

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet : referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidatkinje mr Marije Đorđević, dipl. inž.

Odlukom br. 907/3 od 14. maja 2013. godine imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidatkinje mr Marije Đorđević, dipl. inž., pod naslovom

Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti

Posle pregleda dostavljene disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa kandidatkinjom Komisija je sačinila sledeći

REFERAT

1. UVOD

1.1 Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Magistarski rad pod naslovom *“Ekvivalenti za susedne elektroenergetske sisteme u analizama pouzdanosti”* kandidatkinja je odbranila 28. novembra 2003. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Doktorsku disertaciju pod naslovom *„Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti“* kandidatkinja je prijavila 22. novembra 2012. godine. Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta je na 756. sednici, održanoj 27. novembra 2012. godine imenovalo Komisiju za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije u sastavu : vanredni profesor dr Dragutin Salamon (mentor), docent dr Predrag Stefanov i naučni savetnik Dr Ninel Čukalevski, Institut „Mihailo Pupin“. Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta usvojilo je izveštaj Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije na sednici održanoj 12. februara 2013. godine. Veće naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu je na sednici održanoj 04. marta 2013. godine dalo saglasnost na predloženu temu.

Kandidatkinja je urađenu disertaciju predala na pregled i ocenu 8. maja 2013. godine. Na osnovu predloga Komisije za studije trećeg stepena od 9. maja 2013. godine, Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je na 762. sednici održanoj 14. maja 2013. godine imenovalo Komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije u sastavu: vanredni profesor dr Dragutin Salamon (mentor), redovni profesor dr Ivan Škokljev, naučni savetnik dr Ninel Čukalevski, Institut „Mihailo Pupin“, docent dr Predrag Stefanov i redovni profesor dr Vladica Mijailović, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu.

1.2 Naučna oblast disertacije

Disertacija „*Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti*“ pripada naučnoj oblasti Tehničke nauke – elektrotehnika, užoj naučnoj oblasti Elektroenergetski sistemi, za koju je matični fakultet Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu.

Za mentora doktorske disertacije određen je dr Dragutin Salamon, vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu koji se više godina bavi naučnoistraživačkim i nastavnim radom u oblasti elektroenergetskih sistema i publikovao je veći broj radova iz ove oblasti u časopisima sa SCI liste.

1.3 Biografski podaci o kandidatu

Mr Marija Đorđević, dipl. inž., rođena je 7. decembra 1972. godine u Čačku. Osnovnu školu i gimnaziju završila je sa odličnim uspehom. Nosioc je Vukove i Alasove diplome. Školske godine 1991/92 upisuje se na Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 1997. godine na Energetskom odseku, Smer za energetske pretvarače i pogone, sa ocenom na diplomskom 10. Poslediplomske studije upisala je školske godine 1998/99 na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru Elektroenergetske mreže i sistemi. Magistarsku tezu odbranila je 28. novembra 2003. godine i stekla zvanje magistra elektrotehničkih nauka.

Od 1998. do 2003. godine bila je zaposlena u JP “Elektroprivreda Srbije” (JP EPS), u Direkciji za razvoj i investicije, na problematici prognoze potrošnje električne energije, ekonomskog dispečinga, modelovanja pomoću neuralnih mreža i klastera u elektroenergetskim sistemima (EES). Radila je na izradi studije za procenu gubitaka u okviru JP EPS, gde su klasteri i neuralne mreže primenjeni kao metod za grupisanje podataka. Učestvovala je u implementaciji programskog paketa WSDLFM za kratkoročnu prognozu potrošnje i paketa za ekonomski dispečing.

Od 2003. do 2005. godine radi u Direkciji za upravljanje u JP EPS, a od 2005. godine prelazi u JP “Elektromreža Srbije” (JP EMS), gde i danas radi na problematici proračuna tokova snaga, analiza sigurnosti, proračuna prenosnih kapaciteta prema NTC (*Net Transfer Capacity*) metodologiji, izradi DACF modela (*Day Ahead Congestion Forecast*). Učestvovala je u implementaciji novog sistema SCADA/EMS (*Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management System*) u JP EMS, na implementaciji mrežnih aplikacija estimatora, tokova snaga, analiza sigurnosti, DACF modela, na omogućavanju izlaznih rezultata u UCT (format za razmenu podataka u okviru *Union for the co-ordination of transmission of electricity*) i PTI (*Power Technologies International*) formatu. U okviru JP EMS aktivirala je i aplikaciju za prognozu potrošnje. Učestvuje u izradi petogodišnjih i desetogodišnjih planova razvoja JP EMS.

Aktivno učestvuje u mesečnim proračunima prenosnih kapaciteta prema NTC metodi koje JP EMS alokira svakog meseca i u razvoju novih metodologija za upravljanje zagušenjima, trenutno aktuelnim i na evropskom nivou. Učestvovala je u pilot projektu (*dry-run*) koordinisanih aukcija zasnovanih na tokovima snaga u regionu Jugoistočne Evrope.

Rukovodilac je međunarodne tehničke podgrupe “*Congestion Managment and Market Integration*“, u okviru regionalne grupe RG SEE (*Regional group for South East Europe*) za Jugoistočnu Evropu, pod pokroviteljstvom ENTSO-E Market Komiteta (*The European Network of Transmission System Operators for Electricity* - Udruženje evropskih operatora EES). Kao rukovodilac podgrupe doprinela je istraživanju metodologija za proračun prenosnih kapaciteta zasnovanih na tokovima snaga i kada je u pitanju pristup prekograničnih kapaciteta (*Border Capacity*) i

maksimalnih tokova (*Max Flow*). Trenutno se bavi uspostavljanjem regionalnih procedura za kreiranje zajedničkog regionalnog modela i harmonizaciju metodologije za proračun prenosnih kapaciteta.

Sekretar je međunarodne regionalne grupe RG SEE za Jugoistočnu Evropu. Predstavnik je JP EMS u ENTSO-E grupi „*Network Modeling&Forecast Tool*“ pod pokroviteljstvom Komiteta za rad sistema. Učestvuje u radu domaće CIGRE u komitetu C5, kao član i recezent mnogobrojnih radova.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1 Sadržaj disertacije

Disertacija je napisana na 170 strana, i pored naslovne strane i sadržaja, sadrži ukupno osam poglavlja sa zaključkom i spiskom literature u kome su navedene 42 reference. Disertacija sadrži 53 slike i 49 tabela. Prilozi obuhvataju ukupno 32 strane.

Doktorska disertacija se sastoji od osam poglavlja i to: 1. Uvod, 2. Pouzdanost interkonektivnih sistema u novom ekonomskom okruženju, 3. Opšti pojmovi o pouzdanosti elektroenergetskih sistema, 4. Opšti principi u ekvivalentiranju, 5. Matematički model mrežnog DC ekvivalenta, 6. Metod proračuna na Garverovom (*Garver*) primeru, 7. Ispitivanje metode na realnim sistemima, 8. Primena metodologije na IEEE sistemu, 9. Zaključak. Na kraju je dat spisak korišćene literature. Po formi i sadržaju zadovoljava standarde za doktorsku disertaciju.

2.2 Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodnom poglavlju opisuju se predmet i cilj istraživanja i navode se polazne hipoteze. Urađen je pregled dostupnih dosada objavljenih radova sa sličnom problematikom. Dat je sažet opis i sadržaj disertacije uz navođenje ključnih aspekata na koje će se disertacija usmeriti.

Drugo poglavlje je posvećeno proceni pouzdanosti interkonekcija i međusobno povezanih sistema u novom ekonomskom okruženju, u uslovima liberalizovanog tržišta električne energije. Potrebno je modelovati složenije upravljanje, veći broj ugovora o razmenama i predstaviti složeniji rad sistema. Dat je kratak opis mogućih organizacionih oblika elektroprivrednih preduzeća uz obuhvatanje njihovog uticaja na interkonekcije, što je praćeno posebnim pristupom sa aspekta pouzdanosti. Ukazano je na nove tehnike procene pouzdanosti i zahtevanih parametara zbog dodatnog usložnjavanja uzrokovano radom u interkonekciji.

Treće poglavlje definiše pojmove pouzdanosti obnovljivih i neobnovljivih elemenata i daje osnovne elemente Kronekerove algebre korišćene u proračunima pojedinih parametara pouzdanosti. Jednačinama su opisani modeli izvornih jedinica, vodova (jednostrukih, dvostrukih i trostrukih) i potrošnje. Na osnovu ovih osnovnih modela razvijen je kompletan algoritam za proračun pouzdanosti složenih elektroenergetskih sistema koji rade u interkonekciji, poštujući ugovorenu politiku rada povezanih elektroenergetskih sistema.

Četvrto poglavlje opisuje opštu primenu metoda ekvivalentiranja u analizama elektroenergetskih sistema povezanih u interkonekcije. Dat je opis dva do sada najviše korišćena klasična modela - Wardovog i Dimooovog REI (*Radial Equivalent Independent*) modela. Svi kasnije predloženi ekvivalenti predstavljaju njihove modifikacije. Posebna pažnja je posvećena ekvivalentiranju u analizama pouzdanosti, s obzirom na činjenicu da ekvivalent mora da predstavlja stanje sistema u

uslovima ispada. To znači da ekvivalentni model mora da uključi probabilističke informacije zbog razvoja kvantitativne procene pouzdanosti interkonektivne mreže.

Peto poglavlje opisuje matematički model razvijenog ekvivalenta. U njemu se objašnjava pristup koji je primenjen pri formiranju DC ekvivalenta za interkonektivno područje i daje matematičko objašnjenje ekvivalenta koji se sastoji od izvornog i graničnih čvorova. Objašnjavaju se glavna poboljšanja predloženog ekvivalenta koja se odnose na raspoređivanje snage potrošnje sistema na sve karakteristične čvorove. U ovom poglavlju su prikazani principi primenjeni pri modelovanju izvora susednog sistema koji dodatno uprošćavaju ekvivalentni model. Ovaj predloženi ekvivalent jedinstven je i po predloženoj metodologiji modelovanja simultanih ispada generatorskih jedinica i vodova u interkonektivnom ekvivalentiranom sistemu. Takođe, objašnjen je i način proračuna parametara pouzdanosti u povezanim interkonektivnim sistemima.

U šestom poglavlju prikazan je način primene razvijene metodologije na malom modelu elektroenergetskog sistema, Garverovom test primeru. Metoda je opisana detaljno, uz prikaz neophodnih matematičkih izvođenja, kako bi se razvijena metodologija prezentovala što jasnije. Prikazani su rezultati proračuna parametara DC ekvivalenta, kao i detaljan opis metodologije kojom se preko težinskih faktora obuhvataju uticaji istovremenih ispada vodova i generatora na parametre ekvivalentnog modela. U ovom poglavlju prikazana je i upotreba ekvivalenta u proračunima tokova snaga za slučaj kada je susedni sistem modelovan u potpunosti i kada je zamenjen ekvivalentnim modelom. Ovim je direktno pokazano koliko predloženi ekvivalent dobro reprezentuje stanje u sistemu od interesa. Detaljno je objašnjena interakcija između dva sistema koja je bitna u modelovanju ekvivalentnih stanja izvora sistema. Prezentovana je matrica međusobnih uticaja grana i čvorova koja predstavlja zavisnost tokova snaga po vodovima od snaga injektiranja u čvorovima koja je sastavni deo metodologije za proračun deficita u pojedinim potrošačkim čvorovima. Garverov test sistem, kao sistem od 6 čvorova, veoma je pogodan za prikaz predložene metodologije.

Sedmo poglavlje opisuje primenu predloženog DC mrežnog ekvivalenta na realnim sistemima. Ispitivan je uticaj većeg sistema Srbije na parametre pouzdanosti manjeg sistema Crne Gore i Albanije i to za slučaj kada je on modelovan u potpunosti i kada je zamenjen ekvivalentom. Izabrani granični čvorovi su Pljevlja i Prizren (220 kV) i Ribarevina (400 kV), a svi dalekovodi koji polaze od navedena tri granična čvora modeluju se u potpunosti i nisu deo ekvivalenta. Za modelovanje ekvivalenta primenjena je prethodno opisana metoda, a posebna pažnja posvećena je ekvivalentiranju izvora susednog sistema pri čemu je pokazan efekat redukcije broja stanja susednog sistema. Uticaj istovremenih ispada vodova i generatora u susednom sistemu na parametre ekvivalenta ispitan je i na realnom sistemu Srbije. Kao konačan rezultat dato je poređenje parametara pouzdanosti po potrošačkim čvorovima sistema Crne Gore i Albanije kada je sistem Srbije modelovan u potpunosti i ekvivalentom. Pokazan je uticaj snage ispomaganja između sistema na parametre pouzdanosti susednog sistema, a prikazana je vrlo interesantna zavisnost između indeksa pouzdanosti i nivoa snage ispomaganja.

U osmom poglavlju predložena metodologija primenjena je na IEEE test sistem (*IEEE Reliability Test System*). Izračunati su parametri mrežnog DC ekvivalenta za susedni sistem koji je predstavljen IEEE modelom kao lik u ogledalu. Za sva stanja ispada vodova i generatorskih jedinica računaju se parametri ekvivalenta za susedni sistem, a njihov uticaj obuhvata se preko definisanih težinskih faktora i sastavni je deo ekvivalenta. Koliko je dobar razvijeni DC mrežni ekvivalent pokazuje poređenje tokova snaga u sopstvenom sistemu za slučaj kada je sused modelovan ekvivalentom i u

potpunosti. Prikazana je i procena smanjenja proračunskog vremena, tj. potrebno je samo **2.6%** vremena ukoliko se za proračun pouzdanosti koristi ekvivalent. Ovakav efekat je postignut delom zbog redukcije broja stanja realizovane razvijenim aproksimacijama, a delom zbog smanjenja broja komponenti mreže, tj. uprošćenja mreže na kojoj se rade proračuni. U analizi kompletnog modela dva sistema i u modelu u kome je susedni sistem predstavljen ekvivalentom razmatrani su svi ispadi sa verovatnoćom koja je jednaka ili veća od 10^{-8} . Ukupna verovatnoća ispitivanih situacija je **0.993066**. To znači da se u radu išlo do vrlo velikih tačnosti ispitivanja sistema. Pokazuje se da predstavljanje susednog sistema ekvivalentom daje parametre pouzdanosti za potrošačke čvorove ispitivanog sistema koji se vrlo malo razlikuju od onih koji su dobijeni potpunim modelovanjem sistema. Maksimalna odstupanja od tačnih rezultata javljaju se u blizini graničnih čvorova sa interkonektivnim sistemom.

U zaključku je izložen rezime istraživanja. Najpre je dat kratak osvrt na predloženo rešenje i hipotezu postavljenu na početku istraživanja. Nakon toga su istaknuti ostvareni rezultati i doprinosi teze. Na kraju su istaknute mogućnosti korišćenja predložene metode u proceni pouzdanosti elektroenergetskih sistema u savremenom liberalizovanom, tržišno orijentisanom okruženju, sa novim aspektima u planiranju i funkcionisanju elektroenergetskih sistema.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1 Savremenost i originalnost

Na osnovu pregledane doktorske disertacije Komisija smatra da disertacija obrađuje vrlo aktuelnu problematiku analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema u savremenom, tržišno orijentisanom okruženju njihovog rada. Aktuelnost i značaj istraživanja u oblasti pouzdanosti elektroenergetskih sistema proizilazi iz činjenice da ovi sistemi, u cilju poboljšanja ekonomičnosti i pouzdanosti, rade integrisani u šire interkonekcije.

U sklopu planiranja rada i razvoja elektroenergetskih sistema mora se izvršiti i procena njihove pouzdanosti kako bi se utvrdilo da li stepen pouzdanosti zadovoljava postavljene kriterijume pa se ovoj problematici u naučnim i stručnim časopisima posvećuje posebna pažnja. U novije vreme ova problematika je jedna od bitnih tema u evropskoj interkonekciji i direktno je regulisana direktivama Evropske komisije koje obavezuju sve njene članice da se nivo pouzdanosti različitih oblasti sistema dovodi u prvi plan.

U cilju formiranja metodologije, na početku disertacije prikazan je pregled postojećih istraživanja i rezultata u oblasti razvoja ekvivalenata pouzdanosti. Naglašeno je da proračuni pouzdanosti elektroenergetskih sistema zahtevaju pretraživanje prostora stanja sistema koji je određen usvojenim pravilima eksploatacije i raspoloživošću elemenata sistema. Kod velikog broja generatorskih jedinica i elemenata mreže kojima su karakterisani interkonektivni sistemi, broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka su izuzetno veliki što otežava ove analize.

Da bi se razmatrani proračuni pojednostavili, a time i ubrzali, u literaturi su predloženi različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES. Izvršena je analiza postojećih metoda sa kritičkim osvrtom na tačnost i kvalitet primenjenih ekvivalenata. Danas se uglavnom primenjuju četiri metode za ekvivalentiranje.

U metodi CMT (*Capacity Margin Tables*) susedni sistem se modeluje preko tabele sa verovatnoćama raspoloživih viškova kapaciteta. Prenosni putevi do analiziranog sistema modeluju

se uprošćeno, po metodi grafova protoka, uz uvažavanje termičkih granica. Ne obuhvataju se kvarovi u prenosnoj mreži suseda.

Po metodi RTM (*Reduced Transition Matrix*) detaljno se analizira prostor stanja susednog sistema, grupišu se stanja sa sličnim raspoloživim kapacitetima za transfer u analizirani sistem i na osnovu tako uprošćenog prostora stanja formira sintetička šema susednog elektroenergetskih sistema.

Susedni sistemi se ekvivalentiraju i primenom poznatih REI (*Radial Equivalent Independent*) ekvivalenata koji su našli primenu u različitim analizama rada elektroenergetskih sistema. Ovaj ekvivalent predstavlja varijantu Wardove (*Ward*) šeme u kojoj se svi potrošači zamenjuju ekvivalentnim fiktivnim potrošačkim čvorom, a izvori jednim ekvivalentnim generatorom.

U metodi BG (*Bus Grouping*) izvori susednog elektroenergetskog sistema grupišu se prema njihovom učešću u snagama koje teku po interkonektivnim vodovima i tako se ovaj sistem približno zamenjuje preko nekoliko grupa generatora.

Na osnovu izvršenih analiza uočeno je da je kod nekih elemenata moguće uvesti određene korekcije koje bi dovele do poboljšanja kvaliteta metoda ekvivalentiranja koje se primenjuju za procenu pouzdanosti, kako iz aspekta korišćenja, tako i iz aspekta razvoja. U skladu sa tim predložen je DC mrežni ekvivalent za potrebe proračuna pouzdanosti. Originalnost ovog rada ogleda se u razvoju DC mrežnog ekvivalenta u kome se potrošnja susednog sistema, umesto da je koncentrisana u jednom fiktivnom čvoru, raspodeljuje između zadržanih čvorova strogo u skladu sa metodologijom za eliminaciju nekarakterističnih čvorova mreže. Pri tome se u analizi raspoloživih viškova susednog sistema pomenuta potrošnja modeluje u svakom čvoru proporcionalno prema dijagramu trajanja ukupne potrošnje, a ekvivalentni izvor prema tabeli verovatnoća raspoloživih kapaciteta izvornih jedinica suseda. Ovakvim pristupom se realnije uspostavlja tokovi snaga preko interkonektivnih vodova što povećava tačnost ekvivalenta.

Posebna pažnja je posvećena automatizaciji postupka razvojem softverske podrške u MATLAB okruženju čime je omogućeno automatsko izvršavanje svih razvijenih funkcija, kako za male sisteme od nekoliko mrežnih čvorova, tako i za velike realne sisteme kakav je elektroenergetski sistem Srbije. Korišćenje predloženog ekvivalentnog modela u analizama procene pouzdanosti verifikovano je na tri elektroenergetska sistema, Garverovom, IEEE test sistemu i na realnom sistemu. S obzirom na kompleksnost i aktuelnost teme zaključujemo da je urađena disertacija po značaju na visokom naučnom nivou koji zadovoljava sve standarde za izradu doktorske disertacije i da dobijeni rezultati predstavljaju naučni doprinos u odnosu na postojeće stanje i otvaraju prostor za dalja istraživanja.

3.2 Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Kandidatkinja je u disertaciji koristila savremenu i relevantnu literaturu i korektno je navela dostupne reference koje su u vezi sa temom disertacije. Korišćena literatura u potpunosti ispunjava zahteve dobrog pokrivanja oblasti istraživanja, adekvatnosti i savremenosti analize najnovijih rezultata i trendova razvoja u oblasti istraživanja. Navedene su ukupno 42 reference koje obuhvataju najznačajnije autore iz ove oblasti, radove iz naučnih časopisa i sa konferencija.

3.3 Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Osnovna polazna postavka ovog istraživanja je potreba za preciznim i sofisticiranim alatima koji omogućuju bolje predstavljanje ekvivalenata susednih elektroenergetskih sistema u analizama

pouzdanosti. Analiza velikog broja stanja sistema u proračunima parametara pouzdanosti zahteva veoma efikasne softverske alate. Posledica navedenog zahteva je da parametri pouzdanosti samo proizvodnog dela sistema nisu dovoljni da u analizama pouzdanosti predstavje ceo elektroenergetski sistem pošto su interkonektivni vodovi zbog svoje preopterećenosti često uska grla prenosa. Zbog toga je neophodno da se uradi kompletno modelovanje sistema i dalja razmatranja odnose se na analizu tačnosti predstavljanja prenosne (interkonektivne) mreže.

Minimalni nivo predstavljanja prenosnog sistema podrazumeva primenu transportnog modela. Svako kontrolno područje predstavljeno je kao čvor, a međusobni vodovi su modelovani kao grane između različitih čvorova sa probabilističkim prenosnim kapacitetima. Ipak, ovakav način predstavljanja prenosnog sistema ne omogućuje analize tokova snaga, gubitaka i naponskih prilika. Ovaj nivo modelovanja može se primeniti za predstavljanje samo izolovanog sistema, pošto daje samo informaciju o pouzdanosti proizvodnog sistema, sa aproksimativnim predstavljanjem ograničenja povezanih vodova.

Zbog toga je potreban drugi nivo predstavljanja kako bi bila modelovana osnovna načela tokova snaga (Kirchoffovi zakoni). Kao i u slučaju izolovanog sistema, može biti primenjen linearni DC model tokova snaga. Ovakav pojednostavljen model smanjuje računarske zahteve, a obezbeđuje zadovoljavajuće predstavljanje prenosnih ograničenja vodova i tokova snaga.

Istraživanja u okviru disertacije bazirana su na razvoju metodologije za formiranje ekvivalenta susednog sistema u analizama pouzdanosti. Predložen je DC mrežni ekvivalent kojim se vrši redukcija složene energetske mreže u jednostavniji model koji zadržava sve bitne informacije koje su važne za sprovođenje daljih analiza pouzdanosti. Razvijeni jedinstveni DC mrežni ekvivalent ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnim sistemom što je postignuto formiranjem izvornih čvorova i uzimanjem u obzir interkonektivnih ograničenja i postignutih ugovora. Predloženi ekvivalent je jednostavan za formiranje i modelovanje i omogućava jednostavan proračun tokova snaga. Primena predloženog modela je demonstrirana na tri sistema: Garverovom, IEEE test primeru i na realnom sistemu.

Ceo postupak izrade ove doktorske disertacije može se sumirati kroz sledeći niz aktivnosti:

1. Sistematizovano prikupljanje i proučavanje dostupne literature i analiza postojećih naučnih rezultata i dostignuća iz oblasti disertacije.
2. Kritička analiza problematike ekvivalentnih modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti sa stanovišta uticaja predloženih unapređenja na kvalitet dobijenih rezultata i potrebnog vremena proračuna za slučajeve složenih elektroenergetskih sistema.
3. Razvoj i formiranje DC mrežnog ekvivalenta na osnovu razvijenog matematičkog modela.
4. Razvoj odgovarajuće softverske podrške u programskom okruženju MATLAB za proračun parametara predloženog ekvivalenta koja podjednako dobro radi na svim analiziranim sistemima, počev od Garverovog test sistema od 6 mrežnih čvorova do vrlo kompleksnih realnih sistema kao što je to elektroenergetski sistem Srbije.
5. Dodatno kvalitetno unapređenje proračuna parametara ekvivalenta ostvareno je obuhvatanjem uticaja istovremenih ispada vodova i generatora u ekvivalentiranom susednom sistemu, čime se obuhvataju sva potencijalno moguća stanja susednog sistema.
6. Proračuni i analiza parametara pouzdanosti za slučaj kada je susedni sistem modelovan u potpunosti i kada je zamenjen odgovarajućim ekvivalentom.

7. Verifikacija predložene metode poređenjem rezultata proračuna parametara pouzdanosti za slučajeve navedene u prethodnoj tački
8. Donošenje konačnih zaključaka po pitanju korišćenja razvijenog ekvivalenta u analizama pouzdanosti složenih elektroenergetskih sistema.

Analizom, poređenjem i procenom kvaliteta razvijenog ekvivalenta podstiče se i dalji razvoj metoda za ekvivalentiranje susednih sistema u analizama pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Na osnovu analize sadržaja doktorske disertacije može se zaključiti da primenjene naučne metode i tehnike, po svom značaju i strukturi, odgovaraju temi disertacije i sprovedenim istraživanjima.

3.4 Primenljivost ostvarenih rezultata

Ova doktorska disertacija inicirana je praktičnim i teorijskim potrebama analize pouzdanosti povezanih elektroenergetskih sistema. Njeni rezultati mogu imati vrlo značajnu primenu u procenama pouzdanosti savremenih elektroenergetskih sistema integrisanih u velike interoknektivne sisteme. Bez obzira na regulativu o deregulaciji tržišta električne energije donetu u prethodnoj deceniji koja se odnosi na elektroenergetske sisteme, analiza pouzdanosti je i dalje neophodna, naročito uvažavajući činjenicu da je pouzdanost elektroenergetskih sistema direktno povezana sa troškovima njihove izgradnje i eksploatacije. U novoj raspodeli odgovornosti između učesnika na tržištu (proizvođača, operatora sistema, snabdevača, kupaca, regulatora) koja može da varira od sistema do sistema i dalje postoji snažna potreba za metodama i alatima koji omogućuju procenu pouzdanosti, ali i vrednosti novouvedenih kriterijuma kao što su LOLP (*Loss of Load Probability*), LOLE (*Loss of Load Expectation*), LOEE (*Loss of Enery Expectation*) (poznat i kao EENS - *Expected Energy not Served*) za velike interkonektivne sisteme.

S obzirom da je za potrebe sprovođenja svih potrebnih analiza u okviru doktorske disertacije razvijen i odgovarajući softverski alat u MATLAB okruženju, realno se otvaraju i mogućnost komercijalne primene razvijene metodologije u oblasti analiza pouzdanosti elektroenergetskih sistema koji rade u interaktivnom okruženju.

3.5 Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalan naučni rad

U toku izrade doktorske disertacije kandidatkinja je pokazala sposobnost da sagleda problem istraživanja sa više aspekata i kreativno pristupi njegovom rešavanju. Uočila je glavne nedostatke i probleme postojećih metodologija i razvijenih ekvivalenata i predložila originalan DC mrežni ekvivalent za modelovanje susednih elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti. Rezultati istraživanja u okviru disertacije verifikovani su u okviru realnih elektroenergetskih sistema kao i dobro poznatog IEEE test sistema i publikovani su u međunarodnom i domaćim časopisima i na konferencijama.

Sveobuhvatan i sistematizovan pregled stanja u oblasti elektroenergetskih sistema pokazuje sposobnost kandidatkinje za samostalno uočavanje i sagledavanje otvorenih problema istraživanja, kao i kritičku analizu postojećih saznanja u ovoj oblasti. Na osnovu navedenog smatramo da kandidatkinja poseduje potrebno znanje i iskustvo za samostalan naučni rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1 Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Izrada predložene disertacije doprinosi razvoju matematičkih modela ekvivalenata susednih sistema

u analizama pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Ekvivalentiranjem susednih sistema smanjuje se potrebno kompjutersko vreme proračuna pošto je susedni sistem predstavljen odgovarajućim ekvivalentom koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja. Na taj način se omogućava brža i efikasna analiza pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Razvoj modela ekvivalenata vrlo je značajan za savremene interkonektivne sisteme u kojima je broj mogućih stanja sistema i obim ulaznih podataka vrlo veliki, što u znatnoj meri otežava analize pouzdanosti.

Osnovni naučni doprinos disertacije je razvoj DC mrežnog ekvivalenta, u kome se uvodi jedinstven ekvivalentni izvorni čvor paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova, dok se svi potrošački čvorovi eliminišu korišćenjem Wardovog metoda injektiranja. Na ovaj način je dobijen mrežni ekvivalent sa prirodnim vrednostima admitansi koji ima jedinstven izvorni čvor koji obuhvata stanja svih pojedinih izvornih čvorova. Generisanje stanja koja imaju istu raspoloživu snagu u ekvivalentna stanja značajno smanjuje njihov ukupan broj u poređenju sa slučajem kada su izvori predstavljeni zasebno. Dodatna redukcija prostora stanja ostvarena je uzimanjem u obzir postignutih ugovora između aproksimiranog dela sistema i preostalog sistema razmatrajući uzajamne havarijske isporuke, kao i ograničenja prenosnih kapaciteta interkonektivnih dalekovoda. Formirani mrežni ekvivalent simulira efekte spoljnog sistema u tokovima snaga u ispitivanoj mreži pošto se spoljni sistem u proračunima tokova snaga tretira kao sastavni deo ove mreže.

U okviru predložene doktorske disertacije ističemo sledeće naučne doprinose:

- Izvedena je analiza i dat kritički osvrt na dosad korišćene razvijene ekvivalente u analizama procene pouzdanosti. Za potrebe analize dat je sveobuhvatan i sistematizovan pregled postojećih rešenja u razvoju metodologija za uprošćavanje i ekvivalentiranje susednih sistema u analizama pouzdanosti.
- Ukazano je na prednosti primene razvijenog DC mrežnog ekvivalenta u analizama pouzdanosti interkonektivnih sistema.
- Razvijeni mrežni ekvivalent ima redukovani broj stanja. Broj relevantnih stanja ekvivalentnog izvora redukovani je činjenicom da obezbeđuje podršku susednom sistemu u havarijskim situacijama ne prelazeći ugovorenu vrednost razmene ili maksimalnu prenosnu snagu interkonektivnih dalekovoda.
- Prekoračenja u ekvivalentiranom sistemu vezana za ispade prenosnih vodova i izvora su modelovana preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko modifikovanja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja.
- Formirana ekvivalentna mreža ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnom mrežom što bitno redukuje proračunske probleme u proceni pouzdanosti sistema od interesa.
- Proračunati pokazatelji pouzdanosti za razmatrani sistem za slučaj kada je susedni, interkonektivni sistem predstavljen ekvivalentom i za slučaj kada je modelovan u potpunosti vrlo su podudarni. Na osnovu procenjenog kvaliteta ekvivalenta metoda predložena u disertaciji predlaže se za uprošćavanje susednih sistema u analizama pouzdanosti.
- Razvijena je softverska podrška u MATLAB okruženju koja omogućuje proračun parametara ekvivalenta u analizama pouzdanosti, bilo da se radi o malim sistemima, kao što su test sistemi, bilo da se radi o velikim realnim elektroenergetskim sistemima.
- Demonstracija izvodljivosti i praktične upotrebljivosti predloženog pristupa u razvoju ekvivalenata pouzdanosti prikazana je na realnim elektroenergetskim sistemima.

Doprinosom razvoju matematičkih modela za ekvivalentiranje susednih interkonektivnih sistema u

analizama parametara pouzdanosti, verovatnoće i učestanosti prekida napajanja, ukupne godišnje neisporučene energije i snage po pojedinim potrošačkim čvorovima kandidatkinja je kroz doktorsku disertaciju ostvarila generalno najvažniji cilj – naučno je pokazala da se korišćenjem ekvivalenata u analizama pouzdanosti na efikasan način omogućuju proračuni parametara pouzdanosti savremenih elektroenergetskih sistema koji rade u složenom interkonektivnom okruženju. Sagledavanjem pouzdanosti elektroenergetskih sistema u savremenom liberalizovanom, tržišno orijentisanom okruženju, sa novim aspektima planiranja i funkcionisanja elektroenergetskog sistema, podstiče se dalji razvoj analiza pouzdanosti ovih sistema, što predstavlja dobrobit za kupce električne energije, a time i za celo društvo.

Sveobuhvatni naučni doprinos disertacije je unapređenje modelovanja elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti u savremenom interkonektivnom okruženju, sa ciljem pouzdane isporuke električne energije krajnjim potrošačima.

4.2 Kritička analiza rezultata istraživanja

Kandidatkinja je u disertaciji razmotrila problem i neophodnost razvoja ekvivalenata pouzdanosti. Primenom predloženog DC mrežnog ekvivalenta u analizama pouzdanosti ostvarena je redukcija velike i složene energetske mreže u jednostavniji model koji zadržava sve bitne informacije koje su važne za sprovođenje daljih analiza. Razvijen je jedinstven DC mrežni ekvivalent koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnim sistemom. Predloženi ekvivalent je jednostavan, pogodan za formiranje i modelovanje i omogućuje jednostavan proračun tokova snaga.

Istraživački rad je zasnovan na postojećim naučnim rezultatima sa ciljem da se unaprede postojeći ekvivalenti pouzdanosti i predloženi postupak proračuna sprovede do visokog nivoa tačnosti sa značajnim smanjenjem potrebnih računarskih resursa, posebno proračunskog vremena. Analizirana je obimna literatura kao i različite metode i tehnike u razvoju ekvivalenata pouzdanosti.

Uvidom u postavljene hipoteze, realizovane odluke i dobijene rezultate, Komisija konstatuje da je kandidatkinja uspešno odgovorila na postavljena pitanja koja su od značaja za razvoj ekvivalenata pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Kvalitet predloženog pristupa je verifikovan na dobro poznatim sistemima u različitim operativnim uslovima. Ovim radom je dokazano da se korišćenjem ekvivalenata u analizama pouzdanosti na efikasan način omogućavaju proračuni parametara pouzdanosti savremenih elektroenergetskih sistema.

Urađena doktorska disertacija ističe potrebu za analizama pouzdanosti elektroenergetskih sistema u savremenom liberalizovanom, tržišno orijentisanom okruženju, sa novim aspektima u njihovom planiranju i funkcionisanju, i ujedno ukazuje na potrebu daljeg razvoja ovih metoda.

4.3 Verifikacija naučnih doprinosa

U toku svog istraživačkog rada u užoj oblasti teme doktorske disertacije kandidatkinja je publikovala sledeće radove:

Vrhunski međunarodni časopisi (Kategorija M21):

- [1] J. Nahman, M. Djordjevic, "A DC Network Equivalent For Adequacy Evaluation Of Interconnected Systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 97, pp. 61-67, 2013., (IF=1.694) (ISSN 0378-7796)

Saopštenja sa međunarodnih skupova štampana u celini (Kategorija M33):

- [1] **M. Djordjevic**, "The Description of the new MF (Maximum-Flow) Method for Coordinated Auctions", *DEMSEE (Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe)*, September 2010, Sitia – Greece.
<http://www.oas.gr/synerdia/demse2010>

Vodeći časopisi nacionalnog značaja (Kategorija M51):

- [1] B. Filipović, **M. Đorđević**, A. Kurćubić, M. Stojić, J. Veselinović, "Primena mrežnih aplikacija u NDC Elektromreže Srbije", *Elektroprivreda*, br. 1, 2008., str 42-49, (ISSN 0013-5755)
- [2] Z. Vujasinović, A. Kurćubić i **M. Đorđević**, "Analiza i utvrđivanje uslova za rad elektroenergetskog sistema Albanije u jedinstvenoj mreži UCTE", *Elektroprivreda*, br. 2, 2005, str 18-30, (ISSN 0013-5755)

Saopštenja sa domaćih skupova štampana u celini (Kategorija M63):

- [1] **M. Đorđević**, "Primena mrežnog ekvivalenta u analizi pouzdanosti na sistemu Srbije, Crne Gore i Albanije", 31. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, maj 2013., ref. B3-11.
<http://www.cigresrbija.org/>
- [2] **M. Đorđević**, N. Šijaković, "Opis nove metodologije za prognozu potrošnje električne energije", 30. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, maj 2011., ref. C1-01.
http://www.cigresrbija.org/?page_id=59
- [3] N. Šijaković, M. Kostić, M. Stančević, **M. Đorđević**, I. Trkulja, V. Mladenov, "Softverska alatka za automatizaciju izrade prognoze zagušenja dan unapred i ostale proračune korisne za planiranje rada i razvoja prenosne mreže", 30. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, maj 2011., ref. C2-06.
http://www.cigresrbija.org/?page_id=59
- [4] **M. Đorđević**, Z. Vujasinović, "Razvoj koordinisanih aukcija u regionima jugoistočne i centralnoistočne Evrope", 30. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, maj 2011., referat C5-11.
http://www.cigresrbija.org/?page_id=59
- [5] **M. Đorđević**, A. Kurćubić, "Opis novog MF („maximum-flow“) metoda za koordinisane aukcije, 29. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, maj 2009., referat C5-09.
http://www.cigresrbija.org/?page_id=55
- [6] B. Filipović, **M. Đorđević**, A. Kurćubić, M. Stojić, "Implementacija mrežnih aplikacija u NDC Elektromreže Srbije", ETRAN, Herceg Novi, jun 2007., ref. EE1.4.
<http://etran.etf.bg-ac-rs/>
- [7] **M. Đorđević**, "Primena mikroprocesorskih digitalnih uređaja za merenja u upravljačko informacionim sistemima", 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, sept. 2001., ref. 34-20.
- [8] **M. Đorđević**, "Jedan algoritam klasterovanja", XXVII SYMOPIS – Jugoslovenski simpozijum o operacionim istraživanjima, Zbornik radova, Beograd, 2000.

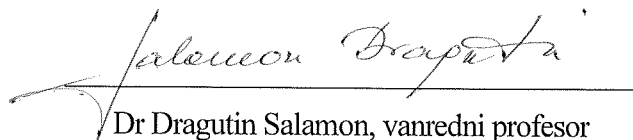
5. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega prethodnog, Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se uobičajeno primenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije na Elektrotehničkom fakultetu univerziteta u Beogradu. Komisija smatra da doktorska disertacija mr Marije Đorđević, dipl. inž., sadrži originalne naučne doprinose koji mogu imati značajnu praktičnu primenljivost u oblasti analiza pouzdanosti interkonektivnih elektroenergetskih sistema.

Na osnovu svega izloženog, komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu da se doktorska disertacija kandidatkinje mr Marije Đorđević, dipl. inž., pod naslovom pod nazivom „**Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti**“ prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

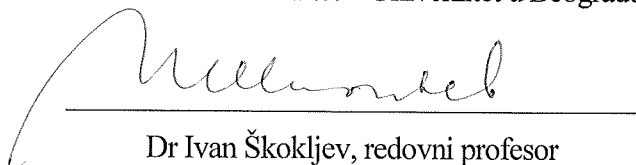
U Beogradu, 05.jula 2013.godine

Komisija :



Dr Dragutin Salamon, vanredni profesor

Elektrotehnički fakultet – Univerzitet u Beogradu



Dr Ivan Škokljev, redovni profesor

Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu



Dr Ninel Čukalevski, naučni savetnik

Institut „Mihailo Pupin“, Beograd



Dr Predrag Stefanov, docent

Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu



Dr Vladica Mijailović, redovni profesor

Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerzitet u Kragujevcu