

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Илије Класнића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5021/13-1 од 25.11.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Илије Класнића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Илија Класнић је рођен 15.09.1989. године у Београду. Основну школу „Јован Јовановић Змај“ и Гимназију у Обреновцу завршио је као носилац Вукове дипломе и са бројним дипломама са такмичења из математике и физике. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2008. године, а дипломирао 2012. године са просечном оценом 8,94 на Одсеку за Енергетику, смер Енергетски претварачи и погони. Мастер студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је у октобру 2012. године, а завршио 2013. године са просечном оценом 10 на смеру Електроенергетски претварачи, под менторством др Зорана Лазаревића. Од фебруара 2013. године запослен је у Електротехничком институту Никола Тесла а.д. у Београду где је ангажован на пословима пројектовања, израде и пуштања у рад система побуде синхроних генератора, фабричким, примопредајним и гаранцијским испитивањима обртних електричних машина (синхроних генератора и мотора), испитивањима енергетских претварача итд. У звању истраживач-приправник био је учесник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја „Повећање енергетске ефикасности ХЕ и ТЕ ЕПС-а развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију“. Током рада учествовао је у изради више стручних студија за потребе ЈП ЕПС у области испитивања, унапређења рада и експлоатације синхроних електричних машина. Аутор или коаутор је неколико радова публикованих у часописима са импакт фактором и скуповима националног и међународног значаја. Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача на секцији Електроенергетика 58. конференције Етран

одржане у Врњачкој бањи 2-5. јуна 2014. године. Члан је студијског комитета СТК А1 за Обртне електричне машине у оквиру CIGRE Србија.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Илија Класнић уписао је докторске студије на модулу Енергетски претварачи и погони на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2013. године. Током докторских студија испунио је следеће испитне и студијске обавезе:

Испити:

1. Уземљивачки системи (Оцена:10; ЕСПБ:9)
2. Мерне спреге и мерни трансформатори (Оцена:10; ЕСПБ:9)
3. Електромоторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије (Оцена:10; ЕСПБ:9)
4. Испитивање и одржавање електричних машина (Оцена:10; ЕСПБ:9)
5. Стабилност електроенергетских система (Оцена:10; ЕСПБ:9)
6. Оптимални и адаптивни стохастички системи (Оцена:10; ЕСПБ:9)
7. Надгледање стања електричних машина у погону (Оцена:10; ЕСПБ:9)
8. Увод у научни рад (Оцена:10; ЕСПБ:6)
9. Одабрана поглавља из електромоторних погона (Оцена:10; ЕСПБ:9)
10. Прелазне појаве у електричним машинама (Оцена:10; ЕСПБ:9)

Обавезе:

1. Студијски истраживачки рад (15 ЕСПБ)
2. Научно стручни рад (3 ЕСПБ)
3. Студијски истраживачки рад (15 ЕСПБ).

Кандидат је остварио укупно 120 ЕСПБ са просечном оценом 10,00.

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду. На захтев студента у школској 2020/2021 години му је одобрено мировање због неге детета.

MSc Класнић Илија је био ангажован на теоријском и експерименталном раду везаном за пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја ТР-33020 “Повећање енергетске ефикасности ХЕ и ТЕ ЕПС-а развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”. Бавио се фабричким, примопредајним и гаранцијским испитивањима синхроних електричних машина (турбо и хидрогенератора), пројектовањем и испитивањем система побуде синхроних генератора и испитивањем енергетских претварача. Аутор је три научна рада у часопису националног значаја категорије М53 и четрнаест радова у зборницима регионалних научних скупова и скупова националног значаја.

Категорија M21A

1. D. Stojić, M. Milinković, S. Veinović and **I. Klasnić**, "Improved Stator Flux Estimator for Speed Sensorless Induction Motor Drives," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 2363-2371, April 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2328617.
2. D. M. Stojic, M. Milinkovic, S. Veinovic and **I. Klasnic**, "Stationary Frame Induction Motor Feed Forward Current Controller With Back EMF Compensation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 4, pp. 1356-1366, Dec. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2438093.

Категорија M23

1. D. Stojić, M. Milinković, S. Veinović and **I. Klasnić**, "Novel proportional-integral-resonant current controller for three phase PWM converters," *2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Belgrade, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/EFEA.2016.7748788.

Категорија M33

1. S. Veinovic, D. Stojic, D. Joksimovic and **I. Klasnic**, "Control of rotary exciter with series and separately excitation windings excitation system of generator a2 at power plant "Kostolac A"," *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)*, Novi Sad, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEE.2017.8171699.

Категорија M53

1. **Ilija Klasnić**, Ljubiša Nikolić, Zoran Ćirić, "Detekcija i lokalizacija mesta proboja statorskog namotaja hidrogenatora", Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, knjiga 28, 2018, doi:10.5937/zeint28-19131
2. **Klasnić Ilija**, Joksimović Dušan, Ćirić Zoran, "Potencijal vratila kod turboagregata", Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, knjiga 26, 2016, str 129-140, doi: 10.5937/zeint26-12122
3. **Klasnić Ilija**, Ćirić Zoran, Bogdanović Slobodan, Džepčeski Dane, Joksimović Dušan, Arnautović Dušan, "Određivanje pojedinačnih gubitaka i stepena korisnog dejstva generatora", Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, knjiga 25, 2015, str 97-109, doi: 10.5937/zeint25-9222
4. Stojić Đorđe, Milinković Milan, Veinović Slavko, Joksimović Dušan, Milojević Nemanja, **Klasnić Ilija**, Arnautović Dušan, "Projektovanje robusnog regulatora pobude na osnovu intervalnog modela generatora", Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, knjiga 23, 2013, str 33-45, doi: 10.5937/zeint23-4690
5. Slavko Veinović, Žarko Janda, Đorđe Stojić, Jasna Dragosavac, Dušan Joksimović, **Ilija Klasnić**, Milan Đorđević, "Estimacija ugla snage sinhronog generatora", Zbornik radova, Elektrotehnički institute Nikola Tesla, knjiga 30, 2020, str 81-91, doi: 10.5937/zeint30-29158

Категорија M63

1. **I.Klasnić**, R.Antić, A.Nikolić, M.Bebić, "Simulacija vektorski upravljanoг asinhronog motora napajanoг strujnim invertorom", Zbornik konferencije ETRAN (2014), Vrnjačka banja, Srbija
2. **I.Klasnić**, J.Dragosavac, Ž.Janda, D.Arnautović, "Grupni regulator reaktivne snage", Zbornik konferencije ETRAN (2015), Srebrno jezero, Srbija
3. **I.Klasnić**, S.Bogdanović, D.Džepčeski, Z.Ćirić, "Određivanje porasta temperature aktivnih delova revitalizovanog hidrogenatora iz ogleда zagrevanja", 34. Savetovanje CIGRE Srbija, Vrnjačka banja, 2019. godine
4. Z.Ćirić, S.Bogdanović, D.Džepčeski, **I.Klasnić**, D.Joksimović, N.Milojević, D.Arnautović, R.Albijanić, D.Belonić, P.Nikolić, M.Đorđević, Z.Bojanić, "Primopredajna ispitivanja

- hidrogeneratora A5 u HE “Đerdap 1””, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 2015. godine
5. D.Joksimović, Z.Ćirić, S.Bogdanović, D.Arnautović, N.Milojčić, **I.Klasnić**, D.Belonić, P.Nikolić, M.Đorđević, “Određivanje reaktansi i vremenskih konstanti sinhronog generatora agregata A4 u HE “Đerdap 1” iz snimaka uspostavljanja napona statora nakon isključenja trolnog kratkog spoja”, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 2015. godine
 6. N.Milojčić, Z.Ćirić, D.Joksimović, **I.Klasnić**, M.Đorđević, “Rezultati ispitivanja Sistema pobude hidrogeneratora snage 211MVA”, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 2015. godine
 7. Ž.Janda, J.Dragosavac, **I.Klasnić**, Z.Ćirić, M.Đorđević, Lj.Mihailović, Z.Božović, “Ispitivanja generatora B2 u TE “NIKOLA TESLA” u cilju utvrđivanja eksploatacionog pogonskog dijagrama”, 34. Savetovanje CIGRE Srbija, Vrnjačka banja, 2019. godine
 8. D.Ilić, **I.Klasnić**, J.Ponočko, D.Mihajlović, Lj.Nikolić, S.Milosavljević, D.Arnautović, “Ispitivanje stanja izolacionog sistema mernih transformatora (110kV i više) ultrazvučnom metodom”, Zbornik radova konferencije Power Plants, Zlatibor 2014, Srbija
 9. J.Ponočko, D.Ilić, J.Lazić, D.Mihajlović, **I.Klasnić**, Đ.Jovanović, “Procena sadržaja vode u čvrstoj izolaciji energetskih transformatora metodom FDS”, Zbornik radova konferencije Power Plants, Zlatibor 2014, Srbija
 10. Đ.Stojić, **I.Klasnić**, M.Milinković, S.Veinović, N.Milojčić, D.Joksimović, D.Arnautović, “Regulator pobude kućnog agregata u HE “Međuvršje””, Zbornik radova konferencije Power Plants, Zlatibor 2014, Srbija
 11. S.Veinović, Đ.Stojić, M.Milinković, D.Joksimović, **I.Klasnić**, D.Arnautović, “Modeli rotacione budilice i diodnog mosta u kolu pobude sinhronog generatora”, Zbornik radova konferencije Power Plants, Zlatibor 2014, Srbija
 12. **I.Klasnić**, S.Bogdanović, D.Džepčeski, Z.Ćirić, “Determination of temperature rise of active parts of the revitalized generator from heat run test”, CIGRE SCA1 Colloquium, New Delhi, India, 2019
 13. **I.Klasnić**, D.Ilić, Đ.Jovanović, Z.Ćirić, D.Kulić, I.Šuka, “Fabrička ispitivanja turbogeneratora”, 35. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 2021. godine
 14. I.Jagodić, Z.Ristić, **I.Klasnić**, M.Ristić, “Hlađenje sinhronih generatora vodonikom – mere predostrožnosti prema novim standardima i pravilniku”, 35. Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 2021. godine

Кандидат Илија Класнић је дана 26.11.2021. године полагао испит о подобности теме и кандидата (докторски испит) пред комисијом у саставу:

1. др Милан Бебић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
2. др Жарко Јанда, виши научни сарадник, Електротехнички институт Никола Тесла у Београду
3. др Златан Стојковић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду

Комисија је оценила да је кандидат Илија Класнић испит положио са оценом: **задовољно**.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат је сакупио сто двадесет (120) ЕСПБ (полагањем испита на докторским студијама и обављањем научно-истраживачких обавеза). Дана 26.11.2021. године је јавно одбранио тему докторске дисертације пред Комисијом (проф. др Милан Бебић, др Златан Стојковић, др Жарко Јанда) формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду на својој седници број 867 од дана 16.11.2021. године.

На основу претходно оствареног рада и постигнутих резултата, Комисија је стекла увид у научно-истраживачке способности кандидата, као и потенцијал да током израде докторске дисертације оствари резултате који могу бити оцењени од стране међународне заједнице. Према томе, Комисија сматра да кандидат Илија Класнић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, поседује адекватан ниво знања и суштински задовољава све потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације са насловом: „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага“ (енглески: „*Estimation and prediction of the thermal state of hydrogenator rotor and its influence on the reactive power limits*“).

На основу свега наведеног можемо закључити да кандидат Илија Класнић у сваком погледу испуњава услове који га квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Хидроелектране, као обновљиви извори енергије, представљају важне произвођаче електричне енергије у свету, где се електромеханичка конверзија врши помоћу хидрогенератора. У основи, хидрогенератор је обртна електрична машина која претвара механичку енергију у електричну. У свом радном веку, хидрогенератор је изложен јаким динамичким оптерећењима електричне, механичке и термичке природе, чије последице могу бити разне врсте кварова и друге материјалне штете.

Један од могућих кварова који изискује много времена за санацију је општећење изолације намотаја ротора због прегревања током експлоатације и убрзаног старења. У тим ситуацијама се обично врши извлачење ротора из синхроног генератора и слање ротора у специјализована постројења произвођача генератора на санацију. Све ово захтева ангажовање специјалних алата и опреме и додатно продужава време погонске нерасположивости агрегата. У циљу избегавања оваквих проблема, веома је корисно вршити мониторинг стања ротора синхроног генератора, како би се правовремено детектовала евентуална нерегуларна стања и појаве које могу довести до општећења ротора. У току експлоатационог века генератора радна тачка не треба да буде у области где су поједини делови хидрогенератора термички преоптерећени.

Ротор синхроног генератора у раду трпи велика механичка, електрична и температурна напрезања. Механички стресови су последица великих брзина обртања и јаких центрифугалних сила. Термички стресови су последица отежаног хлађења и рада генератора при повишеним температурама. Свакако не треба заборавити ни електричне стресове који су последица наглих и честих промена оптерећења, наглих растерећења и брзих дејстава система побуде генератора. Сви ови фактори збирно делују током рада синхроне машине и утичу на њен пројектовани животни век. Животни век генератора је у директној спрези са животним веком изолације који је одређен температурним, електричним, механичким и амбијенталним условима при раду генератора. Очигледно је да су животни век изолације и генератора директно одређени вредностима температуре делова генератора. Испитивањима у самој електрани могуће је директно измерити само температуре оних делова генератора на које је постављен неки од температурних сензора. Уобичајено су то следећи делови синхроних генератора:

Према [1], температуру намотаја синхроног генератора могуће је одредити једном од следеће три методе:

- *resistance method* – температура намотаја се одређује преко пораста отпора намотаја.
- *embedded temperature detector (ETD) method* – температура намотаја се одређује помоћу током производње уграђених сензора за мерење температуре (отпорнички термометри, термопарови и сл.). Сензори треба да буду униформно постављени дуж

целог намотаја и да их буде најмање шест. За температуру намотаја се узима максимална вредност температуре од свих уграђених сензора. Уколико је потребно мерити температуру двослојног намотаја, сензори за мерење температуре треба да буду постављени између два изолована проводника унутар жлеба статора на местима на којима се очекује максимална вредност температуре. У случају да се ради о једнослојном намотају сензори за мерење температуре треба да буду постављени између проводника (штапа) статора и клина за заклињавање.

- *thermometer method* – температура намотаја се одређује помоћу термометара који се постављају на доступне делове намотаја генератора. Овде је могућа примена свих доступних сензора за мерење температуре (као и код претходне методе), а који нису већ уграђени током процеса производње генератора.

Температуру намотаја ротора синхроног генератора могуће је одредити директним мерењем или индиректно. Индиректни начин одређивања температуре намотаја ротора синхроног генератора подразумева примену U-I методе, тј. одређивање средње вредности температуре намотаја ротора преко промене отпора намотаја ротора [2].

Иако је сам начин одређивања средње вредности температуре намотаја ротора прилично једноставан он са собом носи одређене проблеме приликом имплементације. Намотај ротора није температурно калибрисан отпорник што значи да није намењен за мерење температуре намотаја ротора као што је то случај код отпорних мерних сонди. Струја која протиче кроз намотај ротора је доступна за мерење (нпр. помоћу струјног панта), али није константна и садржи већу количину виших хармоника. С друге стране, напон на самом намотају ротора није доступан за мерење; обично се мери напон на излазу из енергетског претварача у систему побуде па је потребно извршити компензацију услед пада напона на четкицама и на енергетским везама од система побуде до намотаја ротора генератора. Пад напона на четкицама зависи од врсте примењених четкица, броја четкица и струје ротора и нарочито треба водити рачуна о њему када генератор ради са нижим вредностима струје побуде [2]. Према [3], вредност пада напона на четкицама може бити од 0,3V до 1,0 V у зависности од врсте примењених четкица. Пад напона на енергетским везама зависи од струје ротора и дужине и врсте самих веза (каблова). Овај проблем се може превазићи уколико је могуће реализовати мерење напона намотаја ротора директно на клизним прстеновима помоћу специјалних четкица. Такође треба имати на уму чињеницу да термичка константа намотаја ротора уноси одређено кашњење. Ово је посебно изражено током транзијентних периода код генератора који раде у вршним електранама [4]. Имајући у виду све наведено, приликом имплементације оваког начина одређивања средње вредности температуре намотаја ротора потребно је до детаља познавати све наведене факторе који могу унети грешку у одређивању средње вредности температуре намотаја ротора која може бити значајна.

Температура намотаја ротора одређена применом индиректне методе представља средњу вредност температуре намотаја ротора и није комплетна слика температуре целог ротора. Максималну вредност температуре намотаја ротора (*hot-spot temperature*) је битно познавати јер је управо она једно од ограничења у оквиру погонског P-Q дијаграма синхроног генератора. Произвођачки P-Q дијаграм генератора је статички дијаграм у оквиру којег се гарантује стабилан и безбедан дуготрајан рад генератора. Међутим, овај статички P-Q дијаграм има у себи уграђену извесну резерву. Ограничење у погледу дозвољених температура и пораста температуре делова генератора, а самим тим и намотаја ротора је дефинисано примењеном класом изолације намотаја ротора, условима хлађења и струјним оптерећењем генератора. Познато је да се дозвољава рад генератора са преоптерећењем по струји статора и/или ротора све док су пораста температуре намотаја у оквиру дозвољених граница (дефинисаних примењеном класом изолације). Произвођачи генератора дефинишу

нивое дозвољених струјних преоптерећења на следећи начин: колико дуго времена се дозвољава рад генератора са струјом већом од номиналне (назначене) за одређени износ.

Температуру намотаја ротора синхроног генератора је, поред индиректног начина одређивања, могуће одредити и директним мерењем, помоћу дигиталних температурних сензора који се постављају директно на делове ротора. Уколико се сензор за директно мерење температуре намотаја ротора постави на изолацију, он не пружа податак о температури бакра, већ о температури изолације. Пад температуре од изолације до бакра намотаја може износити и преко 20°C. Тада се врши процена пада температуре на изолацији како би се добила информација о температури бакра намотаја.

Температура намотаја ротора синхроних генератора се у пракси обично одређује индиректним методом преко мерења отпора намотаја. На овај начин добија се информација о средњој вредности температуре намотаја ротора, али не и о температури најтоплије тачке. Да би се познавала температуре најтоплије тачке и њена позиција потребно је детаљно познавање конструкције самог генератора, типа и начина хлађења генератора, расподеле губитака унутар генератора итд.

Топлотни прорачун генератора даје вредности пораста температуре појединих елемената генератора у односу на температуру расхладног флуида на улазу у генератор. Прорачун се врши на основу познавања свих појединачних губитака снаге који се јављају у генератору и на основу познавања топлотних отпора појединачних делова генератора. Топлота која се генерише унутар генератора услед постојања свих губитака снаге који се јављају у генератору се распростире унутар генератора кондукцијом и конвекцијом. Одвојено се врши топлотни прорачун статора и ротора уз прављење топлотних шема које су аналогне електричним шемама, с тим што у топлотним шемама фигуришу појединачни губици снаге као извори топлоте и топлотни отпори на којима се врши сабирање пораста температуре.

У половима ротора поред Џулових губитака у намотају ротора P_f постоје и губици у полним наставцима P_{ps} . Према [5], топлота која се ослобађа у намотају ротора се једним делом односи са површине намотаја расхладним ваздухом, а други део кондукцијом продире у језгро пола и кроз њега струји ка међугвожђу да би се са површине полног наставка однела расхладним ваздухом. С друге стране, топлота која се ослобађа у полним наставцима (P_{ps}) струји кроз гвожђе пола и такође се односи расхладним ваздухом са површине полних наставка.

Да би се пратило транзијентно кретање температуре ротора, првенствено најтоплије тачке, у окружењу са великом пенетрацијом обновљивих извора енергије (ОИЕ) [6] потребно је располагати са довољно тачним и довољно практичним термичким моделом ротора који за улазе има расположива мерења са електранског система надзора и управљања (distributed control system- DCS). Класичан приступ естимацији и предикцији кретања средње температуре ротора у току експлоатације се базира на U-I методи и коришћењу еквивалентног термичког модела са једном временском константом која је конзервативно одређена. Висока пенетрација ОИЕ у електроенергетски систем поставља нове динамичке захтеве пред хидрогенераторе у смислу појаве интермитентног преоптерећења. То се нарочито односи на средње и мање хидроелектране у пасивним крајевима са малом локалном потрошњом, где се у електричном окружењу електране налази много ОИЕ, а веза ка мрежи велике снаге је остварена преко релативно дугачких водова са релативно великом реактансом. Тада се јавља потреба да се хидрогенератор често користи близу својих термичких граница у релативно кратким временским интервалима, а ту класичан експлоатациони термички модел ротора више не задовољава [6].

У хидроелектранама широм света, у новије време започето је са применом система термичког мониторинга хидрагенератора. Најчешће се мере електричне величине статора и ротора машине, као и температуре бакра статора, језгра статора и расхладних флуида. Температура ротора се процењује на претходно описани начин. Тако се може пратити стање машине када је постигнуто устаљено радно стање, уз ограду да је највећа несигурност

процене везана за естимацију температуре ротора. Међутим, постојећи електрични и термички модели нису прилагођени естимацији у току транзијентних стања и предикцији промене температура у блиском-кратком временском интервалу. Баш ти кратки временски интервали добијају на важности са повећањем пенетрације ОИЕ варијабилне снаге [6].

Мерење и анализа постигнутих радних стања као и снимци термичких транзијентата представљају основу другог дела овог истраживања. Методе базиране на естимацији уз употребу постојећих мерења, већ расположивих у оквиру агрегатског система надзора и мерења (DCS) имају очигледну предност.

Основни циљ истраживања је унапређење постојећих система за естимацију температуре ротора хидрогенератора без употребе детаљних сложених модела који садрже непознате конструкционе параметре [7], [8] у on-line режиму рада, него уместо њих употреба простијих адаптивних термичких модела, којима се прати температура најтоплије тачке намотаја ротора и чији су параметри добијени естимацијом у реалном времену која се континуално врши.

Употреба класичних модела са одношењем топлоте конвекцијом са разних површина у условима принудног турбулентног струјања расхладног флуида у електричним машинама је обрађена у [9] и [10]. Данас постоје програми за решавање проблема струјања флуида и хлађења помоћу Computational Fluid Dynamics (CFD) симулационог софтвера, као што су ANSYS, OpenFOAM, SIMULIA PowerFLOW, COMSOL Multiphysics, и друге софтверске алатке за врло детаљну симулацију струјања. Међутим, сви ти CFD прорачуни захтевају много конструктивних података који су недоступни на електрани и нису практични за прорачуне у реалним радним стањима, како усталих тако и динамичких. Отуда потреба за једноставнијим моделом који довољно брзо може да да битне температуре у свим реалним радним стањима у реалном времену, тако да тај податак може бити употребљен при балансирању динамике коју у енергетски систем уносе ОИЕ. Унутар хидрогенератора, где се намотаји и језгро хладе присилно унутрашњим циркулисањем расхладног ваздуха, са променом снаге агрегата и радних услова се не мења ток расхладног флуида. Тако да су локални услови за хлађење појединих делова (одношење топлоте са појединих површина конвекцијом) увек исти зато што се векторско поље брзина струјања расхладног ваздуха не мења – стационарно је. Само то, стационарно, векторско поље брзина је сложено, може се моделовати помоћу CFD софтвера, или одредити на скалираном моделу струјања [11], али се не мења - једном кад се одреде локални услови хлађења тако да се може одредити еквивалентна термичка шема. Актуелност теме ове докторске дисертације илуструју и новије референце, које се баве идентификацијом усредњеног термичког модела целог хидрогенератора (а не најтоплије тачке ротора) [12], хлађењем ротора генератора гасом (код турбомашине, водоником, али разрађују хлађење површине ротора конвекцијом) [13] и даљом разрадом метода за термичко моделовање машина и мерење температуре ротора без контакта [14], [15], [16] и [17].

Циљни термички модел је предвиђен за употребу у току експлоатације хидрогенератора за естимацију температуре најтоплије тачке. При томе се располаже са измереном температуром на спољној површини роторског намота која се хлади ваздухом путем конвекције, и средњом температуром бабра роторског намота која је одређена преко познате промене отпора побудног намота мереног U/I методом. Резултат овог истраживања ће дати термички модел простирања топлоте у ограниченом простору који представља намотај ротора и испуњен је слојевима изолације и тракастог бакарног проводника, познатих термичких проводности и геометрије. Позната је средња и ивична температура тракастог бакарног проводника, тако да су те вредности гранични услови за решавање тродимензионалне једначине простирања топлоте у нехомогеној средини.

Тако добијени термички модел за израчунавање температуре најтоплије тачке намотаја ротора ће после калибрационих мерења моћи да се користи и без директног мерења температуре на спољној површини роторског намота, која ће се процењивати другим методама.

Намена овако добијеног термичког модела није за дијагностику стања изолације већ за праћење естимације температуре најтоплије тачке ротора у току експлоатације хидрогенератора да би се избегла радна стања која могу довести до оштећења изолације ротора и испада агрегата из погона. Кад дође до термичког нарушавања система чврсте изолације на ротору долази до земљоспоја ротора или до појаве краткоспојених навојака у побудном намотају. Овакви кварови се сигнализирају посебним системима који врше функцију релејне заштите генератора.

Секундарни циљ истраживања је креирање адаптивног електронског система за термички надзор, чије естимације могу служити као улази за електронску адаптивну погонску карту хидрогенератора, која брзо и тачно приказује границе динамичке радне области генератора..

Предложено истраживање има значај у погледу повећања поузданости хидрогенератора, као капиталне опреме у процесу производње енергије. Имплементација резултата истраживања допринела би смањењу броја хаваријских отказа, смањењу трошкова одржавања, и повећању финансијске добити услед веће производње. Развој концепције адаптивног електронског система за термички надзор може представљати практични основ за унапређење и других адаптивних термичких надзорних система у погонима електропривреде, али и других грана индустрије.

Референце:

- [1] International Standard IEC 60034-1: Rotating electrical machines – Part 1 : Rating and performance
- [2] IEEE Std 115-2002 IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, Part I Acceptance and Performance Testing, Part II test Procedures and Parameter determination for Dynamic Analysis,
- [3] IEEE Std 112TM-2004 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators
- [4] IEEE Std 1129-1992 IEEE Recommended Practice for Monitoring and Instrumentation of Turbine Generators
- [5] В.В. Домбровский и др. : Проектирование гидрогенераторов, Энергия, Москва, 1965.
- [6] M Anvari, G Lohmann, M Wachter, P Milan, E Lorenz, D Heinemann, M reza Rahimi Tabar and Joachim Peinke, Short term fluctuations of wind and solar power systems, New Journal of Physics, June 2016.
- [7] Mejuto, C. Improved Lumped Parameter Thermal Modelling of Synchronous Generators. PhD thesis, The University of Edinburgh, 2010.
<https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/1842/4612/1/Mejuto2010.pdf> (07.06.2021).
- [8] Muñoz, D. M. Design, Modelling and Control of Electrical Machines. Doctoral Dissertation in Industrial Electrical Engineering, Lund University, Lund 2004.
<http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1043.pdf> (07.06.2021).
- [9] Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах, Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986.
- [10] Г. Готтер Нагрев и охлаждение электрических машин, пер. с нем., М. - Л., Гостэнегроиздат, 1961.
- [11] H. Jamshidi, Ventilation of a Model Hydro-Generator, An Experimental and Numerical Study, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY G"oteborg, Sweden 2015
- [12] Muharem Mehmedović, Vedrana Jerković Štil, Zdravko Rabuzin, HYDRO GENERATOR THERMAL SYSTEM IDENTIFICATION AND PARAMETER ESTIMATION, Tehnički vjesnik 24, Suppl. 2(2017)

- [13] К. А. КОБЗАРЬ, П. Г. ГАКАЛ, Е. А. ОВСЯННИКОВА, ОБЗОР МЕТОДИК АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОДОРОДОМ, ISSN 2078-774X. Вісник НТУ «ХП». 2015. № 15(1124)
- [14] Classification and comparison of rotor temperature estimation methods of squirrel cage induction motors, Amir Nikbakhsh, Hamid Reza Izadfar, Mostafa Jazaeri, Measurement, Elsevier, Volume 145, October 2019, Pages 779-802
- [15] C. Hudon, C. Guddemi, S. Gingras, R.C. Leite, L. Mydlarski, Rotor Temperature Monitoring using Fiber Bragg Gratings, 2016 Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, Qc, Canada, 19-22 June 2016
- [16] Weili Li, Dan Li, Jinyang Li, Xiaochen Zhang, Influence of Rotor Radial Ventilation Ducts Number on Temperature Distribution of Rotor Excitation Winding and Fluid Flow State Between Two Poles of a Fully Air-Cooled Hydro-Generator, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 64, Issue 5, May 2017
- [17] Han Jichao, Ge Baojun, Tao Dajun, Zhao Hongsen, Xiao Fang, Li Weili, Calculation and analysis of complex fluid flow and thermal fields in a fully air-cooled hydrogenerators, International Journal of Thermal Science, March 2017

3. Полазне хипотезе

- Извори топлотних губитака у хидрогенератору се могу приказати као расподељени извори топлоте, при чему ће се истражити могућност приказивања појединих извора топлоте преко дискретних еквивалентних елемената.
- Термички модел ротора ће бити приказан преко еквивалентног кола са расподељеним параметрима, а остатак термичког модела генератора као еквивалентно термичко коло са концентрисаним параметрима. При томе се анализира простирања топлоте у ограниченом простору који представља намотај ротора и испуњен је слојевима изолације и тракастог бакарног проводника, познатих термичких проводности и геометрије. Позната је средња и ивична температура тракастог бакарног проводника, тако да су те вредности гранични услови за решавање тродимензионалне једначине простирања топлоте у нехомогеној средини са познатим граничним условима.
- Брзине струјања расхладних флуида су приближно константне и сматраће се да се утицај температуре на брзину струјања флуида може занемарити. Еквивалентни проток унутрашњег расхладног ваздуха је константан као и проток расхладне воде измењивача топлоте.
- Могуће је направити приближан модел струјања расхладног ваздуха који је стационаран и довољно добар за прорачун одвођења топлоте са појединих површина роторског намотаја и полног наставка.
- Коришћењем бројних извршених мерења температуре бакра ротора, бакра и језгра статора и расхладних флуида хидрогенератора у низу термички устаљених радних стања, могуће је креирати одговарајуће термичке моделе који за улазне величине имају и електричне величине и температуре које су расположиве на електранском систему за бележење физичких података о тренутном радном стању генератора (DCS).
- На основу претходних резултата се може креирати адаптивни електронски систем за термички надзор који се увек прилагођава тренутним динамичким радним и расхладним условима хидрогенератора прикљученог на мрежу, у реалном времену. Та електронска адаптивна погонска карта хидрогенератора брзо и тачно приказује границе динамичке радне области хидрогенератора online.

4. Научне методе истраживања

За потребе истраживања извршило би се систематизовано прикупљање и анализа постојећих научних резултата из области естимације температуре ротора и топлотног

капацитета ротора хидрогенератора. Након стицања увида у досадашња искуства из ове области биће конципиран модел за естимацију температуре ротора и формирани оригинални мерни алгоритми за адаптивно одређивање параметара термичког модела ротора и за одређивање укупних реактивних могућности хидрогенератора. Полазне основе за конципирање биће базиране на напредним методима идентификације параметара система и класификације вектора који презентују скупове мерених величина у оквиру погодено изабраног вишедимензионалног простора.

Спровео би се потребан број експеримената који би обухватио различите режиме рада хидрогенератора. Овако добијени резултати ће бити процесирани кроз претходно изабране алгоритме за идентификације параметара система и класификацију одабраних специфичних вектора мерених резултата.

Други део истраживања ће се односити на развој и експерименталну потврду концепције адаптивног електронског система за термички надзор, чије естимације могу служити као улази за електронску адаптивну погонску карту хидрогенератора.

5. Очекивани научни допринос

- Систематизација, преглед и компаративна анализа карактеристика постојећих метода естимације температуре ротора хидрогенератора са акцентом на могућност предикције промене температуре ротора у времену током периодичних поремећаја, изазваних интермитентним деловањем ОИЕ.
- Развој алгоритма и новог метода за естимацију температуре ротора, погоденог за примену у самој хидроелектрани са реално расположивим мерењима у електрани (редуковани сет мерних сигнала).
- Експериментална верификација новог метода за естимацију температуре ротора и предикцију промене, погоденог за примену и у статичким и у динамичким прелазним стањима хидрогенератора везаног на мрежу, узимајући у обзир све реалне утицаје мреже и услова хлађења хидрогенератора, у реалном времену.
- Анализа утицаја других немоделираних извора топлоте који нису обухваћени основним практичним термичким моделом хидрогенератора.
- Тако добијени термички модел за израчунавање температуре најтоплије тачке намотаја ротора ће после калибрационих мерења моћи да се користи и без директног мерења температуре на спољној површини роторског намотаја, а у циљу поуздане експлоатације хидрогенератора и ван статичког погонског дијаграма.
- Имплементација новог метода естимације и предикције температуре ротора у реалним радним стањима хидрогенератора у облику електронског термичког надзорног система, у који улазе мерене електричне величине, мерене температуре делова генератора и температуре и протоци расхладних флуида који су расположиви.

6. План истраживања

У првој фази истраживања, детаљно би се размотрила литература у вези са естимацијом температуре ротора код хидрогенератора и постојећих системима термичког мониторинга у реалном времену код хидрогенератора, са издвајањем њихових предности и недостатака, као и детаљно улозновање са узроцима настанка мерних грешака.

У другој фази истраживања ће бити детаљно размотрене концепције практично применљивог уређаја за термички надзор хидрогенератора и практична решења која се односе на сложене мониторинг системе у овиму хидроелектране.

Након детаљног сагледавања тренутног стања у области и критичког сагледавања карактеристика постојећих метода естимације температуре ротора хидрогенератора дефинишу се правци могућих побољшања и унапређења. У наредној фази истраживања биће извршена детаљна анализа снимљених мерења а у циљу компарације резултата добијених

помоћу метода заснованих на класичном упрошћеном моделу првог реда и на сложенијим адаптивним моделима који су развијени у оквиру овог истраживања

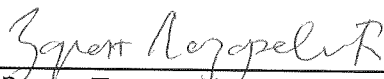
На основу резултата наведених истраживања би били формиран оригинални термички надзорни алгоритми, чији би рад био верификован у реалним експлоатационим условима, и који би на успешан начин вршили естимацију и предикцију температуре ротора хидрогенератора и евалуирали њен утицај на тренутну динамичку погонску карту. Последња фаза истраживања би се односила на развој практично применљивог уређаја за термички надзор хидрогенератора који се налази у реалном погону на хидроелектрани.

7. Закључак и предлог

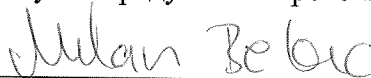
Разматрајући резултате у досадашњем научно-истражовачком раду кандидата Илије Класнића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија сматра да кандидат испуњава све услове за реализацију предвиђених истраживања. Сагледавајући наведене циљеве, очекиване резултате и доприносе, Комисија је у потпуности сагласна да предложена тема са насловом „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага“ задовољава све услове подобности за докторску дисертацију. Комисија констатује да предложена тема припада ужој научној области Енергетски претварачи и погони – електричне машине за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан и за ментора предлаже др Зорана Лазаревића, редовног професора на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Уз Извештај о подобности теме и кандидата, Комисија прилаже и списак радова др Зорана Лазаревића, редовног професора који га квалификују за ментора дисертације. Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Извештај о предлогу теме докторске дисертације са насловом „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага“ и да кандидату Илији Класнићу омогући да приступи изради дисертације.

У Београду, 01.12.2021. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Бебић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жарко Јанда, виши научни сарадник
Универзитет у Београду
Електротехнички институт Никола Тесла а.д. Београд



др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет