Ветроелектране се често постављају у удаљеним руралним подручјима, где је очекивано присуство слабих мрежа са несиметричним (неуравнотеженим) напонима. Може се реализовати алгоритам управљања BDFRG -ом који ће применом методе симетричних компонената обезбедити боље перформансе ветроагрегата у случају несиметрије напона мреже.

4. Научне методе истраживања

- Почетно истраживање ће се односити на формулацију проблема управљања BDFRG-ом у условима несиметричног мрежног напона, а у контексту примене BDFRG-а у ветроенергетици биће дат детаљан преглед стања у области са пратећом анализом најчешће коришћених стратегија управљања.
- Истраживање ће се ослањати на методе за анализу динамичког модела заснованог на примени компонената директног и инверзног система напона и струја коришћењем рачунарских симулација у софтверском пакету Matlab/Simulink.
- Примениће се аналитичке методе за одређивање одговарајућих референтних струја.
- Користиће се методе оптимизације за синтезу алгоритма управљања.

- Коришћењем софтвера Matlab/Simulink биће извршена анализа предложене стратегије управљања у погледу успешности отклањања нежељених ефеката несиметричног мрежног напона.
- Пројектовање BDFRG-а велике снаге коришћењем софтвера на бази методе коначних елемената (*Finite Elements Method*, FEM).
- Примена аналитичке методе за прорачун параметара BDFRG-а, на основу FEM модела.
- Провера предложене унапређене стратегије управљања применом Maxwell/ Simplorer/ Simulink косимулације.
- Верификација перформанси новопроектваног BDFRG-а велике снаге применом предложеног развијеног алгоритма помоћу симулација у реалном времену на HIL (*Hardware In the Loop*) поставци у лабораторији.

5. Очекивани научни допринос

У оквиру предложене докторске дисертације очекују се следећи научни доприноси:

- Детаљан преглед и систематизација постојећих истраживања у области моделовања и управљања DFIG-ом и BDFRG-ом у условима несиметричног напона мреже, са нагласком на примену BDFRG-а у системима за конверзију енергије ветра у електричну енергију.
- Теоријско разјашњење и допринос бољем разумевању перформанси ветроагрегата са BDFRG-ом у условима са несиметричним напонима мреже.
- Реализација оригиналног управљачког алгоритма заснованог на векторском управљању за примену код ветроагрегата са BDFRG-ом који је прикључен на слабу мрежу у чијем су напону присутне компоненте директног и инверзног система.
- Прелиминарни пројекат BDFRG-а велике снаге применом Ansys Maxwell софтвера у циљу провере новог предложеног алгоритма управљања на HIL поставци.
- Демонстрација ефикасности предложеног управљачког алгоритма применом симулација у реалном времену.

6. План истраживања и структура рада

Примарни циљ ове докторске тезе је анализа перформанси двострано напајаног релуктантног ветрогенератора у условима несиметричног мрежног напона, код кога је примењен нови алгоритам управљања, развијен и предложен у овој тези. Да би се постигао овај циљ, сачињен је следећи план истраживања:

1. Преглед постојеће литературе о теми докторске тезе како би се идентификовала најбоља решења за синтезу управљачког алгоритма у разматраном случају.
2. Развој динамичког модела BDFRG-а у условима несиметричног мрежног напона применом једначина за директни и инверзни систем.
3. Развој алгоритма управљања заснованог на векторској контроли са циљем елиминације негативног утицаја компоненти инверзног система напона на перформансе ветрогенератора.
4. Анализа перформанси предложеног управљачког алгоритма применом рачунарских симулација у софтверу Matlab/Simulink.
5. Анализа перформанси предложеног управљачког алгоритма применом Maxwell / Simplorer / Simulink косимулације за случај BDFRG-а мале снаге.

6. Пројектовање BDFRG-а снаге 1.5MW за имплементацију у симулацијама у реалном времену.
7. Анализа перформанси новопројектованог ветрогенератора велике снаге у условима несиметричног мрежног напона на HIL поставци, код које се C код компајлира у dSPACE® из Simulink® модела користећи Real-Time Workshop.

На основу истраживања спроведеног по датом плану, у тези ће бити формулисани и приказани главни научни доприноси. Наведени план истраживања у докторској дисертацији има за циљ развој алгорита управљања BDFRG – ом са применом у ветроенергетици. Овај алгорита се заснива на векторском управљању, а његова примена треба да обезбеди повећање робусности система и побољшање управљивости, посебно у случају ветроелектрана у удаљеним руралним подручјима, као и на мору, где је очекивано присуство слабих мрежа са несиметричним (неуравнотеженим) напонима. Управљачки алгорита ће бити тестиран на моделу новопројектованог BDFRG – а велике снаге у симулацијама у реалном времену на HIL поставци.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, усмене одбране теме докторске дисертације, као и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Тауфика Талуа, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Наслов предложене теме „Развој алгорита управљања двострано напајаним релуктантним генератором у условима несиметричног мрежног напона”, односно на енглеском „Development of Control Algorithm of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions”, Комисија је одлучила да коригује у „**Алгоритам управљања двострано напајаним релуктантним генератором у условима несиметричног мрежног напона**”, односно на енглеском „**Control Algorithm of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions**”. Предложена тема је научно заснована, а резултати теме ће представљати значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области „Енергетски претварачи и погони”. Предвиђено је да се теза напише на енглеском језику.

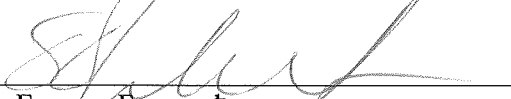
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Тауфику Талуу одобри израду докторске дисертације која ће бити написана на енглеском језику, а под називом „**Алгоритам управљања двострано напајаним релуктантним генератором у условима несиметричног мрежног напона**”, односно на енглеском језику „**Control Algorithm of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions**”, под менторством др Лепосаве Ристић, ванредног професора.

У Београду, 29.09.2022.год

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



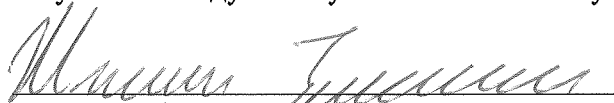
др Лепосава Ристић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Богдан Брковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Веран Васић, редовни професор
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука



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