

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U BEOGRADU

Na 756. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, održanoj 27. novembra 2012. godine određeni smo za članove Komisije za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije mr Marije Đorđević, dipl. inž., pod naslovom „*Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti*“. Nakon pregleda dobijenog materijala Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu podnosimo sledeći

I Z V E Š T A J

1. PODACI O KANDIDATKINJI

a) Opšti biografski podaci, obrazovanje i usavršavanje, rad i napredovanje u struci

Marija Đorđević je rođena 7. decembra 1972. godine u Čačku. Osnovnu školu i gimnaziju završila je sa odličnim uspehom. Nosilac 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 pod naslovom „*Ekvivalenti za susedne elektroenergetske sisteme u analizama pouzdanosti*“ odbranila je 28. novembra 2003. godine i stekla zvanje magistra elektrotehničkih nauka.

Od 1998. do 2003. godine radila je u JP “Elektroprivreda Srbije” (JP EPS), u Direkciji za razvoj i investicije, na problematici prognoze potrošnje, ekonomskog dispečinga, modelovanja pomoću neuralnih mreža i klastera u elektroenergetskim sistemima (EES). Učestvovala je u 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 EES u JP EPS, a od 2005. godine prelazi u JP “Elektromreža Srbije” (JP EMS), gde 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 implemetaciji novog sistema SCADA/EMS (*Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management System*) u JP EMS, na implementaciji sledećih 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 aplikaciju za prognozu potrošnje. Učestvuje u izradi petogodišnjih i desetogodišnjih planova razvoja JP EMS.

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

Rukovodilac je međunarodne tehničke podgrupe “*Congestion Managment and Market Integra-tion*“, 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.

b) Podaci o magistraturi

Magistarski rad kandidatkinje Marije Đorđević, diplomiranog inženjera elektrotehnike pod nazivom "*Ekvivalenti za susedne elektroenergetske sisteme u analizama pouzdanosti* " odbranjen je 2003 godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Mentor pri izradi magistarskog rada bio je dr Jovan Nahman, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu.

Magistarski rad sadrži 115 stranica standardnog formata A4. Podeljen je u 9 poglavlja od kojih osmo predstavlja zaključak, a deveto je spisak neposredno korišćene literature. Uvod nije numerisan. Rad sadrži 12 tabela, 28 slika i 9 priloga.

U prvom poglavlju prikazano je tadašnje stanje u interkonekcijama, kao i osnovni tipovi organizacije elektroprivrednih preduzeća, s osvrtom na uticaj pouzdanosti na njihovu novu organizacionu strukturu. U drugom poglavlju opisano je modelovanje pojedinih komponenata EES, posebno prenosne mreže čiji uticaj postaje veoma bitan u novom ekonomskom okruženju. U trećem poglavlju definisani su pojmovi iz pouzdanosti kao što su obnovljivi i neobnovljivi sistemi, Markovljevi procesi i osnovni elementi Kronekerove algebre. U četvrtom poglavlju kratko su opisana dva osnovna klasična modela, Wardov i Dimooov ekvivalent. U petom poglavlju dat je matematički model modifikovanog Wardovog ekvivalenta. U šestom poglavlju opisani su karakteristični slučajevi koji mogu da nastupe u sistemima koji se analiziraju i procenjena je tačnost ekvivalenta na vrlo malom modelu iz literature. U sedmom poglavlju model je testiran na realnom sistemu i dati su rezultati kao procenat slučajeva u kojima ekvivalent daje loš rezultat kod procene pouzdanosti u odnosu na ukupan broj analiziranih slučajeva.

c) Spisak publikovanih radova

- [1] J. Nahman, M. Djordjevic, "A DC Network Equivalent For Adequacy Evaluation of Interconnected Systems", Electric Power Systems Research, 2012, prihvaćeno za publikovanje.
- [2] M. Đorđević, Z. Vujasinović, "Razvoj koordinisanih aukcija u regionima jugoistočne i centralnoistočne Evrope", 30. savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, juni 2011., ref. C5-11.
- [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 JUKO CIGRE, Zlatibor, juni 2011., ref. C2-06.
- [4] M. Đorđević, N. Šijaković, "Opis nove metodologije za prognozu potrošnje električne energije", 30. savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, juni .2011., ref. C1-01.
- [5] M. Djordjevic, "The Description of the new MF (*Maximum Flow*) Method for Coordinated Auctions", DEMSEE, September 23-24, 2010 Sitia, Greece.

- [6] M. Đorđević, A. Kurćubić, “Opis novog MF (*Maximum Flow*) metoda za koordinisane aukcije“, 29. savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, juni 2009., ref. C5-09.
- [7] B. Filipović, M. Đorđević, A. Kurćubić, M. Stojić, J. Veselinović, “Primena mrežnih aplikacija u NDC Elektromreže Srbije“, „Elektroprivreda“, No. 1, 2008, pp. 42-49.
- [8] B. Filipović, M. Đorđević, A. Kurćubić, M. Stojić, “Implementacija mrežnih aplikacija u NDC Elektromreže Srbije, ETRAN, Herceg Novi, jun 2007., ref. EE1.4.
- [9] Z. Vujasinović, A. Kurćubić, M. Đorđević, “Analiza i utvrđivanje uslova za rad elektroenergetskog sistema Albanije u jedinstvenoj mreži UCTE“, „Elektroprivreda“, No. 2, 2005., pp. 18-30.
- [10] M. Đorđević, “Primena mikroprocesorskih digitalnih uređaja za merenja u upravljačko informacionim sistemima“, 25. savetovanje JUKO CIGRE, Herceg Novi, septembar 2001., ref. 34-20.
- [11] M. Đorđević, “Jedan algoritam klasterovanja“, XXVII SYMOPIS – Jugoslovenski simpozijum o operacionim istraživanjima, Zbornik radova, Beograd, 2000.

Na osnovu dosadašnjeg stručnog rada i objavljenih naučnih rezultata može se smatrati da je kandidatkinja kvalifikovana za rad na izradi doktorske disertacije sa predloženom temom.

2. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

Savremeni EES u cilju poboljšanja ekonomičnosti i pouzdanosti rada po pravilu rade integrisani u šire interkonekcije. U sklopu planiranja rada i razvoja EES mora da se vrši procena pouzdanosti EES kako bi se utvrdilo da li pouzdanost zadovoljava postavljene kriterijume i, ako ne zadovoljava, koje su potrebne intervencije u EES. Proračuni pouzdanosti EES zahtevaju pretraživanje prostora stanja sistema koji je određen usvojenim pravilima eksploatacije i raspoloživošću elemenata sistema. Kod velikog broja generatorskih jedinica i elemenata mreže, što je karakteristično za interkonektivne sisteme, broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka su izuzetno veliki, što u velikoj meri otežava analize pouzdanosti. Da bi se razmatrani proračuni pojednostavili i time ubrzali u literaturi se predlažu različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES.

Poznate su četiri metode za ekvivalentiranje sa primenom u oblasti pouzdanosti. Metoda CMT (*Capacity Margin Tables*) susedni sistem modeluje se preko tabele sa verovatnoćama raspoloživih viškova kapaciteta za isporuku. Prenosni putevi do analiziranog sistema (AS) 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 AS i na osnovu tako uprošćenog prostora stanja formira sintetička šema susednog EES. Susedni EES se ekvivalentiraju i primenom poznatih REI (*Radial Equivalent Independent*) ekvivalentenata koji su našli primenu u različitim analizama rada EES. Pomenuti REI ekvivalent predstavlja varijantu Wardove šeme u kojoj se svi potrošači zamenjuju ekvivalentnim fiktivnim potrošačkim čvorom, a izvori jednim ekvivalentnim generatorom. Metoda BG (*Bus Grouping*) izvore susednog EES grupiše prema njihovom učešću u snagama koje teku po interkonektivnim vodovima i tako ovaj sistem približno zamenjuju preko nekoliko grupa generatora.

Cilj ovog rada je da se razvije DC ekvivalent u kome se potrošnja susednog EES, umesto da je koncentrisana u fiktivnom čvoru, raspodeli među zadržanim čvorovima strogo u okviru metodologije za eliminaciju nekarakterističnih čvorova mreže. Pri tome bi se u analizi raspoloživih viškova susednog EES pomenuta potrošnja modelovala u svakom čvoru proporcionalno prema dijagramu trajanja ukupne potrošnje, a ekvivalentni izvor prema tabeli verovatnoća raspoloživih kapaciteta elektrana suseda. Ovakvim pristupom se realnije uspostavljaju tokovi snaga preko interkonektivnih vodova što povećava tačnost ekvivalenta.

Ova doktorska disertacija inicirana je praktičnim i teorijskim potrebama analize EES. Bez obzira na regulativu o deregulaciji donetu u prethodnoj deceniji koji se odnosi na EES, analiza pouzdanosti je i dalje neophodna naročito uvažavajući činjenicu da je pouzdanost EES direktno povezana sa troškovima izgradnje i eksploatacije EES. U novoj raspodeli odgovornosti između učesnika na tržištu (operatora prenosnog sistema, proizvođača, snadbevača, kupaca, regulatora), koja može da varira od sistema do sistema, i dalje postoji snažna potreba za metodama i alatima koji omogućavaju procenu pouzdanosti i novonastalih veličina u velikim interkonektivnim sistemima, kao što su kriterijumi LOLP (*loss of load probability*), LOLE (*loss of load expectation*), LOEE (*loss of energy expectation*), takođe poznat i kao EENS (*expected energy not served*).

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je ekvivalentiranje složenih interkonektivnih sistema u analizama pouzdanosti kompozitnih sistema. U disertaciji se razmatraju dva interkonektivna elektroenergetska sistema, sistem od interesa i interkonektivni (susedni) sistem. Za sistem od interesa sprovodi se detaljna analiza parametara pouzdanosti. U cilju smanjenja kompjuterskih zahteva, interkonektivni, susedni sistem je prezentovan odgovarajućim aproksimativnim modelom (ekvivalentom) koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja. Primena predloženog modela demonstrira se na tri posmatrana sistema Garverovom, IEEE RTS (*IEEE Reliability Test System*) i na realnom sistemu. Na osnovu poređenja parametara pouzdanosti kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i kada je zamenjen predloženim ekvivalentom, predlaže se korišćenje uprošćenog modela u analizama pouzdanosti.

Cilj istraživanja je razvoj DC mrežnog ekvivalenta za aproksimaciju interkonektivnih sistema u proceni pouzdanosti sistema koji se razmatra. Mrežni ekvivalent se modeluje paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova kako bi se dobio jedan izvorni čvor. Mreža je transformisana u mrežni ekvivalent koji sadrži samo ekvivalentni izvorni čvor i granične interkonektivne čvorove prema sistemu koji se istražuje, a koji je od interesa. Broj relevantnih stanja ekvivalentnog izvora je ograničen time da obezbeđuje podršku susednom sistemu u havarijskim situacijama, ne prelazeći ugovorenu vrednost razmene ili maksimalnu prenosnu snagu interkonektivnih dalekovoda. Prekoračenja u aproksimiranom sistemu, vezana za ispade prenosnih dalekovoda, modeluju se preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko modifikovanja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja. Ekvivalentna mreža se formira tako da ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnom mrežom, što bitno redukuje proračunske probleme u proceni pouzdanosti sistema od interesa. Proračunom pokazatelja pouzdanosti za razmatrani sistem za slučaj kada je susedni, tj. interkonektivni sistem predstavljen ekvivalentom i za slučaj kada je modelovan u potpunosti, procenjuje se kvalitet ekvivalenta. Na osnovu navedenog predloženi ekvivalent bi se koristio za ekvivalentiranje susednih sistema u analizama pouzdanosti.

3. OSVRT NA RELEVANTNE BIBLIOGRAFSKE IZVORE

Primena ekvivalenata u analizama pouzdanosti EES bila je predmet proučavanja više autora. Najznačajnije reference koje je kandidatkinja koristila u svom istraživanju vezanom za predmet doktorske disertacije navedene su u dole navedenoj listi:

- [3.1] J. Nahman, "Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema", *Naučna knjiga*, Beograd, 1992.
- [3.2] R. Billinton, R. N. Allan, L. Salvadery, "Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems", IEEE Pres, New York, 1991.
- [3.3] Endrenyi J, "Reliability Modeling in Electric Power Systems", J. Wiley & Sons, New York, 1978.

- [3.4] R. Billinton, H. J. Koglin, "Reliability equivalents in composite system reliability evaluation", IEE proc., Pt. C, 1987 **134** (3), pp. 224-232.
- [3.5] S. Kumar, R. Billinton, "Adequacy equivalents in composite power system evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, 1988., **PWRS-3** (3), pp. 1167- 1173.
- [3.6] W. Zhang W., R. Billinton, "Application of an adequacy equivalent method in bulk power system reliability evaluation", IEEE Trans. on Power Systems, 1998., **PWRS-13** (2), pp. 661-666.
- [3.7] D. T. Philips, A. Garzia-Diaz, "Fundamentals of Network Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- [3.8] A. D. Patton, S. K. Sung, "A transmission network model for multi-area reliability studies", IEEE Trans. on Power Systems, 1993, **PWRS-8** (2), pp. 459-466.
- [3.9] S. C. Savulescu, "Equivalents for security analysis of power systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, **PAS-100**, (5), pp. 2672-2682.
- [3.10] M. L. Oatts, S. R. Erwin, J. L. Hart, "Application of the REI equivalent for operations planning analysis of interchange schedules", IEEE Trans. on Power Systems, 1990., **PWRS-5**, (2), pp. 547-555.
- [3.11] F. F. Wu, A. Monticelli, "Critical review of external network modeling for online security analysis", Electr. power & energy syst., 1983 **5** (4), pp. 222-235.
- [3.12] E. C. Housos, G. Irisarri, R. M. Porter, A. M. Sasson, "Steady state network equivalents for power system planning applications", IEEE trans. on Power Apparatus and Systems, 1980., **PAS-99**, (6), pp. 2113-2118.
- [3.13] R. Billinton, W. Zhang, "Adequacy equivalent development of composite generation and transmission systems", Reliab. eng. & syst. saf., 2001, **74** (1), pp. 1-12.
- [3.14] H. A. M. Maghraby, R. N. Allan, "Application of DC equivalents to the reliability evaluation of composite power systems, IEEE Trans. on Power Systems, 1999, **PWRS-14**, (1), pp. 355-361.
- [3.15] P. Wang, R. Billinton, L. Goel, "Unreliability cost assessment of an electric power system using reliability network equivalent approaches", IEEE Trans. on Power Systems, 2002., **PWRS-17**, (3), pp. 549-556.
- [3.16] X. Cheng, T. J. Overbye, "PTDF-based power system equivalents", IEEE Trans. on Power Systems, 2005., **PWRS-20** (4), pp. 1868-1876.
- [3.17] I. Dobson, "Voltages across an area of a network", IEEE Trans. on Power Systems, 2012., **PWRS-27** (2), pp. 993-1002.
- [3.18] L. L. Garver, P. R. Van Horne, K. A. Virgau, "Load supplying capability of generation-transmission networks", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979., **PAS-8** (3), pp. 957-961.
- [3.19] IEEE Reliability Test System, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Report prepared by the Reliability Test System Task Force, 1979, **PAS-98** (6), pp. 2047-2054.
- [3.20] U. G. Knight, "Power Systems Engineering and Mathematics", Pergamon Press, Oxford, 1972.

U [3.1] su date osnove opšte teorije pouzdanosti, kao i metode i postupci koji se koriste u analizama pouzdanosti EES. Dat je i pregled osnovnih pokazatelja pouzdanosti, kao i analiza pouzdanosti povezanih EES-a, sa osvrtom na ograničenja u prenosu, njihovu potrošnju i povezanost u složene interkonekcije.

U [3.2] i [3.3] procena pouzdanosti složenih interkonektivnih EES je u mnogim slučajevima složen posao zbog enormnog velikog broja stanja ispada koja moraju biti razmotrena u proračunima. Kompjutersko vreme može biti bitno redukovano ako se neki delovi EES aproksimiraju ekvivalentima sa ograničenim brojem stanja koja reflektuju samo najefektivnija stanja pouzdanosti ovih uprošćenih delova sistema.

U literaturi [3.4] se predlažu različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES, kao što su metoda CMT (*Capacity Margin Tables*), gde se susedni sistem modeluje preko tabele sa verovatnoćama raspoloživih viškova kapaciteta za isporuku, kao i metoda ekvivalentiranja generisanja i potrošnje [3.4, 3.5, 3.6]. Oba pomenuta pristupa koriste metodu maksimalnog toka snage [3.7] za modelovanje tokova snaga kroz sistem kako bi uzeli u obzir ograničenja uzrokovana prekoračenjem prenosnih kapaciteta dalekovoda. Ekvivalenti su generalno povezani sa preostalim delom EES u jednom čvoru iako u realnosti postoji više od jednog interkonektivnog čvora. Pokazano je da ovi ekvivalentni modeli obezbeđuju prilično tačne rezultate i čine mogućim da se analizira uticaj najbitnijih prekoračenja, dok je zahtevano kompjutersko vreme značajno manje.

REI ekvivalent je takođe široko korišćen u prošlosti u analizama sigurnosti i pouzdanosti kako bi se modelovali uticaji spoljnih sistema [3.8, 3.9, 3.10]. On se sastoji od izvornog i potrošačkih čvorova koji su sa graničnim čvorovima povezani preko fiktivnih impedansi. Ove impedanse su definisane tako da su u saglasnosti sa uslovima u graničnim čvorovima za razmatrano osnovno stanje tokova snaga (stanje u base case-u).

Takođe je pokazano da REI model u mnogim slučajevima veoma dobro simulira realan spoljni sistem. Međutim, neuobičajene vrednosti fiktivnih impedansi ponekad mogu da uzrokuju probleme konvergencije u proračunima tokova snaga [3.11, 3.12].

Takođe, važno je naglasiti da, ako bi trebalo uzeti u obzir ispade u spoljnom sistemu, REI ekvivalent bi morao da bude adekvatno modifikovan kod svake strukturne promene.

U analizama sigurnosti i planiranja složenih EES-a često su korišćeni različiti tipovi Wardovih modela spoljnog sistema koji proizvodnju i potrošnju tretiraju kao injektiranje [3.12]. Wardov pristup eliminiše sve spoljne čvorove, a proizvodnja i potrošnja su predstavljeni adekvatnim injektiranjem u graničnim čvorovima. Kako bi se unapredili ovi ekvivalenti u simulaciji realnih tokova snaga u studijama tokova snaga, osnovni Wardov model može biti proširen uvođenjem adekvatne bafer zone.

U [3.13] ekvivalent za potrebe pouzdanosti je konstruisan primenom DC tokova snaga, a prikazan je tabelarno sa verovatnoćama raspoloživih kapaciteta. Poredi se metoda mrežnog toka koja nije dovoljno precizna kao DC proračun tokova snaga. Tehnika DC proračuna tokova snaga obezbeđuje tačnije rešenje stanja sistema nego tehnika mrežnog toka.

DC ekvivalent spoljnog sistema za analizu pouzdanosti zasnovan na injektiranju tipa Wardog modela je takođe prikazan u [3.14]. Uticaj generatorskih jedinica modelovan je posebno za svaki izvorni čvor, koristeći odnos distribucije tokova između izvornih i graničnih čvorova.

Jedan oblik tabele sa verovatnoćama raspoloživih kapaciteta primenjen je u [3.15] kako bi pojednostavio strukturu sistema formiranjem ekvivalenta za deo sistema povezan sa preostalim sistemom preko jednog ili dva čvora.

U [3.16] su predloženi ekvivalenti za neke delove sistema zasnovani na zonalnim PTDF (*Power Transfer Distribution Factor* - faktor raspodele prenosne snage) što je dovelo do razvoja ekvivalenta koji aproksimira transakcije preko PTDF faktora. Upotrebom PTDF pristupa, uticaj bilateralnih transakcija (kupac/prodavac kombinacija) na tokove u prenosnom sistemu može biti obuhvaćen PTDF faktorima. Zapravo, promena u pretpostavljenom učešću pojedinih generatora će uticati na raspored tokova snaga po dalekovodima (prema PTDF).

U skorijem radu [3.17] prezentovane su pojednostavljene šeme za odsečene delove mreže koje se dobijaju kratkim spajanjem njihovih graničnih čvorova i korišćene su za efikasnu naponsku analizu mreže. Novi naponi su kombinacija napona u graničnim čvorovima sa određenim težinskim faktorima.

4. POLAZNE HIPOTEZE

Energetska politika se u nekoliko proteklih godina bitno promenila u većini zemalja. Otvoreni pristup ili pristup prodaji na veliko, vertikalno razdvajanje kompanija, funkcionalno odvajanje prenosa i tržišta kao i vlasnička transformacija elektroprivrednih preduzeća su kreirali potpuno novo okruženje za planiranje i funkcionisanje EES. Bez obzira na promene koje su se odigrale, analiza pouzdanosti je potrebna u analizama rada i razvoja EES, pre svega zbog činjenice da je pouzdanost rada EES u direktnoj vezi sa troškovima.

U novom ekonomskom okruženju procena pouzdanosti interkonekcija i međusobno povezanih EES postaje složenija pošto je neophodno modelovati nove funkcije interkonekcije (složenije upravljanje i veći broj ugovora o razmenama) i predstaviti složeniji rad sistema. U ovoj disertaciji se predlaže da se uprošćavanjem susednih sistema formira ekvivalent mreže susednog EES koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa polaznim modelom susednog sistema, što značajno redukuje vreme proračuna u proceni pouzdanosti sistema od interesa.

Nadovezujući se na rezultate relevantnih referenci, a u skladu sa ciljem istraživanja, pretpostavlja se da predložen pristup, u kome se razvija mrežni DC ekvivalent za aproksimiranje modela susednih sistema u analizama pouzdanosti, može da se prihvati kao teza koju treba dokazati u doktorskoj disertaciji.

5. NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA

Osnovne polazne postavke ovog istraživanja su potreba za sofisticiranim i preciznim alatima koji omogućavaju bolje predstavljanje ekvivalenata susednih EES u analizama pouzdanosti. Ispitivanje velikog broja stanja sistema koja moraju biti analizirana u proračunima parametara pouzdanosti zahteva efikasne alate. Posledica navedenog zahteva implicira da parametri pouzdanosti proizvodnog dela sistema nisu dovoljni da predstave EES u analizama pouzdanosti, pošto su interkonektivni vodovi zbog svoje preopterećenosti često uska grla prenosa. Zbog toga je neophodno da se radi kompleksno modelovanje sistema i dalja razmatranja se tiču nivoa tačnosti predstavljanja prenosne (interkonektivne) mreže.

Minimalni nivo predstavljanja prenosnog sistema podrazumeva primenu transportnog modela. Svako kontrolno područje je predstavljeno kao čvor, a međusobni vodovi su modelovani kao grane između različitih čvorova sa probabilističkim prenosnim kapacitetima. Ipak takvo predstavljanje ne omogućava analize tokova snaga, gubitaka i analize napona. Takav nivo modelovanja može se primeniti za predstavljanje 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 (Kirhofov zakon). 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 biće bazirana na razvoju metodologije za kreiranje ekvivalenta susednog sistema u analizama pouzdanosti. Primena predloženog modela biće demonstrirana na tri sistema, Garverovom, IEEE RTS i na realnom sistemu.

Metode koje će se primenjivati su metode analize, poređenja i procene rezultata.

Metodološki gledano, proces razvoja ekvivalenta i procene njegovog kvaliteta u analizama pouzdanosti odvija se u nekoliko koraka:

1. korak – konstrukcija modifikovanog mrežnog ekvivalenta
2. korak – obuhvatanje uticaja istovremenog ispada vodova i generatora u ekvivalentiranom susednom sistemu
3. korak - ispitivanje parametara pouzdanosti kada je susedni sistem modelovan u potpunosti
4. korak – ispitivanje parametara pouzdanosti kada je susedni sistem zamenjen ekvivalentom
5. korak – poređenje proračunatih parametara pouzdanosti iz koraka 3 i 4
6. korak – donošenje odluke o korišćenju ekvivalenta u analizama pouzdanosti

U okviru rada koristili bi se matematički modeli za proračun tokova snaga, modeli za ekvivalentiranje susednih sistema, kao i Markovljevi probabilistički modeli za proračun verovatnoće, učestanosti i očekivane neisporučene snage i energije elektorenergetskom sistemu koji radi u interkonekciji.

U radu je potrebno razviti softverski alat, korišćenjem MATLAB-a, koji omogućava automatsko izvršavanje koraka 1, 2, 3, 4 i 5. Softversko rešenje trebalo bi da bude uniformno kako bi se obezbedilo testiranje sistema različitih dimenzionalnosti, kao što je Garverov sistem (6 čvorova) ili pak IEEE-RTS relativno veliki sistem. U radu treba da budu istraženi svi slučajevi sa verovatnoćama većim ili jednakim 10^{-8} .

Prepoznavanjem, analizom, poređenjem i procenom kvaliteta kreiranog ekvivalenta u analizama pouzdanosti podstiče se dalji razvoj modelovanja i ekvivalentitiranja susednih sistema u analizama pouzdanosti sistema koji rade u interkonekciji.

6. OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOS

Izrada predložene disertacije trebala bi da doprinese razvoju matematičkih modela za uprošćavanje susednih sistema u analizama pouzdanosti. Ekvivalentiranjem susednih sistema u analizama pouzdanosti smanjuje se računarsko vreme proračuna, a interkonektivni, susedni sistem prezentovan je odgovarajućim aproksimativnim modelom koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja čime se omogućava brza i efikasna analiza pouzdanosti elektroenergetskih sistema. Razvoj ekvivalentnih modela je značajan za savremene interkonektivne sisteme u kojima je broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka vrlo veliki što otežava analize pouzdanosti.

Naučni doprinos koji se očekuje od kandidata je razvoj mrežnog DC ekvivalenta, gde se uvodi jedinstven ekvivalentni izvorni čvor, preko paralelnog povezivanja svih izvornih čvorova, dok su svi potrošački čvorovi eliminisani korišćenjem Wardovg metoda injektiranja. Na ovaj način će biti dobijen mrežni ekvivalent sa prirodnim vrednostima admitansi koji ima jedinstven izvorni čvor koji obuhvata stanja svih pojedinih izvornih čvorova. Agregacija stanja koja imaju istu raspoloživu snagu u ekvivalentna stanja značajno će smanjiti njihov ukupan broj u poređenju sa slučajem kada su izvori predstavljeni zasebno. Dodatna redukcija prostora stanja postići će se 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 će simulirati efekte spoljnog sistema u tokovima snaga u ispitivanoj mreži pošto se spoljni sistem u proračunima tokova snaga tretira kao sastavni deo ove mreže. Doprinosom razvoju matematičkih modela za ekvivalentiranje susednih interkonektivnih sistema u analizama parametara pouzdanosti, kao što su verovatnoće i učestanosti prekida napajanja i ukupne godišnje neisporučene snage i energije po pojedinim potrošačkim čvorovima kandidatkinja će kroz doktorsku disertaciju ostvariti generalno najvažniji cilj – naučno će dokazati da se korišćenjem ekvivalenta u analizama pouzdanosti na efikasan način omogućavaju proračuni parametara pouzdanosti savremenih elektroenergetskih sistema koji rade u složenom interkonektivnom okruženju. Sagledavanjem pouzdanosti EES u savremenom liberalizovanom, tržišno orijentisanom

okruženju, sa novim aspektima u planiranju i funkcionisanju EES, podstiče se dalji razvoj analiza pouzdanosti EES, što predstavlja dobrobit za kupce električne energije, a time i za celo društvo.

Sveobuhvatni naučni doprinos ovog rada treba da bude unapređenje modelovanja EES u analizama pouzdanosti u savremenom interkonektivnom okruženju, sa ciljem obezbeđenja pouzdane isporuke električne energije krajnjim potrošačima.

7. PLAN ISTRAŽIVANJA I STRUKTURA RADA

U uvodnom delu rad će sadržati pregled dosadašnje prakse i problema modelovanja ekvivalenata u analizama pouzdanosti složenih interkonektivnih EES. Ukazaće se na ciljeve i značaj disertacije u kojoj se razvija mrežni ekvivalent sa prirodnim vrednostima admitansi koji ima jedinstven izvorni čvor koji obuhvata stanja svih pojedinih izvornih čvorova. Razvijeni ekvivalentni mrežni model dobro simulira efekte spoljnog sistema u tokovima snaga u ispitivanoj mreži pošto je spoljni sistem u proračunima tokova snaga tretiran kao sastavni deo ove mreže.

U radu će biti predstavljen osvrt na politiku koja se odnosi na elektroenergetski sektor koja se promenila u proteklih nekoliko godina u većini evropskih zemalja i na proces restrukturiranja elektroprivrednih preduzeća evropskih zemalja. U novom ekonomskom okruženju procena pouzdanosti interkonekcija i međusobno povezanih sistema postaje složenija pošto je neophodno modelovati nove funkcije interkonekcije. Kod velikog broja generatorskih jedinica i elemenata mreže, kojima su karakterisani interkonektivni sistemi, broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka izuzetno su veliki što otežava analize pouzdanosti. U radu je dat pregled metoda ekvivalentiranja kako bi se razmatrani proračuni pojednostavili i ubrzali.

Rad treba da opiše detaljno konstrukciju mrežnog DC ekvivalenta, sa matričnim jednačinama u kojima se razdvajaju izvorni i granični čvorovi kao karakteristični i potrošački čvorovi modelovanog sistema. Predloženim pristupom treba da budu obuhvaćeni uticaji jednovremenih ispada generatora i vodova u sistemu koji se modeluje na parametre ekvivalenta. Na ovaj način, redukcija viškova snage koje obezbeđuje susedni sistem zbog ispada vodova i kombinacije ispada vodova i generatorskih jedinica treba da bude obuhvaćena preko jednog dodatnog stanja ekvivalentnog izvora mrežnog ekvivalenta i preko korekcije mrežnih susceptansi ekvivalenta. Izvori susednog sistema koji imaju istu raspoloživu snagu treba da budu prevedeni u ekvivalentna stanja čime će se značajno smanjiti njihov ukupan broj u poređenju sa slučajem kada su izvori predstavljeni zasebno. Dodatno smanjenje prostora stanja biće postignuto uzimanjem u obzir postignutih ugovora između aproksimiranog dela sistema i preostalog sistema razmatrajući uzajamne havarijske isporuke, kao i ograničenja prenosnih kapaciteta interkonektivnih dalekovoda. Razmatranjem deficitarnih situacija, neisporučena snaga će se raspoređivati po svim potrošačkim čvorovima proporcionalno njihovoj snazi.

U radu treba da bude obuhvaćeno i ispitivanje slučaja kada na nekom od vodova dolazi do prekoračenja ograničenja pa je potrebno smanjiti potrošnju i to u onom potrošačkom čvoru koji ima najveći koeficijent uticaja na dati vod. Potrebno je odrediti parametre pouzdanosti po pojedinim potrošačkim čvorovima za slučaj kada se susedni sistem modeluje u potpunosti i kada je zamenjen predloženim ekvivalentom.

U radu će se ispitivanje raditi na malom modelu kao što je Garverov sistem od 6 čvorova, na IEEE RTS sistemu i na realnom sistemu Srbije, Crne Gore i Albanije. Razmatrani su i različiti operativni režimi rada. Na osnovu poređenja parametara pouzdanosti, kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i kada je zamenjen predloženim ekvivalentom, predlaže se korišćenje uprošćenog modela u analizama pouzdanosti.

U zaključnom delu treba dati najvažnije akcente iz disertacije, razvijanje DC mrežnog ekvivalenta koji ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnim sistemom, što je postignuto agregacijom izvornih čvorova i uzimanjem u obzir interkonektivnih ograničenja i postignutih ugovora. Predloženi ekvivalent je jednostavan, jednostavan za konstruisanje i

modelovanje i omogućava jednostavan proračun tokova snaga. Primena ovog ekvivalenta razumno smanjuje proračunske zahteve u proceni pouzdanosti sistema od interesa. Kvalitet predloženog pristupa se verifikuje na dobro poznatim sistemima (tipa IEEE RTS) u različitim operativnim uslovima.

8. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu izloženog, Komisija konstatuje da kandidat mr Marija Đorđević, dipl. inž., ispunjava sve suštinske i formalne uslove za pristupanje izradi doktorske disertacije kao i da je predložena tema disertacije „*Uprošćavanje modela elektroenergetskih sistema u analizama pouzdanosti*“ naučno zasnovana i aktuelna u naučno-stručnoj oblasti deregulacije elektroenergetskih sistema i tržišta električne energije, te da su očekivani rezultati važni za primenu u praksi. Zato Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu da kandidatu mr Marija Đorđević, dipl. inž., odobri izradu doktorske disertacije pod gore navedenim naslovom.

U Beogradu, 26. januara 2013. godine

Komisija :

Dr Dragutin Salamon, dipl. inž.,
vanredni profesor
Elektrotehnički fakultet,
Univerziteta u Beogradu

Dr Predrag Stefanov, dipl. inž.,
docent
Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu

Dr Ninel Čukalevski, dipl. inž.,
naučni savetnik
Institut „Mihailo Pupin“, Beograd