

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Marija M. Đorđević

**UPROŠĆAVANJE MODELA  
ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA  
U ANALIZAMA POUZDANOSTI**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Marija M. Đorđević

**APPROXIMATION OF POWER SYSTEMS IN  
THE ADEQUACY EVALUATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

## Komisija

Mentor

Dr Dragutin Salamon, vanredni profesor  
Elektrotehnički fakultet – Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

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  
Tehnički fakultet Čačak - Univerziteta u Kragujevcu

## Rezime

Ovaj rad prikazuje DC mrežni ekvivalent za uprošćavanje interkonektivnih sistema u analizama pouzdanosti posmatranog elektroenergetskog sistema. Procena pouzdanosti složenih interkonektivnih elektroenergetskih sistema često je težak zadatak zbog velikog broja stanja ispada koje treba analizirati u proračunima. Potrebno računarsko vreme može biti značajno smanjeno ako se neki delovi elektroenergetskog sistema uproste ekvivalentima sa ograničenim brojem stanja koja predstavljaju samo ona najuticajnija stanja sa aspekta pouzdanosti sistema.

Rad predlaže jedan alternativni DC model koji ima jedinstven izvorni čvor koji je dobijen paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova aproksimiranog dela sistema. Takav pristup zadržava osnovnu strukturu modelovanog sistema. Ekvivalentna mreža je formirana paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova kako bi se dobio jedan izvorni čvor. Mreža je oformljena na takav način da je transformisana u mrežni ekvivalent koji sadrži samo ekvivalentni izvorni čvor i interkonektivne čvorove prema sistemu koji se ispituje. Takođe je razmatrana mogućnost dodatne redukcije prostora stanja koja se zasniva na ugovorima o međusobnoj havarijskoj podršci između razmatranog sistema i aproksimiranog dela sistema i na ograničenju prenosnog kapaciteta interkonektivnih vodova.

Prekoračenja u uprošćenom ekvivalentiranom sistemu vezana za simultane ispade proizvodnih jedinica i prenosnih vodova su modelovana preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko ekvivalentiranja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja. Na ovaj način je obuhvaćena redukcija viškova energije obezbeđena preko interkonektivnog sistema zbog ispada samo vodova ili simultanih ispada vodova i proizvodnih jedinica. Ekvivalentna mreža formirana na ovaj način ima jednostavnu strukturu i redukovan broj stanja u poređenju sa originalnom mrežom, čime se smanjuju računski problemi u proceni pouzdanosti sistema od interesa.

Primena predloženog modela je demonstrirana na dva poznata sistema, i to na Garverovom i IEEE RTS sistemu, kao i na realnim elektroenergetskim sistemima Srbije, Crne Gore i Albanije. Kao što može da se vidi iz prikazanih rezultata, predstavljanje interkonektivnih sistema ekvivalentom daje praktično iste rezultate kao kod potpunog modelovanja sistema i za parametre pouzdanosti po potrošačkim čvorovima sistema i za systemske parametre celokupnog sistema. Jedini izuzeci u ovom pogledu su potrošački čvorovi u neposrednoj blizini graničnih čvorova. Ukoliko se koristi ekvivalentni model interkonektivnog sistema, računsko vreme je samo nekoliko procenata od vremena kada su sistemi predstavljeni u potpunosti. Ovo je rezultat redukcije broja komponenti sistema i broja stanja sistema postignutih aproksimacijama interkonektivnog sistema.

DC mrežna aproksimacija interkonektivnih sistema prikazana u ovom radu ima jednostavnu strukturu i smanjen broj stanja u poređenju sa originalnom mrežom. Ovo značajno smanjuje proračunske probleme u proceni pouzdanosti sistema od interesa. Kvalitet predloženog pristupa je uspešno dokazan na test primerima i na realnim sistemima.

## Abstract

This paper presents a DC equivalent network for the approximation of interconnected systems in the adequacy evaluation of the system under consideration. The evaluation of adequacy of composite interconnected power systems is in many cases a cumbersome task because of the enormity of failure states that should be considered by enumeration. The computation time can be significantly reduced if some portions of the power system are approximated by equivalents with a limited number of states that reflect only the most effective adequacy performances of these portions.

This paper suggests an alternative DC model having a single source obtained by parallel connecting of all sources of the approximated system portion. Such an approach retains the basic structure of the modeled system. The equivalent network is built by parallel connecting all source buses to obtain a single source bus. The network constructed in such a way is then transformed in an equivalent network containing only equivalent source bus and the interconnection buses to the system under investigation. The possibility of the additional reduction of the state space, based upon the agreements between the approximated portion and the remaining system concerning the mutual emergency support, and due to the limited loading capacity of interconnection lines, is also considered.

The contingencies in the approximated system associated with simultaneous outages of generating units and transmission lines are modeled by a single equivalent source state and by modifying the admittances of the equivalent network in accordance with the probabilities of these contingencies. In such a way, the reductions of surplus power provided by interconnected system due to the outages of lines alone or in combination with generating units are encompassed. The equivalent network formed in such a way has a simple structure and a reduced number of states when compared to the original network, which considerably reduces the computational burden in the evaluation of the adequacy of the system under consideration.

The application of the proposed model is demonstrated on two well-known systems Garver, IEEE RTS and real electrical systems of Serbia, Montenegro and Albania. As can be seen from presented results, the equivalent representation of interconnected systems has provided practically the same results as the complete model of this system both for the adequacy indices of load nodes and for the total indices for the entire system. Load node being in the closest vicinity of tie node, appears as a single exception in this regard. The calculation time if the equivalent model of interconnected systems is used was only few percent of this time with complete representation of the systems. This was due to the reduction of the number of system components and system states achieved by the approximation of the interconnected system.

The DC network approximating interconnected systems presented in this paper has a simple structure and a reduced number of states when compared to the original system. This considerably decreases the computational burden in the evaluation of the adequacy of the system of interest. The quality of the proposed approach has been successfully verified for test system examples and real electrical systems.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ZNAČAJ POUZDANOSTI U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA</b> .....	<b>13</b>
2.1. Sadašnje stanje i novi izazovi u elektroprivrednim preduzećima .....	13
2.2. Najnovija evropska regulativa .....	14
2.3. Pouzdanost interkonektivnih sistema u novom ekonomskom okruženju .....	15
2.4. Pouzdanost interkonektivnih sistema - novi zadaci i izazovi .....	19
2.5. Nove potrebe u planiranju i operativnom upravljanju .....	20
2.6. Zahtevani parametri .....	22
<b>3. OPŠTI POJMOVI O POUZDANOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA</b> .....	<b>30</b>
3.1. Neobnovljivi elementi .....	30
3.2. Obnovljivi elementi .....	31
3.3. Markovljevi procesi .....	32
3.4. Elementi Kronekerove algebre .....	35
3.5. Izvori .....	35
3.6. Vodovi .....	39
3.7. Povezani elektroenergetski sistemi .....	44
<b>4. OPŠTI PRINCIPI U EKVIVALENTIRANJU KOD POUZDANOSTI EES</b> .....	<b>46</b>
4.1. Opšta razmatranja .....	46
4.2. Redukcija veličine sistema kod analize pouzdanosti .....	52
4.3. Ekvivalenti u oblasti pouzdanosti .....	54
<b>5. MATEMATIČKI MODEL MREŽNOG DC EKVIVALENTA</b> .....	<b>58</b>
5.1. Osnovni principi predloženog DC ekvivalenta .....	58
5.2. Konstrukcija matematičkog modela mrežnog DC ekvivalenta .....	58
5.3. Modelovanje simultanih ispada generatora i vodova u interkonektivnom sistemu .....	62
5.4. Stanja ekvivalentnog modela .....	64
5.5. Proračun pouzdanosti interkonektivnih sistema .....	65
5.6. Uticaj snaga u čvorovima sistema na opterećenje pojedinih grana .....	67
5.7. Linearizovani model tokova snaga .....	70
<b>6. PRIMENA METODE NA GARVEROVOM PRIMERU</b> .....	<b>73</b>
6.1. Uvod .....	73
6.2. Formiranje ekvivalenta za Garverov primer .....	75
6.3. Primena Garverovog ekvivalenta u analizi pouzdanosti sistema .....	78
6.4. Modelovanje interakcije između sistema .....	79
6.5. Obuhvatanje uticaja ispada vodova ili generatora i vodova u sistemu .....	83
6.6. Matrica međusobnih uticaja grana i čvorova za slučaj Garverovog modela .....	85

6.7.	Rezultati za Garverov sistem .....	87
<b>7.</b>	<b>ISPITIVANJE PREDLOŽENE METODE NA REALNIM SISTEMIMA ...</b>	<b>93</b>
7.1.	Ekvivalentiranje sistema Srbije .....	93
7.2.	Ekvivalentiranje izvora susednog sistema .....	95
7.3.	Pokazatelji pouzdanosti na realnom sistemu .....	97
7.4.	Uticaj nivoa ugovorene snage havarijske ispomoći između susednih sistema na parametre pouzdanosti .....	101
7.5.	Ispitivanje uticaja ispada vodova i generatora u susednom sistemu na parametre ekvivalenta .....	105
7.6.	Poređenje tokova snaga primenom ekvivalenta susednog sistema .....	106
<b>8.</b>	<b>PRIMENA METODOLOGIJE NA IEEE SISTEMU .....</b>	<b>109</b>
8.1.	Proračun parametara ekvivalenta .....	110
8.2.	Poređenje tokova snaga u IEEE sistemu .....	112
8.3.	Modelovanje izvora susednog sistema .....	114
8.4.	Uticaj jednovremenih ispada vodova i generatora na parametre ekvivalenta .....	116
8.5.	Proračun pokazatelja pouzdanosti .....	120
8.6.	Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na susedni sistem .....	127
8.7.	Analiza parametara pouzdanosti u režimu povećane potrošnje .....	130
<b>9.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>134</b>
<b>10.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>137</b>
<b>11.</b>	<b>PRILOZI .....</b>	<b>140</b>

## 1. UVOD

Elektroenergetski sistemi (EES), u cilju poboljšanja ekonomičnosti i pouzdanosti rada, rade integrisani u šire interkonekcije. U sklopu planiranja rada i razvoja EES potrebno je da se analizira njegova pouzdanost kako bi se utvrdilo da li pouzdanost zadovoljava postavljene kriterijume i, ako ne, koje su potrebne intervencije u EES. Proračuni pouzdanosti EES zahtevaju pretraživanje prostora stanja sistema koji je određen usvojenim pravilima rada i raspoloživošću elemenata sistema. Kod velikog broja proizvodnih jedinica i elemenata mreže, kojim se karakterišu interkonektivni sistemi, broj mogućih stanja EES i broj ulaznih podataka su izuzetno veliki što otežava analize pouzdanosti. Kako bi se potrebni proračuni pojednostavili a time i ubrzali, u literaturi su predloženi različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES.

Deregulacija elektroenergetskih kompanija je povećala konkurenciju i kreirala novo tržište za kupce na veliko i na malo kao i za enegetske transakcije. Kupovina na veliko uslovlila je povećan broj transakcija energijom između sistema. Ova aktivnost može da rezultuje smanjenjem ukupne pouzdanosti sistema, veličine koja se definiše kao sposobnost sistema da ispuni energetske zahteve u okviru definisanih ograničenja rada sistema. Zbog toga postoji potreba da se kvantifikuje pouzdanost složenih sistema, efekti koje ispadi elemenata EES-a imaju na troškove rada sistema, alternativne planove proširenja i nove operativne scenarije rada sistema.

U praksi, kod procene pouzdanosti složenih sistema najveći problem je potrebno računarsko vreme, što je posebno izraženo u studijama rada i analizama pouzdanosti velikih interkonektivnih sistema. Potrebno računarsko vreme može da se značajno smanji ako se nepromenljivi deo sistema zameni uprošćenim ekvivalentnim modelom. Osnovni cilj u razvoju ekvivalentnih modela u analizama pouzdanosti je zamena složenog sistema sa jednostavnijim ekvivalentom pri čemu se zadržavaju za analizu bitni elementi. Osnovni zadatak u procesu ekvivalentiranja je određivanje parametara koji moraju da budu zadržani kao i parametara modela koji mogu da se zanemare. Razvoj ekvivalentnih modela omogućava nastavak uobičajene procene pouzdanosti i pokazuje se kao koristan u analizama velikih sistema, tj. tamo gde nije potrebno ponavljati proračun celog sistema da bi se analizirala lokalna osetljivost na promene. Cilj razvoja ekvivalenta susednih EES-a je predstavljanje složenih sistema pomoću pojednostavljenih modela koji zadržavaju najvažnije parametre potrebne za analize.

Ova disertacija razmatra primenu DC mrežnog ekvivalenta susednih EES u analizama pouzdanosti susednih interkonektivnih sistema. DC mrežni ekvivalent je konstruisan paralelnim povezivanjem svih izvornih (proizvodnih) čvorova kako bi se dobio jedan ekvivalentni izvorni čvor. Elektroenergetska mreža je transformisana u mrežni ekvivalent koji sadrži samo jedan ekvivalentni izvorni čvor i interkonektivne čvorove prema sistemu koji se istražuje, tj. sistemu od interesa. Broj bitnih stanja ekvivalentnog izvora je ograničen time da susednom sistemu obezbeđuje podršku u havarijskim situacijama pri čemu ne prelazi ugovorenu vrednost razmene ili maksimalnu prenosnu snagu interkonektivnih prenosnih dalekovoda. Prekoračenja u uprošćenom ekvivalentiranom sistemu vezana za ispade prenosnih dalekovoda i generatora su modelovana preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko ekvivalentiranja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja. Ekvivalentna mreža ima, u poređenju sa originalnom mrežom, jednostavniju strukturu i smanjen broj



stanja čime se smanjuju proračunski (računarski) problemi u proceni pouzdanosti sistema od interesa. Primena modela predloženog u ovoj disertaciji demonstrirana je na tri sistema i to na Garverovom sistemu, IEEE RTS sistemu kao i na jednom realnom sistemu.

Procena pouzdanosti složenih interkonektivnih EES često je zahtevan posao zbog vrlo velikog broja ispada koji u proračunima moraju da se analiziraju a što je analizirano u [1, 2]. Najveći problem kod procene pouzdanosti je vreme potrebno za proračun ogromnog broja relevantnih ispada. Ovi zahtevi zavise od profila proizvodnje i potrošnje i topologije elektroenergetske mreže. Potrebno računarsko vreme može da se smanji ako se pojedini delovi EES predstave pomoću ekvivalenata koji imaju ograničen broj stanja koja predstavljaju karakteristična stanja pouzdanosti. Najvažniji zadatak kod razvoja ekvivalenata pouzdanosti je uprošćavanje velike i složene mreže i njeno predstavljanje modelom koji zadržava sve informacije koje su relevantne za sprovođenje studija pouzdanosti. Kod razvoja ekvivalentnih modela mora da se obrati posebna pažnja da li sistem od interesa napaja potrošačke čvorove visokog prioriteta, koji će biti različito tretirani u odnosu na ostale potrošačke čvorove ili pak da li će se ispad rešiti lokalno gde je i nastao, ili će se ispad distribuirati u susedne delove sistema što znači da kod analiza pouzdanosti ekvivalent mora da sadrži zahtevane probabilističke informacije.

U [3] se predlažu različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES, a među njima i CMT metoda (Capacity Margin Tables), gde se susedni sistem modeluje preko tabele sa verovatnoćama raspoloživih viškova kapaciteta. Metoda ekvivalentiranja proizvodnje i potrošnje je prikazana u [3, 4, 5]. Primenom CMT metode raspoloživi kapacitet u posmatranom čvoru se dobija nakon zadovoljenja potreba u posmatranom čvoru. Ekvivalentna tabela graničnih kapaciteta može biti korišćena kao pomoć za drugi sistem koji je povezan sa posmatranim čvorom. Ako je dobijena vrednost graničnih kapaciteta pozitivna, to znači da posmatrani sistem ima viškove snage koji mogu da se iz posmatranog sistema izvezu u drugi interkonektivni sistem. Negativna vrednost graničnog kapaciteta znači da postoji u posmatranom sistemu manjak snage što za posledicu ima ili uvoz energije iz susednih sistema ili isključenje potrošača posmatranog sistema. Nulta vrednost graničnog kapaciteta znači da posmatrani sistem ne zahteva ni pomoć, a nije ni u mogućnosti da isporuči viškove. Zavisno od prioriteta isključivanja potrošača i zavisno od dozvoljenog isključenja potrošača u čvorovima, dobija se odgovarajuća CMT tabela. Odgovarajuće CMT tabele mogu da se razviju i za slučaj više potrošačkih čvorova pri čemu je važno da se razlikuje da li je potrošnja u nekoj tački interkonektivnog sistema prepoznata kao tačka sa potrošačem visokog prioriteta ili su svi potrošači istog prioriteta. U slučaju čvorova istog prioriteta ukupna potrošnja se smanjuje proporcionalno datom ispadu. U sistemu koji ima  $n$  elemenata, ukupan broj stanja za ispitivanje je  $2^n$ . Kod primene CMT metode je teško sprovesti ispitivanje svih stanja sistema pa se posmatraju ispadi četiri ili manjeg broja proizvodnih jedinica i ispadi dva ili manje prenosnih vodova, kao i ispadi jedne proizvodne jedinice i jednog voda.

U [5] u cilju smanjenja potrebnog računarskog vremena, merodavna stanja su definisana brojem istovremenih ispada. Na primer, drugi nivo ispada (N-1, N-2) se definiše kao simultani nezavisni ispad dve komponente ili zavisan ispad koji se preklapa sa drugim zavisnim/nezavisnim ispadom. Zahtevano računarsko vreme brzo raste sa veličinom složenog sistema i sa većim nivoom ispada koji se ispituju. Takođe je primećeno da sa porastom veličine sistema potrebno je razmatrati događaje tipa ispada više komponenti.

Za EES reda veličine kakav je IEEE RTS koji sadrži 24 čvora, pokazuje se da je neophodno razmatrati ispade proizvodnih jedinica do četvrtog stepena i prenosnih vodova do drugog stepena. U navedenom sistemu gde je ukupan broj proizvodnih jedinica 64 i broj prenosnih vodova 79, istraživanje svih relevantnih ispada stvara računarske probleme. Zbog toga je zaključeno da se efikasna analiza pouzdanosti može sprovesti korišćenjem ekvivalenta pouzdanosti.

Najvažniji činilac u proceni pouzdanosti EES je raspoloživost proizvodnih kapaciteta. Raspoloživi kapacitet cele mreže je promenljiva veličina i funkcija je povezana sa proizvodnjom, potrošnjom i pravilima rada sistema. Navedeni parametri su predstavljeni u ekvivalentnom modelu preko ekvivalentnog izvora i ekvivalentne systemske potrošnje. Svaka redukcija potrošnje se reflektuje u redukciji ekvivalentne potrošnje. Verovatnoća i učestanost pojavljivanja svakog stanja mreže su osnovni probabilistički parametri sistema. Svako stanje sistema od interesa treba se kombinuje sa svim stanjima susednog sistema, tj. ekvivalenta. Ako pretpostavimo da je ukupan broj stanja sistema koji se ispituje  $n_{ai}$  i ukupan broj stanja ekvivalentnog sistema je  $n_{eq}$ , onda je ukupan broj analiziranih stanja  $n_{ai} \times n_{eq}$ . Ekvivalent spoljašnjeg, interkonektivnog sistema, jednom razvijen za potrebe analize pouzdanosti, može se veoma efikasno koristiti za različite analize pouzdanosti, pri čemu je bitno smanjeno računarsko vreme.

Pri analizama pouzdanost velikih EES-a, ukoliko se analiziraju unutrašnje mreže sistema, mogu da se koriste:

- Transportni model
- DC i AC proračun tokova snaga.

Obe metode su primenjene u razvoju ekvivalenata pouzdanosti. Iskustva sa AC tokovima snaga nisu bila ohrabrujuća, studije su pokazale da razvoj ekvivalenata pouzdanosti korišćenjem AC tokova snaga može biti vrlo težak, pa se u [4] predlaže transportni model. Transportni model je bazično razmatran u cilju ispitivanja kontinualnog napajanja iz izvornih čvorova do centara potrošnje u cilju zadovoljenja potrošnje u sistemu. Ograničenja u transportnom modelu su ograničena raspoloživa snaga u proizvodnim postrojenjima i prenosni kapacitet dalekovoda. Transportni model može biti definisan ili kao problem maksimalnog toka snage ili kao problem linearnog programiranja. Transportni model nema ograničenja u primeni i može se koristiti u razvoju ekvivalentnih modela za složene mreže, gde su obuhvaćeni i proizvodne jedinice i prenosne komponente.

U [6] je prikazana metoda maksimalnog toka snage kako bi se u obzir uzela ograničenja prenosnih kapaciteta dalekovoda. Ekvivalenti su sa preostalim delom EES-a povezani u jednom čvoru, iako u stvarnosti postoji više od jednog interkonektivnog čvora. Pokazano je da ekvivalentni modeli predstavljeni u [6] daju rezultate prihvatljive tačnosti i omogućavaju analizu uticaja najvažnijih prekoračenja, a istovremeno je potrebno računarsko vreme značajno manje.

REI (*Radial Equivalent Independent*) ekvivalent je u prošlosti široko korišćen kako bi se u analizama obuhvatili uticaji spoljnih sistema što je prikazano u [7, 8, 9]. REI ekvivalent se sastoji od izvornog i potrošačkih čvorova povezanih sa graničnim

čvorovima preko fiktivnih impedansi. Fiktivne impedanse su definisane tako da su zadovoljeni uslovi u graničnim čvorovima za razmatrano osnovno stanje tokova snaga. U [7] je prikazan prenosni model mreže za primenu u ispitivanju pouzdanosti više EES pri čemu se koristi Monte Karlo pristup. Prenosni model mreže je uključen u REI ekvivalent, čime se omogućava tačno modelovanje prenosnih interkonektivnih dalekovoda između EES, dok je računarsko vreme smanjeno čime se omogućavaju varijacije u proizvodnji i potrošnji, zavisno od zahteva za koje se proučava pouzdanost. Ovde se parametri pouzdanosti računaju na osnovu simulacija zasnovanih na istorijskim podacima. Pre primene Monte Karlo metode korišćeni su modeli prenosne mreže koji su tok snage ekvivalentne šeme uvažavali samo u jednom čvoru sa interkonektivnim susednim sistemom. Ovi modeli ne zadržavaju fizički identitet prenosnih dalekovoda pa su neophodna dodatna istraživanja da bi se definisale prenosne mogućnosti između oblasti ili kapaciteti ekvivalentnih prenosnih dalekovoda u DC tokovima snaga. Određivanje prenosnih mogućnosti ili kapaciteta ekvivalentnih vodova je težak zadatak sa obaveznim aproksimacijama. Na osnovu prethodnog se zaključuje da su gore opisani modeli korisni pre svega u analizama koje su više usmerene na planiranje proizvodnih kapaciteta nega na planiranje prenosnih kapaciteta. Alternativa je primena REI ekvivalenta koji zadržava fizički identitet interkonektivnih vodova. [7] se bavi predstavljanjem prenosne mreže za dispečing raspoloživih proizvodnih izvora, kako bi se eliminisali ili minimizovali gubici, u granicama ograničenja nametnutih prenosnom mrežom. REI ekvivalent eliminiše sve fizičke čvorove osim onih koji su granični čvorovi interkonektivnim vodovima ili drugim ključnim prenosnim vodovima čiji fizički identitet mora biti sačuvan. Tačnost REI ekvivalenta korišćenog u analizama pouzdanosti zavisi od načina raspoređivanja izvoda i potrošača u mreži. Ovde je prvi put primenjena pretpostavka da je napon čvorova korišćen pri proračunu ekvivalentne admitanse konstantan i da se ne menja sa promenom uslova u EES, što je je u skladu sa pretpostavkom u DC proračunu gde se isto tako pretpostavlja da je napon u čvorovima konstantan i jednak 1 p.u. Druga pretpostavka pri proračunu ekvivalentne admitanse je da je suma potrošnje u svim potrošačkim čvorovima i suma proizvodnje konstantna, tj. pretpostavlja se da svi potrošači i proizvođači variraju u istom odnosu kao što je pretpostavljeno u osnovnom modelu.

U [8] je analiziran modifikovani Dimoov ekvivalent koji je pogodan za analize sigurnosti i pouzdanosti. Razmatra se uticaj šantova u algoritmima za procenu pouzdanosti. U radu je razmatran što pogodniji način grupisanja čvorova u fiktivne čvorove, tretman šantova i njihovo injektiranje u mrežu kao i način izbora graničnih čvorova. Prema [8] problem predstavlja simuliranje fizičkog ponašanja sistema od interesa, kada je eksterni sistem predstavljen preko ekvivalentnog modela i kad je prezentovan tačnim modelom. Glavni razlozi za ovo su:

- Ekvivalentna injektiranja ne odražavaju fizičku stvarnost, jer formiranje ekvivalentnih čvorova (ili kao PV ili kao PQ ili kao balansni čvor) nema fizičku osnovu. Ovo se pre svega odnosi na narušavanje odziva ekvivalenta reaktivne snage, na promenu bilo u sistemu od interesa bilo u sistemu koji je ekvivalentiran.
- Mnogi od algoritama tokova snaga ne uvažavaju admitanse šantova i šantovi se predstavljaju preko konstantne snage injektiranja. Predstavljanje šantova preko konstantne admitanse ili preko konstantne snage injektiranja u proračunima tokova snaga se ne reflektuje na isti način. Ako su u proračunima šantovi zamenjeni konstantnom snagom injektiranja, iterativni proračun tokova snaga neće dati isti rezultat

kao kada su šantovi predstavljeni konstantnom admitansom od čvora prema zemlji. Prema tome šantovi treba da budu predstavljeni što je moguće tačnije.

U [9] su rađene analize razvoja ekvivalenata pogodnih za upotrebu u on-line estimaciji stanja. Ove metode su fokusirane na ekvivalentiranje modela, koji se zatim fino podešavaju upotrebom raspoloživih podataka iz realnog vremena, npr. iz estimacije stanja sistema, kako bi podesili postojeće uslove u mreži u datom trenutku. Ovi modeli bi se zatim koristili za analizu ispada u onim uslovima sistema definisanim datim vremenskim trenutkom. Zapravo, rad prikazuje upotrebu REI mrežnog ekvivalenta u planiranju interkonektivnih transakcija i njihov uticaj na sigurnost EES-a. Predloženim ekvivalentnim modelom veliki broj interkonektivnih transakcija može se brzo i tačno simulirati selektivnim i manuelnim podešavanjem injektiranja u REI čvorovima. Kako bi se procenile interkonektivne razmene, REI čvorovi moraju biti zasnovani na podacima o susednim sistemima. Kao minimum modelovanja, sistemi, kompanije koje su električno bliske internoj mreži moraju biti prezentovane preko jednog REI čvora, kojim je predstavljena potrošnja i izvori datog sistema. Takođe, električno udaljene kompanije, ali sa čestim interkonektivnim razmenama, treba da budu modelovane preko REI čvorova. Veoma udaljene oblasti mogu biti grupisane zajedno u jedinstven REI čvor bez bitnog uticaja na tačnost modelovanja. Status u realnom vremenu bilo kog elementa u eksternoj mreži mora biti modelovan u osnovnom stanju pre kreiranja ekvivalenta, ukoliko je informacija dostupna. U cilju korišćenja REI ekvivalenta u proceni interkonektivnih razmena, REI injektiranja ekvivalenta i uslovi u graničnim čvorovima proračunati prema osnovnom stanju se podešavaju prema uslovima koji postoje za dato razmatrano stanje sistema. Rezultat je balansirana REI mreža koja omogućava kreiranje uslova u graničnim čvorovima, napona i tokova snaga po interkonektivnim vodovima koji bolje prezentuju stanje sistema nego kada je ekvivalent razvijen za osnovno stanje. Proces koji je ovde razvijen je balansiranje REI ekvivalenta prema uslovima definisanim datim transakcijama. Preko procene korektno identifikovanih REI čvornih injektiranja, kako bi simulirali veći broj interkonektivnih transakcija, operativni osnovni model može se brzo i precizno kreirati. Preciznost ekvivalenta u analizama ispada i promena u graničnim čvorovima, direktno zavisi od tačnosti osnovnog modela iz koga je ekvivalent proračunat. Praktično ograničenje primene ovog ekvivalenta je nedostatak informacija o kompletnoj razmeni podataka između susednih kompanija. Pošto injektiranja REI čvorova predstavljaju složeno generisanje i potrošnju, pokazuje se da upotreba REI ekvivalenta kao estimiranog iz injektiranja proizvodnje u simulaciji specifičnih eksternih ispada nije precizna, posebno blizu graničnih čvorova. Takođe, slično ispadi vodova u eksternom sistemu trebalo bi da budu modelovani u procesu ekvivalentiranja preko aproksimativne procene injektiranja u REI ekvivalentu. Svakako, rad je pokazao da je upotreba REI mrežnog ekvivalenta za projektovanje interkonektivnih transakcija za operativno planiranje analiza sigurnosti vrlo dragocen alat. Preko procene korektno identifikovanih injektiranja u REI čvorovima kako bi se stimulisale mnogobrojne interkonektivne transakcije osnovno stanje za operativno planiranje može biti brzo i precizno kreirano i analizirano. Međutim, kao praktično pitanje, podešavanje REI čvorova zahteva osnovna znanja o trenutnom stanju sistema i generalno koliko se ekonomski uticaji mogu reflektovati na redosled angažovanja proizvođača tokom transakcija. Ograničenja u primeni ekvivalenta postoje. Tačnost ekvivalenta u slučaju ispada i promene u graničnim čvorovima je direktno uslovljena osnovnim stanjem za koje je ekvivalent kreiran.

Propačunate impedanse REI ekvivalenta su u saglasnosti sa uslovima u graničnim čvorovima za razmatrano osnovno stanje sistema. Međutim, neuobičajene vrednosti fiktivnih impedansi mogu ponekad da izazovu probleme sa konvergencijom proračuna, što je konstatovano u [10, 11]. Važno je da se naglasi da ako bi ispadi u spoljnom sistemu trebalo da budu uzeti u obzir, REI ekvivalent bi trebalo da bude modifikovan u svakoj strukturnoj promeni. Različiti tipovi Ward-ovih modela spoljnog sistema koji tretiraju proizvodnju i potrošnju kao injektiranje, često su korišćeni u analizama sigurnosti i planiranja složenih EES-a [11]. Ward-ov pristup eliminiše sve spoljne sabirnice i proizvodnja i potrošnja su predstavljeni adekvatnim injektiranjem u graničnim čvorovima. Kako bi se unapredili ovi ekvivalenti u simulaciji reaktivnih tokova snaga u studijama AC tokova snaga, osnovni Ward-ov model može biti proširen uvođenjem adekvatne dodatne („buffer“) zone.

Rad [11] predstavlja više načina modelovanja Ward-ovog ekvivalenta, gde se obezbeđuje odgovarajuća podrška za analize tokova reaktivne snage. Pokazuje se da će se Ward-ov ekvivalent sa odgovarajućom „buffer“ zonom zadovoljavajuće ponašati i u vrlo strogim uslovima, zbog čega se preporučuje njegova upotreba.

Najveći je problem sa klasičnim Ward-ovim ekvivalentom to što ne omogućava odgovarajuće ponašanje ekvivalentirane oblasti sa aspekta reaktivne snage. To se može objasniti time da je aktivna snaga uvek specificirana za svaki čvor sem referentnog, dok reaktivna snaga nije specificirana za svaki čvor i može da varira. Ako bi se u ekvivalentu pretpostavilo da reaktivna snaga u regulisanim čvorovima ostaje kao u osnovnom stanju, čak i za slučaj ispada, rezultat je neprihvatljiv. Time, jednom formirani Ward-ov ekvivalent nema mogućnosti da proizvodi više ili manje reaktivne snage u ekvivalentiranoj oblasti, čak u slučaju ispada. Nekoliko tehnika ekvivalentiranja kao što su poboljšani REI, Ward-ov ekvivalent sa „buffer“ zonom, tj. prošireni Ward-ov ekvivalent zadovoljavaju zahteve sa aspekta reaktivne snage ekvivalentirane oblasti.

*Ward-ov ekvivalent bez „buffer“ zone* je široko korišćena tehnika, gde su injektiranja snage modelovana ili preko impedanse ili preko struje. Tada se konstruisan ekvivalentiran sistem tretira kao linearan sistem i sastoji se od čvorova koji pripadaju sistemu za koji se sprovodi detaljna analiza. Najveći nedostatak ovog ekvivalenta je da ne reflektuje odgovarajuće ponašanje spoljnog sistema sa aspekta reaktivne snage. Da bi se konstruisao ekvivalent korišćena su injektiranja iz osnovnog stanja. Kao što je poznato u teoriji tokova snaga, aktivna i reaktivna injektiranja za potrošačke čvorove su fiksna, dok je reaktivnim injektiranjima u izvornim čvorovima dozvoljeno da variraju u okviru granica sa ciljem održavanja napona u čvorovima na konstantnim vrednostima. Aproksimacija koja se uvodi da su naponi ekvivalentirane oblasti konstantni, je manje više tačna, ali uvođenje aproksimacije preko fiksnog injektiranja reaktivne snage u izvornim čvorovima prema vrednostima u osnovnom stanju je netačna.

*Ward-ov ekvivalent sa „buffer“ zonom* je tehnika gde se umesto eliminacije svih čvorova u eksternom sistemu koji se ekvivalentira, zadržava nekoliko izvora, koji su u mogućnosti da proizvedu veliku količinu reaktivne snage, kad god je to potrebno, čime se kvalitet ekvivalenta popravljaju. Sledeći zadatak je transformacija čvorova u jedan čvor pronalaženjem dovoljnog broja izvora koji će biti zadržani kako bi mogli da obezbede potrebnu podršku u reaktivnoj snazi kad god je to potrebno. Sprovedeni proračuni pokazuju da relativno mali broj izvora sa velikim mogućnostima variranja reaktivne snage omogućavaju zadovoljavajuće ponašanje ekvivalenta sa aspekta reaktivne snage.

U odlučivanju koji će izvori biti zadržani u sistemu koji se ekvivalentira, primenjeno je nekoliko kriterijuma:

- zadržati izvore sa maksimalnim reaktivnim mogućnostima, tj. zadržati izvore za koje je razlika između osnovnog stanja proizvodnje reaktivne energije i reaktivnih limita najveća;
- eliminisati sve izvore koji ne proizvode dovoljno aktivne i reaktivne snage da pokriju svoje lokalne zahteve;
- broj izvora koji se zadržava treba da bude mali procenat ukupnog broja čvorova u sistemu koji se ekvivalentira;

*Prošireni Ward-ov ekvivalent* obezbeđenje reaktivne energije razmatra na drugačiji način. On podrazumeva kreiranje onog broja novih izvora koji je jednak broju graničnih potrošačkih čvorova čime se postiže da je novi fiktivni izvor povezan za svaki granični potrošački čvor na takav način da ne utiče na rešenje u osnovnom stanju uprošćenog sistema. Novi izvori ne proizvode aktivnu snagu, ali imaju mogućnost da proizvode reaktivnu snagu kad god to interni sistem zahteva.

Kako bi se ovaj problem prevazišao koristi se poboljšani REI ekvivalent. I kada se svi izvorni čvorovi i svi potrošački čvorovi grupišu u jedan čvor, još uvek mogu postojati niski naponi u REI čvorovima. Da bi se prevazišli ovi problemi predlažu se različiti principi grupisanja čvorova, kao npr:

- grupisati izvorne (PV) čvorove u jedan REI-PV, i sve potrošačke (PQ) čvorove u jedan REI - PQ čvor;
- realno generisanje PV čvorova ako je negativno prelazi u REI -PQ čvor;
- ako PV čvor dostigne jednu od reaktivnih granica treba ga tretirati kao PQ čvor i prema tome dodeliti u REI- PQ čvor;

Pokazuje se da su modifikovani REI ekvivalenti dobri i da su naponi REI čvorova uvek blizu 1 p.u. Granica reaktivne snage na PV-REI čvoru jednaka je sumi granica PV čvorova uključenih u REI ekvivalent, što predstavlja konzervativan način postavljanja granica. Korišćenjem ekvivalenta je mnogo teže simulirati ponašanje izvora koji su predstavljeni ekvivalentnim izvorom. Međutim, iako individualni izvori gube svoj identitet, pokazuje se da su rezultati prihvatljivi kada je REI čvor izvor reaktivne snage.

U [12] je u obliku tabele dat ekvivalent pouzdanosti sa verovatnoćama raspoloživih kapaciteta i primenjen je DC proračun tokova snaga. U radu je razvijen ekvivalent za procenu pouzdanosti složenog sistema. Ilustrovan je koncept razvoja ekvivalenta pouzdanosti upotrebom DC tehnike proračuna tokova snaga.

[12] poredi dve tehnike, tehniku mrežnog toka i tehniku DC tokova snaga i ističe prednosti DC proračuna tokova snaga u odnosu na mrežni tok. To su dve konceptualno različite tehnike. Tehnika mrežnog toka može biti korišćena da obezbedi vrednost maksimalnog toka od izvora do potrošača. Svakom prenosnom vodu je dodeljena maksimalna snaga koja može biti prenet preko datog dalekovoda. Metoda mrežnog toka može da se koristi kako bi se obezbedila vrednost maksimalnog toka snage koja može da se prenese od izvora do potrošača. Tehnika mrežnog toka je, prema tome, pogodna za brze mrežne analize. Važno je naglasiti da ekvivalent pouzdanosti koji se

dobija prema tehnici mrežnog toka, nije precizan kao kada se koristi osnovni pristup sa proračunima tokova snaga.

Korišćenjem tehnike mrežnog toka za svako stanje sistema se određuju raspoloživi kapaciteti u graničnim čvorovima, dok pristup zasnovan na DC proračunu tokova snaga ne obezbeđuje direktno ove vrednosti. Da bi se dobio željeni raspoloživi kapacitet, zahteva se za svako stanje sistema, ponavljanje DC proračuna tokova snaga. Raspoloživi kapaciteti dobijeni tehnikom mrežnog toka su veće vrednosti, jer je jedino ograničenje u ovom pristupu prenosni kapacitet, dok su u DC proračunu tokova snaga zadovoljene jednačine balansa. Ekvivalent uspostavljen tehnikom mrežnog toka sadrži veće raspoložive proizvodne kapacitete i, prema tome, obezbeđuje manje vrednosti za parametre koji se odnose na verovatnoću i frekvenciju kvarova. Metoda mrežnog toka daje bolje rezultate nego što su realni, pošto metoda prati samo balans u čvoru. Prema tome ekvivalenti uspostavljeni primenom mrežnog toka daju nerealno bolje parametre pouzdanosti, nego ekvivalenti uspostavljeni primenom DC tokova snaga. U praktičnoj primeni pokazuje se da ekvivalenti uspostavljeni upotrebom DC tokova snaga imaju veći broj stanja nego ekvivalenti uspostavljeni primenom metoda mrežnog toka. Proračunsko vreme potrebno za uspostavljanje i za primenu DC ekvivalenta proračuna tokova snaga je bitno veće nego ono potrebno za uspostavljanje i primenu mrežnog toka. Očigledno je da DC ekvivalent proračuna tokova snaga bolje odslikava stanje sistema nego tehnika mrežnog toka, ali i jedan drugi mogu poslužiti za praktičnu procenu pouzdanosti velikih složenih sistema.

Korišćenje DC proračuna tokova snaga primenljivo je u sistemima sa velikim brojem stanja. DC proračun tokova snaga ne uvažava uticaj tokova reaktivne snage i napona čvorova, koji zahteva AC proračun tokova snaga. Osnovni koncept uključen u DC proračun tokova snaga može biti proširen i na AC proračun tokova snaga, ako su odgovarajući parametri koji se odnose na reaktivne elemente uključeni u datom ekvivalentnom modelu.

Ponavljanje DC proračuna tokova snaga se zahteva za svako stanje sistema da bi se dobili željeni raspoloživi kapaciteti. Na primer, raspoloživa snaga u nekom čvoru za dato stanje je jednaka maksimalnoj snazi  $L_m$  koja može biti konektovana na dati čvor bez prouzrokovanja bilo kog problema u tom stanju. Procedura za neko stanje se odvija u sledećim koracima. Prvo se odredi maksimalni raspoloživi kapacitet u čvoru, proračunavaju se DC tokovi snaga i ukoliko postoje problemi u sistemu preduzimaju se korektivne akcije kako bi se sistem rasteretio. U slučaju problema maksimalni raspoloživi kapacitet u tom čvoru se smanjuje na polovinu vrednosti pa se ponovo proračunavaju DC tokovi snaga, i proverava da li je došlo do problema u sistemu. Maksimalni raspoloživi kapacitet  $L_m$  se smanjuje sve do neke tolerancije  $L_m < \varepsilon$ , gde je  $\varepsilon$  zadata relativno mala vrednost. U [12] se ispitivanje radi za sva stanja sistema i na ovaj način se dobija sistem stanja raspoloživih kapaciteta za dati čvor. U slučaju više graničnih čvorova, ova procedura može biti primenjena na svaki čvor za slučaj svih ispitivanih stanja sistema. Na primer, za slučaj dva granična čvora, najpre se ekvivalent razvija za jedan granični čvor, a zatim na osnovu rezultata za prvi granični čvor se računa ekvivalent, tj. raspoloživi kapacitet u drugom graničnom čvoru, za svako stanje sistema.

DC ekvivalent spoljnog sistema za analizu pouzdanosti zasnovan na injektiranju tipa Ward-og modela je takođe prikazan u literaturi [13]. Uticaj proizvodnih jedinica je

modelovan posebno za svaki izvorni čvor koristeći odnos distribucije tokova između izvornih i graničnih čvorova. Pouzdanost složenih EES-a uključuje ispitivanje i proizvodnih i prenosnih kapaciteta u elektroenergetskoj mreži. Postoje dva načina da se prevaziđe neophodno vreme proračuna parametara pouzdanosti, prvi da se unaprede algoritmi procene pouzdanosti i tehnike, i drugi da se smanji broj komponenti u sistemu, tj. veličina sistema. Izdvajaju se sistem od interesa, granični čvorovi i spoljni sistem i formira se matrica graničnih čvorova, tj. novi model matrice admitansi graničnih čvorova. Injektiranje jedne proizvodne jedinice se distribuira na granične čvorove sa susednim sistemom u odnosu definisanom rezultantnom matricom admitansi koja se dobija kao proizvod matrice graničnih čvorova prema eksternom sistemu i matrice impedansi eksternog sistema, tj. sistema koji se ekvivalentira. Ovaj odnos raspoređivanja tokova na granične čvorove se zove „distribucija prema tokovima snaga“. Kvarovi proizvodnih i prenosnih komponenti se pretpostavlja da su nezavisni. Formiranje ekvivalenta se radi u dva koraka. Prvi deterministički korak je proračun ekvivalentnog modela zasnovanog na pretpostavci da su sve prenosne komponente u spoljnom sistemu raspoložive. Drugi korak je probabilistički da se proračuna ekvivalentni model za slučaj ispada komponenti u spoljnom sistemu.

Deterministički ekvivalentni model proizvodnih jedinica koji reprezentuje spoljne izvorne čvorove u graničnim preračunava se korišćenjem koncepta odnosa distribucije prema tokovima snaga. Probabilistički ekvivalentni model izvora je definisan uzimanjem u obzir i verovatnoće ispada vodova u eksternom sistemu i množenje ovom verovatnoćom definisane distribucije injektiranja. Probabilistički ekvivalent modela potrošnje je isti kao i pokazani ekvivalent modela izvora, predstavljen u svakom graničnom čvoru uzimanjem u obzir verovatnoće ispada prenosnih dalekovoda. Razlog za male netačnosti u ovom ekvivalentu, kada se rezultati porede sa originalnim sistemom, su u načinu modelovanja ekvivalentnog sistema izvora. Proizvodne jedinice eksternog sistema su raspoređene u graničnim čvorovima, tj. proizvodne jedinice su lokalizovane u graničnim čvorovima. Prema tome redukcija u potrošačkim čvorovima zbog ispada proizvodnih jedinica u originalnom spoljnjem sistemu razlikuje se neznatno u odnosu na to kada je spoljni sistem predstavljen ekvivalentom.

U [14] je primenjen pristup tabele sa verovatnoćama raspoloživih kapaciteta kako bi pojednostavio strukturu sistema formiranjem ekvivalenta za deo sistema povezan sa preostalim sistemom preko jednog ili dva čvora. U ovom radu se koristi ekvivalentiranje kako bi se kod potrošača procenili parametri pouzdanosti i troškovi uzrokovani ispadima u različitim segmentima EES. EES je podeljen na proizvodni, prenosni i distributivni podsistem. Pouzdanost individualnih potrošača zavisi od pouzdanosti sva tri podsistema. Uzimajući u obzir složenost celokupnog EES-a, veoma je teško definisati parametre pouzdanosti u potrošačkim čvorovima. Nekada se samo analizira pouzdanosti proizvodnih jedinica, kako bi se zadovoljila ukupna potrošnja sistema. Procena pouzdanosti distributivnog sistema fokusira se na uticaj kvarova distributivnih elemenata na individualne potrošače i obično se zanemaruje efekat u napojnim tačkama sistema. U [14] se sagledava važnost određivanja parametara pouzdanosti kada se uzimaju u obzir svi delovi EES-a. U ovom pristupu se koriste ekvivalenti za veliki složeni sistem koji se može predstaviti preko ekvivalentnog izvornog čvora sa više stanja, razvodna postrojenja sa ekvivalentom sa više stanja i distributivne delove sistema preko ekvivalenta sa više stanja. Razvijeni ekvivalent obezbeđuje pojednostavljenu mrežu za ispitivanje parametara pouzdanosti u potrošačkim čvorovima. Promena u celom sistemu utiče na ekvivalent povezan sa tim delom sistema



i ekvivalenti ostalih delova sistema ostaju isti. Ovaj pristup obezbeđuje praktičnu tehniku ekvivalentiranja za procenu pouzdanosti distributivnog sistema u složenoj konfiguraciji. Korišćenjem sukcesivnog ekvivalentiranja, sistem je sveden na radijalan distributivni sistem kako bi se odredili parametri pouzdanosti u određenoj tački distributivnog sistema. Kvarovi elemenata na distributivnom izvodu 1 utiču na potrošače na distributivnom izvodu 2. Ovaj efekat je predstavljen ekvivalentiranjem izvoda 2 preko ekvivalenta sa više stanja. Računarski programi za definisanje ekvivalenata pouzdanosti za pojedine komponente koriste se za proračune u velikim sistemima. Kompleksan sistem se predstavlja jednostavnim linijskim dijagramom sa povezivanjem u jednoj ili dve distributivne tačke. Ovaj rad predstavlja ekvivalentiranje u cilju određivanja parametara pouzdanosti u tačkama potrošnje i procenu troškova prekida napajanja potrošača u celom EES. Tehnika može biti korišćena za određivanje nepouzdanosti i učestvovanja pojedinih segmenata sistema u troškovima, kao i njihove odgovornosti. Ovo se vidi kao bitan momenat u liberalizovanom elektroenergetskom okruženju. Ovaj sistem omogućava analize pouzdanosti u velikim složenim sistemima.

U [15] su predloženi ekvivalenti za neke delove sistema zasnovani na zonalnim PTDF („*Power Transfer Distribution Factor*“) faktorima raspodele prenosne snage. Ukoliko se proizvodnja u jednoj oblasti poveća za neku vrednost i za isto toliku vrednost smanji u drugoj oblasti, rasporedjivanje tokova snaga po pojedinim granama sistema definiše PTDF faktori. Efikasano tržište zahteva da učesnici na tržištu i regulatori mogu da analiziraju ponašanje tržišta, što se sa aspekta proračunarskog pristupa, pokazalo kao zahtevno, posebno kod izvršavanja dugoročnih simulacija. Zato se javila potreba za boljim alatima, pre svega za određivanje uskih grla u prenosnom sistemu i upravljanje zagušenjima. Tako je i došlo da razvoja ekvivalenta koji aproksimira transakcije preko PTDF faktora. Uticaj bilateralnih transakcija (kupac/prodavač kombinacija) na tokove u prenosnom sistemu obuhvata se preko PTDF faktora. Svaka transakcija od izvora do potrošača se raspodeljuje po vodovima prenosnog sistema po tačno definisanim PTDF faktorima. Dok su kupac i prodavač vezani za jednu tačku injeckiranja, svaki od njih je definisan kao set injeckiranja, sa unapred specificiranim učešćem ukupnih transakcija koje dolaze iz svake tačke. Na osnovu prethodno proračunatih PTDF faktora, može se izračunati doprinos injeckiranja svake od transakcija po pojedinim vodovima. Ključni problem kod primene tradicionalnih ekvivalenata je da zadržavaju samo jedan čvor za sve izvorne čvorove originalne mreže koji mogu učestvovati u prenosu snage prema nekim PTDF faktorima. PTDF faktori od izvornih čvorova originalne mreže do potrošačkih čvorova se ne slažu sa PTDF faktorima ekvivalentiranog izvornog čvora do potrošačkih čvorova. Zapravo, promena u pretpostavljenom učešću pojedinih izvora će uticati na raspored tokova snaga po dalekovodima (PTDF). Zbog toga je razvijen fleksibilniji proces PTDF orijentisanog ekvivalentiranja sa ciljem kreiranja ekvivalentnog sistema, u kojem se PTDF faktori ekvivalenta slažu sa PTDF faktorima originalne mreže što je moguće bolje. Najpre se kreira mrežni model, u kome su većina ili svi PTDF faktori između potrošnje i generisanja originalne mreže dodeljeni zadržanim čvorovima ekvivalentne mreže. Ovaj pristup dozvoljava modelovanje nenultih faktora učešća proizvođača u ekvivalentiranim čvorovima. Naravno, ovo zahteva da pretpostavljeni faktori učešća proizvodnih jedinica budu dostupni u vreme kada se ekvivalent kreira, kako bi se na osnovu njih kreirali PTDF faktori.

Rezultat ovog algoritma je DC ekvivalent koji može biti korišćen u DC tokovima snaga u studijama o tržištu. Na primer, model može biti korišćen za proučavanje strategija uticaja davanja ponuda proizvođača na profit kompanija, uzimajući u obzir ograničenja

uzrokovana prenosnom mrežom ili pak promenama cene goriva. Pošto je dostupan model mreže, takođe može biti razmatran uticaj novih prenosnih vodova ili ispada postojećih. U ovim ekvivalentima zadržavaju se svi potrošački /izvorni čvorovi kao u originalnoj mreži, ali proračunarsko vreme je bitno smanjeno zbog smanjenja veličine modela prenosnog sistema. Tradicionalni ekvivalenti ne obuhvataju faktore učešća proizvodnih jedinica kao pretpostavku i ta informacija o njihovom učešću se gubi. Nova metoda [15] dobro modeluje situacije u kojima u prenosu snage učestvuje više od jedne izvorne oblasti.

Skorije su u [16] prezentovane pojednostavljene šeme za odsečene delove mreže koje se dobijaju kratkim spajanjem njihovih graničnih čvorova, koje se koriste za efikasnu naponsku analizu mreže. Ovde se napon kroz oblast mreže koja se modeluje dobija odgovarajućim kombinovanjem napona u graničnoj oblasti. Poznato je da je napon čvora razlika napona u čvoru i referentnog čvora, i da je napon prenosnog voda razlika napona između čvorova na svakom kraju voda čime se uvodi nov koncept razlike napona između skupa čvorova. Prvo se definiše naponska razlika između skupa čvorova odvojenih sečenjem vodova, a zatim se pokazuje proširenje ove definicije na napone kroz oblast elektroenergetskog sistema koji se ekvivalentira. Takođe se definišu konduktanse oblasti i struje kroz oblast na jedan prirodan način. Novi naponi u graničnim čvorovima su kombinacija napona u graničnim čvorovima sa određenim težinskim koeficijentima. Napon kroz neku oblast se dobija smanjenjem oblasti u mrežu pridruženu graničnim čvorovima, konstruisanjem graničnih čvorova u mrežni ekvivalent oblasti koja tipično ima dva ili tri čvora. Zapravo konstrukcija graničnih čvorova se oslanja na novi koncept napona kroz odsečeni deo mreže. Uglovi napona kroz oblast su kombinacija pojedinih napona u čvorovima oblasti koja se modeluje prema graničnoj oblasti. Konduktansa oblasti i struja kroz oblast takođe kombinuju zajedno konduktanse pojedinih vodova i pojedinih struja da opišu čvorne električne karakteristike oblasti. Pošto naponi, konduktanse i struje zadovoljavaju električne zakone, mnogo je korisnije i značajnije predstavljanje na ovaj način nego preko na primer samo kombinacije struja. Praktično ovi ekvivalentni delovi se ponašaju na konzistentan način sa prirodom operativnog rada sistema.

U ekvivalentnom modelu koji prezentuje ova disertacija uveden je jedinstven ekvivalentni izvorni čvor, preko paralelnog povezivanja svih izvornih čvorova, dok su svi potrošački čvorovi eliminisani korišćenjem Ward-ovg metoda injektiranja. Na ovaj način dobijen je mrežni ekvivalent sa prirodnim vrednostima admitansi koji ima jedinstven izvorni čvor koji obuhvata stanja svih pojedinih izvornih čvorova. Grupisanje stanja koja imaju istu raspoloživu snagu u ekvivalentna stanja značajno smanjuje njihov ukupan broj u poređenju sa slučajem kada su izvori zasebno predstavljeni. Dodatno smanjenje prostora stanja se postiže 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 je spoljni sistem u proračunima tokova snaga tretiran kao sastavni deo ove mreže, što nije slučaj kada se susedni sistem modeluje preko tabele sa verovatnoćama raspoloživih viškova kapaciteta.

U radu je detaljno prikazana metodologija procesa razvoja DC ekvivalenta i procena njegovog kvaliteta u analizama pouzdanosti koja je sprovedena u nekoliko koraka:

1. korak – konstrukcija modifikovanog mrežnog ekvivalenta
2. korak – obuhvatanje uticaja istovremenog ispada vodova i izvora u ekvivalentiranom susednom sistemu
3. korak- proračun parametara pouzdanosti kada je susedni sistem modelovan u potpunosti
4. korak– proračun 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 se koriste matematički modeli za proračun tokova snaga, modeli za ekvivalentiranje susednih sistema, kao i Markovljevi modeli za proračun verovatnoće, učestanosti i očekivane neisporučene snage i energije elektorenergetskom sistemu koji radi u interkonekciji.

U radu je razvijen softverski alat, korišćenjem MATLAB-a, koji omogućava automatsko izvršavanje koraka 1, 2, 3, 4 i 5. Razvijeno softversko rešenje je uniformno čime se obezbeđuje testiranje sistema različitih dimenzionalnosti, kao što je Garverov sistem (6 čvorova) ili pak IEEE-RTS test sistem koji je relativno veliki sistem. U radu su istraženi svi slučajevi stanja sistema sa verovatnoćama pojavljivanja većim ili jednakim  $10^{-8}$ , što predstavlja vrlo visok nivo tačnosti u analizama pouzdanosti sistema.

## 2. ZNAČAJ POUZDANOSTI U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA

### 2.1. Sadašnje stanje i novi izazovi u elektroprivrednim preduzećima

Politika koja se odnosi na energetske sektor promenila se u bliskoj prošlosti svuda u svetu. U većini evropskih zemlja proces restrukturiranja elektroprivrednih preduzeća je već završen.

Otvoreni pristup ili pristup prodaji na veliko, deregulacija vertikalno organizovanih kompanija, funkcionalno odvajanje prenosa, energetske marketing i privatizacija elektroprivrednih preduzeća kreirali su potpuno novo okruženje za planiranje i funkcionisanje elektroenergetskog sistema. U ovom novom okruženju, energetske transakcije se odvijaju u drugačijim okvirima na otvorenom tržištu, gde se snabdevači slobodno takmiče da zadovolje ove potrebe. Sve ovo otvara mnoge nove mogućnosti i stvara nova ograničenja.

Uloga i obaveze interkonekcija između elektroenergetskih sistema takođe se značajno menja. Njihova osnovna uloga se ogledala u potrebnim razmenama energije u havarijskim uslovima i transakcijama koje su bile dugoročno ugovorene. Danas one treba da omoguće i brze kratkoročne transakcije i formiranje mreže otvorenog pristupa i liberalnog tržišta električne energije.

U vertikalno integrisanim elektroprivredama uvek je postojala jasna podela poslova sa aspekta tehnološkog procesa, ali su u ekonomskom ili pravnom pogledu pojedine tehnološke celine bile više ili manje integrisane. Tako je uvek postojala tehnička podela na proizvodnju (G), prenos (T), i distribuciju (D) električne energije, pri čemu je sa prenosom manje ili više bilo povezano i upravljanje EES.

Liberalizacija tržišta i restrukturiranje preduzeća dovodi do daljeg usitnjavanja prethodno navedene klasične trodelne podele. U oblasti proizvodnje, pored proizvođača električne energije mogu se pojaviti i posebna preduzeća koja trguju električnom energijom na veliko (PM - power marketers), kupljenom od strane pojedinih domaćih ili stranih proizvođača [21]. U oblasti prenosa i upravljanja moguće je stvaranje pet različitih entiteta koji mogu obavljati različite uloge u elektroenergetskom sektoru i na tržištu električne energije. To su:

- ISO (independent system operator) - nezavisni operator sistema. On upravlja radom EES-a, obezbeđuje usluge prenosa svim korisnicima mreže i zadužen je za pouzdan i siguran rad EES-a.
- PX (power exchange) - berza električne energije ili komercijalni operator tržišta. To je mesto gde se vrši kupoprodaja električne energije po tržišnim pravilima, tj. ugovaraju se transakcije između proizvođača i potrošača električne energije.
- SC (scheduling coordinator) - koordinator redosleda angažovanja proizvodnih agregata. To je poseban entitet koji uslađuje proizvodnju i potrošnju i to onaj deo koji ne mora obavezno proći kroz berzu električne energije.
- TO (transmission system owner) - vlasnik prenosne mreže. On je zadužen za eksploataciju prenosne mreže, zajedničke infrastrukture na koju dozvoljen pristup imaju svi učesnici na tržištu na ravnopravnoj osnovi.

- AS (ancillary services provider) - provajder pratećih usluga. On obezbeđuje sve one usluge (osim prenosa električne energije koja je predmet transakcija na tržištu) bez kojih EES ne može da funkcioniše pouzdano i sigurno.

Ovaj broj od pet tipova mogućih novih entiteta u oblasti prenosa i upravljanja EES u dosadašnjoj praksi obično se svode na manji broj. Tako, na primer, pod operatorom prenosnog sistema (TSO - transmission system operator) obično se podrazumeva preduzeće koje obavlja i ulogu nezavisnog operatora sistema (ISO) i vlasnika prenosne mreže (TO).

Liberalizacija tržišta električne energije se zasniva na primeni Direktive EU o unutrašnjem tržištu električne energije. Poštujući osnovne principe iz Direktive EU, u praksi u zemljama EU postoji niz različitih načina na koje je organizovan energetske sektor. Proces liberalizacije je započet u svim zemljama koje su izrazile želju da se priključe EU i one sve pokušavaju da harmonizuju svoje zakonodavstvo i organizaciju elektroenergetskog sektora sa zahtevima EU.

## 2.2. Evropska regulativa

Bez obzira na zakon o deregulaciji, donet u prethodnoj deceniji, koji se odnosi na energetske sisteme, nije se promenila osnovna činjenica da je pouzdanost sistema direktno povezana sa troškovima. Danas, kao i pre, apsolutna pouzdanost ne može biti ostvarena, jer bi to zahtevalo nerazumne investicione troškove.

Na taj način, bez obzira na raspodelu odgovornosti između novih učesnika (TSO-ova, proizvođača, snabdevača, kupaca, regulatora) koja može da varira od sistema do sistema, i dalje postoji snažna potreba za metodama i alatima koji omogućavaju procenu vrednosti novouvedenih parametara pouzdanosti, 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).

U Evropi su ove obaveze regulisane novijom regulativom Direktiva (2003/54/EC i 2005/89/EC), pa je sada obaveza svih članica da svake druge godine objave svoje podatke o pouzdanosti.

U poslednjoj dekadi, mnoga elektroprivredna preduzeća prošla su kroz bitne korake uključujući novu organizaciju, kao i prilagođavanje velikom broju tehno-ekonomskih inovacija. Na institucionalnom polju, najveće promene vođene su zajedničkom inicijativom da se dezintegrišu bivši vertikalni monopoli, što je u Evropi dovelo do razdvajanja prenosnih aktivnosti, distributivnih aktivnosti i proizvodno/snabdevačkih aktivnosti. Sa ekonomske tačke gledišta, snažni su podsticaji da se pojača konkurencija na nivou proizvođača. Sa tehničke tačke gledišta, povećano korišćenje obnovljivih izvora energije, pre svega vetroelektrana, od nedavno predstavlja dodatni bitan faktor u energetske analizama u većini zemalja Evrope. Još uvek, brojna važna pitanja, koja se odnose na sigurnost i pouzdanost napajanja električnom energijom i efikasnost, u načelu se nisu promenila. Ova pitanja se moraju oblikovati na drugi način, s jedne strane zbog toga što polje delovanja nije više nacionalno, već kontinentalno, s druge strane zbog odgovornosti koja je danas podeljena između širokog skupa učesnika na tržištu: operatora mreže/vlasnika, proizvođača, snabdevača, regulatornih tela i potrošača.

Činjenice ostaju iste, bez obzira na podelu odgovornosti između pojedinih učesnika, a to su:

-Otvaranje tržišta ne može doneti potpunu sigurnost napajanja više nego što mogu vertikalno integrisani monopoli. Čak iako su se učesnici promenili, još uvek postoji ekonomski balans između troškova dodatnih mera sigurnosti i benefita koje donosi ravnotežna sigurnost proizvodnje i potrošnje. S tim u vezi, osnovna ekonomija kaže da 1 Euro novih troškova uloženi u razvoj elektroenergetskog sistema mora biti balansiran sa najmanje 1 Eurom dodatnih ekonomskih troškova. Tačna raspodela ovih dodatnih troškova dodeljuje se svakom učesniku, a kome tačno, zavisi od regulatorne politike koja se razlikuje od sistema do sistema. Bez obzira na ovo, definicija nekog „prihvatljivog“ nivoa pouzdanosti ima smisla i kriterijumi za ocenu pouzdanosti LOLP (Loss of Load Probability) i LOLE (Loss of Load Expectation), LOEE (Loss of Energy Expectation) se široko koriste.

Sistem pouzdanosti je još uvek dvoznačan u smislu kada mora biti sprovedeno isključenje potrošača jer nema aktivne energije da podmiri potrošnju. Nedostatak može biti posledica dva fenomena: nedostatak lokalnih generatora (pouzdanost izvora) ili nedovoljnih interkonektivnih kapaciteta (pouzdanost prenosa). Činjenica da dolazi do spajanja tržišta čime se elektroenergetski sistemi integrišu u sve veće i veće oblasti, pa se postavlja pitanje legitimnih granica u okviru kojih pouzdanost sistema mora biti procenjena. Najmanja oblast bi bila pojedini TSO-ovi, a najveća integrisano tržište, ili čak sinhrona oblasti gde bi se preklapale granice tržišta kao za slučaj Evrope u smislu UCTE+NORDEL+UKTSO+OST (centralnoevropske zemlje + skandnavske zemlje + Velika Britanija + Albanija).

Imajući ovo u vidu, Direktiva EC eksplicitno obavezuje sve njene članice da izdaju nacionalne izveštaje o pouzdanosti. Ovi izveštaji imaju cilj da se u prvi plan stavi nivo pouzdanosti različitih oblasti sistema, sa prognozama koje će biti ostvarene na vremenskom horizontu od 15 godina. Direktiva EC još uvek ne nalaže eksplicitno da se sprovede zajednička analiza pouzdanosti između susednih zemalja, ali se pretpostavlja da će to biti neki od narednih koraka. Imajući u vidu prethodno, JP EMS ima obavezu da kao članica evropskih operatora sistema svake godine sprovede analizu usklađenosti proizvodnih kapaciteta i potrošnje u okviru svoje kontrolne oblasti.

### **2.3. Pouzdanost interkonektivnih sistema u novom ekonomskom okruženju**

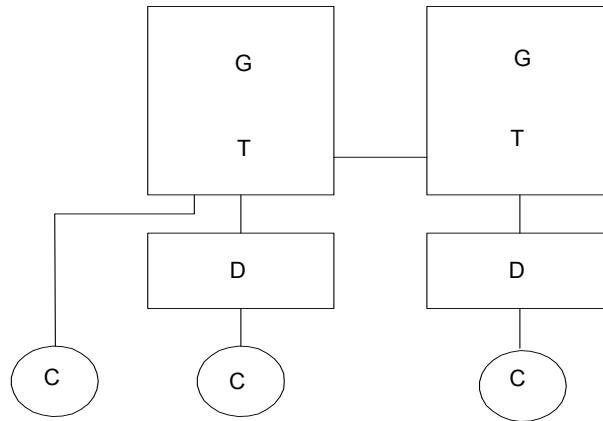
U novom ekonomskom okruženju procena pouzdanosti interkonekcija i međusobno povezanih sistema postaje složenija pošto je neophodno modelovati nove funkcije interkonekcije (složenije upravljanje i veći broj ugovora o razmenama) i predstaviti složeniji rad sistema.

Osim toga, neophodno je da se više pažnje posveti ulozi koju pouzdanost interkonekcija ima u planskim i operativnim odlukama u okvirima liberalizovanog tržišta i decentralizovanog rada.

U sledećim poglavljima je dat kratak opis mogućih organizacionih oblika kako bi se bolje razumeo njihov uticaj na interkonekcije, što je praćeno i posebnim pristupom pitanju pouzdanosti.

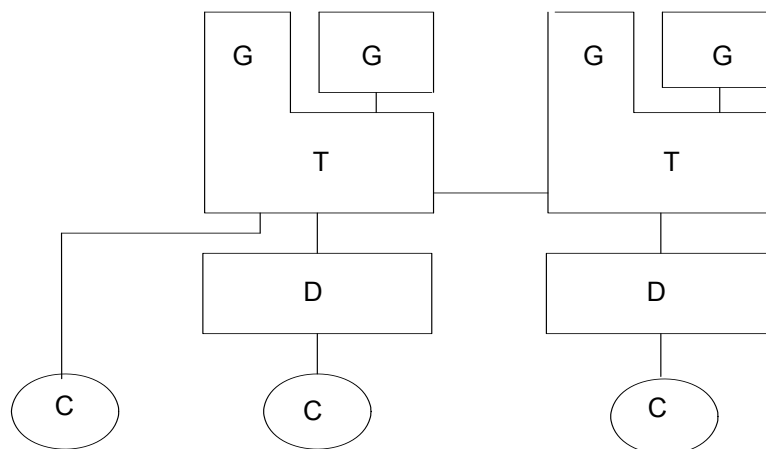
### 2.3.1. Različiti tipovi organizacije i institucionalnih uređenja [22]

Vertikalno integrisana (*Vertical Integrated* - VI) struktura je tradicionalan model. Proizvodnja, prenos i distribucija su u vlasništvu jednog monopolskog preduzeća koje ima obavezu napajanja potrošača na svojoj teritoriji. On najviše odgovara javnim preduzećima u državnom vlasništvu. U ovom modelu posluje se na osnovu ovlašćenja državnih organa, koji odlučuju o unutrašnjoj organizaciji, tarifama i investicionim planovima. Ova struktura je prikazana na slika 2.1., gde su sa G označeni proizvođači, sa T prenosni sistem, sa D distributivni sistem i sa C krajnji potrošači.



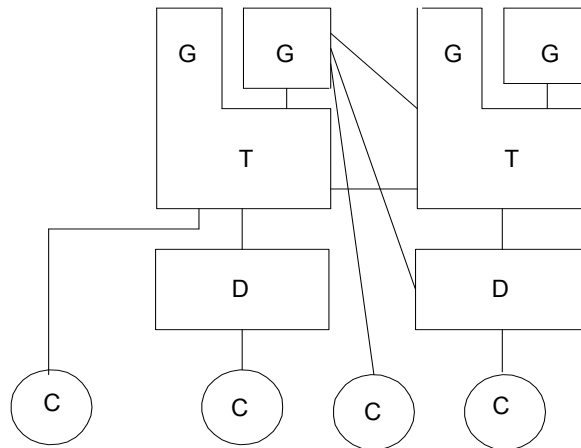
Slika 2.1. Vertikalno integrisana struktura

Konkurentno integrisana (*Competitive Integrated* - CI) struktura pored potpuno integrisanih struktura u ovom modelu proizvodnja može da bude izložena konkurenciji. U ovom modelu proizvođači električne energije ne moraju organizaciono pripadati istoj kompaniji, ali se ugovorima obavezuju da je prodaju istom kupcu. Nezavisni proizvođači energije (IPP) su povezani na mrežu (slika 2.2.), ali nemaju otvoren pristup njoj pa mogu da prodaju energiju samo preduzećima na čiju su mrežu povezani. Nezavisni proizvođači su u međusobnoj konkurenciji, ali jedini kupac ima monopolski položaj na tržištu.



Slika 2.2. Konkurentno integrisana struktura

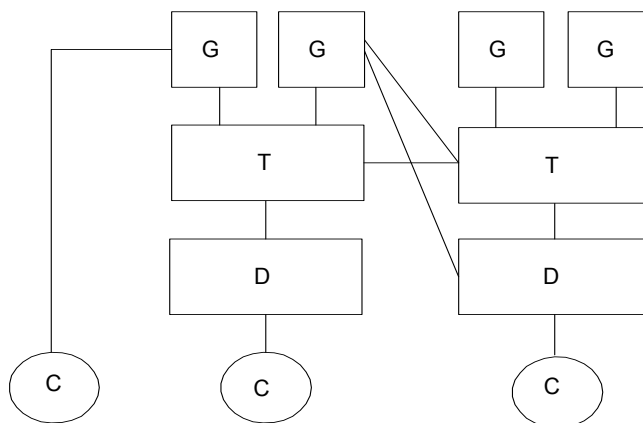
Otvoreni pristup (*Open access* - OA) struktura. Integrisana preduzeća u ovom modelu još postoje, ali moraju obezbediti slobodan pristup mreži nezavisnim proizvođačima električne energije. U ovom modelu prenos se zadržava kao tzv. prirodni monopol. Pristup prenosnoj mreži je slobodan za sve proizvođače, a kupci električne energije su samo elektrodistribucije koje na sebe preuzimaju obavezu snabdevanja električnom energijom krajnjih potrošača. Proizvođači imaju pravo da ekskluzivno prodaju drugim preduzećima ili takođe direktnim potrošačima. Upravljanje elektroenergetskim sistemom je sastavni deo prenosa, a troškovi transakcija i ugovaranja kupovine i prodaje su daleko veći nego u prva dva modela (slika 2.3).



Slika 2.3. Otvoren pristup

Spot market (SP) struktura. Proizvodnja i prenos su odvojeni entiteti u ovom modelu, kao što je prikazano na slici 2.4. Spot market je organizovan od strane prenosnog entiteta, gde proizvođači i potrošači mogu da poredе njihove ponude i potražnje. U ovom modelu krajnji potrošač je slobodan da napravi sopstveni izbor snabdevanja električnom energijom tako što svi potrošači imaju slobodan pristup svim proizvođačima direktno ili preko posrednika (distribucija i preprodavaca). To znači da električnu energiju od preduzeća ne kupuje samo prenos, već svi kupci mogu ravnopravno i slobodno ući na tržište ili izaći sa tržišta električne energije. Ponekad, svaki agent može ugovarati dugoročne razmene garantujući neku stabilnu cenu koja nije garantovana na tržištu. Tržište zbog velikog broja ugovarača i transakcija postaje otvoreno i složenije, čime se povećavaju i troškovi pomoćnih službi koje obavljaju poslove tržišta.





Slika 2.4. Spot market struktura

### ***2.3.2. Uticaj procene pouzdanosti na novu organizacionu strukturu i na nove zadatke interkonekcija***

Parametri pouzdanosti koji se danas upotrebljavaju opisuju ponašanje u vertikalno integrisanim preduzećima (VI) čije je osnovni cilj obaveza napajanja potrošača.

Trebalo bi primetiti da VI model ne podrazumeva da prenos nije otvoren za druga preduzeća. Odgovarajuće modelovanje zahteva konkretno predstavljanje ugovora između kompanija i modelovanje efekata upravljanja u različitim međusobno povezanim sistemima.

Sasvim je sigurno da će novi institucionalni okviri zahtevati definiciju novih parametara pouzdanosti. U konkretnom slučaju, zbog porasta broja učesnika, pod procenom pouzdanosti može biti smatrana analiza sposobnosti ispunjavanja ugovornih obaveza u različitim delovima različitih sistema, proizvodnje, prenosa i distribucije (G, T, D).

U VI strukturi, centralno planiranje obezbeđuje mogućnost potvrde usklađenosti rada delova sistema, dok u slobodnom tržištu svaki deo sistema ima svoju odgovornost i uopšte nije sigurno da je napajanje obezbeđeno. Na primer, proizvođači nemaju obavezu prognoze i razvoja konzuma, regulisanje uvođenja novih proizvodnih kapaciteta je ostavljeno tržištu. Kako ova pitanja nisu odgovarajuće rešena moraju da budu definisani novi, odgovarajući kriterijumi pouzdanosti. Tradicionalna ciljna funkcija (minimizacija troškova) nije više važeća pa modelovanje ukupnog procesa odlučivanja postaje vrlo složeno, pošto različiti učesnici imaju različite ciljeve koji u opštem slučaju nisu u skladu sa globalnom minimizacijom troškova.

Konačan uticaj je usmeren na akviziciju podataka koja može biti ometena poverljivošću zbog odgovarajućih ugovornih obaveza. Ovi uticaji naročito mogu da budu izraženi kod novih tehnologija. Svi ovi faktori utiču na planiranje prenosa i veze između sistema, pa se javlja potreba za novim alatima i metodama modelovanja pouzdanosti.

### ***2.3.3. Uticaj pouzdanosti kod planiranja novih interkonekcija***

Kao što je prethodno objašnjeno novi organizacioni oblici zahtevaju ponovno ispitivanje kriterijuma i procene pouzdanosti. Oni takođe zahtevaju veću ulogu analiza pouzdanosti

u planiranju interkonekcije. Pouzdanost može da ima ključnu ulogu u planiranju interkonektivnih razmena energije i poštovanja raznih ugovora, pošto u prisustvu više učesnika na tržištu, kupci i prodavci moraju znati uticaj pouzdanosti na njihove interese.

Zbog toga planiranje interkonekcija mora da se fokusira i na ekonomiju, i na finansije i pouzdanost, uključujući uticaj pouzdanosti interkonekcija na dugoročne i kratkoročne marginalne troškove i finansijske pokazatelje svakog preduzeća/regiona između kojih se nalazi interkonekcija. Finansijska razmatranja igraju odlučujuću ulogu u određivanju potrebe za novim interkonekcijama.

#### **2.4. Pouzdanost interkonektivnih sistema - novi zadaci i izazovi**

U prošlosti, problem je bio opisivanje pouzdanosti proizvodnje i celine proizvodnja-prenosni sistem i kako se njima upravlja. Neke publikacije opisuju kriterijume pouzdanosti [23], druge prikazuju rezultate različitih proračunskih alata.

Međutim, kada se radi sa interkonekcijama i povezanim sistemima, novi razvoj i promene odnose se na potrebu modelovanja nove stvarnosti. Osnovni zadatak tiče se definicije novih parametara pouzdanosti, koji bi trebalo da budu proračunati kao dodatak već poznatim koji su relevantni za neprekidnost napajanja. Potrebno je definisati:

- zavisnost od podrške iz interkonekcije, tj. proceniti sposobnost preduzeća da napaja svoje potrošače bez neplanirane podrške iz interkonekcije,
- operativne troškove koji su uštedeni objedinjavanjem rezerve, i proceniti kvantitativnu korist zbog rada sa zajedničkom rezervom koju obezbeđuje interkonekcija,
- pouzdanost tranzita/transakcija i proceniti sposobnosti sistema ili preduzeća u upravljanju specifičnim energetskim transakcijama ili upravljanju ugovorima o tranzitu u njihovom potrošačkom području,
- parametre energetskih razmena u cilju obezbeđivanja kvantitativne procene dodatnih koristi koje proističu iz rada sistema u interkonekciji.

Gornji parametri nisu konceptualno novi, pošto svaka interkonektivna studija rađena u prošlosti pokušava da ih izračuna u cilju definisanja koristi od predloženog razvoja mreže. Ono što je novo je potreba da se ovi parametri izračunaju, uzimajući u obzir novi okvir u kome modelovanje ekonomičnog rada, bilateralnih obaveza i obaveza u upravljanju moraju biti kvantifikovani. Osim toga, proračun navedenih parametara uključuje nove dodatne zadatke i nove izazove povezane sa poboljšanjem modelovanja sistema i računarskih metodologija i alata, koji će morati da uzmu u obzir sledeće:

- povećanje veličine sistema koje zahteva nove tehnike i alate za redukciju veličine sistema, uz očuvanje dovoljne tačnosti probabilističkih analiza,
- povećanje broja jednosmernih i naizmeničnih interkonektivnih veza između različitih sistema s ciljem bolje eksploatacije viška kapaciteta u nekom sistemu i/ili boljeg iskorišćenja različitih priroda raspoložive energije,
- prisustvo više dispečerskih centara sa sopstvenim operativnim ciljevima, čije uključivanje formuliše vrlo kompleksan optimizacioni problem.

## 2.5. Nove potrebe u planiranju i operativnom upravljanju

Osnovni princip povezan sa procenom pouzdanosti povezanih elektroenergetskih sistema je skoro isti kao kod nezavisnog izolovanog energetskog sistema, tj. ocenjivanje sposobnosti napajanja energijom na zahtev potrošača. Ovi potrošači mogu biti individualni potrošači energije ili preduzeća čija je uloga posrednička između energetskih čvorova napajanja i stvarnih potrošača energije. Osnovna razlika između dva tipa sistema je da ovde mora postojati ugovor između susednih preduzeća koji određuje kako, kada i na koji način se energetske razmene odvijaju kroz interkonekciju. Ipak, treba primetiti da tehnike procene pouzdanosti i zahtevani parametri moraju da kreiraju dodatna uslozňavanja uzrokovana postojanjem interkonekcije, ali treba naglasiti da je osnovni koncept razvoja tehnika ocene pouzdanosti vrlo sličan u slučajevima izolovanog sistema i u povezanim sistemima.

U bilo kojoj proceni pouzdanosti prepoznaju se sledeći osnovni koraci:

- razumeti rad i način predstavljanja komponenata sistema,
- definisati vodove na kojima može biti kvar,
- zaključiti posledice kvarova,
- izvesti modele koji reprezentuju ove karakteristike,
- na kraju selektovati razvojne tehnike za ispitivanje pouzdanosti.

Ovi principi se primenjuju u svim sistemima, uključujući izolovane i povezane sisteme. Osnovene razlike su:

- a) posledice sistema u specifičnom stanju mogu biti različite ako se posmatra s tačke gledišta sopstvenog sistema, pomoći iz drugih sistema ili međusobnog upravljanja sistemima.
- b) interkonekcije su često slabi delovi sistema, sa relativno malim brojem međuveza. Ovo može izazvati porast nestabilnosti i stvoriti značajan problem sigurnosti kada se javljaju ispadi. Ovi dodatni problemi trebalo bi da budu takođe uzeti u obzir u skupu parametara.

### 2.5.1. Definisane radnih stanja sistema

Kod procene pouzdanosti, radni uslovi povezanih sistema s aspekta napajanja potrošnje i podnošenja poremećaja trebalo bi da budu opisani skupom radnih stanja. U prošlosti analiza stanja kvarova bila je povezana sa pozdanošću uglavnom fokusiranom na stanja "gubitka potrošnje" i parametrima kao što su LOLP, LOLE, LOL i EENS.

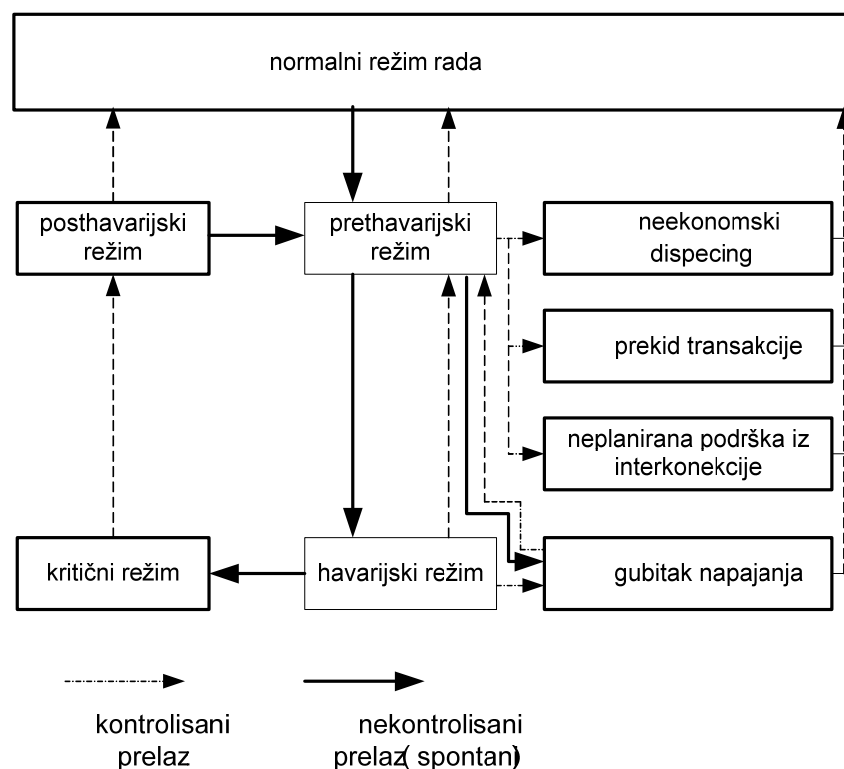
Ipak, napajanje energijom je jedan od zadataka zahtevanih u sistemu, uz šta treba dodati da svako preduzeće bude odgovorno za minimizaciju troškova rada sopstvenog sistema i upravljanja rezervom. Zbog toga ekonomičnost rada poga i pouzdanost napajanja su jako povezani. Na primer, posmatraju se dve nesusedne kompanije koje teže razmeni energije iz ekonomskih razloga. Za vreme razmene energije mrežna ograničenja mogu nastati zbog termičkog opterećenja ili problema sa naponom koji suprotno utiču ili na pouzdanost sistema koji daje pomoć ili na pouzdanost pomognutog sistema, zavisno od ugovora.

Skup osnovnih radnih stanja svakog sistema obuhvata [23]:

- normalno,
- predhavarijsko,
- gubitak napajanja,
- havarijsko,
- kritično,
- posthavarijsko stanje.

Za povezane sisteme, dodatna su sledeća stanja (slika 2.5):

- neekonomski dispečing (*Off-Economic Dispatch*), znači da zahtevani kapaciteti u prenosnoj mreži mogu biti dostignuti samo preko promene u redosledu angažovanja proizvodnih agregata. Ova dodatna mera dovodi do dodatnih operativnih troškova.
- prekid transakcije (*Interruption of Transaction*), znači da mrežna ograničenja u jednoj oblasti dovode do prekida razmene energije,
- neplanirana podrška iz interkonekcije (*Unplanned Support From Interconnectors*) znači da zbog ispada proizvodnih jedinica ili mrežnih ograničenja, proizvodni kapaciteti nisu dovoljni da napajaju potrošnju sopstvenog konzuma i energetska podrška je obično uzeta od interkonektivnih partnera.



Slika 2.5. Operativna stanja sistema sa glavnim prelazima [23]

Opšte je prihvaćeno da je procena pouzdanosti povezanih sistema problem velikih dimenzija i mnogo je kompleksniji nego procena pouzdanosti samostalnih sistema. Prema tome trebalo bi uvesti dodatni skup novih odgovarajućih parametara.

## 2.6. Zahtevani parametri

Pouzdanost je sposobnost sistema da ispuni energetske zahteve u okviru definisanih ograničenja u cilju dugoročnog planiranja rada sistema. Sigurnost je sposobnost da se podnesu poremećaji u sistemu ne računajući nekontrolisani gubitak opterećenja. Probabilistički pristup analizi sigurnosti nije predmet istraživanja već se posmatraju pitanja vezana za pouzdanost.

### 2.6.1. Samostalni sistem i HLI (*Hierarchical Level I*) parametri

Pre opisivanja parametara koji mogu biti korisni za procenjivanje pouzdanosti povezanih sistema, treba razmotriti one koji se trenutno koriste u proceni samostalnih sistema uključujući parametar LOL (Loss of Load). Kada je mreža zanemarena, ovi parametri su takođe korišćeni za procenu pouzdanosti proizvodnih kapaciteta u smislu zadovoljenja potrošnje sistema, poznate kao HLI (*Hierarchical Level I*) procena. Korišćeni parametri su :

**LOLP** (Loss of Load Probability) - verovatnoća pojave deficita snage u odnosu na zahteve potrošnje, tj. verovatnoća deficitarne situacije. Ova veličina daje verovatnoću, ali ne i veličinu deficita.

**LOLE** (Loss of Load Expectation) - prosečan broj dana u kojima se očekuje da će dnevna vršna snaga potrošnje prevazići raspoložive proizvodne kapacitete. Alternativno, to može biti prosečan broj sati za koji očekivana potrošnja prelazi raspoložive kapacitete. Izražava se u jedinicama broj sati/period posmatranja.

**LOEE** (Loss of Energy Expectation) – očekivana neisporučena energija, energija koja neće biti isporučena zbog slučajeva kada potrošnja prelazi raspoloživu proizvodnju. Ovaj parametar definiše veličinu deficita kao njegovu verovatnoću pa time i tačnije opisuje rizike.

LOEE je skoro isti kao **EENS** (Expected Energy not Supplied) ili **EUE** (Expected Unserved Energy) ili slični termini.

Frekvencija i trajanje **F&D** (Frequency and Duration) - proširenje parametara LOLE koje identifikuje očekivanu frekvenciju deficita i njegovo očekivano trajanje.

**EIR** (Energy Index of Reliability) i **EIU** (Energy Index of Unreliability) - odnose se na LOEE koji je normalizovan deljenjem ukupnom potrošnjom energije. Oni obezbeđuju da i veliki i mali sistemi mogu da se porede na istim osnovama i da mogu biti praćene hronološke promene u sistemu.

**SM** (System Minutes) - odnosi se na LOEE koji je normalizovan deljenjem sa vršnim opterećenjem.

Treba naglasiti da sve gornje veličine predstavljaju očekivanje, to jest one nisu determinističke veličine već srednje vrednosti raspodele verovatnoće. One obezbeđuju vrlo bitne parametre pouzdanosti sistema uzimajući u obzir stohastičke i determinističke karakteristike proizvodnih sistema i potreba potrošača.

Situacija je bitno složenija kada se više sistema nalaze u deficitarnim stanjima i kada se mora znati prioritet u njihovom snabdevanju. Složene interkonekcije najbolje je analizirati metodom pretraživanja, pri čemu se povezni sistemi smatraju kao jedan jedinstven sistem. Za slučaj povezanih sistema, analiza pouzdanosti može se raditi na različitim nivoima predstavljanja prenosne mreže sistema. Nivoi su:

- a) mreže u sopstvenom i susednim sistemima su ignorisane i uključeni su samo interkonektivni vodovi,
- b) uključena je mreža sopstvenog sistema,
- c) uključene su mreže sopstvenog i neke ili sve mreže eksternih sistema.

Tipovi analiza koje koristi svaki od ovih nivoa variraju, praktično između slučaja a) i druga dva slučaja. Prvi od njih zanemaruje parametre tačaka opterećenja i razmatra opšte parametre sistema dok b) i c) mogu razmatrati i jedne i druge.

### **2.6.2. Koncepti povezanih sistema**

Iz prethodnog poglavlja se vidi da ima dovoljan broj parametara povezanih sa pouzdanošću elektroenergetskih sistema. Njih često ima i više nego što je potrebno za pojedinačnu analizu, ali to nije problem jer ovi parametri imaju različito značenje i svaki ima specifičnu ulogu u različitim slučajevima. Zaključak je da je u nekom određenom slučaju samo jedan ili nekoliko odgovarajućih. Za svaki slučaj se posebno određuju parametri koji se posmatraju, tj. izabrani skup zavisi od konkretnog slučaja i zahtevane odluke.

Povezani elektroenergetski sistemi mogu biti analizirani u nekoliko nivoa. Prvo, unutrašnje veze, vodovi u svim sistemima su zanemareni (slika 2.6). Ovo je ekvivalentno HLI tipu procene u samostalnim sistemima.

Drugo, unutrašnje veze u posmatranom sistemu su predstavljene, dok one u susednim sistemima nisu. Ovo je potpuno modelovanje posmatranog sistema a ostali sistemi su predstavljeni preko raspoložive energije koja je injektirana iz interkonekcije (slika 2.7).

Treće, unutrašnje veze u posmatranom i susednim sistemima mogu biti uključene. Grananje se povećava sve dok se potpuno ne modeluje posmatrani sistem i okolni sistemi u interkonekciji (slika 2.8). Za svaki od navedenih slučajeva dat je pregled parametara pouzdanosti.

#### **2.6.2.1 Slučaj kada mreže u sistemima nisu uvažene**

U ovom slučaju, koncept je da li potrebe u posmatranom sistemu mogu biti zadovoljene preko proizvodnje unutar samog sistema zajedno sa raspoloživim proizvođačima iz okolnih sistema praćenim redukovanim kapacitetima i raspoloživošću interkonekcije kao i ugovorenim razmenama. Merodavni su uobičajeni parametri pouzdanosti proizvodnih kapaciteta opisani u tački 2.6.1, zajedno sa parametrima koji su dodatno razmatrani uzimajući u obzir radna stanja sa slike 2.5. Svi ovi parametri su dati u tabeli 2.1. Ova tabela nije konačna i može biti proširena zavisno od kreatora ili kompanije.

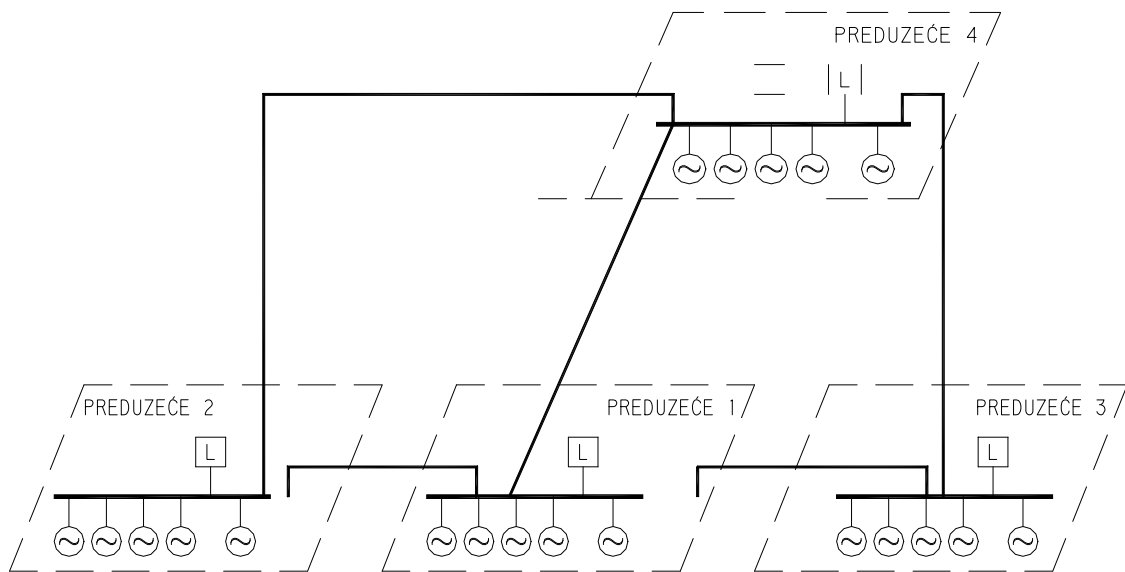
## 2.1. Tabela parametara pouzdanosti

<p>GUBICI OPTEREĆENJA (loss of load)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* LOLP</li> <li>* LOLE</li> <li>* F&amp;D</li> <li>* EENS</li> <li>* LOEE</li> <li>* EIR</li> <li>* EIU</li> <li>* SM</li> </ul>
<p>NEPLANIRANA PODRŠKA IZ INTERKONEKCIJE (unplanned support from interconnection)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* verovatnoća podrške</li> <li>* frekvencija podrške</li> <li>* pomoćna energija i snaga</li> </ul>
<p>NEEKONOMIČAN DISPEČING (off-economic dispatch)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* operativni troškovi</li> <li>* verovatnoća neekonomičnog dispečinga</li> <li>* frekvencija neekonomičnog dispečinga</li> </ul>
<p>PREKID TRANSAKCIJE (interruption of transaction)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* verovatnoća prekida</li> <li>* frekvencija prekida</li> <li>* prekinuta transakcija snage</li> <li>* prekinuta transakcija energije</li> </ul>

Vrlo je bitno primetiti da postoje dva skupa za svaki parametar koji treba izračunati; jedan bez interkonekcije i jedan sa njom. Rezon za ovo je da svaki sistem zahteva skup dva kriterijuma za svaki od ovih uslova. Ovo obezbeđuje da svaki sistem preuzima odgovornost za sebe (prvi skup) ali takođe obezbeđuje skup većeg nivoa pouzdanosti, kada su uključene interkonekcije (drugi skup). Na osnovu ovih parametara moguće je odrediti benefite rada u interkonekciji.

Kao dodatak navedenim parametrima, koji su odgovarajući za izolovane i povezane sisteme, treba razmotriti i parametre koji se odnose na energetske razmene između sistema, zajedno sa frekvencijom. Oni će pokazati korist od interkonekcije i efekte ugovora o tranzitu i ugovora o interkonekcijama. Korist i efekti za svaki sistem u interkonekciji mogu da budu vrlo različiti. Parametri neekonomskog dispečinga prikazani u tabeli 2.1. su veličine povezane sa onim slučajevima kada idealan ekonomski dispečing ne može biti realizovan zbog nametnutih ograničenja ili zbog energetske postrojenja isključenih iz pogonskih razloga. Takve situacije, prema tome, nisu najekonomičnije dispečersko upravljanje i uzrokuju dodatne operativne troškove zbog operativnih ograničenja.

Svi gornji parametri su sistemski parametri i korisni su samo za globalno upravljanje sistemom i upravljanje energijom. Na ovom nivou predstavljanja (slika 2.6) analiza se svodi na procenu zahteva proizvodnih kapaciteta (HLI procena).



Slika 2.6. Mreže u EE sistemima su ignorisane

Za vreme planiranja razvoja EES, neophodno je odrediti koliko je kapaciteta potrebno da bude instalirano u cilju zadovoljenja očekivanih potreba u nekom budućem periodu i obezbediti dovoljnu rezervu da se izvrši korektivno i preventivno održavanje proizvodnih kapaciteta. Ovi kapaciteti mogu biti obezbeđeni ili preko instalacije dodatnih kapaciteta unutar posmatranog sistema ili korišćenjem proizvodnih kapaciteta u susednim sistemima i kupovinom potrebne energije preko interkonekcije. Analiza bi trebalo da bude urađena sa i bez razmatranja kapaciteta van posmatranog sistema, a takođe je potrebna i odgovarajuća cost-benefit analiza.

Postoje dva osnovna pristupa koja se mogu koristiti za određivanje nivoa pouzdanosti proizvodnih kapaciteta:

- analitički
- simulacioni.

Osnovna razlika između dva pristupa u procesu selektovanja stanja i određivanja verovatnoće i drugih parametara pouzdanosti. Analitičkim tehnikama se vrednosti parametara pouzdanosti određuju na osnovu matematičkih modela. Glavni problem sa ovim pristupom je potreba da se uvažavaju određene aproksimacije čiji su efekti često nedovoljno poznati. Analitički pristup generalno selektuje stanja u rastućem redosledu od nivoa verovatnoće, npr. nultog ispada, ispada prvog reda itd. Proces se obično zaustavlja za neku zadatu verovatnoću ili kada verovatnoća nekog stanja postane manja od neke specificirane vrednosti. Stanje je, prema tome, procenjeno samo jednom i parametri su proračunati matematički iz statističkih podataka koji definišu svako stanje, npr. verovatnoća, frekvencija, trajanje, itd.

Simulacione tehnike (npr. Monte Karlo simulacija) određuje parametre simulacijom stvarnih procesa i slučajnim ponašanjem sistema. Ove tehnike se mogu podeliti u dve kategorije: sekvencijalne i nesekvencijalne. Nesekvencijalne simulacije razmatraju



svaki interval vremena nezavisno i prema tome ne mogu modelovati vremenske korelacije i sekvencijalne događaje. Sekvencijalni pristup uzima svaki interval (obično jedan sat) po hronološkom redosledu. Sekvencijalne simulacije su vrlo korisne u proceni sistema koji imaju vremenski zavisnu istoriju kao što su hidro sistemi koji sadrže rezervoare i pumpne akumulacije, ali nisu neophodne za analizu termo sistema. Sekvencijalne i nesekvencijalne simulacije su vrlo korisne u modelovanju kompleksnijih sistema. Monte Karlo pristupi su korisni za kompleksnije modelovanje, ekonomska razmatranja, donošenje odluka i za rad sa velikim energetske sistemima, kao što su interkonekcije.

Problem kod svih ovih simulacionih tehnika je da rezultat zavisi od broja eksperimenata, i početne (seed) veličine korišćene u eksperimentima i od sekvence slučajnih brojeva. Stanja imaju veću verovatnoću pojavljivanja kao da su više puta simulirana. Proces se zaustavlja ili posle fiksnog broja simulacija ili na osnovu statističkog pravila zaustavljanja. Očekivana vrednost parametara se definiše kao srednja vrednost parametara dobijenih za svaku simulaciju. Drugi statistički parametri, na primer standardna devijacija, mogu biti određeni na sličan način na osnovu simulacionih rezultata.

Složeni sistem koji se sastoji od termo agregata obično je pogodan za analitičke tehnike. Izuzetak je kada se zahtevaju druge informacije osim srednjih i očekivanih. U takvim slučajevima mogu biti neophodne simulacione tehnike. Kod analitičkog pristupa su potrebne i neke aproksimacije. One su obično prihvatljive u najvećem broju slučajeva i pošto je moguća primena AC tokova snaga, time je obuhvaćena procena naponskih prilika i problema reaktivne energije.

Neki sistemi ne mogu biti lako procenjeni analitičkim pristupom. Ovo uključuje hidro sisteme podržane rezervama i pumpnim akumulacijama. Unutrašnja složenost takvih sistema zahteva upotrebu simulacija, pre svega sekvencijalnih.

Principi opisani u prethodnom odeljku primenljivi su u nezavisnom sistemu i u interkonekcijama. Za interkonekcije je važno da raspoloživi proizvodni kapaciteti posmatranog sistema mogu da budu i raspoloživi kapaciteti u drugim sistemima interkonekcije. Ova raspoloživa proizvodnja zavisi od interkonektivnih ugovora. Maksimalna raspoloživa proizvodnja za druge sisteme, nakon zadovoljenja potrošnje sistema, može biti manja nego što je ova veličina ako susedni sistem želi da čuva neku rezervu, ili može biti veća ako ugovor daje neki prioritet drugom sistemu. To takođe zavisi od sistema preko kojih se obavlja tranzit, faktora pouzdanosti i sigurnosti koji utiču na sposobnost tranzita, i ugovora povezanih sa procesima tranzita.

U svakom od gornjih slučajeva, posmatrani sistem neće videti sve instalisane kapacitete interkonekcije, sem ove veličine. Ovaj raspoloživi kapacitet može biti transformisan u ekvivalent multi-state jedinicu koja sadrži stanja ekvivalentnih kapaciteta i njihove verovatnoće (frekvencija i trajanje ako je zahtevano). Ova modifikovana multi-state jedinica se kombinuje sa tabelom kapaciteta sopstvenog sistema koji se onda posmatra kao nezavisan sa svojim modelom potrošnje koji obezbeđuje novi skup parametara, uključujući LOLE, LOEE itd.

### 2.6.2.2 Slučaj kada je uvažena mreža posmatranog sistema

Ako je mreža posmatranog sistema uvažena u analizama, pored parametara navedenih u tabeli 2.1. mogu biti definisani i novi parametri vezani kako za sistem u celini tako i za pojedine tačke opterećenja, tako da su u analize uključeni svi parametri povezani sa proizvodnim i prenosnim kapacitetima, i koji su navedeni u tabelama 2.2 i 2.3 [24]. Svaki skup parametara može biti ocenjivan sa ili bez uvažavanja interkonekcije tako da mogu da se procene poboljšanja uzrokovana ugovorima u interkonekciji. Kao dodatak parametrima prikazanim u tabeli 2.2 i 2.3 postoji potreba razvijanja parametara koji vrednuju energetske razmene u interkonekciji kao što su učestanost, trajanje, opterećenje i energija.

Parametri dati u tabeli 2.2 prikazuju uticaj (gledano sa strane potrošača), značajnih tačaka napajanja od kvarova koji su uzrokovani od strane posmatranog sistema ili je uzrok u susednim sistemima i interkonekciji.

Tabela 2.2. Tipični parametri tačaka napajanja

OSNOVNE VELIČINE * verovatnoća kvara * očekivana verovatnoća kvara * očekivan broj naponskih prekoračenja * očekivani nivo prekida potrošnje, MW * očekivana neisporučena energija, MWh * očekivano trajanje prekida potrošnje, h
MAKSIMALNE VELIČINE * maksimum prekida snage potrošnje, MW * maksimum prekida energije potrošnje, MWh * maksimum trajanja prekida potrošnje, h
SREDNJE VREDNOSTI * srednja vrednost prekida opterećenja/prekid, MW/prekid * srednja vrednost neisporučene energije/prekid, MWh/prekid * srednje trajanje prekida/prekid, h/prekid
VELIČINE IZOLOVANIH ČVOROVA * očekivani broj prekida * očekivani nivo prekida snage potrošnje, MW * očekivana neisporučena energija, MWh * očekivano trajanje prekida opterećenja, h

Parametri dati u tabeli 2.3 su generalno poznati kao IEEE skup sistemskih parametara i već su široko korišćeni u praktičnim primenama. Oni predstavljaju veličine koje će biti korišćene za globalne sisteme i u svrhu upravljanja energetske tokovima.

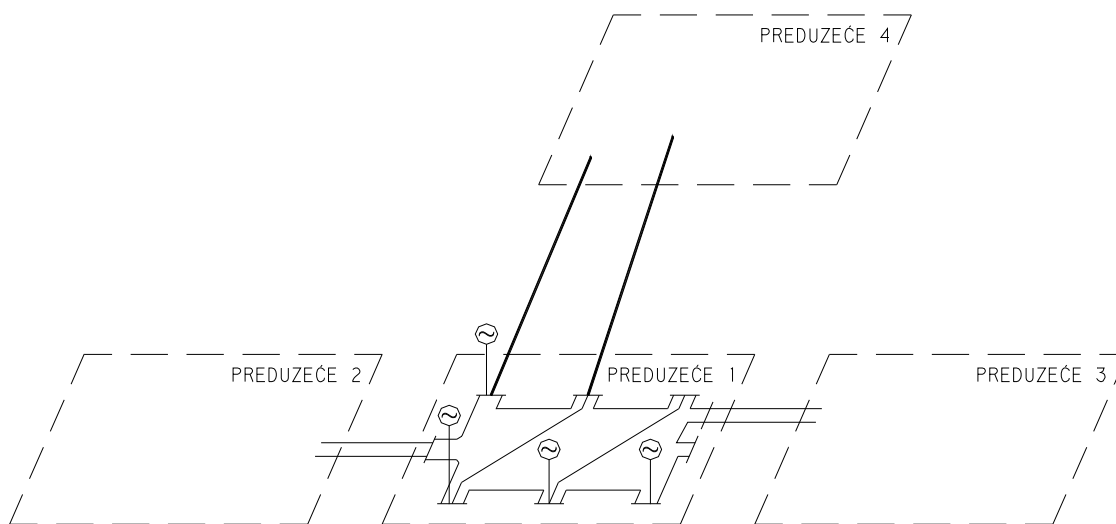
Tabela 2.3. IEEE skup sistemskih parametara

OSNOVNE VELIČINE * parametar prekida snage sistema, MW/MW, god. * prosečna snaga prekida napajanja /poremećaj, MW/poremećaj * energetske parametar prekida napajanja, MWh/MW, god. * modifikovani energetske parametar prekida napajanja
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

* sistemske minute
<b>SREDNJE VREDNOSTI</b>
* srednji broj prekida/ tačka potrošnje
* srednja snaga prekida/ potrošnju, MW/ tačka potrošnje
* srednja energija prekida/ potrošnju, MWh/ tačka potrošnje
* srednje trajanje prekida potrošnje / tačka potrošnje, h/ tačka potrošnje
* srednji broj naponskih prekoračenja/ tačka potrošnje
<b>MAKSIMALNE VREDNOSTI</b>
* maksimalan prekid snage sistema u okviru nekih dodatnih uslova, MW
* maksimum neisporučene energije sistema u okviru nekih dodatnih uslova, MWh

Parametri u obe gornje tabele su klasični parametri povezani samo sa pouzdanošću, ali se mogu proširiti kako bi uključili koncept sigurnosti. Opšti parametri ne mogu biti mnogo različiti, ali mogu biti dodatno opisani. Dodatni podskup može da uključi verovatnoću, učestanost i trajanje svakog od stacionarnih događaja, događaje naponskih kolapsa i druge parametre koji predstavljaju dinamičke procese. Parametri predstavljeni za proračun događaja pouzdanosti mogu se numerički promeniti ako se uključi problem sigurnosti zbog učestanosti i trajanja koji dodatno u specifičnom stanju mogu da utiču sa aspekta sigurnosti datog stanja.

Kada je mreža u posmatranom sistemu modelovana (slika 2.7) dobija se složen sistem proizvodnje i prenosa. Funkcija složenog sistema je da proizvodi električnu energiju u generatorskim čvorovima i onda da prenosi ovu energiju do čvorova napajanja. Sposobnost sistema da proizvede dovoljno energije da zadovolji potrebe u čvorovima napajanja i da je transportuje bez prekoračenja sistemskih operativnih ograničenja, može biti merena jednim ili sa više parametara pouzdanosti. Svrha procene pouzdanosti energetskog sistema na ovom nivou je da se proceni sposobnost sistema da izvrši svoju funkciju prenosa energije generisane u sistemu do čvorova napajanja.



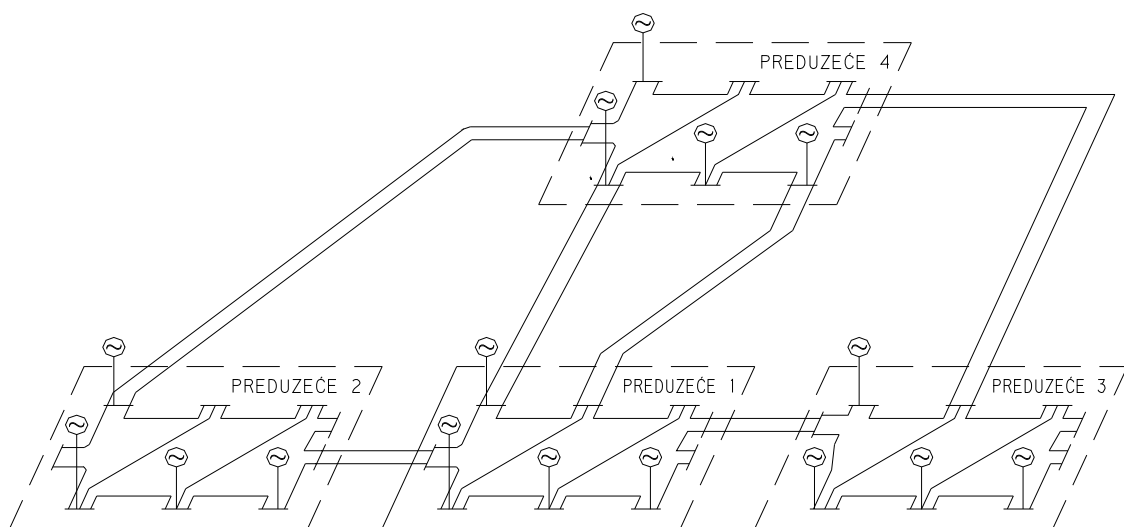
Slika 2.7. Mreža sistema od interesa je uvažena

Procena pouzdanosti sistema na ovom nivou predstavljanja je kompleksna pošto se moraju razmatrati ukupni efekti pouzdanosti u proizvodnji i prenosu.

U HLI studijama planiranja, kod procene pouzdanosti analizira se odgovarajuće stacionarno stanje, tj. da li proizvodni sistem može da zadovolji svoju potrošnju. Dinamičko ponašanje sistema je generalno bitno samo za vreme operativnog rada i promena u sistemu. Ovaj koncept pouzdanosti stacionarnog stanja je nekompletan i prema tome nedovoljan kada je u analizu uključen prenosni sistem. Prenosne mogućnosti moraju obezbediti ne samo odgovarajuće prenosne kapacitete da zadovolje potrošnju, pri čemu napon, frekvencija i termička ograničenja moraju biti održavani na zahtevanom nivou.

### 2.6.2.3 Slučaj kada su mreže susednih sistema uvažene

Kada je mreža pomoćnog sistema uključena (slika. 2.9.), kompleksnost analize se povećava. Parametri će biti konceptualno isti kao oni što su prikazani u prethodnoj tački, samo numeričke vrednosti mogu biti promenjene. Moguća su dva pristupa.



Slika 2.8. Modelovane su mreže susednih sistema

Prvi pristup je odvojena procena pouzdanosti pomoćnog i tranzitnog sistema i kreiranje ekvivalenata za njih. Ova procedura zahteva ekvivalentiranje i redukciju. Međutim možda bi bilo moguće i preporučljivo potpuno predstavljanje tranzitnog sistema, ili bar onog u bliskom susedstvu sopstvenog sistema.

Drugi pristup je procena pouzdanosti potpunih interkonektivnih sistema kao kompletnih i samostalnih entiteta. Ovo može da bude glomazno za velike sisteme, praktično nemoguće.

### 3. OPŠTI POJMOVI O POUZDANOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA

Pouzdanost se definiše kao sposobnost obnavljanja predviđene funkcije u toku određenog vremena pod zadatim spoljašnjim uslovima [20]. Navedena referenca važi u nardenom poglavlju. Pomenuta definicija primenjuje se kako na elemente nekog sistema pojedinačno tako i na sistem u celini. Naravno, funkcije sistema i elemenata se razlikuju, a mogu se razlikovati i vreme i spoljašnji uslovi.

U zavisnosti od vrste funkcije elemenata ili sistema, u proračunima pouzdanosti određuju se različiti pokazatelji pouzdanosti preko kojih se iskazuje mera pouzdanosti. Generalno se pokazatelji pouzdanosti mogu podeliti na statičke i dinamičke. Statički pokazatelji se definišu za obnovljive elemente i sisteme. Oni ukazuju na prosečno ponašanje u dugom periodu eksploatacije, često u toku celog tehničkog veka elementa ili sistema. Dinamički pokazatelji određuju se za neobnovljive objekte ali i za obnovljive objekte kada je potrebno predviđanje njihovog ponašanja u ograničenom vremenskom intervalu.

#### 3.1. Neobnovljivi elementi

Neobnovljivi su sistemi koji se ne obnavljaju posle kvara tako da im životni vek traje onoliko dugo koliko protekne vremena do kvara. Osnovni pokazatelj jednog neobnovljivog elementa je pouzdanost koja se definiše kao

$$R(t) \equiv P\{T > t\} \quad (3.1)$$

gde  $T$  označava vreme trajanja ispravnog rada sistema, a  $t$  je vreme koje je do trenutka posmatranja proteklo od početka rada sistema. Prema tome, pouzadnost  $R(t)$  je verovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti ispravan.  $R(t)$  je dinamički pokazatelj za sistem pošto se u principu menja sa vremenom.

Nepouzdanost sistema je verovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti u kvaru. Kvar se može dogoditi bilo kada do tog trenutka. Prema tome nepouzdanost se definiše kao:

$$Q(t) \equiv P\{T \leq t\} \quad (3.2)$$

Može se zaključiti da  $Q(t)$  po svojoj definiciji je funkcija raspodele verovatnoće slučajne promenljive  $T$ . Nepouzdanost je takođe dinamički pokazatelj.

Očigledno je :

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad (3.3)$$

Funkcija  $Q(t)$  poseduje sva svojstva integralne funkcije raspodele slučajne veličine vremena bezotkaznog rada, tj.  $Q(0) = 0$  ;  $Q(\infty) = 1$  ;  $Q(t_i) \geq Q(t_j)$ , za  $t_i > t_j$ .

Gustina raspodele verovatnoće slučajne promenljive  $T$  jednaka je, po definiciji:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (3.4)$$

Funkcija  $f(t)$  često se naziva učestanošću.

Karakteristična veličina za analizu pouzdanosti je i intenzitet otkaza koji se definiše kao:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.5)$$

Za praktične procene pouzdanosti koristi se srednje vreme trajanja ispravnog rada koje se određuje kao matematičko očekivanje vremena trajanja ispravnog rada sistema.

$$m \equiv E\{t\} \equiv \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = - \int_0^{\infty} t \cdot R'(t) \cdot dt \quad (3.6)$$

Parcijalnom integracijom dobija se:

$$m = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (3.7)$$

Svi navedeni parametri mogu se koristiti i kod obnovljivih sistema, tj. sistema koji se po nastanku otkaza obnavljaju zamenom neispravnih delova ili opravkom. Kod ovakvih sistema ocenjuje se pouzdanost sistema od trenutka puštanja u rad do prvog otkaza. Pri tome je reč ne samo o prvom puštanju u rad sistema nego i o svakom puštanju posle obnavljanja, pri čemu se pretpostavlja da se obnavljanjem sistem dovodi u isto stanje kao kada je bio nov. Parametar  $m$  statički jer ne zavisi od tekućeg vremena.

### 3.2. Obnovljivi elementi

U analizama pouzdanosti prvenstvenu važnost imaju obnovljivi sistemi, odnosno sistemi koji se opravkom ili zamenom nekog elementa dovode u ispravno stanje. Ovi sistemi, mogu se dakle nalaziti u dva stanja: ispravnom stanju i stanju obnavljanja. Raspodela verovatnoća boravka u nekom stanju može se odrediti pomoću dijagrama stanja ako se sva ostala stanja sem posmatranog proglase apsorpcionim, odnosno stanjem iz koga nema izlaza. Verovatnoća da će sistem biti u apsorpcionom stanju u nekom trenutku  $t$  je verovatnoća da je trajanje boravka u posmatranom stanju jednako ili manje od  $t$ . To zapravo znači da je verovatnoća prelaska u apsorpciono stanje jednaka raspodeli verovatnoće trajanja boravka u posmatranom stanju.

Saglasno ovome, svi ranije navedeni parametri mogu se definisati i za obnovljive sisteme, s tim što se oni u tom slučaju odnose na vreme od puštanja u rad do prvog otkaza, odnosno od puštanja u rad posle obnavljanja do ponovnog otkaza (slika 3.1.). U tom smislu, srednje vreme trajanja ispravnog rada  $m$  često se obeležava sa MTTF (Mean Time To Failure).

$$MTTF = m = 1/\lambda \quad (3.8)$$

Za obnovljive sisteme, uvodi se pojam srednje vreme između dva kvara, i označava sa

$$MTBF = T = m + r \quad (3.9)$$

gde je:

$T$  - srednji vremenski ciklus

$m$  - srednje vreme ispravnog rada

$r$  - srednje vreme trajanja kvara

$MTTR$  (srednje vreme trajanja kvara) se definiše kao:

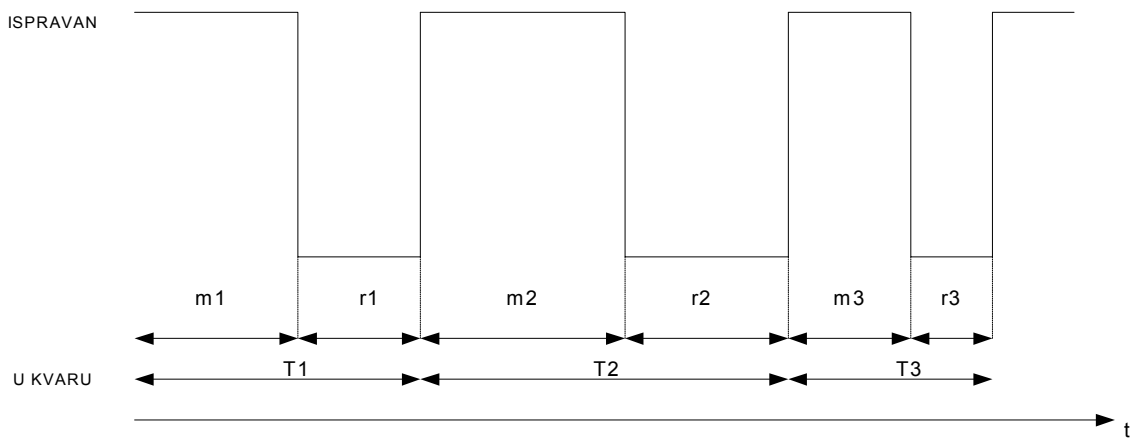
$$MTTR = r = 1/\mu \quad (3.10)$$

gde je:

$\mu$  - intenzitet obnavljanja

Recipročna vrednost srednjeg vremenskog ciklusa naziva se srednja učestanost kvarova:

$$f = 1/T = \lambda\mu / (\lambda + \mu) \quad (3.11)$$



Slika 3.1. Vremenski dijagram sistema sa dva stanja

Verovatnoća da će sistem sa datim vremenskim dijagramom biti ispravan u nekom proizvoljnom trenutku biće

$$A = m / (m + r) = \mu / (\mu + \lambda) \quad (3.12)$$

Ova veličina kod obnovljivih sistema naziva se raspoloživost. Analogno tome, neraspoločivost će biti

$$U = 1 - A = \lambda / (\lambda + \mu) \quad (3.13)$$

Verovatnoća da je sistem ispravan u nekom trenutku  $t$  veća je ako je sistem obnovljiv nego ako nije. Kod neobnovljivih sistema, svaki kvar koji se dogodio bilo kad pre trenutka  $t$  prouzrokuje neradno stanje sve vreme posle tog trenutka. Kod obnovljivih sistema posle otkaza sistem se obnavlja tako da postoji konačna verovatnoća da će sistem koji je otkazao pre trenutka  $t$  biti ispravan u ovom trenutku i kasnije. Prema tome između pokazatelja pouzdanosti jednog istog sistema kada se ovaj obnavlja i ne obnavlja postoje sledeći odnosi:

$$\begin{aligned} A(t) &> R(t) \\ U(t) &< Q(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Raspoloživost i neraspoloživost su dinamički parametri. Za razliku od pouzdanosti i nepouzdanosti, ovi parametri imaju i specifične stacionarne vrednosti koje su vrlo važne kod dugoročnog planiranja elektroenergetskih sistema.

### 3.3. Markovljevi procesi

Ako su trajanja ispravnog rada i obnavljanja raspodeljena po eksponencijalnom zakonu, može se formirati jednostavan matematički model za izračunavanje verovatnoća stanja sistema. Pošto intenziteti prelazaka između stanja ne zavise od vremena boravka u stanjima, ovakav sistem prelazaka iz stanja u stanje predstavlja Markovljev stohastički proces sa diskretnim stanjima koji je kontinualan i homogen u vremenu. Markovljevim modelom mogu se obuhvatiti i stanja sa neeksponencijalnom raspodelom ako se ova zamene kombinacijom fiktivnih stanja sa eksponencijalnom raspodelom.

Verovatnoće stanja sistema određuju se iz odgovarajućih Kolmogorovljev-Čepmenovih jednačina

$$\dot{p}_k(t) = \sum_{i=1}^{k-1} a_{ki} p_i(t) + a_{kk} p_k(t) + \sum_{i=k+1}^n a_{ki} p_i(t), \quad k=1,2,\dots,n \quad (3.15)$$

gde je:

$p_k(t)$  - verovatnoća da je u trenutku  $t$  sistem u stanju  $k$ ,

$n$  - broj stanja sistema,

$a_{ki}$  - intenzitet prelaza iz stanja  $i$  u stanje  $k$ ,  $k \neq i$ ,

$a_{ii}$  - intenzitet napuštanja stanja  $i$ ,

Intenzitet napuštanja stanja  $i$  jednak je zbiru intenziteta prelaza iz stanja  $i$  u ostala stanja sistema

$$a_{ii} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n a_{ki} \quad (3.16)$$

U matricnom obliku jednačine (3.15) imaju oblik:



$$p'(t) = a \cdot p(t) \quad (3.17)$$

pri čemu je:

$$p(t) \equiv [p_1(t) \dots p_n(t)]^T \text{ i } a \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Verovatnoće stanja sistema dobijaju se rešavanjem gornjih diferencijalnih jednačina za poznate početne uslove  $p_k(0)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . U opštem slučaju jednačine se rešavaju primenom poznatih numeričkih metoda za integraciju sistema diferencijalnih jednačina. Jednačine za određivanje stacionarnih vrednosti verovatnoća stanja sistema dobijaju se iz jednačina (3.17) kao granične vrednosti kada vreme teži beskonačnosti. Tako se diferencijalne jednačine za verovatnoće stanja u vremenu pretvaraju u linearne algebarske jednačine za stacionarne vrednosti ovih verovatnoća. Dobijeni sistem jednačina je neodređen pošto je matrica  $a$  singularna. Zato se jedna od jednačina sistema zamenjuje relacijom:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (3.18)$$

Sistem jednačina dobija oblik

$$A \cdot p = b \quad (3.19)$$

U (3.19)  $b$  predstavlja  $N$  dimenzionalni vektor dat izrazom

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Matrica  $A$  se dobija kada se u matrici  $a$  elementi prvog reda zamene jedinicama. Stacionarna vrednost raspoloživosti sistema određuje se kao zbir verovatnoća boravka u radnim stanjima, a stacionarna vrednost neraspoloživosti kao zbir verovatnoća boravka u neradnim stanjima. Učestanost kvarova određuje se kao učestanost prelaza granice između radnih i neradnih stanja

$$f = \sum_{\substack{i \in R \\ k \in N}} a_{ki} p_i = \sum_{\substack{i \in N \\ k \in R}} a_{ki} p_i \quad (3.21)$$

gde su  $R$  i  $N$  označeni skupovi radnih i neradnih stanja.

### 3.4. Elementi Kronekerove algebre

Za jednostavno formiranje jednačina za verovatnoće stanja složenog sistema iz jednačina stanja njegovih komponenti može da posluži Kronekerova algebra. Osnovne operacije su Kronekerov zbir i Kronekerov proizvod i definišu se na sledeći način.

Kronekerov proizvod matrice A dimenzija (m\*n), i matrice B dimenzija (p\*q), je matrica dimenzija ((mp)\*(nq))

$$A \otimes B \equiv \begin{bmatrix} a_{11} \cdot B & \cdots & a_{1n} \cdot B \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} \cdot B & \cdots & a_{mn} \cdot B \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Kronekerov zbir kvadratne matrice Q dimenzija (q\*q) i kvadratne matrice M dimenzija (m\*m) je kvadratna matrica dimenzija ((q\*m)\*(q\*m)):

$$Q \oplus M \equiv Q \otimes I_m + I_q \otimes M \quad (3.23)$$

gde je sa  $I_k$ ,  $k=m,q$  označena jedinična matrica dimenzija  $k * k$ .

Iz definicija algebarskih operacija (3.22) i (3.23) slede relacije:

$$\begin{aligned} A \otimes B &\neq B \otimes A \\ &\text{ako je } A \neq B \\ A \oplus B &\neq B \oplus A \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} A \otimes B \otimes C &= A \otimes (B \otimes C) = (A \otimes B) \otimes C \\ A \oplus B \oplus C &= A \oplus (B \oplus C) = (A \oplus B) \oplus C \\ (A \otimes B) \cdot (C \otimes D) &= (A \cdot C) \otimes (B \cdot D) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Poslednja jednakost u (3.25) važi ako su matrice u parovima A, C i B, D takvih dimenzija da se mogu pomnožiti.

### 3.5. Izvori električne energije

#### 3.5.1. Model sa dva stanja

U proračunima pouzdanosti složenih elektroenergetskih sistema izvori električne energije se najčešće predstavljaju modelima sa dva stanja:

- stanjem sa punom raspoloživošću instalisanog kapaciteta
- stanjem potpunog ispada iz pogona.

Kod pomenutog modela, raspoloživost i neraspoločivost izvora izračunavaju se primenom sledećih jednostavnih relacija

$$A = \frac{T_R}{T} \quad (3.26)$$

$$U = \frac{T_I}{T} \quad (3.27)$$

pri čemu je:

$$T = T_R + T_I \quad (3.28)$$

U relacijama od (3.26) do (3.28)  $T_R$  je ukupno trajanje ispravnog stanja izvora,  $T_I$  je ukupno trajanje potpunog ispada izvora, u vremenskom intervalu između dva planska remonta.

Pokazatelji  $U$  i  $A$  u potpunosti opisuju karakteristike izvora koje su merodavne za proračune verovatnoće deficitarnih stanja elektroenergetskih sistema i očekivane neisporučene energije potrošačima u analiziranom vremenskom periodu.

U slučajevima kada se želi proceniti učestanost i pojedinačno trajanje deficitarnih situacija ili kratkoročno prognozirati ponašanje sistema, moraju se poznavati intenziteti otkaza ( $\lambda$ ) i obnavljanja izvora ( $\mu$ ). Na osnovu poznavanja opštih odnosa koji postoje između pokazatelja pouzdanosti elemenata sa dva stanja može se za pokazatelje pouzdanosti izvora pisati

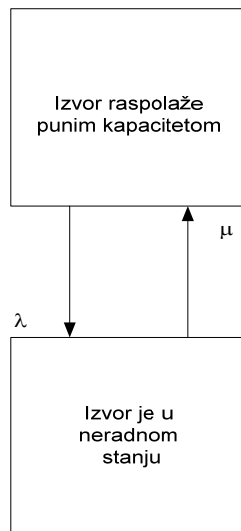
$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.29)$$

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.30)$$

Izrazi (3.29) i (3.30) predstavljaju stacionarne verovatnoće normalnog radnog i neradnog stanja izvora kada su vremena boravka u ovim stanjima eksponencijalno raspodeljena.

Učestanost ispada izvora iz pogona, koja se poklapa sa učestanošću obnavljanja, izračunava se kao

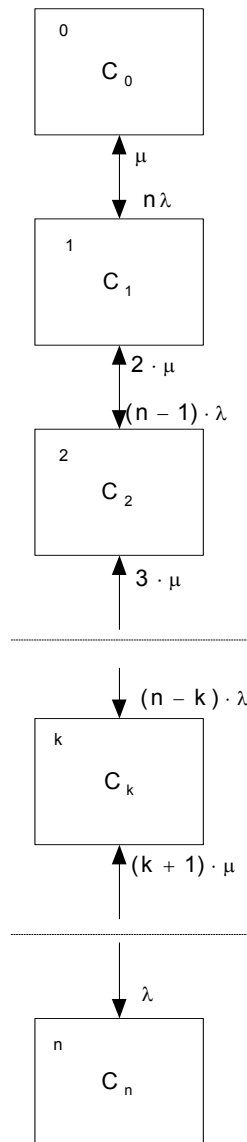
$$f = \lambda \cdot A = \mu \cdot U \quad (3.31)$$



Slika 3.2 Markovljev dijagram prelaza za izvor sa dva stanja

### 3.5.2. Grupa izvora jednakih karakteristika

U elektranama često postoji više generatorskih jedinica sa jednakim tehničkim karakteristikama. Generatorske jedinice istih karakteristika mogu se, u analizama pouzdanosti, grupisati tako da se smanji ukupni broj stanja izvora koja treba obuhvatiti. Ekvivalentni izvor koji obuhvata  $n$  generatorskih jedinica sa dva stanja ima  $(n+1)$ -no stanje, umesto  $2^n$  stanja koliko bi se imalo kada generatorske jedinice ne bi bile grupisane. Moguća sva stanja grupe su: sve jedinice raspoložive, jedna od jedinica u kvaru, dve jedinice u kvaru, ..., svih  $n$  jedinica u kvaru (slika 3.3). Sa  $\lambda$  i  $\mu$  označeni su intenziteti kvara i obnavljanja generatorskih jedinica, a sa  $C_k$  raspoloživi kapacitet grupe u stanju  $k$ .



Slika 3.3 Dijagram prelaza između stanja za grupu od  $n$  generatorskih jedinica

Verovatnoća da će neraspoloživo biti  $k$  generatorskih jedinica (verovatnoća da će se ekvivalentni generator nalaziti u stanju  $k$ ) jednaka je:

$$P_k = \binom{n}{k} U^k \cdot A^{n-k} \quad (3.32)$$

Izraz (3.32) obuhvata sve moguće kombinacije grupa od  $k$  generatorskih jedinica od ukupno  $n$  jedinica koje mogu biti u kvaru.

Intenzitet prelaska iz stanja  $k$  u  $k+1$  jednak je:

$$\lambda_{k+1,k} = (n-k) \cdot \lambda \quad (3.33)$$

pošto bilo koja od jedinica koja je raspoloživa u stanju  $k$  može ispasti iz pogona.

Raspoloživi kapacitet grupe generatora (ekvivalentnog generatora u stanju  $k$ ) jednak je

$$C_k = (n - k) \cdot c \quad (3.34)$$

gde je  $c$  označena instalisana snaga jedne generatorske jedinice.

### 3.6. Vodovi

Elektroenergetski vodovi, posebno nadzemni vodovi, su elementi elektroenergetskog sistema koji se najčešće kvare zbog svoje dužine i izloženosti spoljašnjim uticajima kao što su atmosferska pražnjenja, vetar, zaleđivanje i druge vremenske nepogode, klizanje terena, zemljotresi, zagađenost vazduha koje dovodi do zaprljanja izolatora, požara itd. U analizi pouzdanosti moguće je obuhvatiti sve navedene uticaje preko odgovarajućih modela vodova i odgovarajućih vrednosti karakterističnih pokazatelja pouzdanosti koji će se uvrstiti kod primene razvijenih modela [20].

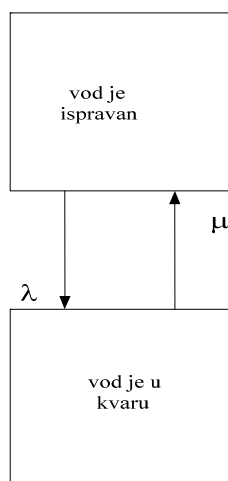
Pri sastavljanju matematičkih modela za analizu pouzdanosti vodova treba voditi računa o nameni modela. Ako se želi detaljni proračun pouzdanosti određenog voda u sklopu analize alternativnih rešenja za napajanje jednog izabranog postrojenja, model može biti složeniji i obuhvatiti više konkretnih okolnosti koje utiču na rad voda pri čemu će se koristiti pokazatelji pouzdanosti koji su specifični za pomenute uslove rada. U analizama pouzdanosti elektroenergetskog sistema svaki vod je samo jedan od elementa elektroenergetske mreže. U ovakvim situacijama nije moguće koristiti detaljne modele vodova već se oni u izvesnoj meri moraju uprostiti.

Kako je već rečeno, vodovi su elementi sistema koji su najčešće izloženi kvarovima. Međutim, kvarovi vodova se, u proseku otklanjaju znatno brže nego kvarovi izvora tako da je i pored velikog intenziteta kvarova, neraspoloživost vodova znatno manja od neraspoloživosti izvora. Zbog toga je verovatnoća uspostavljanja deficitarnih stanja elektroenergetskog sistema usled kvarova vodova obično relativno mala. Međutim vodovi bitno utiču na uslove rada sistema pri ispadima izvora, zbog ograničenih prenosnih kapaciteta. To je osnovni razlog zbog koga je u analizama pouzdanosti elektroenergetskog sistema potrebno uzeti u obzir uticaj vodova i mreže u celini.

#### 3.6.1. Model voda sa dva stanja

Za predstavljanje prenosnih vodova u sistemskim analizama najčešće se koristi model voda sa dva stanja (slika 3.4).

Model razlikuje ispravno stanje i stanje kvara. U prvom od pomenutih stanja smatra se da vod raspolaže svojim punim instalisanim kapacitetom, a u drugom da je u potpuno neradnom stanju.



Slika 3.4 Dijagram prelaza za model voda sa dva stanja

Raspoloživost i neraspoloživost voda izračunavaju se na osnovu opštih relacija za modele sa dva stanja

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.35)$$

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.36)$$

a učestanost kvarova je

$$f = \lambda \cdot A = \mu \cdot U \quad (3.37)$$

Intenzitet otkaza  $\lambda$  i intenzitet popravke  $\mu$  obuhvata sve vrste otkaza na vodu, u svim klimatskim uslovima i na svim delovima voda.

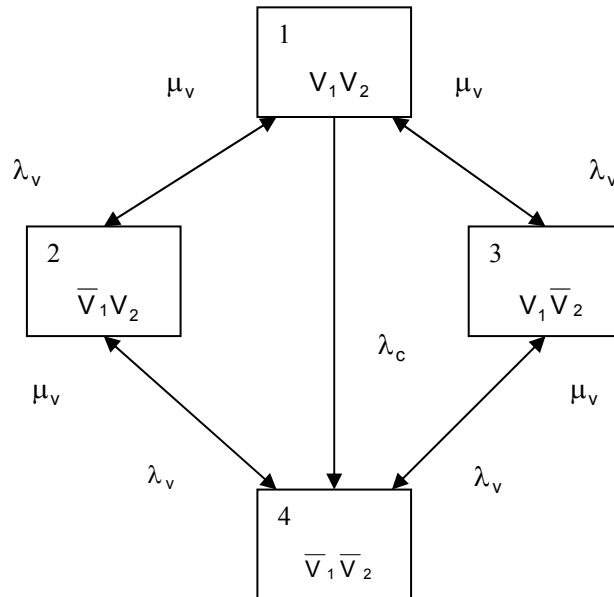
### 3.6.2. Jednovremeni kvarovi

Pod pojmom jednovremeni kvar podrazumeva se kvar više komponenti elektroenergetskog sistema koji je posledica jednog zajedničkog uzroka i koji nastaje jednovremeno kod svih posmatranih komponenti. Jednovremeni kvarovi se mogu dogoditi kod vodova koji se vode delom na istoj trasi i kod višestrukih vodova, tj. vodova koji koriste zajedničke stubove.

### 3.6.3. Vodovi na istoj trasi

Kod vodova koji se vode na istoj trasi, delom ili na svojoj dužini, do jednovremenog ispada iz pogona svih vodova može doći usled različitih spoljašnjih uzroka. Mogući uzroci su: klizanje terena, zemljotres, požar, nevreme sa jakim vetrom, jednovremeno dejstvo leda i vetra [20]. Na slici 3.5 je prikazan dijagram prelaza za dva voda na istoj trasi. Parametri  $\lambda_k$  i  $\mu_k$ ,  $k=1, 2$ , označavaju intenzitete otkaza i obnavljanja vodova za kvarove koji se događaju na vodovima individualno. Sa  $\lambda_c$  označen je intenzitet jednovremenih kvarova, koji su karakteristični za vodove na istoj trasi. Kako se vidi,

usled spoljašnjih uzroka jednovremeno se, sa intenzitetom  $\lambda_c$  prelazi iz normalnog radnog stanja (1) u stanje (4) u kome su oba voda u kvaru. Stanje 2 i stanje 3 su stanja kada je samo jedan vod u kvaru.



Slika 3.5. Dijagram prelaza za dva voda izložena jednovremenim kvarovima

Na slici 3.5, prikazana su sledeća stanja:

$V_1V_2$  - vod 1 i vod 2 su u ispravnom stanju

$\bar{V}_1V_2$  - vod 1 je u kvaru, a vod 2 je u ispravnom stanju

$V_1\bar{V}_2$  - vod 1 je u ispravnom stanju, a vod 2 je u kvaru

$\bar{V}_1\bar{V}_2$  - vod 1 i vod 2 su u kvaru

Primenom opšteg postupka za približno izračunavanje stacionarnih vrednosti pokazatelja pouzdanosti za Markovljeve dijagrame stanja važi sledeće:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$$

$$p_1' = -p_1(2\lambda_v + \lambda_c) + p_2\mu_v + p_3\mu_v \quad (3.38)$$

$$p_2' = p_1\lambda_v - p_2(\mu_v + \lambda_v) + p_4\mu_v$$

$$p_3' = p_1\lambda_v - p_3(\lambda_v + \mu_v) + p_4\mu_v$$

Rešavanjem ovih jednačina stanja dobijaju se sledeće verovatnoće za pojedina stanja



$$p_1 = \frac{\mu_v^2}{\mu_v(\mu_v + 2\lambda_v) + \lambda_v(\lambda_v + \lambda_c)}$$

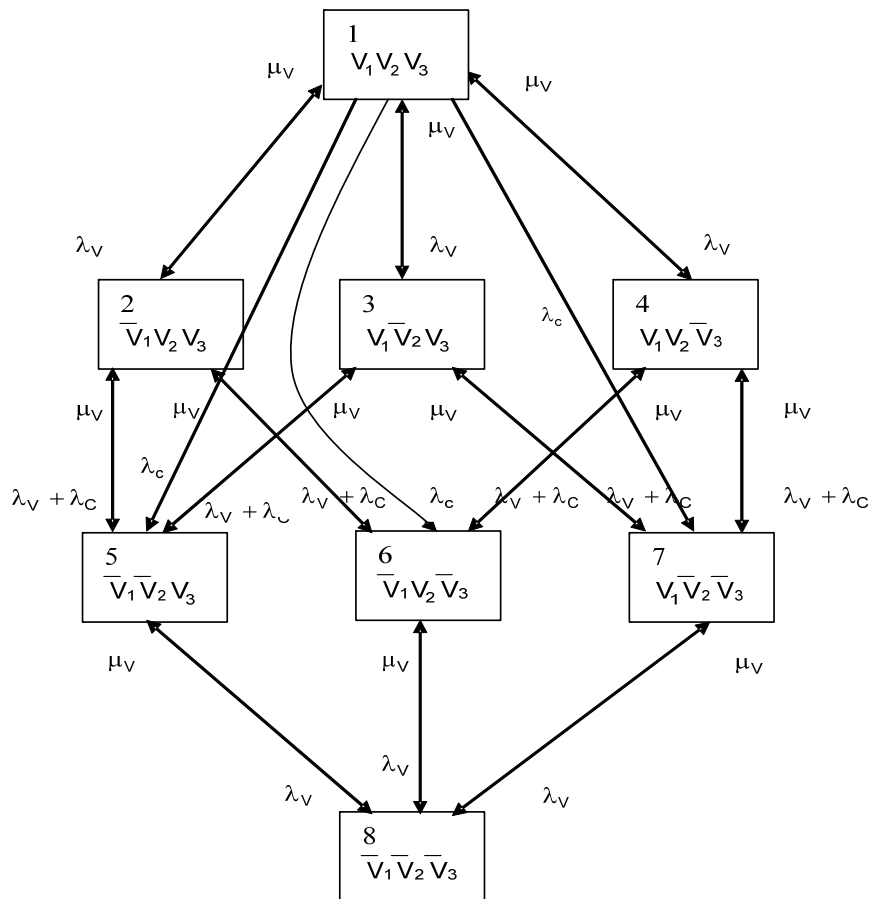
$$p_2 + p_3 = p_A = \frac{2\mu_v\lambda_v}{(\lambda_v + \mu_v)^2 + \lambda_v\lambda_c}$$

(3.39)

$$p_2 = p_3$$

$$p_4 = \frac{\lambda_v(\lambda_v + \lambda_c)}{(\lambda_v + \mu_v)^2 + \lambda_v\lambda_c}$$

Posmatraćemo jednačine stanja tri voda na istoj trasi pri čemu je  $\lambda_c$  intenzitet jednovremenog otkaza dva voda.



Slika 3.6. Dijagram prelaza za tri voda

$$\begin{aligned}
p_1' &= -p_1(3\lambda_v + \lambda_c) + p_2\mu_v + p_3\mu_v + p_4\mu_v \\
p_2' &= p_1\lambda_v - p_2(\mu_v + 2(\lambda_v + \lambda_c)) + p_5\mu_v + p_6\mu_v \\
p_3' &= p_1\lambda_v - p_3(\mu_v + 2(\lambda_v + \lambda_c)) + p_5\mu_v + p_7\mu_v \\
p_4' &= p_1\lambda_v - p_4(\mu_v + 2(\lambda_v + \lambda_c)) + p_6\mu_v + p_7\mu_v \\
p_5' &= p_1\lambda_c + p_2(\lambda_v + \lambda_c) + p_3(\lambda_v + \lambda_c) - p_5(2\mu_v + \lambda_v) + p_8\mu_v \\
p_6' &= p_1\lambda_c + p_2(\lambda_v + \lambda_c) + p_4(\lambda_v + \lambda_c) - p_6(2\mu_v + \lambda_v) + p_8\mu_v \\
p_7' &= p_1\lambda_c + p_3(\lambda_v + \lambda_c) + p_4(\lambda_v + \lambda_c) - p_7(2\mu_v + \lambda_v) + p_8\mu_v \\
p_8' &= p_5\lambda_v + p_6\lambda_v + p_7\lambda_v - 3\mu_v p_8
\end{aligned} \tag{3.40}$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 = 1$$

Ako se uvedu smene

$$p_A = p_2 + p_3 + p_4 \tag{3.41}$$

$$p_B = p_5 + p_6 + p_7$$

kao rešenje sistema dobijaju se sledeći izrazi:

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{6\mu_v^3}{6(\mu_v^3 + \lambda_v^3) + 3\mu_v^2(5\lambda_c + 6\lambda_v) + 2\lambda_c^2(\lambda_v + 3\mu_v) + 2\lambda_v^2(4\lambda_c + 9\mu_v)} \\
p_8 &= \frac{\lambda_v}{\lambda_v + 3\mu_v} \left(1 - p_1 \frac{\mu_v + 3\lambda_v + \lambda_c}{\lambda_v + 3\mu_v}\right) \\
p_A &= \frac{3\lambda_v + \lambda_c}{\mu_v} p_1 \\
p_B &= \frac{3\mu_v}{\lambda_v} p_8
\end{aligned} \tag{3.42}$$

gde je:

$p_1$  - verovatnoća kada su svi vodovi ispravni

$p_A$  - verovatnoća kada je jedan vod u kvaru

$p_B$  - verovatnoća kada su dva voda u kvaru

$p_8$  - verovatnoća kada su sva tri voda u kvaru

Slučajevi sa više od tri voda na istoj trasi su nerealni u praksi, zato se i ne analiziraju. Izvedene relacije će se koristiti u proračunima u poglavljima 6,7 i 8.

### 3.7. Povezani elektroenergetski sistemi

U proračunima pouzdanosti povezanih elektroenergetskih sistema izvori u sistemu obično se modeluju ekvivalentnim izvorom koji obuhvata sve izvore u odgovarajućem sistemu. Svaki izvor  $k$  može biti u nekoliko stanja raspoloživosti instalisanog kapaciteta i može se opisati vektorom verovatnoća stanja

$$p_k = [p_1 \dots p_n]^T \quad (3.43)$$

i dijagonalnom matricom raspoloživih kapaciteta

$$x_k = \text{diag}\{x_1 \dots x_n\} \quad (3.44)$$

U matrici  $x_k$  raspoloživi kapaciteti izvora u pojedinim stanjima poređani su po glavnoj dijagonali istim redom kao odgovarjuće verovatnoće stanja u vektoru  $p_k$ .

Najpre posmatrajmo dva izvora u sistemu i neka su  $p_1$ ,  $x_1$  i  $p_2$ ,  $x_2$  prethodno definisani karakteristični vektori /matrice za izvore 1 i 2. Vektor verovatnoća stanja ukupnih kapaciteta za dva posmatrana izvora može se dobiti Kronekerovim množenjem vektora  $p_1$  i  $p_2$ , čime se dobijaju verovatnoće svih mogućih koincidencija stanja izvora

$$p = p_1 \otimes p_2 \quad (3.45)$$

Matrica raspoloživih snaga dva izvora u stanjima čije su verovatnoće sadržane u vektoru  $p$  dobija se Kronekerovim sabiranjem matrica  $x_1$  i  $x_2$

$$x = x_1 \oplus x_2 \quad (3.46)$$

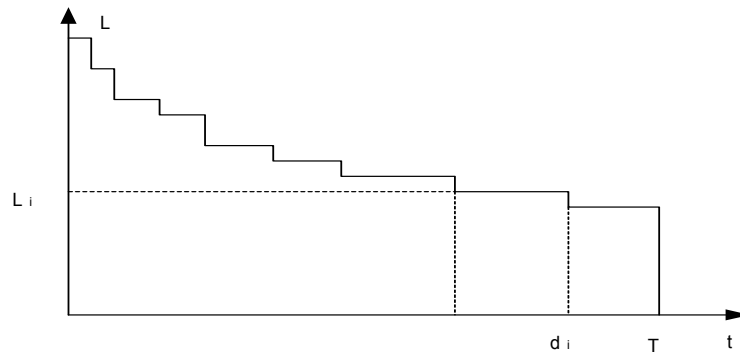
Vektor verovatnoća mogućih koincidencija stanja  $n$  izvora dobija se kao Kronekerov proizvod njihovih vektora verovatnoća

$$p = \bigotimes_{k=1}^n p_k \quad (3.47)$$

a matrica ukupno raspoloživih snaga u navedenim stanjima kao Kronekerov zbir matrica raspoloživih snaga izvora

$$x = \bigoplus_{k=1}^n x_k \quad (3.48)$$

Potrošnja se zamenjuje preko krive trajanja koja se zamenjuje stepeničastom krivom sa konačnim brojem nivoa snaga (slika 3.7).



Slika 3.7. Aproximativna kriva trajanja potrošnje

Svaki nivo se karakteriše svojom vrednošću snage i trajanjem. Ovako uprošćena kriva trajanja potrošnje jednoznačno se opisuje tabelom verovatnih vrednosti snage potrošnje (tabela 3.1).

Tabela 3.1. Diskretizovana kriva trajanja potrošnje

$L_i$	$P\{L = L_i\}$
$L_1$	$p_1$
....	....
$L_n$	$P_n$

U tabeli je sa  $L_i$  označena snaga nivoa  $i$ , a sa  $n$  je ukupan broj nivoa sa kojom je zamenjena kriva trajanja. Verovatnoća da će snaga potrošnje biti  $L_i$  jednaka je relativnom trajanju ovog nivoa:

$$p_i = \frac{d_i}{T} \quad (3.49)$$

gde je  $d_i$  vreme trajanja nivo snage  $L_i$ .

## 4. OPŠTI PRINCIPI U EKVIVALENTIRANJU KOD POUZDANOSTI EES

Savremeni elektroenergetski sistemi rade integrisani u šire interkonekcije u cilju poboljšanja ekonomičnosti i pouzdanosti rada. Kod velikog broja generatorskih jedinica i elemenata mreže kojim se karakterišu interkonektivni sistemi broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka izuzetno su veliki što otežava analize pouzdanosti. Da bi se razmatrani proračuni pojednostavili i ubrzali formiraju se ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES.

### 4.1. Opšta razmatranja

U analizi stacionarnih stanja povezanih elektroenergetskih sistema pojavljuje se problem velikih dimenzija sistema i nedostatka podataka za predstavljanje dela sistema koji nije od neposrednog interesa za preduzetu analizu. Naime, ceo povezni sistem može se ovde predstaviti kao da se sastoji iz dva dela:

1. Interni (ili sopstveni) sistem, koji predstavlja deo povezanog sistema od neposrednog interesa za analizu, za koji postoje svi neposredni podaci koji se koriste pri modelovanju pojava.
2. Eksterni (ili spoljašnji) sistem, koji predstavlja susedne sisteme, povezane sa internim sistemom. Ovaj deo poveznog sistema nije od neposrednog interesa za analizu stacionarnog stanja internog sistema i za njega obično ne postoje adekvatni podaci za modelovanje pojava.

Da bi se prevazišao problem dimenzionalnosti i nedostataka validnih podataka za modelovanje, u analizi stacionarnih stanja povezanih elektroenergetskih sistema pribegava se što tačnijoj predstavi internog dela sistema, dok se eksterni zamenjuje ekvivalentom. Prema tome, statički ekvivalent eksternog dela povezanog elektroenergetskog sistema predstavlja uprošćeni model koji odslikava njegov odziv pri proučavanju pojava u internom delu sistema. Drugim rečima pod ekvivalentiranjem se podrazumeva zamena dela sistema koji nije od interesa dovoljno dobrim ekvivalentnim sistemom znatno manjih dimenzija. Ovaj ekvivalent se onda priključuje uz model internog sistema, kao jedan nezavisan dodatak. O njegovom kvalitetu može se suditi samo na osnovu poređenja rešenja sa uključenim ekvivalentom sa rešenjima dobijenim pri analizi originalnog sistema.

Svi dosada razvijeni modeli statičkih ekvivalenata su manje ili više dobre aproksimacije ekvivalentiranih delova povezanih elektroenergetskih sistema. Neki od njih reaguju na promenu topološke strukture, neki na poremećaje reaktivnih i aktivnih snaga u internom sistemu. Danas korišćeni ekvivalenti se baziraju na dva osnovna klasična modela: Wardov i Dimoov REI ekvivalent. Svi kasnije predloženi ekvivalenti predstavljaju njihove modifikacije i generalizacije učinjene sa ciljem da se ti ekvivalenti poboljšaju i prilagode specifičnim primenama.

Principijelna razlika između dva pomenuta osnovna ekvivalenta sastoji se u tome da Wardov ekvivalent zahteva poznavanje topologije i parametara ekvivalentiranog dela sistema, a Dimoov ekvivalent još i celokupno osnovno stanje u tom delu sistema.

#### 4.1.1. Wardov ekvivalent

Klasični Wardov ekvivalent zasniva se na redukciji kompleksne matrice admitansi čvorova i sastoji se iz sledećih koraka [35]:

1) Svi čvorovi elektroenergetskog sistema dele se u tri grupe: interne (I), granične (B), i eksterne (E) čvorove (slika 4.1). Pri tome se kao granični čvorovi definišu čvorovi sopstvenog (internog) i čvorovi spoljašnjeg (eksternog) sistema koji su međusobno povezani.



Slika 4.1. Podela čvorova povezanog elektroenergetskog sistema na interne (I), granične (B) i eksterne (E)

Linearni model sistema po metodi napona čvorova može se sada prikazati u obliku

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_E \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{EE} & \underline{Y}_{EB} & 0 \\ \underline{Y}_{BE} & \underline{Y}_{BB} & \underline{Y}_{BI} \\ 0 & \underline{Y}_{IB} & \underline{Y}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_E \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

gde su:

$\underline{I}_E, \underline{I}_B, \underline{I}_I$  - subvektori fazora injektiranih struja u eksternim, graničnim i internim čvorovima, respektivno

$\underline{V}_E, \underline{V}_B, \underline{V}_I$  - subvektori fazora napona u eksternim, graničnim i internim čvorovima respektivno

$\underline{Y}_{EE}, \underline{Y}_{EB}, \underline{Y}_{BE}, \underline{Y}_{BB}, \underline{Y}_{BI}, \underline{Y}_{IB}, \underline{Y}_{II}$  - submatrice kompleksne matrice admitansi poveznog sistema, pridružene E, B, i I skupovima.

2) Eliminišu se čvorovi u eksternom sistemu, polazeći od modela (4.1)

Prva od tri jednačine sistema (4.1) daje:

$$\underline{Y}_{EE} * \underline{V}_E + \underline{Y}_{EB} * \underline{V}_B = \underline{I}_E \quad (4.2)$$

odakle je:

$$\underline{V}_E = \underline{Y}_{EE}^{-1} * \underline{I}_E - \underline{Y}_{EE}^{-1} * \underline{Y}_{EB} * \underline{V}_B \quad (4.3)$$

Zamenom izraza za  $V_E$  iz (4.3) u drugu jednačinu iz (4.1) :

$$\underline{Y}_{BE} * \underline{V}_E + \underline{Y}_{BB} * \underline{V}_B + \underline{Y}_{BI} * \underline{V}_I = \underline{I}_B \quad (4.4)$$

gde je

$$\underline{I}_B = \underline{Y}_{BE} \underline{Y}_{EE}^{-1} (\underline{I}_E - \underline{Y}_{EB} \underline{V}_B) + \underline{Y}_{BB} \underline{V}_B + \underline{Y}_{BI} \underline{V}_I \quad (4.5)$$

pa sistem (4.1) tada dobija oblik

$$\begin{bmatrix} \underline{I}'_B \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}'_{BB} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_B \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

gde je

$$\underline{I}'_B = \underline{I}_B - \underline{Y}_{BE} \underline{Y}_{EE}^{-1} \underline{I}_E = \underline{I}_{Beq} \quad (4.7)$$

$$\underline{Y}'_{BB} = \underline{Y}_{BB} - \underline{Y}_{BE} \underline{Y}_{EE}^{-1} \underline{Y}_{EB} = \underline{Y}_{eq} \quad (4.8)$$

3) Relacije (4.6)-(4.8) daju ekvivalent modela (4.1). One opisuju internu mrežu i ekvivalent spoljašnje mreže i formiraju bazu za proračun tokova snaga, pri čemu granični čvorovi B mogu zadržati originalnu klasifikaciju potrošačkih ili naponskih čvorova. Matrica  $-\underline{Y}_{BE} \underline{Y}_{EE}^{-1} \underline{Y}_{EB}$  u (4.8) predstavlja korekciju matrice  $\underline{Y}_{BB}$  zbog ekvivalentiranja spoljašnje mreže i ona odgovara granama koje povezuju granične čvorove (B) sa eksternim (E). Drugim rečima, nova ekvivalentna submatrica  $\underline{Y}'_{BB}$  (4.8) zahteva da se uvede korekcija submatrice  $\underline{Y}_{BB}$  na taj način što se između graničnih čvorova pojavljuju fiktivne grane. Isto tako  $-\underline{Y}_{BE} \underline{Y}_{EE}^{-1} \underline{I}_E$  odgovara ekvivalentnoj dodatnoj injektiranoj struji iz eksternog sistema u graničnim čvorovima, što odgovara da injektiranja  $\underline{I}_B$  treba korigovati sa dodatnim fiktivnim injektiranjima. Konačno se može napisati:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{eq} \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{eq} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_B \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

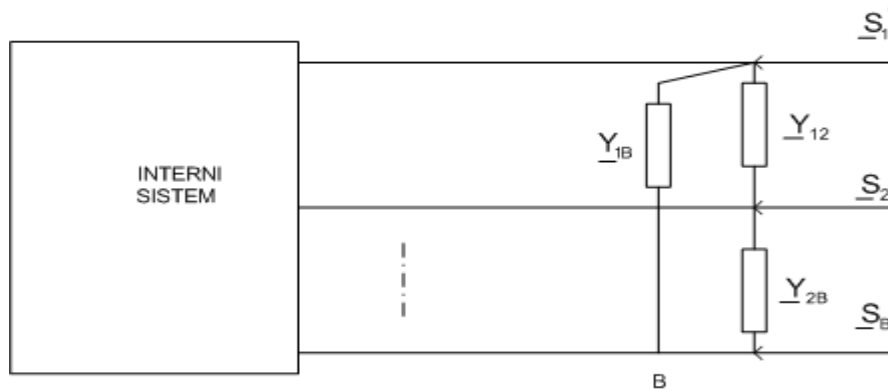
odakle se jednostavno mogu napisati jednačine tokova snaga za sopstveni sistem, s obzirom da su  $\underline{Y}_{BI} = \underline{Y}_{IB}^T$  i  $\underline{V}_B$  u suštini parametri i promenljive koje pripadaju internom sistemu (u smislu reči sopstveni sistem).

Sa definicijom fiktivnih grana i fiktivnih injektiranja u graničnim čvorovima pridruženim internom sistemu, Wardov ekvivalent može se predstaviti kao na slici 4.2,

gde se injektirane fiktivne kompleksne snage u graničnim čvorovima dobijaju preko izraza :

$$S'_K = \underline{V}_K I'_K{}^* = \underline{V}_K \sum_{i \in \alpha_B} (\underline{V}_i^* \underline{Y}'_{ki}) ; K \in \alpha_B \quad (4.10)$$

gde  $\alpha_B$  označava skup svih graničnih čvorova sopstvenog sistema (pridruženih internom sistemu). Elementi matrice  $\underline{Y}'_{ki}$  uzimaju odgovarajuće vrednosti iz submatrice  $\underline{Y}'_{BB}$  (za  $i \in \alpha_B$ ) i  $\underline{Y}'_{BI}$  (za  $i \in \alpha_I$ ).



Slika 4.2. Wardov ekvivalent eksternog elektroenergetskog sistema

U klasičnoj primeni ovog ekvivalenta, nezavisno od promenjenih zahteva za aktivnom i reaktivnom snagom u sistemu od interesa, nova-fiktivna injektiranja kompleksnih snaga u graničnim čvorovima  $S'_K (K \in \alpha_B)$  ostaju konstantna, pa ovaj ekvivalent daje identične rezultate kao i proračun celog sistema (bez redukcija) ali samo za stanje za koje je ekvivalent izveden (tj. osnovno stanje).

Sa primenom Ward-ovog ekvivalenta spoljašnjeg dela sistema, proračun tokova snaga u povezanim elektroenergetskim sistemima vrši se na isti način kao i za slučaj samostalnih sistema, s tim što se na model internog sistema doda spoljašnji ekvivalent.

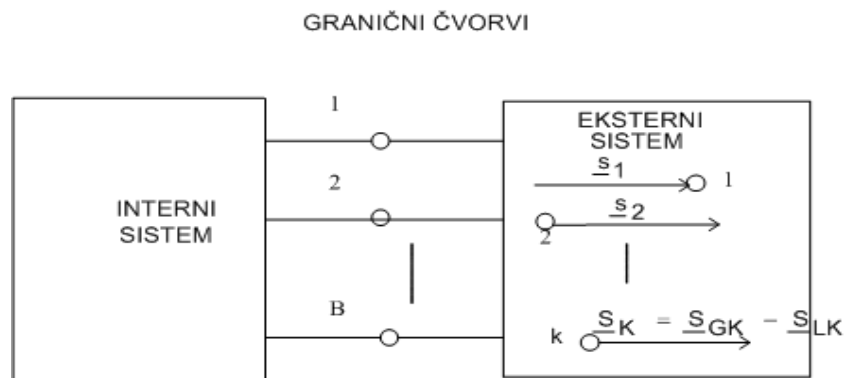
#### 4.1.2. Dimoov REI ekvivalent

Osnovna ideja REI ekvivalenta (Radial Equivalent Independent) je da se sva injektiranja u eksternim čvorovima uklone i grupišu u jednom ili više novih fiktivnih REI čvorova. Ovi REI čvorovi se zatim povežu na pasivne spoljne čvorove posredstvom fiktivnih grana, čije admitanse zavise od stanja eksterne mreže i uklonjenih injektiranja. Grupisana injektiranja se raspodele na REI čvorove preko tih fiktivnih radijalnih grana koje čine REI mrežu. Posle grupisanja, svi čvorovi sa nultim injektiranjem se eliminišu Gaussovom procesom eliminacije, čime se dobija mreža ekvivalentnih radijalnih grana koje povezuju granične i REI čvorove. Pri ovoj redukciji radna tačka eksternog sistema se ugrađuje u admitanse grana REI mreže što znači da posle redukcije kompletan REI ekvivalent zavisi ne samo od topologije i parametara eksterne mreže, već i od njene radne tačke [35].

Postoje tri osnovna koraka u procesu formiranja REI ekvivalenta :



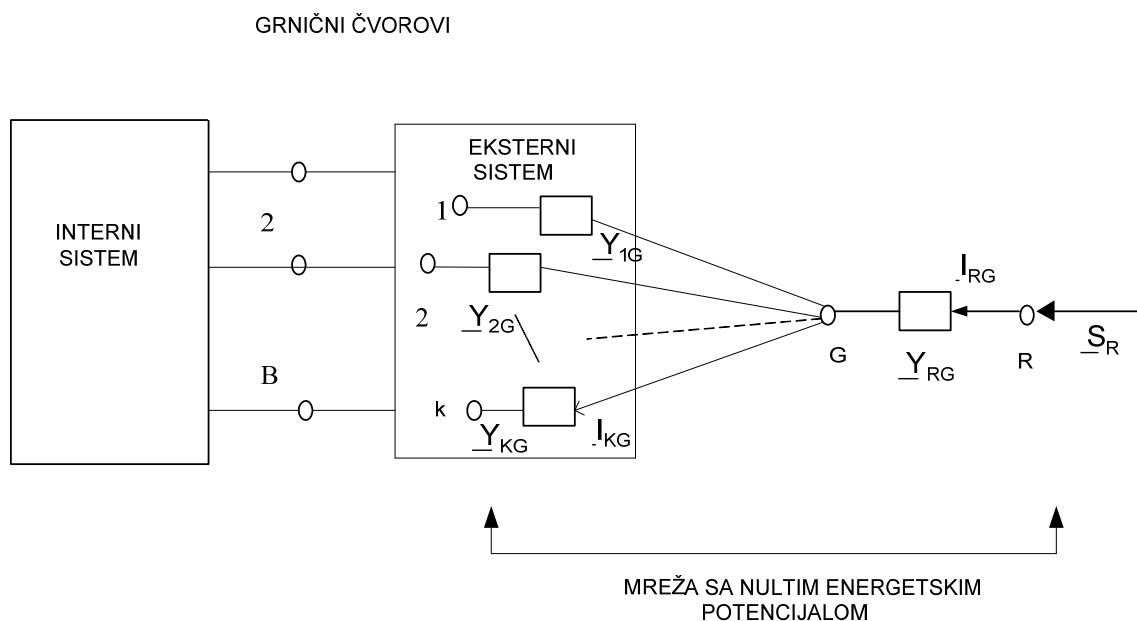
1) Ukloniti sva injektiranja iz svih čvorova k koji treba da se grupišu (slika 4.3a).



Slika 4.3.a.

2) Formirati REI mrežu koja polazi iz čvora G i priključiti je tim čvorovima k (slika 4.3b).  
Grupisati sva injektiranja u REI čvor R.

$$S_R = \sum_K S_K \quad (4.11)$$



Slika 4.3.b.

3) Eliminirati sve čvorove k i čvor G primenom Gausove metode eliminacije.

Vrednosti admitansi  $\underline{Y}_{KG}$  i  $\underline{Y}_{RG}$  u REI mreži se biraju na osnovu rešenog proračuna tokova snaga eksternog sistema, tako da su injektiranja u čvoru k iz REI mreže su egzaktno ista kao originalna injektiranja u rešenom proračunu tokova snaga. Konvencionalno se za bazni slučaj  $\underline{V}_G$  postavlja da bude nula (čvor G se bira na osnovu nultog energetskog bilansa). Onda su admitanse napona i struja sa slike 4.3b.

$$\underline{Y}_{KG} = \frac{S_K^*}{V_K^2} \quad \underline{I}_{KG} = \frac{S_K^*}{V_K} \quad \underline{I}_{RG} = \sum_K \underline{I}_{KG} \quad (4.12)$$

gde je:

- $\underline{S}_k = P_k + jQ_k$  - prividna snaga injektirana u čvoru  $k=1,2,\dots,N_E$  u eksternoj mreži u p.u.  
 $\underline{V}_k$  - fazor napona u čvoru  $k=1, 2,\dots, N_E$   
 $\underline{I}_{kG}$  - fazor struje koja teče kroz admitansu REI mreže  $\underline{Y}_{kG}$ , koja je jednaka injektiranoj struji u čvoru k.  
 $\underline{Y}_{kG}, \underline{Y}_{RG}$  - admitanse u REI mreži dobijene na osnovu nultog energetskog bilansa u tački G ( $\underline{V}_G=0$ )

S obzirom na relacije (4.12), može se napisati sledeća jednačina:

$$\frac{\underline{I}_{RG}^2}{\underline{Y}_{RG}} = \sum_k \frac{\underline{I}_{kG}^2}{\underline{Y}_{kG}} \quad (4.13)$$

Ponekad je poželjno da se za eksterni sistem formira više od jedne REI mreže. Grupisanje čvorova u REI mrežu može se bazirati na njihovoj jednorodnosti (svi PQ čvorovi idu zajedno na jednu, a svi PV čvorovi zajedno na drugu REI mrežu), zatim na njihovoj geografskoj bliskosti ili na osnovu nekog drugog kriterijuma.

Sa slike 4.3b, za spoljašnju mrežu se može napisati sledeća matrična jednačina:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{I}_R \\ \underline{I}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{EE} & \underline{Y}_{EG} & 0 & \underline{Y}_{EB} \\ \underline{Y}_{GE} & \underline{Y}_{GG} & -\underline{Y}_{GR} & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_{RG} & \underline{Y}_{RR} & 0 \\ \underline{Y}_{BE} & 0 & 0 & \underline{Y}_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_E \\ 0 \\ \underline{V}_R \\ \underline{V}_B \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

gde je:

$\underline{Y}_{EE}$  - submatrica sopstvenih admitansi čvorova eksternog sistema

$\underline{Y}_{EG}=\underline{Y}_{GE}$  - vektor - kolona čiji su elementi admitanse  $-\underline{Y}_{KG}$

$\underline{Y}_{EB}=\underline{Y}_{BE}$  - submatrica međusobnih admitansi između eksternih i graničnih čvorova

$\underline{Y}_{GG} = \underline{Y}_{RG} + \sum_k \underline{Y}_{kG}$  - sopstvena admitansa čvora G (slika 4.3.b)

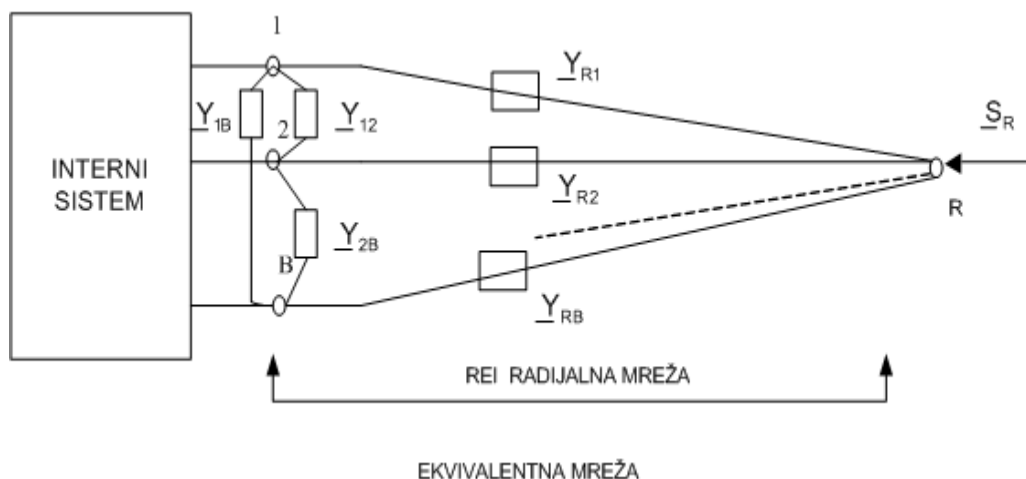
$\underline{Y}_{RR}=\underline{Y}_{RG}$  - sopstvena admitansa čvora R (slika 4.3.b)

$\underline{Y}_{BB}$  - submatrica sopstvenih admitansi graničnih čvorova

Dimooov REI ekvivalent sa jednim fiktivnim čvorom (slika 4.3c) se dobija primenom postupka Gausove eliminacije na sistem jednačina (4.14). Na taj način se eliminišu svi eksterni čvorovi i čvor G, pa se iz jednačine (4.14) dobija:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}'_{RR} & \underline{Y}'_{RB} \\ \underline{Y}'_{BR} & \underline{Y}'_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_B \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

pri čemu se submatrice admitansi  $\underline{Y}'_{RR}$ ,  $\underline{Y}'_{RB}$ ,  $\underline{Y}'_{BR}$ ,  $\underline{Y}'_{BB}$  određuju u postupku Gausove eliminacije pomenutih čvorova.



Slika 4.3.c.

Slika 4.3. Konstrukcija REI ekvivalenta sa jednim fiktivnim čvorom

REI ekvivalent je razvijen kao ekvivalent prilagođen određenom stanju i rešenom proračunu tokova snaga. Njegova tačnost zavisi i od načina grupisanja čvorova. REI mreža stvara nove povezne grane, pa je REI ekvivalentna mreža gušća nego originalna. Admitanse grana REI mreže mogu imati vrednosti koje se znatno razlikuju od uobičajenih vrednosti za realne grane. Mogu se u njima pojaviti negativni otpori i redni kapaciteti.

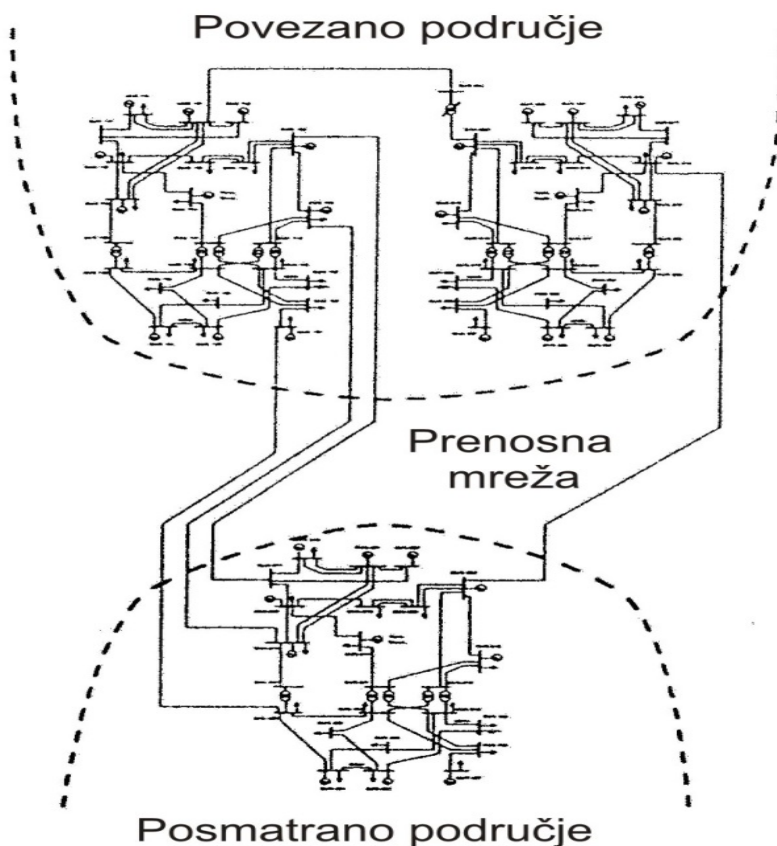
#### 4.2. Redukcija veličine sistema kod analize pouzdanosti

Kao što je pomenuto, kada se radi sa interkonekcijama biće korišćene tehnike za analizu pouzdanosti povezanih sistema. Takvi sistemi su obično mnogo veći od nacionalnih ili regionalnih. Ovo je, na primer, slučaj u Evropi i Severnoj Americi gde su najveći energetske sistemi interkonektivni i često rade kao članovi "power pool"-a.

Jedna od glavnih teškoća kod analiza pouzdanosti realnih interkonektivnih sistema je kompjutersko vreme potrebno za analizu ogromnog broja mogućih situacija. Zaista, ogromna veličina sistema (broj proizvodnih jedinica i komponenti prenosnog sistema), kao i veliki skup višestrukih ispada utiču na pouzdanost sistema.

Dodatno, u slučaju interkonekcija, analize pouzdanosti trebalo bi da procene uticaj tehničkih, ekonomskih i političkih ugovora na performanse pouzdanosti interkonektivnih energetske sistema. Ovo je zbog toga što su interkonektivni tokovi snaga superponirani na tokove sistema i mogu prouzrokovati bitne probleme za pouzdanost prenosne mreže celog interkonektivnog sistema. Prema tome procena pouzdanosti celog interkonektivnog sistema zahteva ogromne kompjuterske resurse što može dovesti do toga da ove analize postanu praktično nemoguće.

Način da se ovaj problem prevaziđe je da se analiza pouzdanosti fokusira na sistem ili područje od interesa (Area of Interest, AI) tj. na sopstveni sistem. Sopstveni sistem se predstavlja detaljnije, dok ostali deo interkonektivnog sistema, interkonektivno područje (Interconnected Area, IA), eksterni sistem (ES) modeluje se preko ekvivalenta (vidi sliku 4.4). Ovi pristupi omogućavaju razumnu redukciju proračunskog vremena obezbeđujući da je ekvivalent po veličini mnogo manji nego ceo eksterni sistem.



Slika 4.4. Primer podele interkonektivnog sistema

Koncept razvoja i korišćenje ekvivalenata u studijama energetskog sistema nije novost i primenjeno je u mnogim studijama o sistemu. Postoje aplikacije koje rade sa konceptom ekvivalenta sa determinističke tačke gledišta. Takve aplikacije podrazumevaju analize stacionarnog stanja sistema (redukcija mreže, proračun tokova snaga), kao i analize dinamičkih aspekata (analiza stabilnosti). Prema tome, osnovna karakteristika ekvivalenata energetskog sistema je da se odnose na primenu za koju su oni razvijani i na područje za koje se namerava njihova primena.

Razvoj procedure za ekvivalent pouzdanosti koji će biti korišćen u studijama interkonektivnih kompozicija energetskih sistema zavisice od

- dominantne uloge prema kojoj su ekvivalenti modelovani, kao što su zajednička pomoć između interkonektivnih sistema u havarijskim situacijama, dnevni ili sezonski transferi snage i energije u cilju redukcije troškova goriva, godišnje ugovorno napajanje snagom i energijom u cilju rešavanja nedostataka generatorskih kapaciteta u jednom ili više sistema i slično

- ciljeva studija pouzdanosti koji se odnose na procenu pouzdanosti samo jednog od interkonektivnih sistema, procena interkonektivne mreže i slično.

Ovi faktori bitno utiču na definiciju i modelovanje i područja od interesa, tj. sopstvenog sistema i interkonektivnog područja, tj. eksternog sistema. U narednom poglavlju date su karakteristike ekvivalenata u analizama pouzdanosti EES-a.

### **4.3. Ekvivalenti u oblasti pouzdanosti**

#### **4.3.1. Uvod**

Osnovni cilj razvoja ekvivalenata pouzdanosti je redukcija velike i složene energetske mreže u jednostavniji model koji zadržava sve bitne informacije koje su važne za sprovođenje daljih analiza pouzdanosti.

Međutim, kao što je pomenuto u poglavlju 4.2, kada se proučava veliki povezan energetska sistem neophodno je da se razviju ekvivalentni modeli za određen deo ovih sistema kako bi se značajno redukovalo kompjutersko vreme pri, čemu se čuva zahtevana tačnost preko ciljne funkcije u analizama pouzdanosti (dugoročne odluke planiranja, selekcija odgovarajućih operativnih strategija, itd.).

U prošlosti su predlagane različite kompjuterske metode za proračun različitih parametara pouzdanosti interkonektivne mreže [24, 27-29, 30], koje nisu uzimale u razmatranje prenosne puteve koji postoje u svakom interkonektivnom energetska sistem. Ova činjenica određuje glavne aspekte i potrebe sistema koje moraju da budu uvažene prilikom određivanja ekvivalenta pouzdanosti za susedni sistem.

Na razvoj odgovarajućih ekvivalentnih modela za područje od interesa (IA) vrlo je uticala sistemska operativna filozofija u okviru uslova ispada. Ako se područje od interesa nalazi u havarijskom stanju onda će ekvivalent pouzdanosti za interkonektivno područje biti različit od onog u kome se područje od interesa nalazi u normalnom radnom stanju. U slučaju samostalnog sistema strategija prekidanja napajanja ograničavala se samo na napajanje u području od interesa. U slučaju povezanih sistema efekat će zavisi od toga da li će uticaj ispada biti lokalizovan u području gde se takav ispad pojavljuje ili će biti distribuiran u susedna područja.

Drugi bitan faktor koji zahteva posebnu pažnju je informacija da ekvivalent pouzdanosti 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. Objedinjavanje prenosnih kapaciteta i proizvodnih kapaciteta u analizama pouzdanosti je ključni zadatak u svim primenama [24, 27, 28, 30, 36, 37].

Konačno, metoda za razvoj ekvivalentnog modela pouzdanosti zavisiće od različitih interkonektivnih zadataka koji zavise i od ciljeva procene pouzdanosti u svakom energetska sistem u toku proučavanja. Ovo znači da tehnike modelovanja tokova snaga moraju biti u skladu sa energetska balansom interkonektivnog i sistema od interesa. Poznate su četiri metode za ekvivalentiranje.

Proračuni za gore navedene zahteve i faktore, kao i modelovanje uticaja kompleksne topologije mreže interkonektivnog područja na tehničke performanse posmatranog sistema, koriste različite tehnike ekvivalentiranja koje se zasnivaju na sledećim metodama:

- Tabela graničnih kapaciteta (*Capacity Margin Tables*)
- Redukovana matrica prenosa ("Reduced Transition Matrix")
- REI ekvivalent
- Grupisanje čvorova (*Bus Grouping*)

Metoda CMT (*Capacity Margin Tables*) susedni sistem 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 EES.

Susedni EES se ekvivalentiraju i primenom poznatih REI (*Radial Equivalent Independent*) ekvivalenta 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.

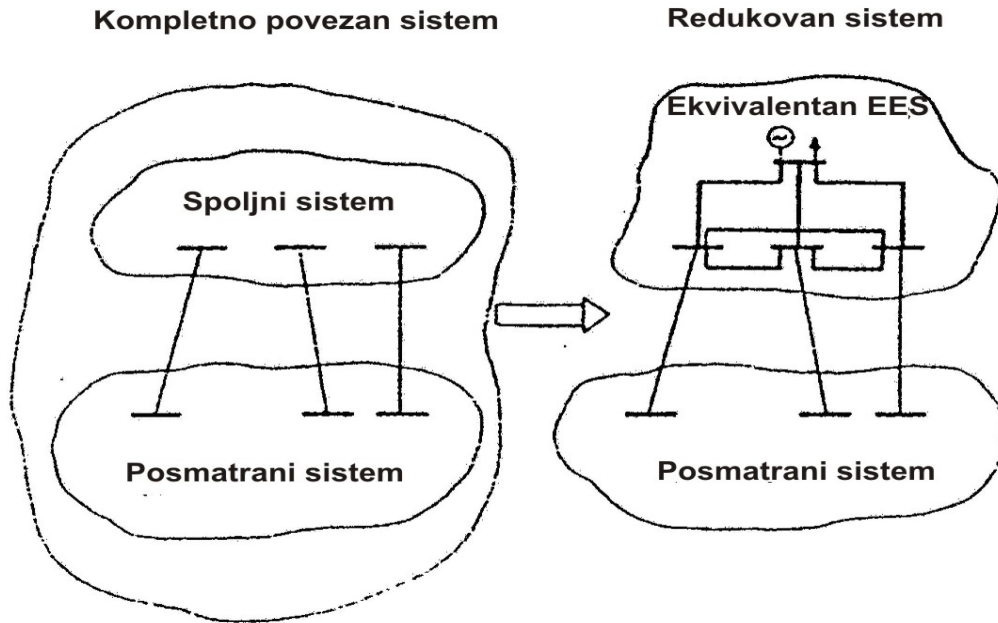
Metoda BG (*Bus Grouping*) izvore susednog EES grupiše prema njihovom učešću u snagama koje teku po interkonektivnim vodovima i tako ovaj sistem približno zamenjuju preko nekoliko grupa generatora.

Prva dva metoda ekvivalentiranja namenjena su slučajevima u kojima se procena pouzdanosti interkonektivnog energetskeg sistema izvršava primenom odgovarajućih direktnih probabilističkih proračuna pouzdanosti.

REI ekvivalent metoda je bila eksplicitno zamišljena i razvijena za Monte Karlo aplikacije, dok je poslednji bio originalno formulisan u okvirima determinističkih optimizacionih procedura, ali može se koristiti i za probabilističke aplikacije kada tokovi snaga kroz dati interkonektivni interfejs moraju biti proračunati u ekonomsko-tehničkim procenama pouzdanosti sopstvenog sistema.

#### **4.3.2. Tehnika REI ekvivalenta**

U [40] predlažu se ekvivalenti pouzdanosti sa namerom da budu korišćeni u Monte-Karlo simulaciji (i sekvencijalnih i nesekvencijalnih tehnika) za studija procene pouzdanosti složenih energetskih sistema. Ovaj pristup ima sledeće osnovne karakteristike (slika 4.4):



Slika 4.4. REI ekvivalent za interkonektivno područje

- mrežni ekvivalent za prenosni sistem interkonektivnog područja sastoji se od graničnih čvorova interkonektivnog, eksternog sistema, koji definišu krajeve interkonektivnih kola koja pripadaju interkonektivnom području
- dodat je pomoćni referentni čvor koji je povezan sa graničnim čvorovima interkonektivnog područja preko fiktivnih vodova ili transformatora čija je impedansa proračunata prema tehnici REI ekvivalenta
- u jedinstvenom pomoćnom čvoru ekvivalenta povezani su i proizvodnja i potrošnja eksternog sistema.

Mrežni ekvivalent može biti proračunat primenom tehnike redukovane čvorne matrice admitansi koja je na pogodan način modifikovana i kao takva može biti inkorporirana u model DC tokova snaga prenosne mreže.

Izvršavaju se sledeći osnovni koraci kreiranja ekvivalenta:

- proračun DC tokova snaga za kompletan sistem za datu referentnu situaciju u pogledu opterećenja, mrežnih komponenti i angažovanja generatora u svakom čvoru
- definisanje graničnih čvorova između posmatranog sopstvenog sistema i interkonektivnog sistema, eksternog sistema
- dobijanje matrice admitansi za interkonektivni sistem iz matrice kompletnog sistema i odgovarajuće proširivanje i modifikovanje

- proračun redukovane matrice interkonektivnog sistema viđene sa strane graničnih čvorova.

Proizvodnja i opterećenje ekvivalentnog modela interkonektivnog sistema mogu biti razvijeni primenom jedne od sledeće dve procedure:

- 1) Detaljno predstavljanje je primenjeno preko vezivanja svih proizvodnih jedinica i opterećenja interkonektivnog područja u pomoćnom referentnom čvoru i isključivanjem onih konektovanih u granične čvorove koji su eksplicitno modelovani. Moguće je modelovati neraspoloživost i redosled održavanja svake generatorske jedinice, varijacije preko godine za svako opterećenje sistema i redosled prioriteta isključenja opterećenja između različitih tačaka opterećenja sistema u havarijskim uslovima.
- 2) Predstavljanje generatorskih kapaciteta razmatranjem različitih sedmičnih distribucija i uvažavanjem efekata održavanja jedinica u svakoj sedmici godine. Opterećenje je predstavljeno ili godišnjim ili sedmičnim krivama trajanja opterećenja.

Primenjene tehnike ekvivalentiranja daju vrlo zadovoljavajuće rezultate [40], ako je mreža interkonektivnog područja dobro obuhvaćena i dominantan tok snaga između sopstvenog i eksternog sistema ima isto usmerenje u različitim simuliranim situacijama opterećenja.



## 5. MATEMATIČKI MODEL MREŽNOG DC EKVIVALENTA

### 5.1. Osnovni principi predloženog DC ekvivalenta

U sledećem poglavlju opisuje se metodologija razvoja DC mrežnog ekvivalenta i daju se osnovni principi primene u ekvivalentiranju složenih interkonektivnih sistema u analizama pouzdanosti. Razmatraju se dva međusobno povezana interkonektivna elektroenergetska sistema, sistem od interesa i susedni. Za sistem od interesa sprovodi se detaljna analiza parametara pouzdanosti. U cilju smanjenja kompjuterskih zahteva, susedni interkonektivni sistem je prezentovan DC mrežnim ekvivalentnim modelom koji ima jednostavnu strukturu i redukovan broj stanja. Na osnovu poređenja parametara pouzdanosti kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i kada je zamenjen razvijenim ekvivalentom predlaže se korišćenje uprošćenog modela u analizama pouzdanosti.

Predloženi ekvivalent je modifikovani REI ekvivalent u kome se potrošnja susednog EES-a, umesto da je koncentrisana u jednom fiktivnom čvoru, raspodeli među zadržanim čvorovima strogo u okviru metodologije za eliminaciju nekarakterističnih čvorova mreže. Pri tome bi se u analizi raspoloživih viškova susednog elektroenergetskog sistema 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.

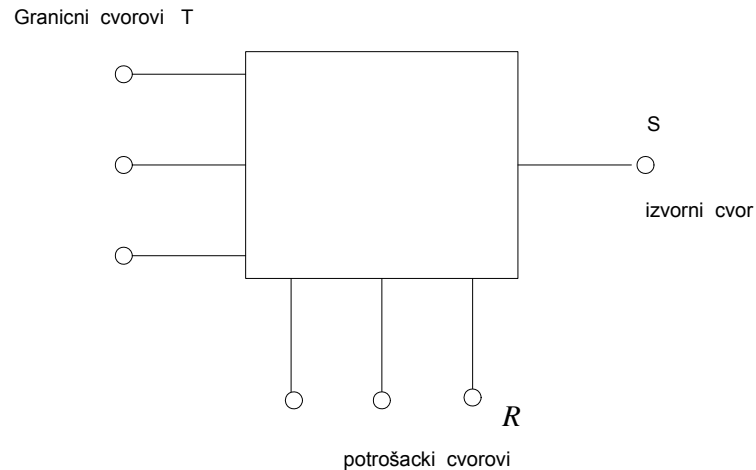
Predloženi mrežni ekvivalent dobijen je paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova kako bi se dobio jedinstven izvorni čvor. Mreža je konstruisana na takav način da je transformisana u mrežni ekvivalent koji sadrži samo ekvivalentni izvorni čvor i interkonektivne čvorove prema sistemu koji se istražuje, tj. sistemu od interesa. Broj relevantnih stanja ekvivalentnog izvora je ograničen time da obezbeđuje podršku u havarijskim situacijama susednom sistemu, ne prelazeći ugovorenu vrednost razmene ili maksimalnu prenosnu snagu interkonektivnih prenosnih dalekovoda. Unapređenje u predloženom ekvivalentu je da su prekoračenja u ekvivalentiranom modelu, vezana za ispade prenosnih vodova i generatora u susednom sistemu, modelovana preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko modifikovanja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja. Ekvivalentna mreža je formirana na takav način da ima jednostavnu strukturu i redukovan broj stanja u poređenju sa originalnom mrežom, što bitno redukuje proračunske probleme u proceni pouzdanosti sistema od interesa.

### 5.2. Konstrukcija matematičkog modela mrežnog DC ekvivalenta

Najpre razmotrimo dva interkonektivna elektroenergetska sistema, recimo sistem od interesa (AI) i interkonektivni sistem (IA). Sistem od interesa je područje za koje se sprovodi detaljna analiza parametara pouzdanosti. U cilju smanjenja kompjuterskih zahteva, interkonektivni sistem će biti prezentovan odgovarajućim aproksimativnim modelom, koji će imati jednostavnu strukturu i redukovan broj stanja.

Sistem koji treba ekvivalentirati, interkonektivni sistem, može se posmatrati kao sistem koji sadrži izvorne, potrošačke i granične čvorove (slika 5.1). Potrebno je uočiti granične čvorove sistema koji se modeluje sa susednim sistemom i to su čvorovi

označeni sa T, kao i potrošačke čvorove modelovanog sistema, koji su označeni sa R. Svi izvorni čvorovi grupišu se u jedan fiktivni izvorni čvor označen sa S kao na slici 5.1.



Slika 5.1. Modifikovan eksterni sistem

U cilju konstrukcije DC ekvivalenta za interkonektivno područje, tj. za eksterni sistem koji se zamenjuje ekvivalentom, biće primenjen sledeći pristup:

1. Formira se matrica susceptansi za eksterni sistem uključujući čvorove preko kojih su interkonektivni vodovi povezani sa sistemom od interesa. Ovi vodovi nisu uključeni u ekvivalentan model eksternog sistema. Interkonektivni vodovi se razmatraju u potpunosti, tako da se njihovi parametri ne ekvivalentiraju.
2. Potrebno je povezati sve izvorne čvorove eksternog sistema u cilju dobijanja jednog izvornog čvora. Modelovanje ekvivalentnih stanja izvornog čvora biće detaljno opisano u poglavlju 5.4.
3. Potrebno je odrediti matricu susceptansi za formirani sistem. Ova matrica se dobija iz matrice susceptansi originalne mreže spoljnjeg, interkonektivnog sistema na sledeći način:
  - međusobna suscepntansa ekvivalentnog izvornog čvora sa nekim drugim mrežnim čvorom jednaka je sumi međusobnih susceptansi originalnih izvornih čvorova sa datim čvorom
  - sopstvena susceptansa ekvivalentnog izvornog čvora jednaka je sumi sopstvenih susceptansi originalnih izvornih čvorova
  - sopstvene susceptanse preostalih mrežnih čvorova i međusobne susceptanse između njih ostaju iste kao u originalnoj mreži

4. Koristeći matricu susceptansi formiranu u koraku 3, elementarnim matričnim proračunom određuju se parametri ekvivalentne mreže za eksterni sistem koja sadrži samo ekvivalentni izvor S i interkonektivne granične čvorove T.

Za aktivna injektiranja u svim čvorovima eksternog sistema koji se ekvivalentira, može se napisati sledeća matrična jednačina

$$[P] = [B][\delta] \quad (5.0)$$

gde su:

- $[B]$  - matrica susceptansi svih čvorova susednog sistema
- $[P]$  - vektor aktivnih injektiranja u svim čvorovima susednog sistema
- $[\delta]$  - vektor uglova fazora napona u čvorovima susednog sistema

Kada ovu matričnu jednačinu razdvojimo na izvorne i granične čvorove, kao karakteristične, i potrošačke čvorove, možemo napisati u sledećoj formi:

$$\begin{bmatrix} P_S - P_{SL} \\ -[P_T] \\ -[P_R] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_S & [B_{ST}] & [B_{SR}] \\ [B_{TS}] & [B_{TT}] & [B_{TR}] \\ [B_{RS}] & [B_{RT}] & [B_{RR}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_S \\ [\delta_T] \\ [\delta_R] \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Indeksi S, R, T odnose se na ekvivalentni izvorni čvor S, na interkonektivne granične čvorove T i preostale, tj. potrošačke čvorove R eksternog sistema.

U (5.1)  $P_S - P_{SL}$  predstavlja sumu aktivnih injektiranja u ekvivalentnom izvornom čvoru koja se dobija kao suma generisanja u svim izvornim čvorovima  $P_S$  od koje se oduzima potrošnja na tim izvornim čvorovima  $P_{SL}$ . Matrica  $[P_T]$  predstavlja eksplicitno zadate vrednosti aktivnih injektiranja u graničnim čvorovima, a matrica  $[P_R]$  predstavlja aktivne snage u potrošačkim čvorovima. U (5.1) uočava se da postoje sledeće relacije između submatrica:

$[B_{TS}] = [B_{ST}]$  - odnose se na susceptanse između ekvivalentnog izvornog čvora S i graničnih čvorova T

$[B_{RS}] = [B_{SR}]$  - odnose se na susceptanse između ekvivalentnog izvornog čvora S i potrošačkih čvorova R

$[B_{RT}] = [B_{TR}]$  - odnose se na susceptanse između graničnih čvorova T i potrošačkih čvorova R

Prema jednačini (5.1) imamo:

$$[\delta_R] = -[B_{RR}]^{-1} ([P_R] + [B_{SR}][\delta_T] + [B_{TR}][\delta_R]) \quad (5.2)$$

Korišćenjem (5.2), eliminiše se  $[\delta_R]$  iz odgovarajućih izraza za aktivna injektiranja u izvornom i interkonektivnim čvorovima, prema jednačini (5.2). Posle elementarnih svođenja dobija se sledeća matrična jednačina

$$\begin{bmatrix} P_S - P_{ESL} \\ -[P_{TE}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ESS} & [B_{EST}] \\ [B_{ETS}] & [B_{ETT}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_S \\ [\delta_T] \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

gde je :

$$P_{ESL} = P_{SL} - [B_{SR}][B_{RR}]^{-1}[P_R] \quad (5.4)$$

$$[P_{TE}] = [P_T] - [B_{TR}][B_{RR}]^{-1}[P_R] \quad (5.5)$$

$$B_{ESS} = B_{SS} - [B_{SR}][B_{RR}]^{-1}[B_{RS}] \quad (5.6)$$

$$[B_{EST}] = [B_{ST}] - [B_{SR}][B_{RR}]^{-1}[B_{RT}] \quad (5.7)$$

$$[B_{ETS}] = [B_{EST}]^T \quad (5.8)$$

$$[B_{ETT}] = [B_{TT}] - [B_{TR}][B_{RR}]^{-1}[B_{RT}] \quad (5.9)$$

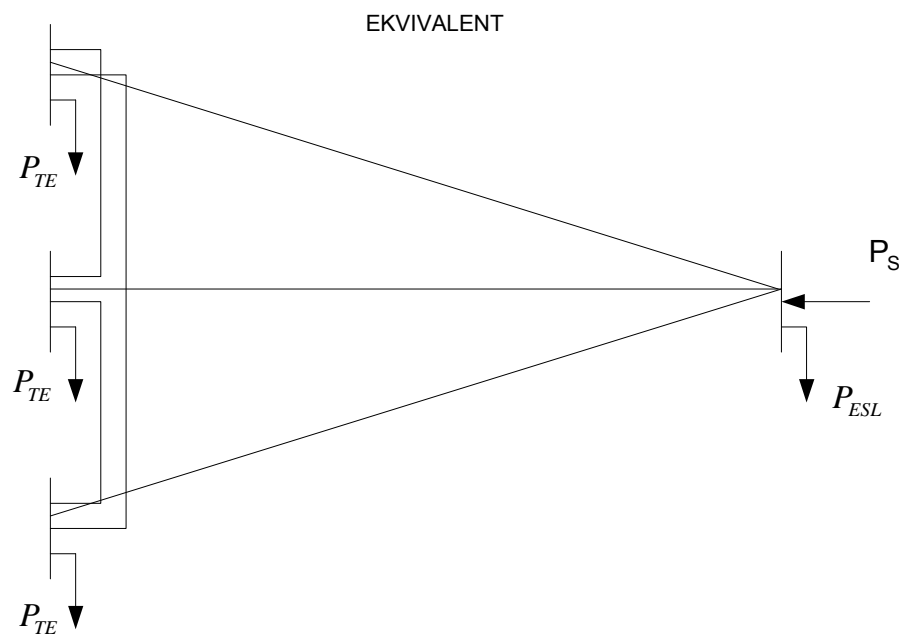
Jednačina (5.3), zapravo definiše ekvivalent mreže eksternog interkonektivnog sistema. Potrošački čvorovi R su eliminisani, a u jednačini (5.3) figurišu samo čvorovi T, interkonektivni, i S- ekvivalentni izvorni čvor. Ovo je i bio cilj da se dobije jednostavna mrežna struktura koja će u sebi sadržati jedinstven izvorni čvor i granične čvorove prema interkonektivnim vodima.

Elementi matrice  $[B_{EST}]$  su negativne susceptanse grana koje povezuju granične interkonektivne čvorove T sa izvornim čvorom, dok su nedijagonalni elementi matrice  $[B_{ETT}]$  negativne susceptanse grana između graničnih interkonektivnih čvorova T.

Leva strana jednačine (5.3), predstavlja aktivna injektiranja u karakterističnim (izvornom i graničnim) čvorovima ekvivalentne šeme. Jednačine (5.4) i (5.5) daju ekvivalentna opterećenja u ekvivalentnom izvornom i graničnim, interkonektivnim čvorovima, respektivno. Analiziranjem jednačine (5.4) i (5.5) uočava se da aktivno injektiranje u karakterističnim čvorovima ekvivalentne šeme  $P_{ESL}$  i  $[P_{TE}]$  se sastoji od prvog dela koji predstavljaju eksplicitno zadate vrednosti aktivne snage, u ekvivalentnom izvornom čvoru  $P_{SL}$  i eksplicitno zadata vrednost snage u interkonektivnim graničnim čvorovima  $[P_T]$ .

Snaga potrošnje susednog sistema  $[P_R]$  raspoređuje se na sve karakteristične čvorove ekvivalente šeme, tj. šeme koja sadrži granične čvorove i ekvivalentni izvorni čvor, i to na sledeći način. U ekvivalentnom izvornom čvoru snaga potrošnje susednog sistema se raspoređuje u odnosu definisanom proizvodom matrica susceptansi između izvornog čvora i potrošačkih čvorova i između potrošačkih čvorova  $[B_{SR}][B_{RR}]^{-1}[P_R]$ , a u

interkonektivnim, graničnim čvorovima sa vrednošću definisanom proizvodom matrica susceptansi između graničnih i potrošačkih i između potrošačkih čvorova  $[B_{TR}][B_{RR}]^{-1}[P_R]$ . Ovo raspoređivanje snage potrošnje susednog sistema ne samo u jednom ekvivalentnom, izvornom, čvoru već i na granične čvorove je osnovno unapređenje REI ekvivalenta. Ovim se uspostavljaju realniji tokovi snaga na interkonektivnim dalekovodima kao kada je susedni spoljni sistem modelovan u potpunosti. Tokovi snaga opisani u ovom ekvivalentnom modelu mogu se predstaviti kao na slici 5.2.



Slika 5.2. Modifikovani REI ekvivalent sistema u kome je snaga potrošnje raspoređena u svim karakterističnim čvorovima

### 5.3 Modelovanje simultanih ispada generatora i vodova u interkonektivnom sistemu

Kako bi se poboljšao ekvivalent susednog sistema, tj. kako bi se datim ekvivalentom obuhvatila i stanja ispada u sistemu koji se ekvivalentira, u ovom radu je uzeta u razmatranje i promena u susednom sistemu. Na ovaj način se za svako stanje ispada i generatorskih jedinica i vodova kreira ekvivalent prema opisanoj metodologiji. Moglo bi se reći da je formiran na neki način dinamički ekvivalent pouzdanosti. Znači, predloženi ekvivalent nije samo relevantan za jedno, osnovno stanje sistema za koje je prvobitno izveden, već je dopunjen i sa dodatnim stanjima ispada. Može se reći da je ovaj pristup još jedno od unapređenja do sada razvijanih ekvivalenata. U ovom poglavlju razmatra se samo susedni sistem, tj. sistem za koji se razvija ekvivalent.

Simultani ispadi generatorskih jedinica i prenosnih vodova uzimaju se u obzir na sledeći način.

1. Kompletan model susednog, interkonektivnog (IA) sistema se proširuje uvođenjem maksimalne ugovorene snage ili dozvoljenog toka snage kao dodatnog opterećenja (potrošnje) na interkonektivnim čvorovima sa sistemom (AI). Ovako modifikovani (IA) će se nadalje, samo u ovom segmentu proračuna, tretirati odvojeno od sopstvenog, (AI) sistema. Zapravo, na svaki od interkonektivnih čvorova se injektira dodatna potrošnja, maksimalna ugovorena snaga havarijske ispomoći između sistema (E), koja se raspoređuje na granične čvorove. Sa ovako definisanim dodatnim opterećenjem vrši se ispitivanje spoljnog sistema.
2. Svi relevantni simultani ispadi generatorskih jedinica i prenosnih vodova se ispituju u proceni pouzdanosti susednog sistema (IA) opisanog u koraku 1. Ukoliko je deficitarna situacija prouzrokovana prekoračenjem na nekom vodu potrebno je eliminisati prekoračenje redukovanjem dodatog opterećenja (potrošnje) na interkonektivnim čvorovima. Zatim se izračunavaju verovatnoće i učestanosti ovih situacija sa prekoračenjima, kao i redukcija dodatog opterećenja. Ako situacija ne može biti popravljena smanjenjem dodatog opterećenja prekoračenje koje se razmatra biće odbačeno kao indikacija interne nepouzdanosti susednog sistema (IA) i u tom slučaju se ne može očekivati podrška sopstvenom (AI) sistemu. U ovom koraku je bitno zabeležiti verovatnoće i učestanosti deficitarnih stanja, stanja simultanih ispada vodova i generatora, kao i vrednost redukcije dodatne potrošnje na interkonektivnim graničnim čvorovima.
3. Za sve relevantne deficitarne situacije iz koraka 2 proračunava se mrežni DC ekvivalent, po istom principu kao u poglavlju 5.2, ali za razmatranu situaciju, odnosno topologiju. Za svako stanje mreže se računaju susceptanse ekvivalentne šeme koje odgovaraju zadatoj ispitivanoj topologiji. Ovo je neka vrsta dinamičkog ekvivalenta. Zapravo, za svaku nastalu situaciju sa definisanim ispadima, proračunavaju se parametri ekvivalenta po principima primenjenim za osnovno stanje, tj. kada su svi elementi u ispravnom stanju.
4. Definisanje finalnog DC mrežnog ekvivalenta, koji uključuje efekte ispada koji se razmatraju obuhvata se preko težinskih faktora susceptansi ekvivalentne šeme uzimanjem u obzir verovatnoća ovih zabeleženih deficitarnih situacija.

$$B_w = \sum_i p_i B_i + B(1 - \sum_i p_i) \quad (5.10)$$

Izraz (5.10) se primenjuje na sve susceptanse ekvivalentne šeme. U jednačini (5.10)  $B_w$  je susceptansa konačne ekvivalentne šeme sa obuhvaćenim težinskim uticajima istovremenih ispada vodova i generatorskih jedinica, pri čemu je:

$i$  - indeks svih deficitarnih situacija uzrokovanih ispadima vodova i generatora u susednom sistemu

$p_i$  - verovatnoća deficitarnih situacija

$B_i$  susceptansa za situaciju  $i$

$B$  - je susceptansa šeme kada ispadi vodova nisu razmatrani, prvobitno proračunatog ekvivalenta u osnovnom stanju sistema.

5. Uzimanjem u obzir efekata defektnih situacija uzrokovanih ispadima vodova preko težinskih faktora može se formirati jedno ekvivalentno generatorsko stanje. Raspoloživo generisanje u ovom stanju je

$$P_{Ee} = \sum_i p_i (L_B + L_{Ti}) / \sum_i p_i \quad (5.11)$$

U jednačini (5.11) kao ranije,  $L_B$  je ukupna potrošnja susednog sistema, a  $L_{Ti}$  je ukupna snaga dodata na krajevima interkonekcije koja se može predati sopstvenom sistemu u razmatranoj deficitarnoj situaciji  $i$  prouzrokovanoj ispadom vodova ili generatora  $i$  vodova. Na ovaj način dobija se jedinstveni mrežni ekvivalent koji modeluje sve deficitarne situacije uzrokovane istovremenim ispadima vodova i generatora.

Verovatnoća i učestanost ekvivalentnog stanja generatora kojom se obuhvataju razmatrane deficitarne situacije računaju se primenom izraza

$$P_{Ee} = \sum_i p_i \quad (5.12)$$

$$f_{Ee} = \sum_i \lambda_i p_i \quad (5.13)$$

Ovde  $\lambda_i$  označava intenzitet napuštanja razmatranog deficitarnog stanja  $i$ .

Na ovaj način, redukcije viškova snage koju obezbeđuje susedni, interkonektivni sistem zbog ispada vodova ili zbog ispada kombinacije vodova i generatorskih jedinica, su obuhvaćene preko jednog dodatnog stanja ekvivalentnog izvora mrežnog ekvivalenta i preko korekcije mrežnih susceptansi ekvivalenta. Ovi proračuni će biti sprovedeni na svim test primerima, na Garverovom, IEEE RTS sistemu i na realnom ekvivalentiranom sistemu Srbije. Međutim, biće pokazano da korekcije mrežnih susceptansi ekvivalenta imaju vrlo mali efekat na analizirane parametre pouzdanosti, pa se u proračunu koraci 3 i 4 mogu izostaviti u proračunskoj proceduri u cilju pojednostavljena proračuna.

#### 5.4. Stanja ekvivalentnog modela

Prostor vektora stanja susednog sistema sastoji se od sledećih stanja:

1. Sva stanja sa raspoloživim viškovima proizvodnje, koji nisu manji od maksimalno dozvoljene snage koja može biti prenesena u sopstveni sistem preko interkonektivnih vodova spojena su u jedno stanje. Ova maksimalno dozvoljena snaga  $E$  je ukupno opterećenje koje se može preneti preko interkonektivnih vodova uzimajući u obzir njihov kapacitet ili je to dogovorena maksimalna ispomoć sopstvenom sistemu.

Zapravo, sva stanja izvora susednog sistema u kojima je raspoloživa snaga izvora ovog sistema za  $E$  veća od ukupne snage potrošnje susednog sistema zamenjuju se jednim ekvivalentnim stanjem. Verovatnoća ovog stanja jednaka je zbiru verovatnoća svih stanja izvora susednog sistema kod kojih je zadovoljen pomenuti uslov. Ekvivalentni intenzitet napuštanja ovog stanja jednak je zbiru intenziteta sa kojim se ovo stanje napušta zbog ispada nekih od izvora. Raspoloživa snaga susednog sistema je zbir

dogovorene maksimalne ispomoći E i ukupne snage potrošnje susednog sistema. Ovo stanje ekvivalentnog izvora se definiše kao gornja granica.

2. Stanja u kojima su raspoloživi viškovi generisanja manji od maksimalne snage koja se može preneti u sopstveni sistem formiraju prostor stanja. To su stanja u kojima je raspoloživa snaga izvora veća od ukupne snage potrošnje susednog sistema, a manja od zbira ove snage i ugovorene havarijske ispomoći E modeluju se pojedinačno. Ukoliko neka od ovih stanja imaju iste viškove proizvodnje, ova stanja se grupišu u jedno ekvivalentno stanje. U svakom pojedinačnom slučaju snaga susednog sistema jednaka je zbiru ukupne potrošnje susednog sistema i raspoložive snage za ispomoć.

U ovoj grupi su stanja koja se odnose na ispade generatorskih jedinica, kao i ekvivalentno stanje koje modeluje efekte uzrokovane simultanim kvarovima generatorskih jedinica i prenosnih vodova, što je detaljno objašnjeno u poglavlju 5.3.

3. Obično, ugovorena havarijska podrška ne obavezuje susedni sistem da pruža podršku isporuke sopstvenom sistemu ukoliko ove akcije prouzrokuju deficit u susednom sistemu. Prema tome, stanja susednog sistema sa negativnim viškovima generisanja se ne uzimaju u razmatranje, jer oni nemaju efekat na pouzdanost sopstvenog sistema. Ovo stanje ekvivalentnog izvora je definisano kao donja granica.

Verovatnoća i učestanost prethodno opisanih stanja ekvivalentnog mrežnog modela se računaju na sledeći način

$$P_s = \sum_i P_{si} \quad (5.14)$$

$$f_s = \sum_i \left( P_{si} \sum_j \lambda_{ij} \right) \quad (5.15)$$

U jednačinama (5.14) i (5.15)  $P_{si}$  su verovatnoće stanja  $i$  povezanih u stanje sistema  $s$  i  $\lambda_{ij}$  je intezitet napuštanja stanja  $s$  iz stanja  $i$ . Indeks  $i$  se kreće kroz sva stanja povezana u stanje  $s$  dok se indeks  $j$  odnosi na stanja susednog sistema koja nisu uključena u stanje  $s$  u kojima se mogu pojaviti prelazi iz stanja  $i$ .

## 5.5. Proračun pouzdanosti interkonektivnih sistema

Kod povezanih interkonektivnih sistema u proračunu pouzdanosti moraju se uzeti u obzir usvojeni principi rada sistema. Prvi princip je da je svaki sistem odgovoran najpre za napajanje sopstvene potrošnje. Ukoliko je raspoloživi kapacitet pozitivan ukazuje da sistem ima viška snage koja može biti raspoloživa za druge oblasti. Nula vrednost raspoloživog kapaciteta znači da je sistem izbalansiran i da nema razmene sa susednim sistemom. Negativan raspoloživi kapacitet znači da je sistemu potrebna podrška iz drugih sistema ili će se raditi redukcija potrošnje. Negativan raspoloživi kapacitet ima isti uticaj na sistem od interesa kao i nulti raspoloživi kapacitet.

Proračun parametara pouzdanosti sopstvenog sistema, uzimajući u obzir podršku iz susednog sistema uključuje sledeće korake:



1. Maksimalna havarijska podrška susednog sistema, sistemu od interesa treba da bude definisana kao jedan ulazni podatak. U slučaju da ova podrška nije redukovana ugovorom, njegova maksimalna vrednost biće definisana maksimalnim opterećenjem interkonektivnih vodova.

2. Ekvivalent za susedni sistem formira se na prethodno opisani način dat izrazima (5.3) i (5.4).

3. Parametri pouzdanosti za sopstveni sistem kada je susedni sistem predstavljen svojim ekvivalentnim modelom se određuju razmatranjem svih mogućih ispada do nekog usvojenog reda. Svaki ispad se karakteriše sa dva osnovna parametra:

- verovatnoćom pojavljivanja

$$p_i = \prod_j U_j \cdot \prod_k A_k \quad (5.16)$$

- učestanošću pojavljivanja

$$f_i = p_i \cdot \left( \sum_j \mu_j + \sum_k \lambda_k \right) \quad (5.17)$$

U jednačinama (5.16) i (5.17)  $A$  i  $U$  su raspoloživost i neraspoloživost pojedinih elemenata sistema, dok su  $\mu$  i  $\lambda$  njihovi inteziteti obnavljanja i kvara. Indeks  $j$  je indeks svih elementa u kvaru, indeks  $k$  je indeks svih ispitanih elementa u razmatranom stanju sistema  $i$ . Nakon proračunavanja parametara pouzdanosti za svaki sistem, i sopstveni i susedni, potrebno je proračunati parametre pouzdanosti povezanih sistema.

4. Ukupna potrošnja koja nije isporučena potrošačima određuje se sračunavanjem deficita u svim situacijama ispada vodova i proizvodnih jedinica. Ukoliko postoji deficit u proizvodnim kapacitetima dolazi do redukcije u potrošnji koja se ravnomerno raspoređuje u svim potrošačkim čvorovima. U slučaju prekoračenja po vodovima sistema redukcija potrošnje se sprovodi u tačno određenim potrošačkim čvorovima. Obično, redukovani su su potrošači u čvorovima koji imaju najveći efekat na tok snage na kritičnoj grani sistema. Ovi čvorovi se određuju prema metodologiji koja će biti opisana u poglavlju 5.6. U slučaju da postoji lista prioriteta u napajanju različitih potrošačkih čvorova, čvor sa najnižim prioritetom biće prvi redukovan.

5. Za svaki potrošački čvor  $m$  određuju se sledeći parametri:

- ukupna verovatnoća deficitarnih situacija

$$P_m = \sum_k p_k \quad (5.18)$$

- ukupna učestanost deficitarnih situacija u toku godine

$$f_m = \sum_k f_k \quad (5.19)$$

- očekivana neisporučena energija u toku godine

$$END_m = \sum_k \Delta L_k p_k \cdot 8760 \quad (5.20)$$

- očekivana neisporučena snaga u toku godine

$$LND_m = \sum_k \Delta L_k f_k \quad (5.21)$$

Indeks  $k$  se kreće po svim stanjima sistema u kojima se javlja deficit u čvoru  $m$ .  $\Delta L_k$  označava neisporučenu snagu u čvoru  $m$  u deficitarnom stanju  $k$ .

Očekivana neisporučena energija i snaga za ceo sistem se dobija sumiranjem ovih indeksa za sve potrošačke čvorove.

## 5.6. Uticaj snaga u čvorovima sistema na opterećenje pojedinih grana

U ovom poglavlju opisan je način na koji se vrši redukcija po potrošačkim čvorovima u sopstvenom sistemu ukoliko dolazi do deficita. Najpre treba objasniti da se deficitarnom situacijom smatra situacija kada je nemoguće zadovoljiti sopstvenu potrošnju čak i u slučaju kada se dobija pomoć iz susednog sistema [19]. Ukupan deficit u potrošnji se ravnomerno raspoređuje na sve potrošačke čvorove u slučaju da nema prioriteta u napajanju pojedinih potrošača. Takođe, za svako stanje izvora i topologije mreže proračunavaju se tokovi snaga prema DC metodologiji i proverava stanje u mreži sa aspekta prekoračenja po vodovima. U ovom radu ispituju se sva moguća stanja ispada izvornih jedinica i stanja ispada jednog voda. Ukoliko je on dvostruki ili trostruki, ispituju se i stanja istovremenog ispada dva, odnosno tri voda. U slučaju prekoračenja na vodovima, nakon proračuna tokova snaga, potrebno je smanjiti potrošnju i to u onom potrošačkom čvoru koji ima najviše uticaja na dati vod. U ovom radu je kompletno razvijena metodologija ispitivanja uticaja injektiranja u čvorovima i toka snage na pojedinim vodovima, koja je primenjena u proračunu deficita relevantnih situacija. Ova zavisnost je pokazana detaljno na Garverovom primeru koji je mali i gde je lako pratiti razvijenu metodologiju.

U narednim poglavljima je opisana metoda prema kojoj se proračunavaju zavisnosti opterećenja pojedinih grana od injektirane snage u čvorovima sistema [19].

### 5.6.1. Matrica međusobnih uticaja grana i čvorova

Da bi se izračunali faktori proporcionalnosti izmrđu čvorova i grana koristi se kao veza između promena injektiranja u čvorovima i tokova po granama, ili pak između toka u jednoj i nekoj drugoj grani. Faktori mogu biti proračunati iz matrice reaktansi čvorova  $[X]$  i sadrže direktno upotrebljiv oblik informacije u datoj matrici. U daljem tekstu biće opisan međusobni uticaj čvorova i grana i precizan postupak određivanja faktora proporcionalnosti.

Polazi se od skupa N jednačina za mrežu od N+1 čvorova, s obzirom na to da je čvor 0 referentni čvor. Može se napisati sledeća matricna forma,

$$[P] = [B][\delta]$$

ili

$$[\delta] = [B]^{-1}[P] = [X][P] \quad (5.22)$$

koja može biti rešena iterativnim i matricnim tehnikama. Jednačine su linearne, gde je  $[B]$  matrica (N\*N) sa dijagonalnim elementima  $B_{ii}$  jednako sumi rednih susceptansi grana povezanih sa čvorom  $i$  i nedijagonalnih elemenata  $B_{ij}$  jednakih negativnoj susceptansi grane  $ij$ .

#### 5.6.1.1 Fizički značaj matrice

Ako se injektirana snaga premesti iz čvora  $i$  u referentni čvor mreža će biti opisana sledećim jednačinama

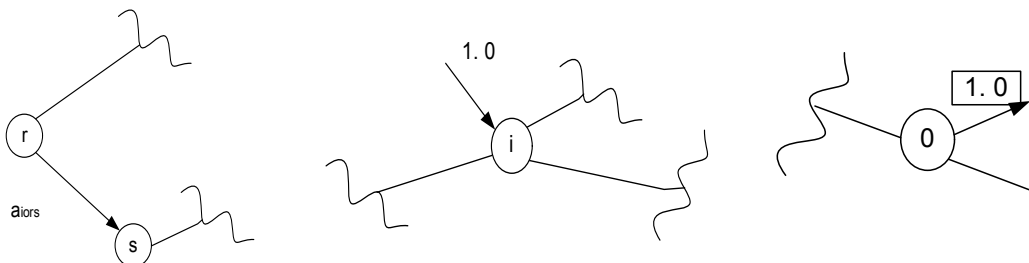
$$\delta_j = X_{j1}0 + \dots + X_{ji}P_i + \dots + X_{jN}0 = X_{ji}P_i, (j \neq i) \quad (5.23)$$

$$\delta_i = X_{i1}0 + \dots + X_{ii}P_i + \dots + X_{iN}0 = X_{ii}P_i, (j = i) \quad (5.24)$$

$X_{ii}$  i  $X_{ij}$  su promene faznih uglova za pretpostavljeni čvor  $i$  i  $j$ , respektivno, sa injektiranjem snage između čvora  $i$  i referentnog. Njihove vrednosti će zavisiti od referentnog čvora. Matrica  $[X]$  je simetrična,  $X_{ij} = X_{ji}$ .

Ukoliko se injektirana snaga pomeri iz čvora  $i$  u referentni čvor 0 (slika 5.3), promena ugla između neka druga dva čvora  $r$  i  $s$  biće  $X_{ir} - X_{is}$ . Ako grana spaja čvorove, njena inkrementalna promena toka snage biće faktor uticaja,

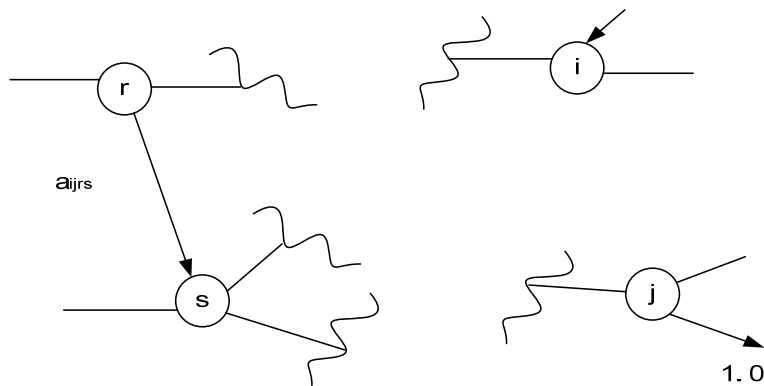
$$a_{iors} = (X_{ir} - X_{is})/x_{rs} \quad (5.25)$$



Slika 5.3 Pomeraj injektiranja iz čvora  $i$  u referentni

Ukoliko se injektiranje pomeri iz čvora  $i$  u čvor  $j$ , inkrementalni tok snage na grani  $rs$  biće faktor uticaja (slika 5.4):

$$a_{ijrs} = a_{iors} - a_{ojrs} = \left( X_{ir} - X_{is} - \left( X_{jr} - X_{js} \right) \right) / x_{rs} \quad (5.26)$$



Slika 5.4 Pomeraj injektiranja iz čvora  $i$  u čvor  $j$

Faktor  $a_{iors}$  može biti definisan kao matrica od  $m$  vrsta (grana) i  $N$  kolona (čvorova). Razmatranjem faktora po vrsti, par po par, uvek se može generisati faktor  $a_{ijrs}$ .

### 5.6.2 Veza između snaga u čvorovima i tokova po granama

Ovo je još jedan način da se pokaže veza između injektiranja u čvorovima i tokova po granama sistema [20], kako bi se dobili linearni koeficijenti zavisnosti između injektiranja po čvorovima i tokova po granama sistema.

U slučaju kada na nekom od vodova dolazi do prekoračenja granica, potrebno je smanjiti potrošnju i to u onom čvoru koji ima najveći koeficijent uticaja na datu granu. Prethodno dobijena matrica faktora uticaja omogućava da se definiše čvor koji je od interesa.

Veličina koja definiše za koliko je potrebno smanjiti injektiranje u definisanom čvoru može se dobiti i na osnovu sledećih relacija. Matrica sopstvenih i međusobnih admitansi nezavisnih čvorova mreže (svih čvorova sem usvojenog baznog) jednaka je

$$[Y] = [A][Y_g][A]^T \quad (5.27)$$

gde je  $[A]$  matrica incidencije, a  $[Y_g]$  matrica admitansi grana.

Između snaga u granama i snaga u čvorovima postoji veza

$$[P_g] = [C][P] \quad (5.28)$$

gde je

$$[C] = [Y_g][A]^T[Y]^{-1} \quad (5.29)$$

Sa  $[P_g]$  označene su snage u granama, a sa  $[P]$  snage u čvorovima.

Elementi  $c(i,j)$  matrice  $[C]$  su traženi koeficijenti koji pokazuju koliko snage u čvorovima  $j$  utiču na snage u granama  $i$ .

### 5.7. Linearizovani model tokova snaga

U ovom proračunu korišćen je DC model tokova snaga [43]. Pokazuje se da proračun tokova snaga sa DC modelom daje odlične rezultate. Broj stanja koja se ispituju u radu je ekstremno veliki, pa je za ovu svrhu pogodan DC proračun tokova snaga. Korišćena je linearna priroda jednačina. Pošto DC model tokova snaga predstavlja aproksimaciju realnih jednačina snaga, može se bezbedno zaključiti da je potrebne veličine vrlo lako razviti bez bilo kakvih znanja o naponima i injektiranjima eksternog sistema.

Kompletan proračun tokova snaga (Newton-Raphsonov postupak), uprkos visokoj tačnosti proračuna, nije pogodan da se primeni u analizama pouzdanosti kod ogromnog broja stanja sistema koja treba ispitati. Zbog ogromnih vremenskih zahteva kod analiza pouzdanosti uzet je DC proračun tokova snaga, koji se može koristiti za brze približne proračune tokova aktivnih snaga.

Polazi se od opšteg izraza za aktivna injektiranja u nezavisnim čvorovima jedne elektroenergetske mreže:

$$P_i = P_{gi} - P_{pi} = G_{ii}V_i^2 + V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j \left( G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij} \right) \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5.30)$$

gde je:

$V_i$  - moduo fazora napona  $\underline{V}_i = V_i \angle \delta_i$  u čvoru  $i=1, 2, \dots, N$

$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  - fazni ugao između fazora napona  $\underline{V}_i$  i  $\underline{V}_j$

$\alpha_i$  - skup čvorova direktno povezanih granama sa čvorom  $j=1, 2, \dots, N$  ( $j \neq i$ )

$G_{ij}, B_{ij}$  - realni i imaginarni delovi elemenata matrice admitansi nezavisnih čvorova

$$\underline{Y}_{bus} = \{ \underline{Y}_{ij} \} = \{ G_{ij} + jB_{ij} \} \text{ [p.u.]}$$

$i, j \in [1, N]$  - indeksi nezavisnih čvorova mreže

Ako se u izrazima za proračun admitansi  $B_{ij}$  matrice  $\underline{Y}_{bus}$  zanemare sve otočne admitanse i uvedu pretpostavke:

$$G_{ij} \approx 0 \quad V_i \approx V_j \approx 1.00 \text{ p.u.}$$

$a_{ij} = 1$  (odnosi transformacije svih regulacionih transformatora jednaki su količniku odgovarajućih baznih napona);

$\cos\delta_{ij} \approx 1.00$  i  $\sin\delta_{ij} \approx \delta_{ij}$

jednačina (5.30) postaje

$$P_i = \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \delta_{ij} = \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} (\delta_i - \delta_j) = \delta_i \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} - \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \delta_j = -B_{ii} \delta_i - \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} \delta_j \quad i=1,2,\dots, \quad (5.31)$$

jer je :

$$B_{ii} = -\sum_{j \in \alpha_i} B_{ij} = \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij}^g \quad B_{ij} = -B_{ij}^g$$

gde je  $B_{ij}^g = -\frac{1}{X_{ij}^g}$  - susceptansa (a  $X_{ij}^g$  reaktansa) grane i-j [p.u.].

U matricnoj formi jednačina (5.31) postaje :

$$[P] = -[B'] [\delta] \quad (5.32)$$

gde je :

- $[B'] = \{B_{ij}\}$  - (N x N) - dimenziona matrica susceptansi nezavisnih čvorova mreže (otočne susceptanse u čvorovima mreže se zanemaruju);
- $[P] = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N]^T$  - N - dimenzioni vektor aktivnih injehtiranja u nezavisnim čvorovima mreže;
- $[\delta] = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_N]^T$  - N-dimenzioni vektor uglova fazora napona u nezavisnim čvorovima

Matrica  $B'$  u jednačini injehtiranja je singularna matrica. Međutim, jednačina (5.30) ima rešenje ako se unapred izabere fazni ugao jednog čvora (recimo, za  $i = 1$ ;  $\delta_1 = 0$ ). U tom slučaju jednačina (5.30) se svodi na N-1 dimenzionu linearnu matricnu jednačinu:

$$[P_r] = -[B_r'] [\delta_r] \quad (5.33)$$

gde je :

- $[B_r'] = \{b_{ij}\}$  - nesingularna matrica reda (N-1) (redukovana matrica susceptansi), koja se dobija na taj način što se iz matrice susceptansi  $B'$  odstrane vrsta i kolona, koje odgovaraju referentnom čvoru (ovde  $i=1$ );
- $[P_r] = [P_2 \ P_3 \ \dots \ P_N]^T$  - (N-1) - dimenzioni redukovani vektor aktivnih

injektiranja u nezavisnim čvorovima mreže, sem referentnog čvora  $i = 1$

$[\delta_r] = [\delta_2 \ \delta_3 \ \dots \ \delta_N]^T$  - (N-1) - dimenzioni vektor nepoznatih uglova fazora napona.

Elementi  $b_{ij}$  redukovane matrice susceptansi  $[B'_r]$  su isti kao i preostali elementi posle eliminisanja vrste i kolone koje odgovaraju referentnom čvoru matrice susceptansi  $[B']$ .

$$b_{ij} = \begin{cases} -B_{ij}^g = \frac{1}{X_{ij}^g} & \text{za } i \neq j; \\ \sum_{j \in \alpha_i} B_{ij}^g = -\sum_{j \in \alpha_i} \frac{1}{X_{ij}^g} & \text{za } i = j \end{cases} \quad (5.34)$$

Ovde je  $i, j = 2, 3, \dots, N$ , jer je  $i=1$  referentni čvor za merenje uglova ( $\delta_1=0$ ), pri čemu je aktivna snaga injektiranog čvora 1.

$$P_1 = -\sum_{i=2}^N P_i \quad (5.35)$$

Linearni DC model za proračun tokova snaga (5.33) daje jednostavan izraz za fazne uglove napona u svim čvorovima izuzev referentnog čvora  $i=1$

$$\delta_r = -[B'_r]^{-1} P_r \quad (5.36)$$

Tokovi aktivnih snaga po svim granama  $\ell=1,2,\dots,L$ , kada su poznati vektori faznih uglova, mogu se izračunati preko formule:

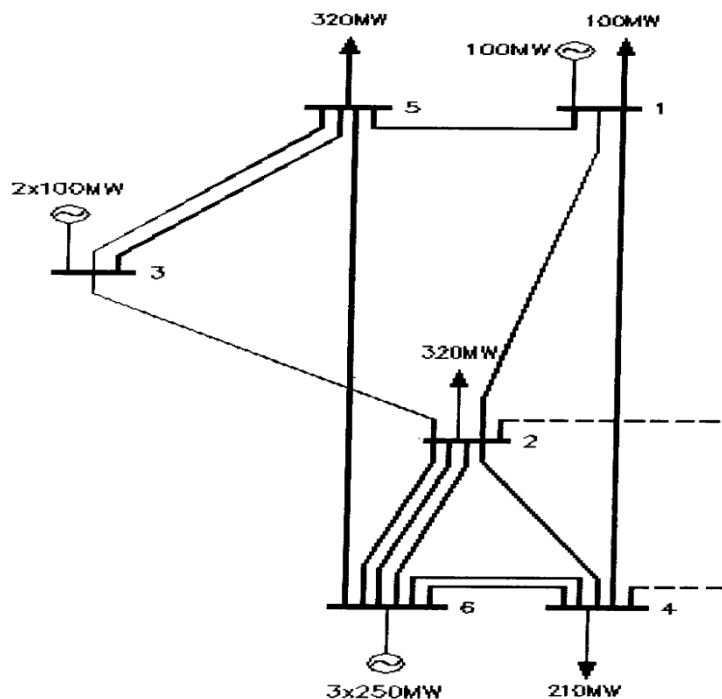
$$P_\ell = P_{KM} = -B_{KM}^g (\delta_K - \delta_M) = \frac{\delta_K - \delta_M}{X_\ell^g} \quad (5.37)$$

gde su K i M čvorovi neke grane  $\ell$ , a L je ukupan broj grana.

## 6. PRIMENA METODE NA GARVEROVOM PRIMERU

### 6.1. Uvod

U narednom poglavlju prikazan je razvijeni mrežni DC ekvivalent za Garverov primer [17], kao i metoda proračuna pokazatelja pouzdanosti.



Slika 6.1 Garverov sistem

Garverov sistem je sistem od 6 čvorova, 3 generatorska i 3 potrošačka i pogodan je za jednostavan prikaz metode. Podaci o generatorskim čvorovima, broju i snagama generatorskih jedinica dati su u tabeli 6.1, kao i podaci i o raspoloživosti i o intezitetu ispada.

Tabela 6.1. Podaci o generatorskim jedinicama

čvor	nazivna snaga (MW)	raspoloživost	intezitet ispada (ispad/god.)
1	100	0.95	7.3
3	2·100	0.80	7.3
6	3·250	0.87	7.6

Podaci o potrošačkim čvorovima 1, 2, 4 i 5, prikazani su u tabeli 6.2.



Tabela 6.2. Podaci o potrošačkim čvorovima

Čvor	Pp (MW)
1	100
2	320
4	210
5	320

Takođe, podaci o prenosnim vodima dati su u tabeli 6.3. Vrednosti susceptansi su izražene u p.u., prenosni kapaciteti voda u MW i intezitet kvara u broju kvarova po godini.

Tabela 6.3. Podaci o dalekovodima sistema

vodovi	susceptan (p.u.)	prenosni kapacitet za DC proračun (MW)	$\lambda$ (ispad/god)
1-2	2.5	100	1.0
1-4	1.67	80	1.5
1-5	5	100	0.5
2-3	5	100	0.5
2-4	2.5	100	1.0
2-6	10	3·150	0.75
3-5	10	2·100	0.5
4-6	6.66	2·100	0.75
5-6	1.64	100	1.5
2-2'	2.5	100	1.0
4-4'	5	100	1.5

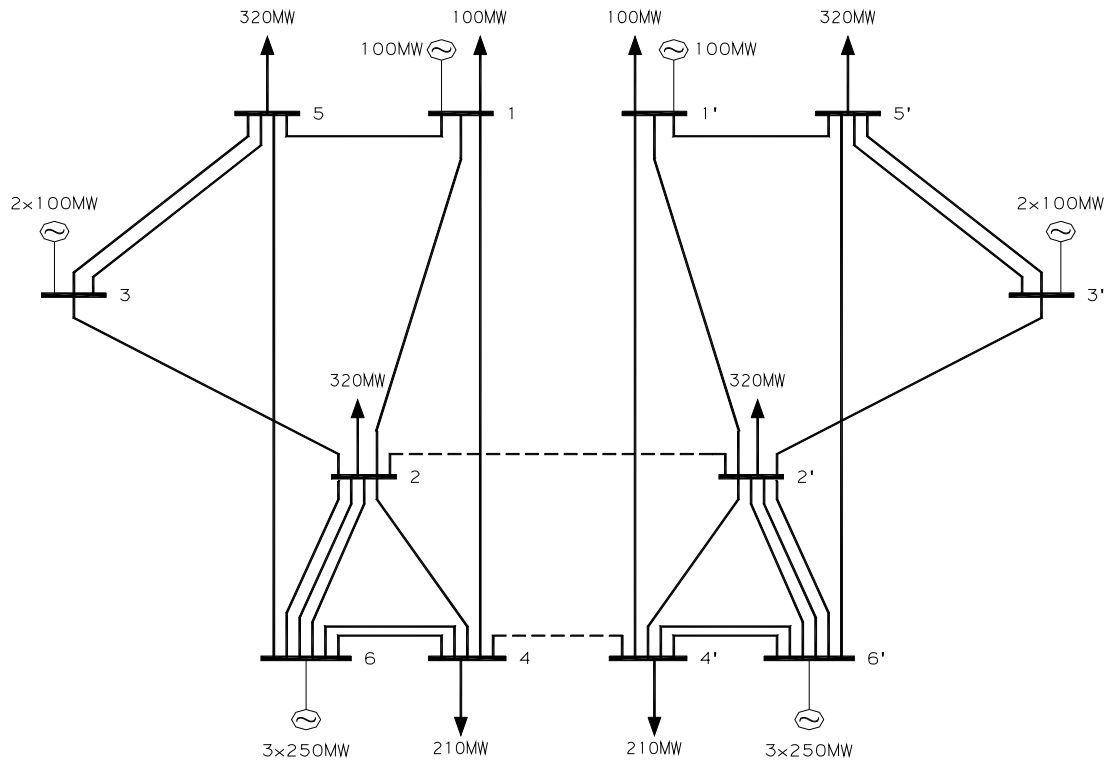
U proračunima pouzdanosti, za vodove sistema uzeto je vreme popravke voda  $r=7h$ .

Intezitet popravke  $\mu$  dobija se preko vremena trajanja popravke  $\mu = \frac{8760}{r} \left[ \frac{1}{god.} \right]$ .

Maksimalna ugovorena podrška susednog sistema za vreme havarijskog stanja je 100 MW.

U cilju prezentovanja razvijenog DC mrežnog ekvivalenta i metode na osnovu koje se vrše proračuni, sopstveni sistem je predstavljen kao Garverov primer, u daljem tekstu biće označen sa A. Susedni sistem je takođe predstavljen Garverovim primerom, kao lik u ogledalu (slika 6.2) i u daljem izlaganju biće označen sa B. Ovi sistemi su međusobno povezani vodovima 2-2' i 4-4'. Podaci o poveznim vodovima 2-2' i 4-4' su takođe dati u tabeli 6.3. Da bi se rezultati poredili, a pre svega pokazala upotrebna vrednost razvijenog ekvivalenta, proračuni parametara pouzdaosti rade se za dva slučaja:

- kada je susedni sistem modelovan u potpunosti i
- kada je susedni sistem zamenjen ekvivalentnim DC modelom.



Slika 6.2. Sopstveni i susedni sistem predstavljeni Garverovim primerom

## 6.2 Formiranje ekvivalenta za Garverov primer

Primenom matematičkog modela iz poglavlja 5 dobijeni su parametri ekvivalenta susednog sistema koji je u ovom slučaju predstavljen Garverovim primerom. Treba napomenuti da povezni vodovi 2-2' i 4-4' nisu obuhvaćeni ekvivalentom, tj. povezni vodovi se modeluju u potpunosti. Prema tome, čvorovi 2' i 4' su usvojeni kao granični čvorovi, kao na slici 6.2.

Kao referentni čvor uzet je čvor 1, čija je eksplicitno zadata potrošnja  $P_{SL} = 100 \text{ MW}$ , dok je snaga u karakterističnom čvoru 2' jednaka  $P_{T2} = 320 \text{ MW}$ , a u čvoru 4' jednaka  $P_{T3} = 210 \text{ MW}$

Proračunom prema (5.4) i (5.5) dobijaju se vrednosti koje predstavljaju snagu potrošnje ekvivalentnog sistema koja se raspoređuje u izvornom čvoru S i graničnim čvorovima T. Zapravo, snaga potrošnje sistema koji se ekvivalentira raspoređena je u svim karakterističnim čvorovima ekvivalentne šeme, tj. potrošnja nije koncentrisana u jednom fiktivnom čvoru, na primer izvornom, što je jedno od unapređenja primenjenog ekvivalenta. Deo matrične jednačine koji se odnosi na raspoređivanje potrošnje ekvivalentnog sistema proračunat prema jednačini (5.4) i odnosi se na izvorni čvor je

$$[B_{SR}][B_{RR}]^{-1}[P_R] = 320 \text{ MW},$$

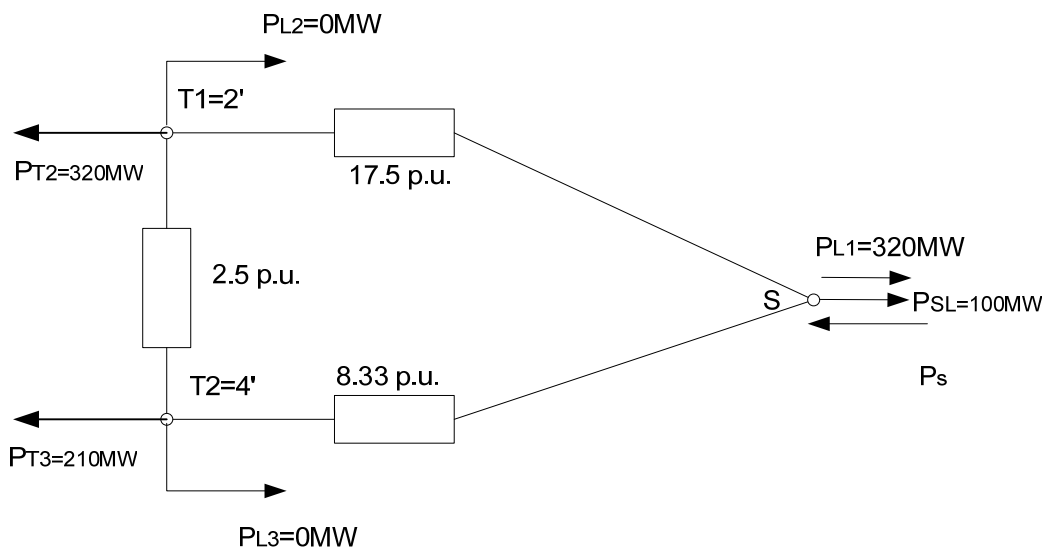
a deo koji se odnosi na granične čvorove proračunat prema jednačini (5.5) je

$$[B_{TR}][B_{RR}]^{-1}[P_R] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Prema tome, potrošnja ekvivalentnog sistema

$$[P_L] = \begin{bmatrix} 320 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} MW$$

se raspoređuje na karakteristične čvorove kao na slici 6.3



Slika 6.3 Raspoređivanje snage na karakteristične čvorove

Prema osnovnoj jednačini ekvivalenta (5.3) dobija se ekvivalentna potrošnja u karakterističnim čvorovima i to u izvornom

$$[P_{ESL}] = 420 MW,$$

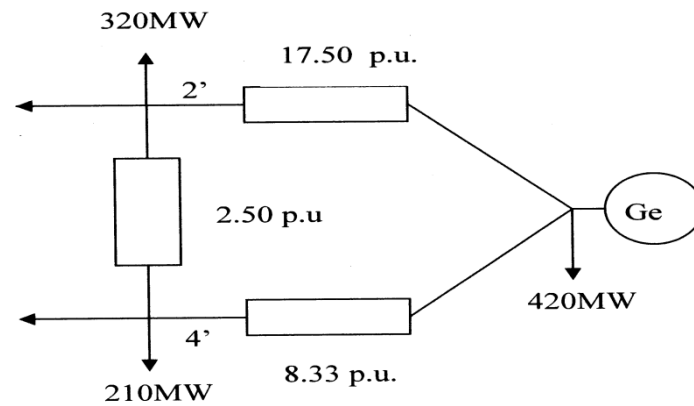
i u karakterističnim

$$[P_{TE}] = \begin{bmatrix} 320 \\ 210 \end{bmatrix},$$

pa je konačna potrošnja ekvivalenta

$$[P_L] = \begin{bmatrix} 420 \\ 320 \\ 210 \end{bmatrix} MW$$

što je i prikazano na konačnoj šemi ekvivalenta za Garverov sistem (slika 6.4).



Slika 6.4. Parametri evivalentne šeme za Garverov primer

Matrica susceptansi grana ekvivalentne šeme  $[B_{EST}]$ , dobijena proračunom prema jednačini (5.3), odgovara susceptansama grana između karakterističnih čvorova ekvivalentne šeme, tj. izvornog čvora  $S$  i graničnih čvorova  $2'$  i  $4'$ .

$$[B_{EST}] = \begin{bmatrix} 25.83 & -17.50 & -8.33 \\ -17.50 & 20.00 & -2.50 \\ -8.33 & -2.50 & 10.83 \end{bmatrix}$$

Iz matrice karakterističnih čvorova  $[B_{EST}]$ , dobijaju se susceptanse ekvivalenta, za granu  $S-2'$  jednaka je 17.5 p.u., za granu  $S-4'$  jednaka je 8.33 p.u., i za ekvivalentnu granu  $2'-4'$  jednaka je 2.5 p.u. Parametri dobijeni proračunom prikazani su na šemi na slici 6.4. Snaga izvora  $P_s$  u fiktivnom izvornom čvoru menja se zavisno od stanja generatorskih jedinica svih izvora susednog sistema grupisanih u čvoru  $i$ , prikazanom kao na slici 6.4. Način na koji se vrši ekvivalentiranje i grupisanje izvora susednog sistema detaljno je opisano u posebnom poglavlju 6.4.

Opisani ekvivalent primenljiv je i za druge analize u elektroenergetskim sistemima. Primera radi, u tabeli 6.4. dati su DC tokovi snaga po pojedinim granama za slučaj modelovanja susednog sistema u potpunosti i kada je on zamenjen ekvivalentom, za osnovno stanje sistema kada su svi generatori i svi vodovi u ispravnom stanju. Obzirom da je Garverov model vrlo mali sistem može se reći da su tokovi snaga po pojedinim vodima vrlo slični, što se može smatrati dobrim rezultatom.

Tabela 6.4. Poređenje tokova kada je sused modelovan u potpunosti i ekvivalentom

početni čvor	krajnji čvor	potpun (MW)	ekvivalent (MW)
2	1	95.18	95.78
4	1	70.79	69.85
5	1	34.03	34.37
3	2	-37.55	-38.13
4	2	10.80	8.78
6	2	397.54	394.45
5	3	-237.55	-238.13
6	4	235.99	239.31
6	5	116.47	116.25

### 6.3. Primena Garverovog ekvivalenta u analizi pouzdanosti sistema

U cilju određivanja kvaliteta ekvivalenta u proračunu parametara pouzdanosti potrebno je izračunati pokazatelje pouzdanosti za sopstveni sistem (Garverov primer) kada je susedni sistem predstavljen ekvivalentom i kada je susedni sistem modelovan u potpunosti. Susedni sistem zamenjen je ekvivalentom u čvorovima koji su granični sistemu od interesa 2' i 4' (slika 6.2). U daljem tekstu i jednačinama sopstveni sistem čija se pouzdanost računa biće označen sa A, a susedni sa B.

Parametri pouzdanosti se proračunavaju za sopstveni sistem, tj. sistem od interesa. Najpre se porede potrošnja i proizvodnja sopstvenog sistema. Određuje se da li sopstveni sistem ima problema u napajanju sopstvenih potrošača. U ovom radu se sve analize rade za jedan nivo potrošnje, tj. ona je konstantna vrednost. Ukoliko sistem zadovoljava potrošnju sopstvenih potrošača, onda se ne razmatra veza sa susednim sistemom. Međutim ako postoji deficit onda se razmatraju mogućnosti ispomoći iz susednog sistema. Vrednost deficita u sopstvenom sistemu se smanjuje za vrednost ispomoći iz susednog sistema. Tada se razmatraju spojeni sistemi i za slučaj predstavljanja suseda ekvivalentom i za slučaj predstavljanja sistema u potpunosti. Zapravo, ovo su situacije u kojima se testira kvalitet ekvivalenta. Za svaku od ispitivanih situacija proračunavaju se DC tokovi snaga, bilo da je sused modelovan u potpunosti ili je zamenjen ekvivalentom.

U svakom od deficitarnih stanja određuje se verovatnoća stanja i učestanost napuštanja tog stanja ili ulaska u to stanje. Ove su učestanosti međusobno jednake i predstavljaju učestanost stanja, po metodi trajanja deficitarne situacije [20]. U radu se za proračun verovatnoće koriste elementi Kronekerove algebre i tako dolazi do verovatnoća pojedinih situacija sistema. U radu su analizirane sledeće situacije:

- svi mogući ispadi generatorskih jedinica,
- ispadi jednog voda, bilo da je vod jednostruki, dvostruki ili trostruki, i
- istovremeni ispadi jedne generatorske jedinice i jednog voda

Ako ispad generatora stvara deficit, ovaj se deficit ravnomerno raspodeljuje na sve potrošačke čvorove i zapisuje po čvorovima. Za svako stanje izvora oba sistema, kada

su svi dalekovodi u pogonu, proračunavaju se DC tokovi snaga, a zatim proverava preopterećenost dalekovoda sopstvenog sistema. Ukoliko je neki od dalekovoda preopterećen, potrebno je dodatno smanjiti potrošnju u čvoru koji najviše utiče na preopterećeni vod, po metodologiji detaljno opisanoj u poglavlju 5.6 gde se razmatra uticaj snaga u čvorovima sistema na opterećenje pojedinih grana. Da bi se odredilo koji čvor ima najveći uticaj na granu na kojoj je došlo do prekoračenja razvijena je matrica međusobnih uticaja grana i čvorova, a rezultati proračuna za Garverov primer dati su u poglavlju 6.6.

Razmatrane su i deficitarne situacije u slučaju ispada jednog voda i istovremenog ispada jednog voda i jedne generatorske jedinice u sopstvenom sistemu. Ako ispad voda dovodi do prekoračenja graničnih snaga pojedinih vodova, snage po ugroženim vodovima se smanjuju odgovarajućim smanjivanjem opterećenja u potrošačkom čvoru koji najviše utiče na tok snage po posmatranom vodu. Algoritam ispitivanja je prikazan u prilogu 6.2.

U toku daljeg proračuna, zapisuje se redukcija potrošnje u odgovarajućem čvoru i verovatnoća i učestanost date situacije. Princip koji je usvojen prilikom ispitivanja je da se sistemi ne mogu ispomagati na štetu svojih potrošača, tj. da svaki sistem podmiruje prioritarno svoje potrošače. Na primer, ako je ispala snaga u sistemu A veća od zbira raspoložive snage sistema A i B, situacija se sanira redukcijom potrošača u sistemu A. Ako je došlo do prekoračenja snaga po vodovima sistema A ono se eliminiše intervencijama u sistemu A. Međutim, ako je do pomenutog prekoračenja došlo zbog pokrivanja deficita u sistemu B, ovaj se deficit ne sanira. Sve isto važi i za sistem B.

Na kraju proračuna dobijaju se tabelarni podaci o deficitarnim situacijama u svim potrošačkim čvorovima, i o verovatnoćama i učestanostima tih situacija. Konačni sumarni rezultati o pokazateljima pouzdanosti su dati u poglavlju (6.7), tj. prikazano je poređenje pokazatelja pouzdanosti kada je susedni sistem B modelovan u potpunosti, i kada je susedni sistem zamenjen opisanim ekvivalentom, što je i bio krajnji cilj ovog rada.

#### **6.4. Modelovanje interakcije između sistema**

Neka je E dogovorena maksimalna ispomoć susednog sistema B sopstvenom sistemu A. U daljem ispitivanju uzeta je vrednost  $E=100\text{MW}$ .

##### **6.4.1 Modelovanje izvora susednog sistema**

Stanja izvora susednog sistema B ekvivalentiraju se na sledeći način:

- a) Sva stanja izvora susednog sistema u kojima je raspoloživa snaga izvora ovog sistema za E veća od ukupne snage potrošnje susednog sistema zamenjuju se jednim ekvivalentnim stanjem. Verovatnoća ovog stanja jednaka je zbiru verovatnoća svih stanja izvora susednog sistema kod kojih je zadovoljen pomenuti uslov. Ekvivalentni intenzitet napuštanja ovog stanja jednak je zbiru intenziteta sa kojim se ovo stanje napušta zbog ispada nekih od izvora. Raspoloživa snaga susednog sistema je jednaka zbiru maksimalne ispomoći E i ukupne snage potrošnje susednog sistema. Kako je snaga potrošnje susednog sistema jednaka  $950\text{MW}$  i  $E=100\text{MW}$ , onda je ova granična snaga jednaka  $1050\text{MW}$ .

- b) Stanja u kojima je raspoloživa snaga izvora susednog sistema veća od ukupne snage potrošnje susednog sistema, a manja od zbira ove snage i ugovorene havarijske ispomoći  $E$  modeluju se pojedinačno. Ovde se mogu grupisati ona stanja kod kojih se ima ista raspoloživa snaga. U svakom pojedinačnom slučaju snaga susednog sistema jednaka je zbiru ukupne potrošnje susednog sistema i raspoložive snage za ispomoć.
- c) Stanja izvora susednog sistema sa deficitarnim situacijama u ovom sistemu tj. kada je raspoloživa snaga izvora manja od ukupne snage potrošnje, se ne razmatraju pošto ne utiču na pokazatelje pouzdanosti sopstvenog sistema A.

Matematički model definisanih stanja dat je u sledećem poglavlju (6.4.2)

#### **6.4.2 Modelovanje parametara pouzdanosti u ekvivalentiranom sistemu**

Prilikom modelovanja sistema u proračunima, usvojene su sledeće oznake:

$A$  – sistem čija se pouzdanost računa

$B$  - susedni sistem

$d_A, d_B$  – deficiti snage u sistemima A i B

$s_A, s_B$  – viškovi snage u sistemima A i B

$g_A, g_B$  – proizvodnja aktivne snage u sistemima A i B u određenom stanju

$c_A, c_B$  – ukupna potrošnja sistema A i B

$E$  – ugovorena maksimalna snaga havarijske ispomoći među sistemima A i B

Razmatraju se sledeće situacije:

Ukoliko postoji deficit aktivne snage u sistemu A i pri tome višak snage u sistemu B koji može da nadoknadi deficit u sistemu A, onda se povećava proizvodnja aktivne snage u sistemu B.

$$0 < d_A \leq E, \quad s_B \geq d_A \quad g_B \text{ se povećava za } d_A$$

Ukoliko postoji deficit aktivne snage u sistemu A i pri tome višak snage u sistemu B koji manji od deficita u sistemu A, onda se povećava proizvodnja aktivne snage u sistemu B, do maksimalne vrednosti snage koju sistem B može da proizvede.

$$0 < d_A \leq E, \quad 0 < s_B \leq d_A \quad g_B \text{ se povećava za } s_B$$

Ukoliko postoji deficit aktivne snage i u sistemu A, i u sistemu B, onda se potrošnja u sistemu B smanjuje za vrednost deficita snage u sistemu B.

$$0 < d_A, \quad d_B > 0 \quad c_B \text{ se smanjuje za } d_B$$

Ukoliko postoji deficit aktivne snage u sistemu A, koji je veći od ugovorene snage havarijske ispomoći  $E$ , a u sistemu B višak snage koji je veći od  $E$ , proizvodnja aktivne snage u sistemu B se povećava samo do maksimalne ugovorene snage havarijske ispomoći između sistema.

$$d_A > E, \quad s_B \geq E \quad g_B \text{ se povećava za } E$$

Ukoliko postoji deficit aktivne snage u sistemu A, koji je veći od ugovorene snage havarijske ispomoći E, a u sistemu B višak snage koji je manji od E, i ne može da nadoknadi deficit u sistemu A, onda se proizvodnja aktivne snage u sistemu B povećava za dati višak.

$$d_A > E, \quad s_B < E \quad g_B \text{ se povećava za } s_B$$

Ukoliko postoji višak aktivne snage u sistemu A, koji može da nadoknadi deficit u sistemu B, pri čemu je on manji od ugovorene snage havarijske ispomoći E, onda se proizvodnja aktivne snage u sistemu A povećava za navedeni deficit u sistemu B.

$$s_A > 0 \quad 0 < d_B \leq E \quad s_A \geq d_B \quad g_A \text{ se povećava za } d_B$$

Ukoliko postoji višak aktivne snage u sistemu A, koji ne može da nadoknadi deficit u sistemu B, pri čemu je on manji od ugovorene snage havarijske ispomoći E, onda se proizvodnja aktivne snage u sistemu A povećava za mogući višak u sistemu A, a ukupna potrošnja u sistemu B se smanjuje za vrednost razlike deficita u sistemu B i viška u sistemu A.

$$s_A > 0 \quad 0 < d_B \leq E \quad s_A < d_B \quad g_A \text{ se povećava za } s_A, c_B \text{ se smanjuje za } d_B - s_A$$

Ukoliko postoji višak aktivne snage u sistemu A, koji je manji od ugovorene snage havarijske ispomoći E i deficit u sistemu B koji je veći od maksimalne ugovorene snage havarijske ispomoći, onda se proizvodnja aktivne snage u sistemu A povećava za mogući višak snage u sistemu A, a ukupna potrošnja u sistemu B smanjuje se za vrednost razlike deficita u sistemu B i viška u sistemu A.

$$0 < s_A \leq E \quad d_B > E \quad g_A \text{ se povećava za } s_A, c_B \text{ se smanjuje za } d_B - s_A$$

Ukoliko postoji višak aktivne snage u sistemu A, koji je veći od maksimalne ugovorene snage havarijske ispomoći E i deficit u sistemu B koji je veći od ugovorene snage havarijske ispomoći E, onda se proizvodnja aktivne snage u sistemu A povećava za vrednost maksimalne ugovorene snage havarijske ispomoći, a ukupna potrošnja u sistemu B smanjuje se za vrednost razlike deficita u sistemu B i maksimalne ugovorene snage havarijske ispomoći E.

$$s_A > E \quad d_B > E \quad g_A \text{ se povećava za } E, c_B \text{ se smanjuje za } d_B - E$$

Na osnovu prethodno definisanih situacija može se definisati sažeti model izvora sistema B. Sva stanja sistema B kod kojih je

$$s_B \geq E \tag{6.1}$$

mogu se zameniti ekvivalentnim stanjem  $B_{AE}$ . Verovatnoća ovog stanja jednaka je

$$P_{BAE} = \sum_k P_k \tag{6.2}$$

gde su sa  $p_k$  verovatnoće svih stanja sistema B koja zadovoljavaju uslov (6.1).



Učestanost stanja  $B_{AE}$  jednaka je

$$f_{BAE} = \sum_j \lambda_j p_j \quad (6.3)$$

Indeks  $j$  obuhvata sva stanja koja pripadaju razmatranoj grupi iz kojih se može preći u stanja koja ne ispunjavaju uslov (6.1), tj. ovo su granična stanja za grupu. Sa  $p_j$  i  $\lambda_j$  označene su verovatnoće pomenutih graničnih stanja i njihovi intenziteti prelaza u stanja koja ne ispunjavaju uslov (6.1).

Sva stanja sistema  $B$  kod kojih je

$$d_B > E \quad (6.4)$$

moгу se zameniti ekvivalentnim stanjem  $B_{UE}$ . Verovatnoća ovog stanja jednaka je

$$P_{BUE} = \sum_k P_k \quad (6.5)$$

gde indeks  $k$  obuhvata sva stanja sistema  $B$  za koje važi relacija (6.4). Učestanost stanja  $B_{UE}$  jednaka je

$$f_{BUE} = \sum_j \lambda_j p_j \quad (6.6)$$

Indeks  $j$  obuhvata sva stanja koja pripadaju razmatranoj grupi iz kojih se može preći u stanja koja ne pripadaju ovoj grupi tj. granična stanja za grupu. Sa  $p_j$  i  $\lambda_j$  označene su verovatnoće pomenutih graničnih stanja i njihovi intenziteti prelaza u stanja koja ne ispunjavaju uslov (6.4). Ostala stanja sistema  $B$  se ne grupišu već razmatraju pojedinačno, kao ranije.

Pošto je Garverov primer mali sistem razmatraju se sva moguća stanja ispada generatorskih jedinica. Ukupan broj stanja izvora susednog sistema sa aspekta ispada generatorskih jedinica je 24. Prvi izvorni čvor ima dva moguća stanja generatora, s obzirom da ima jednu jedinicu koja može biti uključena, stanje 1, ili isključena, stanje 2. Drugi generatorski čvor ima 3 stanja i treći 4 stanja, tako da je ukupan broj stanja razmatranog sistema  $2*3*4=24$ . U prilogu 6.1 dati su vektori mogućih stanja Garverovog sistema. Ukoliko generatorski čvor ima 2 iste jedinice, moguća stanja su 1, kada su sve ispravne, 2 kada je jedna ispravna, a druga nije i stanje 3, kada su obe jedinice van pogona. Ako jedinice nisu iste, onda je broj mogućih stanja 4.

Prema prethodno opisanoj metodologiji, za definisanu snagu ispomoći između sistema  $E=100$  MW, od mogućih 24 stanja izvora sistema  $B$  dobijaju se 4 stanja ekvivalentnog izvora sa sledećim parametrima

$$\text{raspoloživa snaga ekvivalentnih stanja } X_{ekv} = \begin{bmatrix} 1050 \\ 950 \\ 850 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{verovatnoća ekvivalentnih stanja } PE_{ekv} = \begin{bmatrix} 0.400370 \\ 0.221252 \\ 0.035559 \\ 0.342810 \end{bmatrix}$$

$$\text{ekvivalentni intezitet napuštanja stanja } \lambda_{ekv} = \begin{bmatrix} 22.2 \\ 14.6 \\ 14.6 \\ 52.6 \end{bmatrix}$$

Učestanost stanja predstavljenih gornjom granicom je  $f_{BAE} = 8.8882$ , dok je učestanost stanja obuhvaćenih donjom granicom  $f_{BUE} = 15.205$ .

Prema prethodnoj analizi, postoji samo jedno ekvivalentno stanje susednog sistema, kada je u mogućnosti da isporuči sistemu od interesa 100 MW, i ono se javlja sa sledećim parametrima:

- snaga u sistemu  $X_{ekv1} = 1050 \text{ MW}$
- verovatnoća stanja  $P_{ekv1} = 0.40037$
- ekvivalentni intezitet napuštanja stanja  $\lambda_{ekv1} = 22.2$
- učestanost ekvivalentnog stanja  $f_{ekv1} = 8.8882$

### 6.5. Obuhvatanje uticaja ispada vodova ili generatora i vodova u sistemu B

Jedan od bitnih segmenata unapređenja prikazanog ekvivalenta je obuhvatanje uticaja ispada vodova i generatora u ekvivalentiranom sistemu. Zapravo za svaku od razmatranih situacija ispada, tj. stanja izvora i topologije, formira se dinamički ekvivalent pouzdanosti, proračunat po istoj metodologiji kao i ekvivalent u osnovnom stanju. Uticaj istovremenih ispada vodova i generatora koji se reflektuje na susceptanse ekvivalenta i na ekvivalentno stanje generatora se uzima preko težinskih faktora što je detaljno opisano u poglavlju 5.3. U ovom delu su dati rezultati proračuna za Garverov primer na kome je primenjena opisana metodologija. Obuhvaćen je uticaj simultanih ispada generatorskih jedinica i dalekovoda u susednom sistemu B na parametre ekvivalenta.

Razmatrane su sledeće situacije:

- ispada jednog dalekovoda i jedne generatorske jedinice
- ispad samo jednog dalekovoda
- ispad dva dalekovoda

Simultani ispadi pojedinih generatorskih jedinica i voda mogu se uzeti u obzir na sledeći način. Model susednog sistema B je komplementiran, tj. proširen dodavanjem na interkonektivnim tačkama sa sopstvenim sistemom A, maksimalne ugovorene snage kao dodatog opterećenja. Ispitivanje je rađeno za slučaj kada se na interkonektivnim tačkama 2' i 4' dodaje po 50 MW, ukupno 100 MW, vrednost koja predstavlja

maksimalno moguću dodatnu snagu koja je i merodavna za ovo istraživanje na Garverovom primeru.

Rezultati istraživanja na Garverovom modelu su pokazali da je potrebno uraditi minimalne korekcije ekvivalenta zbog simultanih ispada generatora i vodova u ekvivalentiranom sistemu.

Obzirom da ispad bilo koje generatorske jedinice u sistemu B dovodi do ispada snage većeg ili jednakog od 100 MW, a kako je potrošnja sistema B 950 MW, što je za 100 MW manje od maksimalne proizvodnje u sistemu B, zaključuje se da ne postoji ni jedno dodatno stanje kada se susednom sistemu može isporučiti snaga koja je manja od 100 MW.

Test je rađen kada su svi generatori ispravni, a testira se ispad jednog voda i istovremeni ispad dva voda. Rezultat testa je sledeći:

- verovatnoća ovakvih stanja je 0.0012699
- učestanost je 1.5992
- vrednosti admitansi treba korigovati za:

$$\delta Y_{s-2'} = 0.020635$$

$$\delta Y_{s-4'} = 0.0097824$$

$$\delta Y_{2'-4'} = 0.0023817$$

pa konačne vrednosti admitansi ekvivalenta Garverovog modela su:

$$Y_{s-2'} = 17.498,$$

$$Y_{s-4'} = 8.3292$$

$$Y_{2'-4'} = 2.4992$$

Korigovane vrednosti ekvivalentnog stanja sa snagom od 1050 MW su:

$$\text{- verovatnoća stanja } P_{ekvl} = 0.4016399$$

$$\text{- učestanost ekvivalentnog stanja je } f_{ekvl} = 10.4874$$

U tabelama 6.5. i 6.6. prikazana su stanja susednog sistema zbog kojih je vršena korekcija ekvivalenta zbog istovremenih ispada generatorskih jedinica i vodova i admitanse ekvivalenta susednog sistema u kome je promenjena topologija, s obzirom da su obuhvaćeni ispadi pojedinih dalekovoda. Za svaku od ispitivanih topologija se proračunavaju parametri ekvivalenta, kao i potreba da se na interkonektivnim čvorovima smanji dodatno opterećenje. Proračun je pokazao da ni jedan slučaj smanjenja dodatnog opterećenja na interkonektivnim dalekovodima ne dovodi do rešavanja problema prekoračenja pa je ekvivalentirano dodatno opterećenje jednako nuli, a time i korekcija snage ekvivalentnog generatora.

Vrednosti susceptansi ekvivalentne šeme kada su svi vodovi uključeni bile su:

$$Y_{s-2'} = 17.5000$$

$$Y_{s-4'} = 8.3300$$

$$Y_{2'-4'} = 2.5000$$

Analiza ispada jedne generatorske jedinice i jednog voda, ne učestvuje u korekciji ekvivalenta. Nazivna snage najmanje generatorske jedinice u Garverovom test primeru je 100 MW. Ukoliko dođe do ispada čak i najmanje generatorske jedinice, susedni sistem nije u mogućnosti da pomogne sistemu od interesa. Zapravo ne postoji ni jedno stanje sa ispadom generatorske jedinice koje može da učestvuje u ispomaganju sistema od interesa.

Analiza ispada jedne grane pokazala je da postoje situacije koje su merodavne za korekciju ekvivalenta. U tabeli 6.5 su prikazane verovatnoće, učestanosti i vrednosti susceptansi ekvivalenta sa zadatom topologijom.

Tabela 6.5. Analiza ispada jednog voda sistema koji se ekvivalentira

Ispad voda	verovatnoća	učestanost	$Y_{s-2'}$	$Y_{s-4'}$	$Y_{2'-4'}$
1-2	3.1720e-004	0.3992	15	8.33	2.5
1-4	4.7579e-004	0.5985	17.5	6.66	2.5
2-3	1.5860e-004	0.1997	12.5	8.33	2.5
2-4	3.1720e-004	0.3992	17.5	8.33	0

Analiza ispada dve grane prikazana je u tabeli 6.6. gde su navedene verovatnoće, učestanosti i vrednosti susceptansi datih topologija.

Tabela 6.6. Analiza ispada dva voda sistema koji se ekvivalentira

Ispad voda	Ispad voda	verovatnoća	učestanost	$Y_{s-2'}$	$Y_{s-4'}$	$Y_{2'-4'}$
1-2	2-3	1.2669e-007	3.1789e-004	15	8.33	2.5
1-2	2-4	2.5327e-007	6.3540e-004	15	2.58.33	
1-4	2-3	1.9003e-007	4.7674e-004	17.5	6.66	2.5
1-4	2-4	3.7991e-007	9.5292e-004	17.5	6.66	2.5
2-3	2-4	1.2664e-007	3.1777e-004	12.5	8.33	2.5

Nakon obuhvatanja uticaja istovremenih ispada vodova i generatora dobijaju se konačne vrednosti admitansi ekvivalenta:

$$Y_{s-2'} = 17.498$$

$$Y_{s-4'} = 8.3292$$

$$Y_{2'-4'} = 2.4992.$$

## 6.6. Matrica međusobnih uticaja grana i čvorova za slučaj Garverovog modela

U poglavlju 5.6 detaljno je opisan uticaj injektiranja u čvorovima sistema na pojedine grane mreže. U ovom poglavlju su prikazani rezultati opisane metodologije na Garverovom modelu.

Uticaji pojedinih čvorova na grane sistema predstavljenog Garverovim primerom poređani po prioritetima, predstavljeni su u tabeli 6.7. Oznaka 1 znači da dati čvor ima najveći uticaj, a 5 najmanji uticaj na datu granu. Na primer na granu 2-3 najveći uticaj ima čvor 3, pa čvor 2, a tek onda čvorovi 4, 5, i 6 po nivou prioriteta.

Tabela 6.7. Uticaji čvorova na grane Garverovog sistema

grana čvor	1-2	1-4	1-5	2-3	2-4	2-6	3-5	4-6	5-6
<b>2</b>	1	2	2	2	5	2	5	5	4
<b>3</b>	4	4	5	1	2	4	1	3	3
<b>4</b>	2	1	3	3	1	5	4	1	5
<b>5</b>	3	3	1	4	4	3	3	4	2
<b>6</b>	5	5	4	5	3	1	2	2	1

U slučaju kada na nekom od vodova dolazi do prekoračenja limita potrebno je smanjiti potrošnju i to u onom čvoru koji ima najveći koeficijent uticaja na datu granu. Prethodno dobijena matrica omogućava da se definiše čvor koji je od interesa. Napomena je da su samo na čisto potrošačkim čvorovima smanjena opterećenja zbog deficita u sistemu.

Veličina koja definiše za koliko je potrebno smanjiti injektiranje u definisanom čvoru, može se dobiti i na osnovu matrice  $[C]$ , definisane u poglavlju 5.6. Kako je  $[A]$  matrica incidencije za Garverov primer jednaka

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

a matrica grana je  $Y_g$ ,

$$Y_g = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.67 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.64 \end{bmatrix}$$

onda je  $[C] = [Y_g][A]^T[Y]^{-1}$

Vrednosti ove matrice su date u tabeli 6.8.

Tabela 6.8. Koeficijenti međusobnih uticaja grana i čvorova Garverovog sistema

Grana Čvor	1-2	1-4	1-5	2-3	2-4	2-6	3-5	4-6	5-6
2	-0.4058	-0.2072	-0.3870	0.2831	0.0957	0.2154	0.2831	-0.1115	-0.1040
4	-0.3101	-0.3578	-0.3320	0.1921	-0.2256	-0.2767	0.1921	0.4166	-0.1399
5	-0.1935	-0.1109	-0.6956	-0.2057	0.0275	-0.0153	-0.2057	-0.0834	0.0987

Između snaga u granama i snaga u čvorovima postoji veza

$$[P_g] = [C][P]$$

gde su sa  $[P_g]$  označene snage u granama, a sa  $[P]$  snage u čvorovima.

Elementi  $c(i,j)$  matrice  $[C]$  su traženi koeficijenti koji pokazuju koliko kvantitativno treba smanjiti potrošnju u potrošačkom čvoru  $j$  da bi se rešilo preopterećenje na datomvodu  $i$ .

## 6.7. Rezultati za Garverov sistem

### 6.7.1. Ispitivanje deficitarnih situacija

U radu su ispitane sledeće situacije sa aspekta ispada pojedinih elemenata sistema:

- kombinacije svih mogućih ispada izvornih jedinica u oba sistema
- svi mogući ispadi jednog generatora i jednog voda u sistemu A, za sva moguća stanja izvornih jedinica u sistemu B

Jedna od osnovnih prednosti ovog ekvivalenta je u redukciji broja stanja merodavnih za ispitivanje. Ovim se bitno utiče na kompjutersko vreme potrebno za proračune pouzdanosti. Kod malih sistema kakav je Garverov vreme proračuna je zanemarljivo, ali u slučaju većih sistema kakav je IEEE RTS sistem, vreme potrebno za proračun je drastično veće. Za slučaj Garverovog modela porediće se broj situacija koje se ispituju za slučaj potpunog modelovanja suseda i primenom ekvivalenta.

Ukupan broj ekvivalentnih stanja sa aspekta izvora susednog sistema je 4, uz jedno dodatno stanje kojim se obuhvataju istovremeni ispadi vodova i generatora, znači ukupno 5 ekvivalentnih stanja. Pri tome se sva stanja sa kvarovima vodova suseda računaju kao jedno stanje pošto su obuhvaćena jednim ekvivalentnim stanjem (poglavlje 6.5).

Ukupni broj razmatranih stanja kada se povezani sistemi razmatraju u celosti je 1224. Ovaj broj se dobija na sledeći način. Prema Prilogu 6.1 ukupan broj stanja sa aspekta ispada generatorskih jedinica je 24. Smatramo da su jedinice u svakom od proizvodnih čvorova jednakih karakteristika pa se može za broj stanja primeniti formula  $n+1$ , gde je  $n$  broj jedinica u proizvodnom čvoru, što je objašnjeno u poglavlju 3.5.2. Kombinacijom ispada izvora u oba sistema dobija se ukupan broj stanja za ispitivanje  $24*24=576$ .

Ukoliko se razmatra ispad jednog voda i jedne generatorske jedinice u posmatranom sistemu pri svim mogućim stanjima izvora u susednom sistemu dobija se ukupno  $3*9*24=648$  stanja, gde se broj 3 odnosi na broj generatorskih čvorova, 9 na vodove, a 24 na stanja izvora susednog sistema. Ukupan broj stanja dobija se da je  $576+648=1224$ .

Ukupni broj razmatranih stanja kada je sused zamenjen ekvivalentom je 255. Ovaj broj se dobija na sledeći način. Broj ispada izvora u oba sistema je  $24*5=120$  dok je broj ispada jedne generatorske jedinice i jednog voda  $3*9*5=135$ , pa je ukupan broj stanja kada se koristi ekvivalent  $135+120=255$ .

Zaključak je da je i na malom sistemu broj situacija koje se ispituju bitno smanjen.

#### a) Ispad svih izvora u oba sistema

Ispitivane su deficitarne situacije u slučajevima svih mogućih kombinacija ispada izvornih jedinica u oba sistema. Kao što je već objašnjeno, u radu se porede deficiti po pojedinim potrošačkim čvorovima kada je susedni sistem B predstavljen u potpunosti i kada je zamenjen ekvivalentom. Vrlo je interesantno poređenje sumarnih rezultata, proizvoda verovatnoća i deficita, po pojedinim čvorovima, što je prikazano u tabeli 6.9. U redu sa oznakom ekvivalent, dati su rezultati kada je sistem B predstavljen ekvivalentom, a u redu sa oznakom potpun kada je sused kompletno modelovan. Sve vrednosti u tabelama su izražene u MW. Vidi se da je razlika u rezultatima proračuna (odstupanje) zanemarljiva.

Tabela 6.9. Poređenje sumarnih rezultata kod ispada izvora sistema

čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	
0	22.718	0	14.909	24.54	0	ekvivalent
0	22.699	0	14.896	24.518	0	potpun
0	0.019	0	0.013	0.022	0	odstupanje

#### b) Ispad jednog generatora i jednog voda

Takođe ispitivane su situacije svih mogućih kombinacija ispada jednog voda i jedne generatorske jedinice, za slučaj svih mogućih stanja izvornih jedinica susednog sistema B. Precizni rezultati o deficitima po pojedinim čvorovima za svaku situaciju, o učestanosti deficitarnih situacija i verovatnoći ispitivanih situacija dati su u priložima 6.3-6.6.

Vrlo je interesantno poređenje sumarnih rezultata proizvoda verovatnoća i deficita, svih razmatranih situacija, kada je sistem B predstavljen ekvivalentom i kada je kompletno modelovan, što je prikazano u tabeli 6.10. Vidi se da je odstupanje takođe zanemarljivo.

Tabela 6.10. Poređenje sumarnih rezultata kod ispada jednog izvora i jednog voda

čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	
0.00	0.034897	0.00	0.010992	0.11952	0.00	ekvivalent
0.00	0.034791	0.00	0.010937	0.11931	0.00	potpun
0	0.000106	0	5.5E-05	0.00021	0	odstupanje

### 6.7.2. Pokazatelji pouzdanosti Garverovog sistema

Za svaki od čvorova  $c$  sopstvenog, neekvivalentiranog sistema potrebno je izračunati

- ukupnu verovatnoću prekida napajanja  $p_c = \sum_i p_{ci}$
- ukupnu učestanost prekida napajanja  $f_c = \sum_i f_{ci}$
- ukupnu očekivanu neisporučenu energiju  $END_c = \sum_i P_{ci} p_{ci} \cdot 8760$
- godišnje neisporučenu snagu  $PND_c = \sum_i P_{ci} f_{ci}$

gde je:

$p_{ci}$  – verovatnoća deficitarne situaciju  $i$  u čvoru  $c$

$f_{ci}$  – učestanost deficitarne situaciju  $i$  u čvoru  $c$

$P_{ci}$  – neisporučena snaga čvoru  $c$  u deficitarnoj situaciji  $i$

Indeksom  $i$  obuhvataju se sva razmatrana deficitarna stanja koja dovode do redukcije potrošnje u posmatranom čvoru. Indeksom  $c$  obuhvataju se svi čvorovi neekvivalentiranog sistema.

Tabela 6.11. Parametri pouzdanosti sopstvenog sistema kada je susedni kompletno modelovan

Čvor	$p_c$	$f_c$ (1/god)	$END_c$ (MWh/god)	$PND_c$ (MW/god)
1	0	0	0	0
2	0.3651	32.17	199.1	2097.4
3	0	0	0	0
4	0.3649	31.83	130.6	1360.9
5	0.3793	33.52	215.8	2362.2
6	0	0	0	0

Tabela 6.12. Parametri pouzdanosti kada je susedni sistem predstavljen ekvivalentom

Čvor	$p_c$	$f_c$ (1/god)	$END_c$ (MWh/god)	$PND_c$ (MW/god)
1	0	0	0	0
2	0.3656	32.65	199.3	2084.1
3	0	0	0	0
4	0.3653	32.31	130.7	1352.1
5	0.3798	34.17	216.0	2359.3
6	0	0	0	0

### 6.7.3 Poređenje rezultata po pojedinim čvorovima

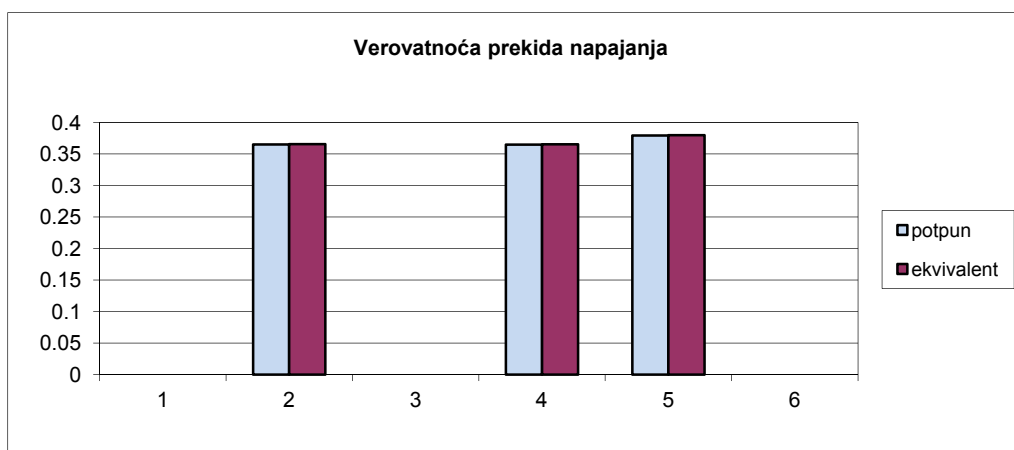
U tabelama 6.13. do 6.16. prikazani su rezultati po čvorovima za slučaj da je susedni sistem B kompletno modelovan i za slučaj da je sistem B ekvivalentiran. Takođe, koliko



se rezultati dobro slažu kada je susedni sistem modelovan u potpunosti i ekvivalentom prikazano je dijagramima na slikama od 6.5. do 6.8.

Tabela 6.13. Ukupna verovatnoća prekida napajanja  $p_c$

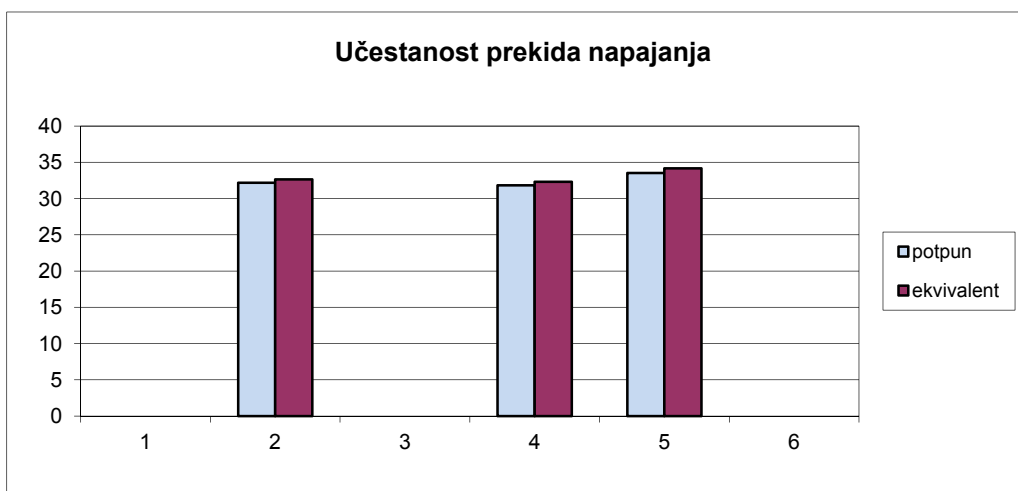
Čvor	susedni kompletno modelovan	susedni predstavljen ekvivalentom
1	0	0
2	0.3651	0.3656
3	0	0
4	0.3649	0.3653
5	0.3793	0.3798
6	0	0



Slika 6.5. Ukupna verovatnoća prekida napajanja  $p_c$

Tabela 6.14. Ukupna učestanost prekida napajanja  $f_c$

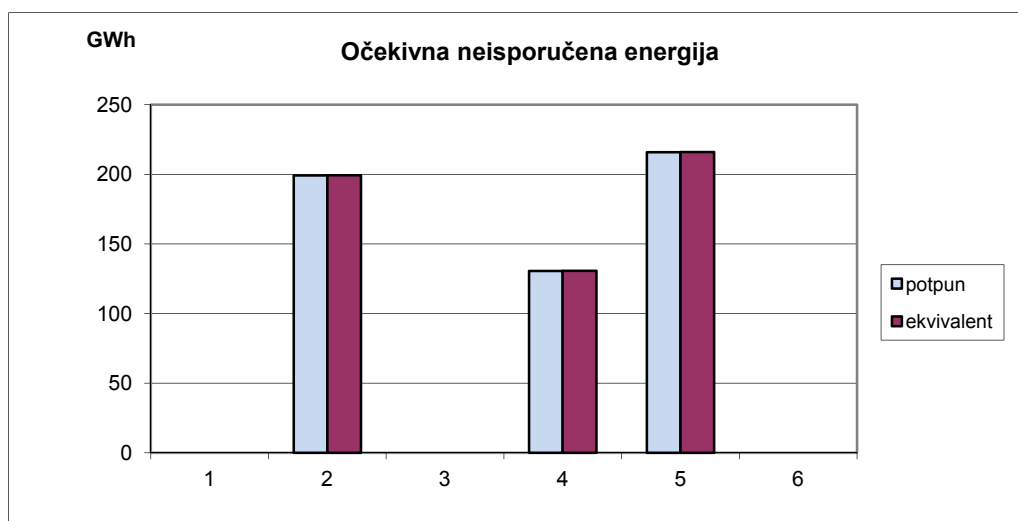
Čvor	susedni kompletno modelovan (1/god.)	susedni predstavljen ekvivalentom (1/god.)
1	0	0
2	32.17	32.65
3	0	0
4	31.83	32.31
5	33.52	34.17
6	0	0



Slika 6.6. Ukupna učestanost prekida napajanja  $f_c$

Tabela 6.15. Ukupna očekivana neisporučena energija  $END_c$

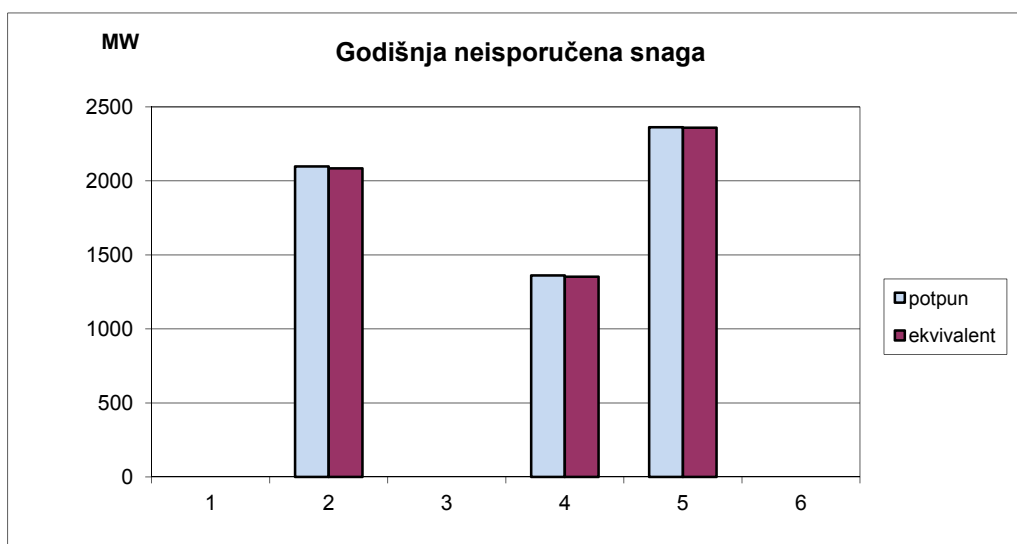
Čvor	Susedni kompletno modelovan ( MWh)	Susedni predstavljen ekvivalentom ( MWh)
1	0	0
2	199149	199316
3	0	0
4	130585	130699
5	215820	216021
6	0	0



Slika 6.7. Ukupna očekivana neisporučena energija  $END_c$

Tabela 6.16. Godišnja neporučena snaga  $PND_c$

Čvor	Susedni kompletno modelovan ( MW)	Susedni predstavljen ekvivalentom ( MW)
1	0	0
2	2097.4	2084.1
3	0	0
4	1360.9	1352.1
5	2362.2	2359.3
6	0	0



Slika 6.8. Godišnja neporučena snaga  $PND_c$

Kao što se vidi predloženi pojednostavljeni model daje rezultate koji su vrlo bliski rezultatima dobijenim sa kompletno modelovanim susednim sistemom sa odstupanjima koja su procentualno vrlo mala. Ovo se može oceniti kao vrlo dobar rezultat za tako mali sistem koji je inače veoma osetljiv na ispade.

## 7. ISPITIVANJE PREDLOŽENE METODE NA REALNIM SISTEMIMA

U radu je kompletna metoda ispitana i na realnim sistemima Srbije, Crne Gore i Albanije. Sistem Srbije se posmatra kada je modelovan u potpunosti i kada je zamenjen ekvivalentom i ispituje se njegov uticaj na parametre pouzdanosti u potrošačkim čvorovima u susednom sistemu. U radu je za proračun korišćen zimski model iz 2011. godine, kako bi se uzeli uslovi iz vršnog opterećenja. Na interkonektivnim čvorovima sa ostalim susednim sistemima koji nisu predmet ove analize postavljene su realne vrednosti snage, bilo da se radi o uvozu ili izvozu u definisanom modelu. U radu je obuhvaćen i deo sistema BiH, elektrane Gacko i Trebinje, kako bi se dobila jedna realna celina za razmatranje. Kompletni podaci o sistemima su dati u prilogu 7. U proračunima je korišćen DC model tokova snaga. Rezultati proračuna tokova snaga su poređeni sa profesionalnim softverskim alatima koji se koriste u JP Elektromreža Srbije. Pokazalo se da tokovi aktivnih snaga za definisano stanje imaju približno iste vrednosti. U definisanom modelu bilansi snaga proizvodnje i potrošnje su predstavljeni u tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Bilansi snage u sistemima

Sistem	Proizvodnja	Potrošnja	$P_{gen}-P_{pot}$
Srbija	$P_{gen} = 5.890 \text{ MW}$	$P_{pot} = 4.797 \text{ MW}$	1.093 MW
Crna Gora i Albanija	$P_{gen} = 1.768 \text{ MW}$	$P_{pot} = 1.276 \text{ MW}$	492 MW

Šeme razmatranih sistema su date u prilogu prilogu 7.

### 7.1. Ekvivalentiranje sistema Srbije

Predloženom metodologijom testiran je sistem Srbije sa okolinom i proračunati su parametri pouzdanosti sistema Srbije, pri čemu je sistem Crne Gore i Albanije zamenjen ekvivalentom. S obzirom na veličinu i broj čvorova pomenutih sistema interesantno je posmatrati uticaj znatno većeg sistema Srbije na manje sisteme Albanije i Crne Gore, pa su u radu prikazani ovi rezultati, kao kritičniji slučaj. Prema tome, ovde je sistem Srbije razmatran kao eksterni, susedni, a sistem Crne Gore i Albanije kao sopstveni, tj. sistem u kome se posmatra uticaj ekvivalentiranja. Kod izbora graničnih čvorova između pomenutih sistema uzeti su čvorovi tako da se razmatrani sistemi mogu predstavljati kao zasebne celine.

Granični čvorovi su Pljevlja (220 KV), Ribarevina (400 KV) i Prizren (220 KV). Svi dalekovodi koji polaze od navedena tri granična čvora modeluju se u potpunosti i nisu deo ekvivalenta (Prizren-Fierza, Ribarevina-Podgorica, Ribarevina-Pljevlja). Ukupna potrošnja u sistemima se smatra da je konstantna, tj. analiza se radi za jedan nivo potrošnje. Potrošnja susednog sistema, tj. sistema Srbije, proračunata prema jednačinama za DC mrežni ekvivalent (poglavlje 5) raspoređena je u sledećim karakterističnim čvorovima ekvivalentne šeme

$$P_{Lizvor} = 4690.4 \text{ MW}$$

$$P_{LPljevlja} = 90.3 \text{ MW}$$

$$P_{LRibarevina} = 0 \text{ MW}$$

$$P_{LPrizren} = 16.4 \text{ MW}$$

Snage u karakterističnim čvorovima  $T_1$  (Prizren),  $T_2$  (Ribarevina),  $T_3$  (Pljevlja) su eksplicitno zadate  $P_{T1}$ ,  $P_{T2}$  i  $P_{T3}$  i zavise od konkretnog stanja sopstvenog sistema.

Uzete su vrednosti iz razmatranog zimskog modela

Prizren  $P_{T1} = 224.1$  MW (potrošnja),

Ribarevina  $P_{T2} = 0$  MW (razvodno postrojenje)

Pljevlja  $P_{T3} = 150$  MW (proizvodnja)

Zbirna snaga svih izvora u sistemu  $P_s$ , zavisna je od režima rada generatora. Proračunate vrednosti admitansi ekvivalentne šeme su:

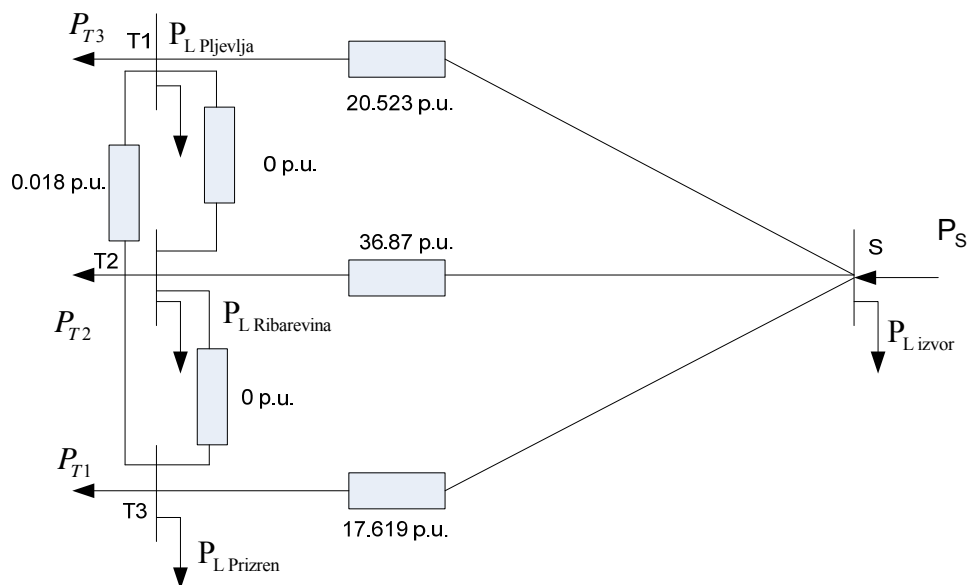
$$Y_{izvor-Pljevlja} = 20.523 \text{ p.u.}$$

$$Y_{izvor-Ribarevina} = 36.87 \text{ p.u.}$$

$$Y_{izvor-Prizren} = 17.619 \text{ p.u.}$$

$$Y_{Ribarevina-Pljevlja} = 0.018 \text{ p.u.}$$

Na osnovu ovih proračuna dobija se ekvivalentna šema susednog sistema, tj. sistema Srbije, kao na slici 7.1.



Slika 7.1. Ekvivalentna šema sistema Srbije

## 7.2. Ekvivalentiranje izvora susednog sistema

Jedno od od bitnih unapređenja u razvoju metodologije je i način modelovanje izvora susednog sistema. Svi izvori susednog sistema su grupisani u jednom čvoru i predstavljeni zbirnom snagom  $P_s$ . Ukoliko bi u toj tački ekvivalentne šeme bilo razmatrano samo jedno stanje izvora, ekvivalent bi bio i suviše grub. Ako je broj generatorskih jedinica u pojedinim izvornim čvorovima  $n$ , onda je broj mogućih stanja za ispitivanje sa aspekta ispada generatorskih jedinica, pod uslovom da su one istih karakteristika  $n+1$ . U prilogu 7.2 dati su podaci o izvornim jedinicama u pojedinim proizvodnim čvorovima sistema Srbije. Prethodnim razmatranjem dobija se broj mogućih stanja izvora koja je potrebno modelovati sa aspekta ispada izvora susednog sistema, tj. sistema Srbije, njih ukupno  $7*5*3*3*3*3*3*3*3*3=229\ 635$  stanja.

I kod realnog modela vrši se ekvivalentiranje stanja izvora prema metodologiji opisanoj u poglavlju 5.4. Uzeta je maksimalna ugovorena snaga havarijske ispomoći između sistema  $E = 100$  MW. Sva stanja izvora susednog sistema kod kojih je snaga veća od zbira potrošnje susednog sistema  $P_{potB}$  i snage ispomaganja  $E = 100$  MW, ekvivalentirana su jednom veličinom, gornjom granicom  $P_{potB} + E$ . Takođe, ona kod kojih je proizvodnja u susednom sistemu Srbije manja od potrošnje, definisana su kao jedno stanje ekvivalenta, u kome nema ispomaganja između sistema i u njima ekvivalent ne dolazi do izražaja. Ova stanja ekvivalentirana su donjom granicom.

Broj mogućih stanja za ispitivanje sa aspekta ispada izvornih jedinica u pojedinim proizvodnim čvorovima u sistemu Crne Gore i Albanije je  $2*4*8*4*5*6*5=38\ 400$  stanja. U prilogu 7.3 dati su podaci o broju izvornih jedinica u svakom generatorskom čvoru. U ovoj analizi sistem Crne Gore i Albanije je sopstveni i njegova stanja se ne ekvivalentiraju. Kako je ukupan broj stanja izvora u sistemu Srbije 229635 stanja, kombinacijom svih mogućih stanja sa aspekta ispada generatorskih jedinica u oba sistema dobija se ukupan broj situacija koje treba ispitati  $229635*38400=8\ 817\ 984\ 000$ . Obzirom na ovako ekstremno veliki broj situacija koje treba ispitati, što je praktično nemoguće, obično se ispitivanja vrše do neke usvojene granične verovatnoće, ili pak do koincidencije nekog broja istovremenih ispada u sistemu. U ovakvim situacijama proračuna pokazatelja pouzdanosti potreba za ekvivalentom dolazi najviše do izražaja. Primenom ovakvog načina ekvivalentiranja stanja izvora broj ekvivalentnih stanja u ispitivanjima je bitno manji. Ukoliko se menja granična verovatnoća do koje će se obuhvatiti ispitivanje kao i ugovorena maksimalna snaga havarijske ispomoći između sistema, broj merodavnih stanja za ispitivanje se menja, što je prikazano u tabeli 7.2. Ukupan broj stanja izvora suseda dobijen je ekvivalentiranjem prema opisanoj metodologiji o donjoj i gornjoj granici snage izvora ekvivalenta, a zatim grupisanjem onih stanja koja imaju iste raspoložive snage.

Tabela 7.2. Grupisanje izvora u susednom sistemu

Granična verovatnoća	Maksimalno ugovorena snaga havarijske ispomoći	Ukupan broj stanja izvora	Broj ekvivalentnih stanja	Posle grupisanja
0.001	100	159	20	14
0.001	200	159	42	26
0.0001	100	1684	193	22
0.0001	200	1684	325	42
0.00001	100	7328	300	22
0.00001	200	7328	485	42

U radu se vodilo računa i o koincidenciji broja ispada generatorskih jedinica. Ispitivanjem su obuhvaćeni svi ispadi koincidencije petog stepena, pa je ukupan broj stanja susednog sistema koji se razmatra jednak 4848, a primenjenom metodologijom ekvivalentiranja i zatim grupisanjem stanja istih raspoloživih snaga, ekvivalentni broj stanja izvora koji se razmatra je 22. U tabeli 7.3. su dati kompletni podaci o ekvivalentnim stanjima izvora za slučaj da je dogovorena maksimalna snaga havarijske ispomoći  $E = 100\text{MW}$ , koji se odnose na ekvivalentnu raspoloživu snagu, ekvivalentnu verovatnoću i ekvivalentni intezitet ispada.

Tabela 7.3. Ekvivalentna stanja izvora sistema

Ekvivalentna stanja izvora susednog sistema	Ekvivalentni intenzitet ispada	Ekvivalentna snaga izvora (MW)	Verovatoća stanja
1	120.75	5121.2	0.38549
2	0.79242	5025	0.0037598
3	0.41925	5045	0.0022396
4	0.89713	5065	0.0041999
5	1.0355	5120	0.0038938
6	0.64923	5085	0.0020617
7	1.328	5030	0.0044286
8	0.5616	5105	0.0018869
9	2.1956	5060	0.0080884
10	1.3132	5080	0.0062312
11	0.93218	5100	0.0045207
12	0.62706	5050	0.002558
13	1.0697	5070	0.0046023
14	1.3718	5090	0.0047879
15	0.40483	5035	0.0017266
16	2.4765	5110	0.0089127
17	0.20085	5055	0.0011637
18	2.2191	5040	0.007662
19	0.73323	5075	0.0022819
20	0.5507	5095	0.0020271
21	1.4721	5115	0.005121
22	0	0	0.29689

Primenom ekvivalenta pri modelovanju susednog sistema broj situacija merodavnih za ispitivanje rapidno se smanjuje.

Broj stanja u sopstvenom sistemu, ako se uzima koincidencija ispada petog stepena je 1308, pa je broj situacija merodavnih za ispitivanje koja se odnose na ispade izvora u potpuno modelovanim sistemima  $1308 \cdot 4848 = 6\,341\,184$ , dok se upotrebom ekvivalenta broj stanja za ispitivanje smanjuje na  $1308 \cdot 22 = 28\,776$  stanja.

U radu su analizirane i situacije istovremenog ispada jednog dalekovoda i jedne generatorske jedinice u sopstvenom sistemu, za slučaj svih stanja izvora u susednom sistemu. Broj situacija kada je sused kompletno modelovan je jednak  $4848 \cdot 33 \cdot 8 = 1\,279\,872$  situacija, gde je 8 broj generatorskih čvorova u sopstvenom sistemu (jer se radi ispad jedne generatorske jedinice), a 33 je broj dalekovoda koji se razmatra. Radijalni dalekovodi nisu razmatrani. U slučaju upotrebe ekvivalenta razmatra se  $22 \cdot 33 \cdot 8 = 5\,808$  situacija.

Prema tome, ukupan broj stanja za ispitivanje 7 621 056 kada su sistemi modelovani u potpunosti, svodi se na 34 584 kada je sistem Srbije zamenjen ekvivalentom.

### 7.3. Pokazatelji pouzdanosti na realnom sistemu

Proračun pokazatelja pouzdanosti za pojedine potrošačke čvorove je razmatran na susednom sistemu Crne Gore i Albanije, i to za dva slučaja:

- susedni sistem Srbije je modelovan u potpunosti
- susedni sistem Srbije je zamenjen ekvivalentom

Proračunavaju se parametri pouzdanosti, koji se odnose na potrošačke čvorove, a primenjena metoda prema kojoj se raspoređuje deficit je ista kao i za slučaj Garverovog primera. Zapravo, ukupan deficit sistema se raspoređuju na sve potrošačke čvorove srazmerno potrošnji u datim čvorovima. Nakon proračuna tokova aktivnih snaga, ukoliko dolazi do prekoračenja po pojedinim vodovima u sopstvenom sistemu, vrši se redukcija potrošnje u onom potrošačkom čvoru koji ima najveći uticaj na vod na kome je došlo do preopterećenja. Metodologija je pokazana u poglavlju 5.6. Parametri pouzdanosti koji se računaju definisani su u poglavlju 5.4:

- ukupna verovatnoća prekida napajanja  $p_c$
- ukupna učestanost prekida napajanja  $f_c$
- ukupna očekivana neisporučena energija  $END_c$
- godišnje neisporučena snaga  $PND_c$

Parametri pouzdanosti u kojima je susedni sistem modelovan ekvivalentom predstavljani su u tabeli 7.4 . Za naziv čvora je korišćeno UCTE ime čvora, gde je UCTE oznaka zvanično ime čvora usaglašeno na nivou svih članica UCTE interkonekcije.



Tabela 7.4. Parametri pouzdanosti kada je susedni EES Srbije modelovan ekvivalentom

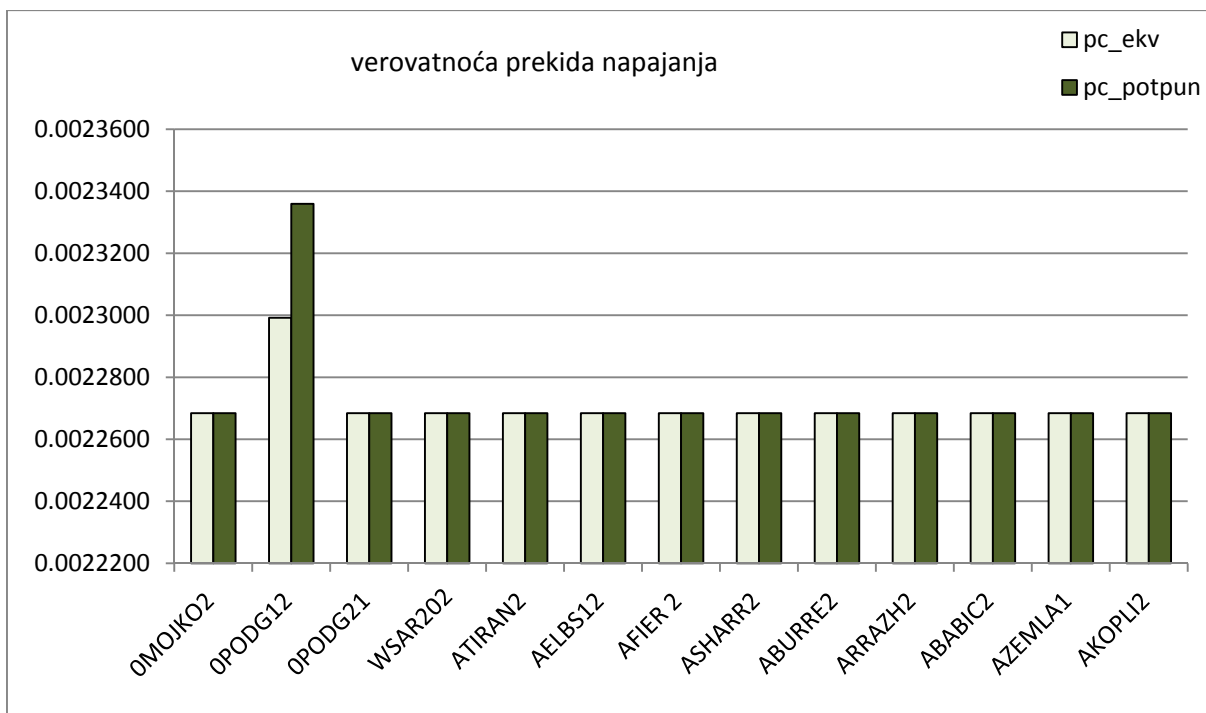
<b>Naziv čvora</b>	<b>END<sub>c</sub> (MWh/god)</b>	<b>PND<sub>c</sub> (MW)</b>	<b>p<sub>c</sub></b>	<b>f<sub>c</sub></b>
Mojkovac	16.64	0.04	0.002268	0.071329
Podgorica 220kV	82.89	0.26	0.002299	0.080659
Podgorica 400kV	158.49	0.39	0.002268	0.071329
Sarajevo	2.48	0.01	0.002268	0.071329
Tirana	146.57	0.36	0.002268	0.071329
Elbasan	52.17	0.13	0.002268	0.071329
Fier	47.20	0.12	0.002268	0.071329
Sharr	48.19	0.12	0.002268	0.071329
Burrel	17.39	0.04	0.002268	0.071329
Dures	44.72	0.11	0.002268	0.071329
Babic	22.36	0.06	0.002268	0.071329
Zemlak	22.36	0.06	0.002268	0.071329
Koplik	3.48	0.01	0.002268	0.071329

Rezultati proračuna kada je sistem Srbije modelovan u potpunosti dati su u tabeli 7.5.

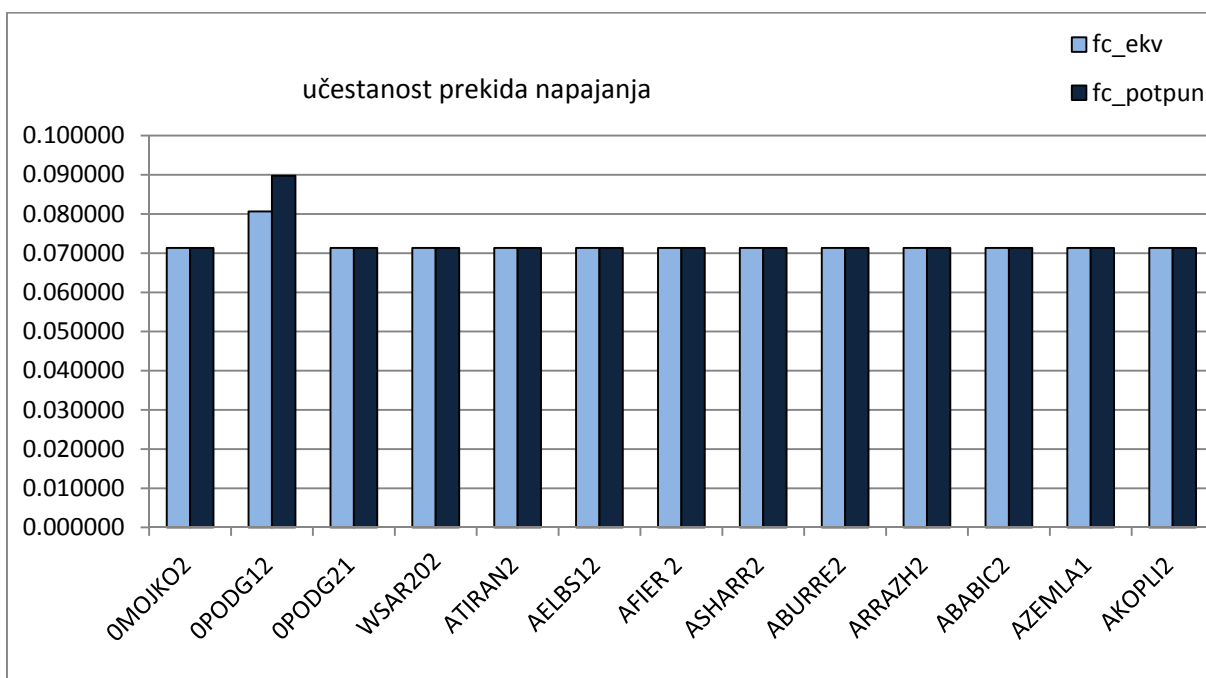
Tabela 7.5. Parametri pouzdanosti kada je susedni EES Srbije modelovan u potpunosti

<b>Naziv čvora</b>	<b>END<sub>c</sub> (MWh/god)</b>	<b>PND<sub>c</sub> (MW)</b>	<b>p<sub>c</sub></b>	<b>f<sub>c</sub></b>
Mojkovac	16.65	0.04	0.002268	0.071329
Podgorica 220kV	92.04	0.52	0.002336	0.089746
Podgorica 400kV	158.59	0.40	0.002268	0.071329
Sarajevo	2.49	0.01	0.002268	0.071329
Tirana	146.66	0.37	0.002268	0.071329
Elbasan	52.20	0.13	0.002268	0.071329
Fier	47.23	0.12	0.002268	0.071329
Sharr	48.22	0.12	0.002268	0.071329
Burrel	17.40	0.04	0.002268	0.071329
Dures	44.74	0.11	0.002268	0.071329
Babic	22.37	0.06	0.002268	0.071329
Zemlak	22.37	0.06	0.002268	0.071329
Koplik	3.48	0.01	0.002268	0.071329

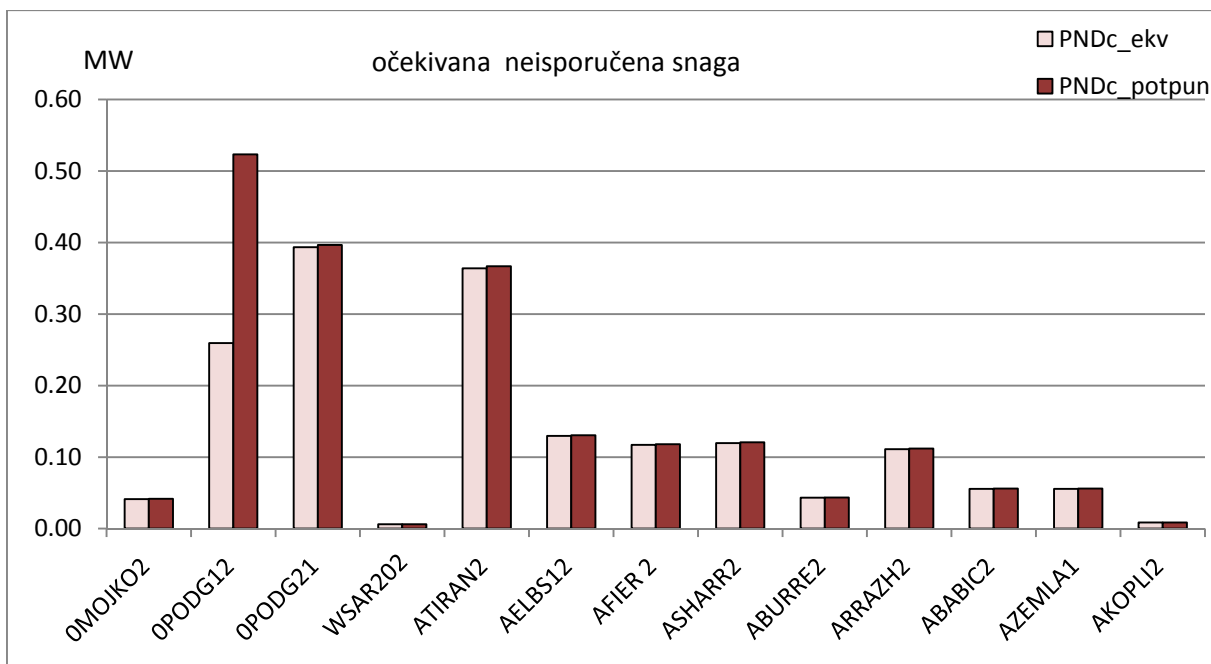
Na narednim dijagramima data su uporedna poređenja pojedinih pokazatelja pouzdanosti kada je susedni sistem modelovan u potpunosti i preko ekvivalenta (slike od 7.2 do 7.5).



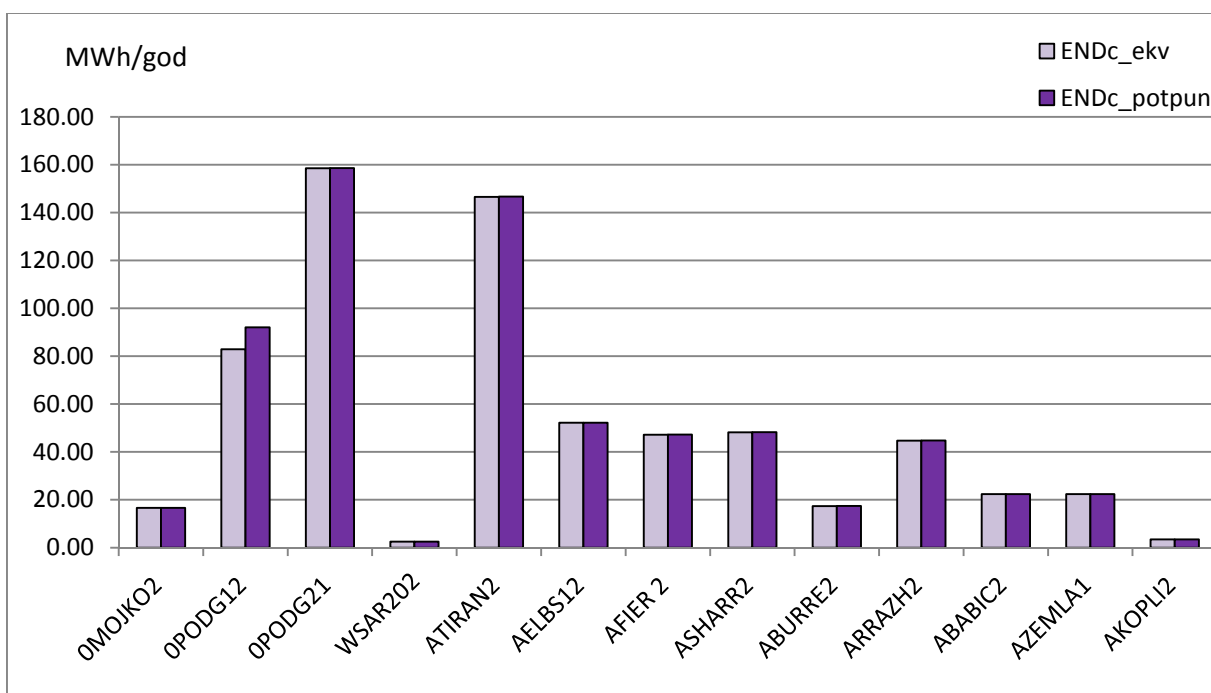
Slika 7.2. Dijagram verovatnoće prekida napajanja



Slika 7.3. Dijagram učestanosti prekida napajanja



Slika 7.4. Dijagram očekivane neisporučene snage



Slika 7.5. Dijagram očekivane neisporučene energije

Iz priloženih rezultata se zaključuje da se indeksi pouzdanosti proračunati za sopstveni sistem vrlo dobro slažu kada je susjed modelovan ekvivalentom. Najveća odstupanja su u blizini interkonektivnih čvorova, u ovom slučaju u čvoru Podgorica, referisati se na tabele 7.4 i 7.5.

#### 7.4. Uticaj nivoa ugovorene snage havarijske ispomoći između susednih sistema na parametre pouzdanosti

Vrlo je interesantno ispitivanje na koji način ugovorena snaga havarijske ispomoći između sistema utiče na smanjenje deficitarnih situacija u ispitivanom, sopstvenom sistemu. Ovde je posebno bitno da se kao sused razmatra sistem Srbije i njegov uticaj na potrošačke čvorove u mnogo manjem sistemu Crne Gore i Albanije.

U ovom istraživanju snaga havarijske ispomoći (dozvoljena snaga razmene) se razmatra za sledeće slučajeve:

- a) E = 50 MW
- b) E = 100 MW
- c) E = 200 MW

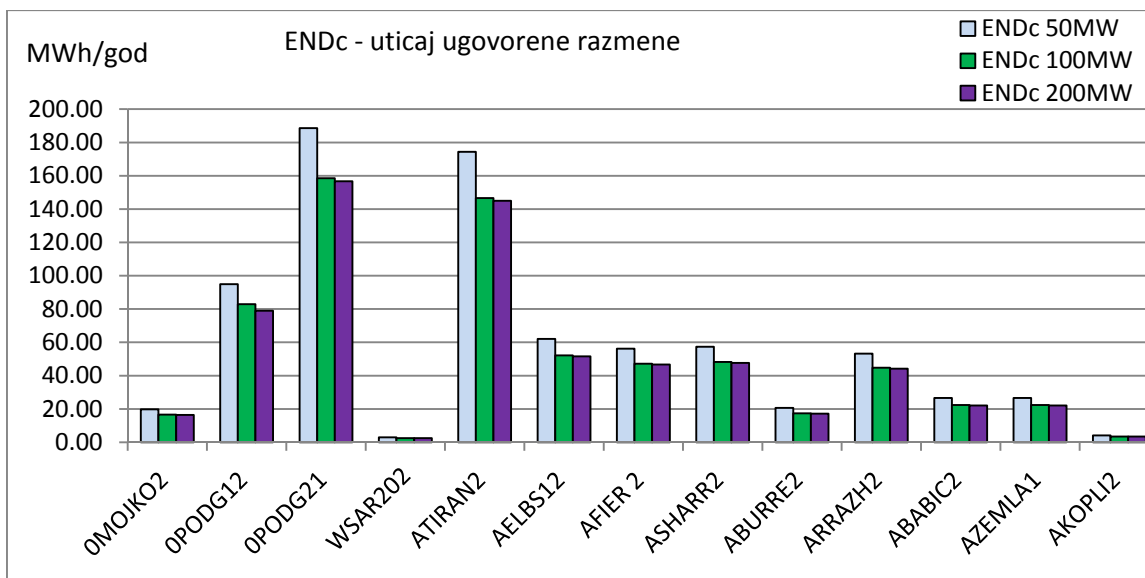
Ilustracija ovog uticaja za sva tri nivoa definisane ugovorene havarijske ispomoći između sistema je prikazana praćenjem parametara pouzdanosti po pojedinim potrošačkim čvorovima ispitivanog sistema i to:

- ukupne neisporučene godišnje energije
- očekivane neisporučene snage
- učestanosti prekida napajanja i
- verovatnoće prekida napajanja.

Zavisnost ugovorene snage havarijske ispomoći i ukupne neisporučene energije data je rezultatima prikazanim preko tabele 7.6. i preko dijagrama na kojima su uporedna poređenja ukupne neisporučene godišnje energije po pojedinim potrošačkim čvorovima (slika 7.6). Vrednosti očekivane neisporučene energije su izražene u MWh/god.

Tabela 7.6. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na susedni sistem

Potrošački čvor	E=50MW	E=100MW	E=200MW
Mojkovac	19.80	16.64	16.46
Podgorica 220kV	94.87	82.89	79.00
Podgorica 400kV	188.56	158.49	156.73
Sarajevo	2.96	2.48	2.46
Tirana	174.38	146.57	144.93
Elbasan	62.06	52.17	51.59
Fier	56.15	47.20	46.67
Sharr	57.34	48.19	47.66
Burrel	20.69	17.39	17.20
Dures	53.20	44.72	44.22
Babic	26.60	22.36	22.11
Zemlak	26.60	22.36	22.11
Koplik	4.14	3.48	3.44

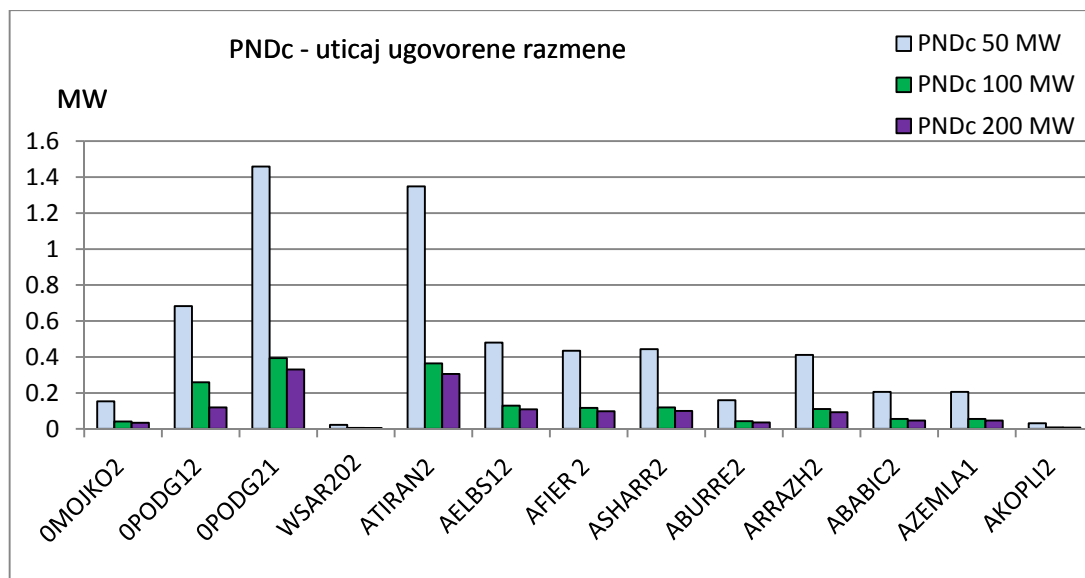


Slika 7.6. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na ukupnu neisporučenu energiju po potrošačkim čvorovima

Zavisnost ugovorene snage havarijske ispomoći i očekivane neisporučene godišnje energije po čvorovima data je rezultatima prikazanim preko tabele 7.7. i preko dijagrama na slici 7.7. Vrednosti očekivane neisporučene snage su izražene u MW/god.

Tabela 7.7. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na očekivanu neisporučenu snagu susednom sistemu

Potrošački čvor	PNDc 50MW	PNDc 100MW	PNDc 200MW
Mojkovac	0.15318	0.041331	0.034668
Podgorica 220kV	0.68308	0.25939	0.11959
Podgorica 400kV	1.4586	0.39357	0.33012
Sarajevo	0.022863	0.0061688	0.0051743
Tirana	1.3489	0.36396	0.30529
Elbasan	0.48011	0.12955	0.10866
Fier	0.43439	0.11721	0.098312
Sharr	0.44353	0.11968	0.10038
Burrel	0.16004	0.043182	0.03622
Dures	0.41153	0.11104	0.093138
Babic	0.20576	0.05552	0.046569
Zemlak	0.20576	0.05552	0.046569
Koplik	0.032008	0.0086364	0.0072441

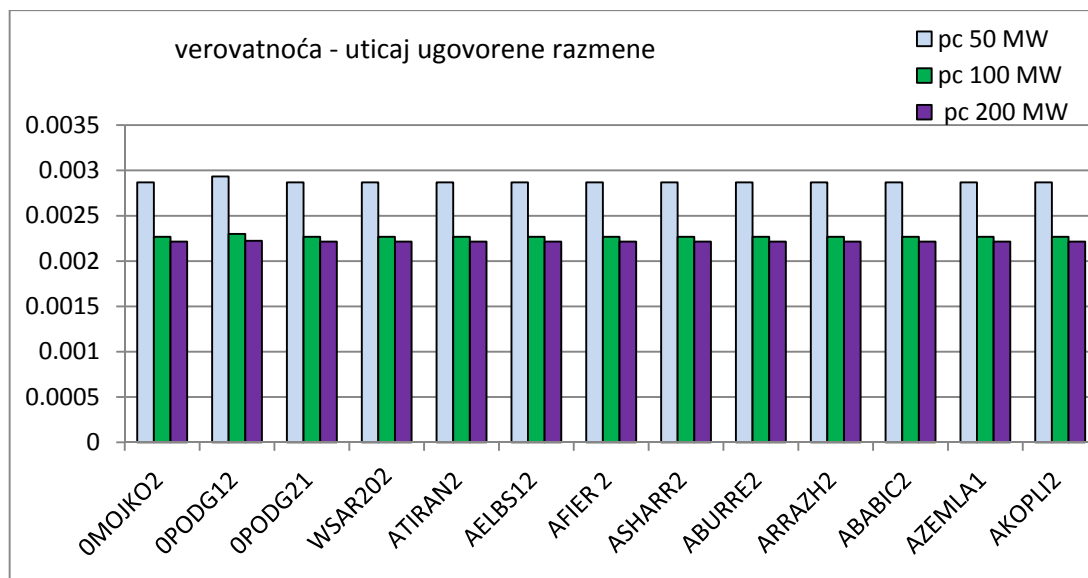


Slika 7.7. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na ukupnu neisporučenu snagu po potrošačkim čvorovima

Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći između sistema na verovatnoću i učestanost prekida napajanja u pojedinim potrošačkim čvorovima susednog sistema dati su tabelama 7.8. i 7.9. i dijagramima 7.8. i 7.9.

Tabela 7.8. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na verovatnoću prekida napajanja u susednom sistemu

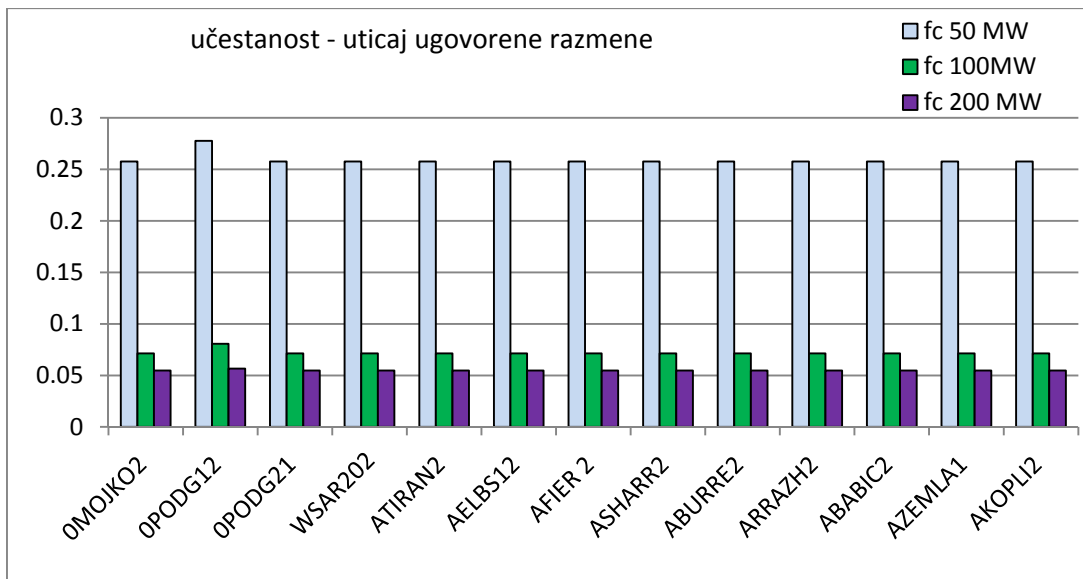
Potrošački čvor	pc		
	E=50 MW	E=100 MW	E= 200 MW
Mojkovac	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Podgorica 220kV	0.0029334	0.0022992	0.0022228
Podgorica 400kV	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Sarajevo	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Tirana	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Elbasan	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Fier	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Sharr	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Burrel	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Dures	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Babic	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Zemlak	0.0028678	0.0022684	0.0022156
Koplik	0.0028678	0.0022684	0.0022156



Slika 7.8. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na u verovatnoću prekida napajanja u susedom sistemu

Tabela 7.9. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na učestanost prekida napajanja u susedom sistemu

Potrošački čvor	fc		
	E=50 MW	E=100 MW	E=200 MW
Mojkovac	0.25764	0.071329	0.054751
Podgorica 220kV	0.2777	0.080659	0.056641
Podgorica 400kV	0.25764	0.071329	0.054751
Sarajevo	0.25764	0.071329	0.054751
Tirana	0.25764	0.071329	0.054751
Elbasan	0.25764	0.071329	0.054751
Fier	0.25764	0.071329	0.054751
Sharr	0.25764	0.071329	0.054751
Burrel	0.25764	0.071329	0.054751
Dures	0.25764	0.071329	0.054751
Babic	0.25764	0.071329	0.054751
Zemlak	0.25764	0.071329	0.054751
Koplik	0.25764	0.071329	0.054751



Slika 7.9. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na učestanost prekida napajanja u susednom sistemu

### 7.5. Ispitivanje uticaja ispada vodova i generatora u susednom sistemu na parametre ekvivalenta

I u slučaju primene ekvivalenta na realnim sistemima parametri razvijenog ekvivalenta su korigovani uzimanjem u obzir uticaja istovremenih ispada vodova i generatora u sistemu koji se ekvivalentira. Primenjena metodologija je opisana u poglavlju 5.3 sa ciljem da se obuhvati uticaj istovremenih ispada generatora i vodova na parametre ekvivalenta.

Ispadi u susednom sistemu ispituju se u slučaju kada se na interkonektivne čvorove dodaje po 50 MW, ukupno 150 MW ( i to na Prizren, Ribarevinu i Fierzu). Za novoformiranu mrežu, tj. za svako novo topološko stanje definisano dole navedenim situacijama proračunavaju se admitanse ekvivalenta.

Razmatra se ispad jedne grane susednog sistema, tj. sistema Srbije

Ispitivanjem ispada jednog voda pokazalo se da nema ni jedne situacije koja je merodavna za ispitivanje, tj. za korekciju ekvivalenta. Zapravo, smanjenjem dodatnog opterećenja na interkonektivnim čvorovima situacija u sistemu po pitanju preopterećenosti dalekovoda ostaje ista. Samim tim, ove situacije ne ulaze u one koje su merodavne za korekciju ekvivalenta za osnovno stanje sistema.

Razmatra se ispad dve grane susednog sistema, tj. sistema Srbije

U daljem tekstu nabrojane su situacije koje su merodavne za ispitivanje, i to su:

- 1) Ispadi voda 220 kV Čačak-Požega i voda 220 kV Kraljevo-Požega preopterećuje se transformator TS 400/220 kV Niš. Moguće je isporučiti susednom sistemu dodato opterećenje, tj. snagu u interkonektivnim čvorovima od po 3\*5 MW.



- 2) Ispadi voda 400 kV Niš-Kosovo B i transformatora TS 400/220 kV Niš preopterećuje se vod 220 kV Kraljevo-Krusevac. Moguće je isporučiti susednom sistemu dodato opterećenje, tj. snagu u interkonektivnim čvorovima od po 3\*40 MW.
- 3) Ispadi voda 220 kV Obrenovac-N. Sad i voda 400 kV RP Mladost-S.Mitrovica preopterećuje se dalekovod 220 kV Srbobran-S.Mitrovica. Moguće je isporučiti susednom sistemu dodato opterećenje, tj. snagu u interkonektivnim čvorovima od po 3\*30 MW.

Prema tome, obuhvatanjem opisanih stanja preko težinskih faktora dobija se korekcija admitansi i ekvivalentno stanje izvora ekvivalenta susednog sistema (jednačine date u 5.3).

Proračun je pokazao da su korekcije zanemarljive i admitanse dobijene proračunom su praktično iste kao i za osnovno stanje za koje je ekvivalent razvijen:

$$Y_1=17.6186 \text{ p.u.}$$

$$Y_2=36.8700 \text{ p.u.}$$

$$Y_3=20.5315 \text{ p.u.}$$

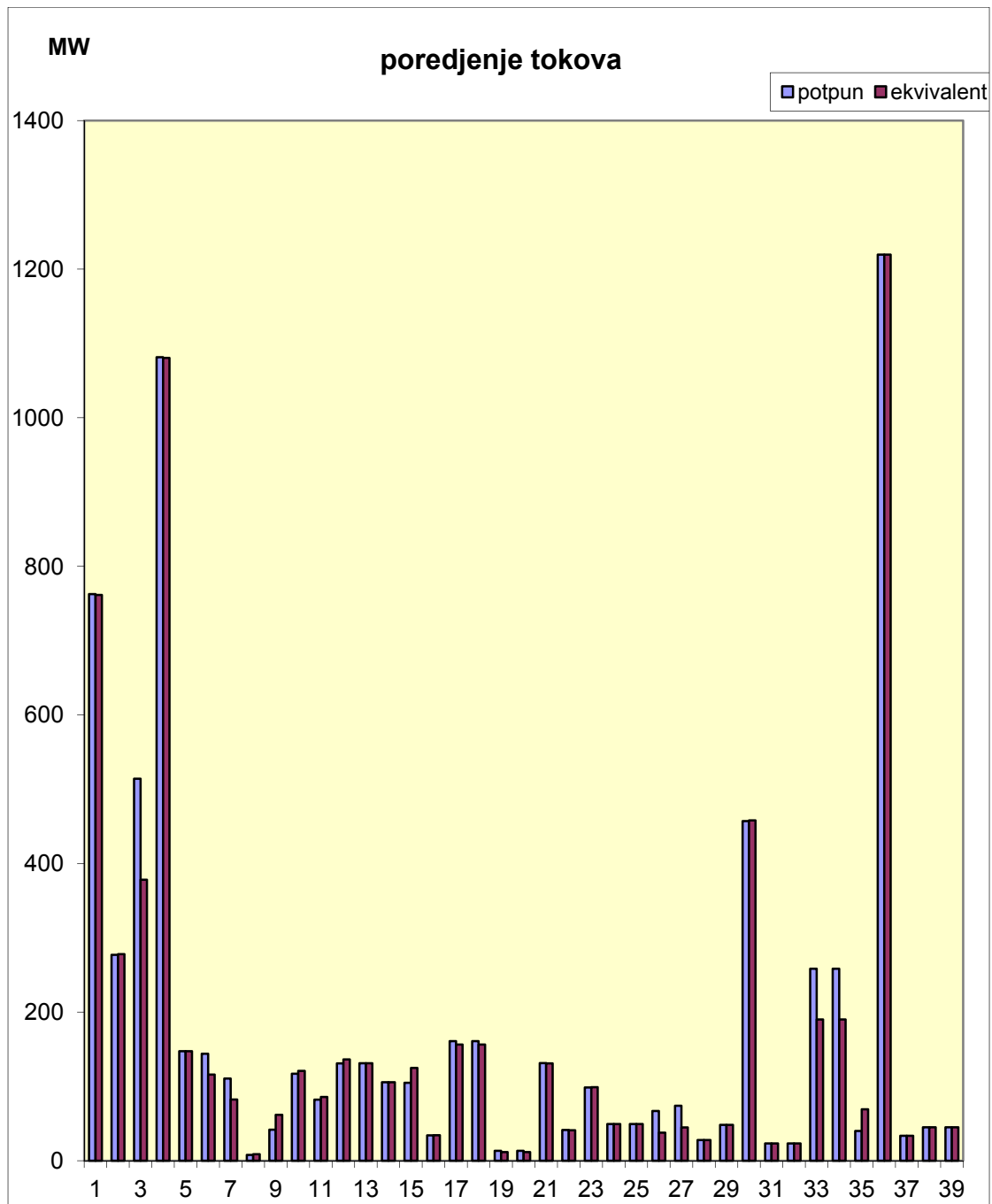
$$Y_4=0.0181 \text{ p.u.}$$

## **7.6. Poređenje tokova snaga primenom ekvivalenta susednog sistema**

Da bi se videla moguća primena ekvivalenta, ne samo za potrebe istraživanja parametara pouzdanosti, urađena je dodatna analiza poređenja tokova snaga po dalekovodima sistema Crne Gore i Albanije, u slučaju kada je susedni sistem Srbije modelovan u potpunosti i kada je modelovan ekvivalentom. Vrednosti po pojedinim vodovima sopstvenog sistema Crne Gore i Albanije dati su u tabeli 7.10 i dijagramom na slici 7.10. Uočava se da su razlike u tokovima zanemarljive na većini dalekovoda, dok su najuočljivije u neposrednoj blizini graničnih čvorova Ribarevine, Pljevlja i Prizrena.

Tabela 7.10. Poređenje tokova snaga po dalekovodima sopstvenog sistema

	dalekovod UCTE imena	potpun susedni tok (MW)	ekvivalent tok (MW)
1	Podgorica - Trebinje	762.54	761.54
2	Perućica - Trebinje	277.06	278.06
3	Pljevlja - Ribarevina	514.14	378.25
4	Ribarevina - Podgorica	1081.50	1080.50
5	Piva - Pljevlja	147.50	147.50
6	Pljevlja - Mojkovac	144.08	115.86
7	Mojkovac - Podgorica	110.58	82.36
8	Podgorica - Perućica	7.86	8.86
9	Fierza - Komani	41.78	61.89
10	Fierza - Burrel	117.19	120.90
11	Burrel - Elbasan	82.19	85.90
12	Fierza - Tirana	131.01	136.41
13	Komani - Sharr	131.23	131.25
14	Komani - Elbasan	105.66	105.68
15	Komani - Vau Dejes	104.89	124.96
16	Sharr - Elbasan	34.23	34.25
17	Vau Dejes - Tirana (1)	160.96	156.38
18	Vau Dejes - Tirana (2)	160.96	156.38
19	Tirana - Elbasan (1)	13.28	11.58
20	Tirana - Elbasan (2)	13.28	11.58
21	Tirana - Dures	131.36	131.01
22	Dures - Fier	41.36	41.01
23	Elbasan - Fier	98.64	98.99
24	Elbasan1- Elbasan2 (1)	49.45	49.47
25	Elbasan1- Elbasan2 (2)	49.45	49.47
26	Koplik - Vau Dejes	67.02	37.80
27	Podgorica - Koplik	74.02	44.80
28	HE Perućica-Perućica	27.80	27.80
29	Perućica - Pljevlja	48.20	48.20
30	TS 400/220 kV Trebinje	457.06	458.06
31	TS 400/220 kV Elbasan (1)	23.21	23.21
32	TS 400/220 kV Elbasan (2)	23.21	23.21
33	TS 400/220 kV Plevlja (1)	258.48	190.16
34	TS 400/220 kV Plevlja (2)	258.48	190.16
35	Prizren - Fierza	39.98	69.20
36	Trebinje - Gacko	1219.60	1219.60
37	MojkovacK- Mojkovac	33.50	33.50
38	Fier - Babic	45.00	45.00
39	Zemlak - Elbasan	45.00	45.00

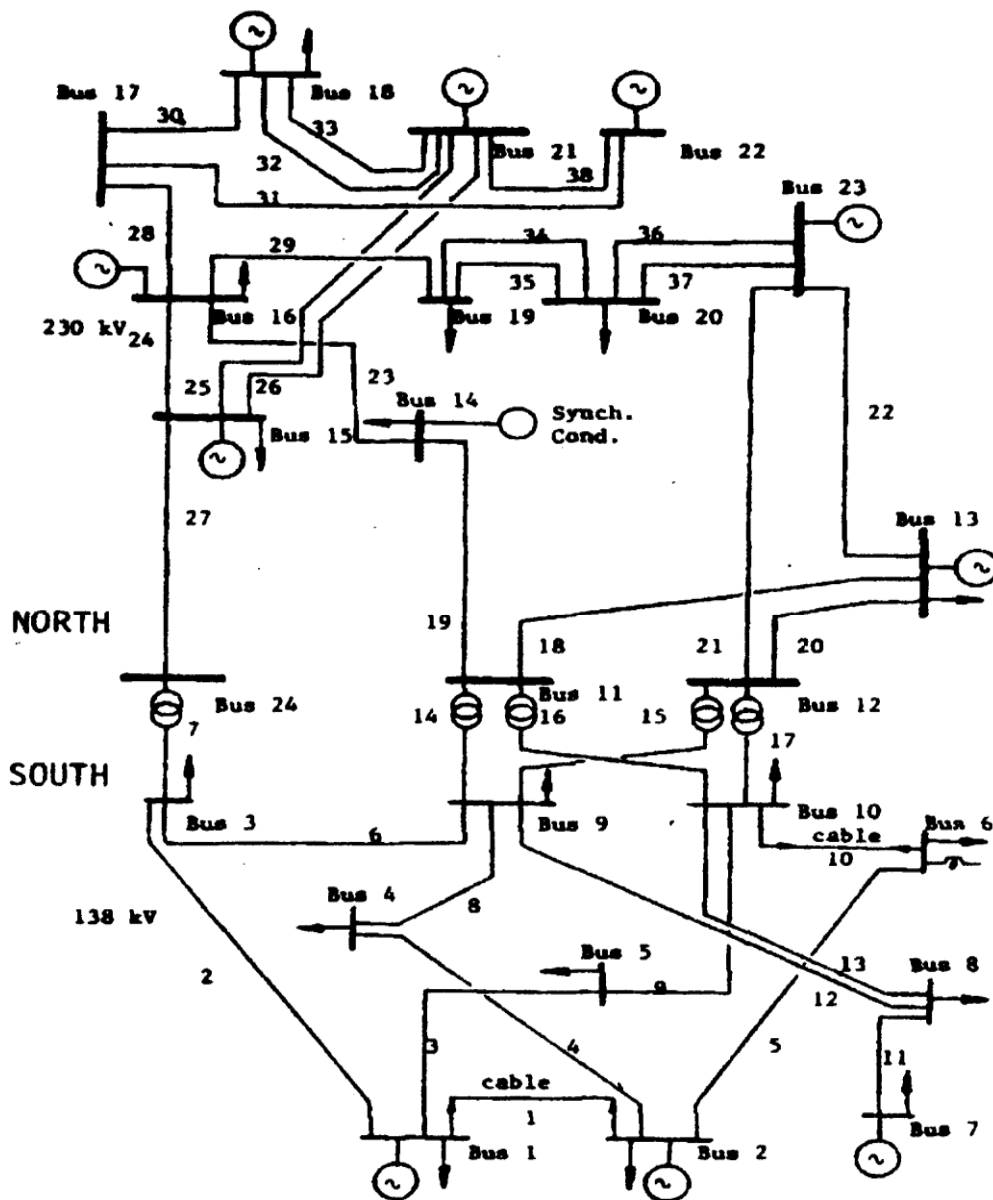


Slika 7.10 Poređenje tokova snaga po dalekovodima, kada je sused modelovan ekvivalentom i u potpunosti

## 8. PRIMENA METODOLOGIJE NA IEEE RTS SISTEMU

U radu je opisana primena metodologije na IEEE RTS (IEEE Reliability Test System) sistemu [18].

Svi relevantni podaci za generatorske jedinice, prenosne vodove i transformatore su dati u prilogu 8. Šema IEEE-RTS sistema predstavljena je na slici 8.1.



Slika 8.1. IEEE-RTS test sistem

Kao što se može videti, sistem se sastoji od 32 generatorske jedinice, 33 prenosna voda, 5 transformatora i 24 čvora. Transformatori povezuju severni 230 kV i južni 138 kV region. Ukupni instalisani generatorski kapaciteti u severnom regionu su 2721 MW, a u južnom regionu 684 MW. Ukupna potrošnja severnog i južnog regiona je 1518 MW i 1332MW, respektivno. IEEE-RTS (sopstveni sistem) je povezan sa svojim susednim

sistemom, predstavljenim kao lik u ogledalu, preko graničnih čvorova koji su postavljeni u susednom sistemu u tačkama 17' i 24', a povezni interkonektivnim dalekovodima 17-17' i 24-24'. Podaci koji se odnose na interkonektivne vodove dati su u tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Podaci o interkonektivnim vodovima

Vod	Kapacitet prenosnog voda (MW) za DC proračun	Susceptansa (p.u.)	Intenzitet ispada (ispad/god)	Intenzitet obnavljanja(1/god)
Čvorovi 17-17'	300	5	0.45	796
Čvorovi 24-24'	300	5	0.45	796

*Napomena:* svi čvorovi u susednom sistemu su isti kao i u sopstvenom, samo su označeni sa ', a susedni sistem je postavljen kao lik u ogledalu. Maksimalna snaga proizvodnje u IEEE sistemu je  $P_{gen} = 3405$  MW, a potrošnje  $P_{pot} = 2850$  MW. Snaga potrošnje je konstantana vrednost. Pretpostavlja se da svi potrošački čvorovi sistema imaju isti prioritet u napajanju. Maksimalna ugovorena snaga razmene (havarijska podrška) između sopstvenog i susednog sistema uzeta je da bude  $E = 500$  MW. Ova vrednost maksimalne ugovorene snage je usvojena kako bi se video efekat ekvivalentiranja izvora, prema opisanoj metodi. Pošto je  $P_{pot} + E < P_{gen}$ , postoje stanja izvora susednog sistema koja će biti grupisana u gornju granicu ekvivalenta.

### 8.1 Proračun parametara ekvivalenta

Prema metodologiji opisanoj u poglavlju 5 formiran je ekvivalent za susedni sistem. Povezni vodovi 17-17' i 24-24' nisu obuhvaćeni ekvivalentom. Snage koje su eksplicitno zadate u graničnim čvorovima 17' i 24' su  $P_{T17} = 0$  MW,  $P_{T24} = 0$  MW. Za IEEE RTS sistem čvor sa rednim brojem 13 (prilog 8), izabran je za referentno-balanski čvor, a u njemu je snaga potrošnje 265 MW. Prema razvijenoj metodologiji eksplicitno zadate snage u karakterističnim čvorovima su:

$$P_{ESL} = 265 \text{ MW (referentni)},$$

$$P_{T17} = 0 \text{ MW}$$

$$P_{T24} = 0 \text{ MW}$$

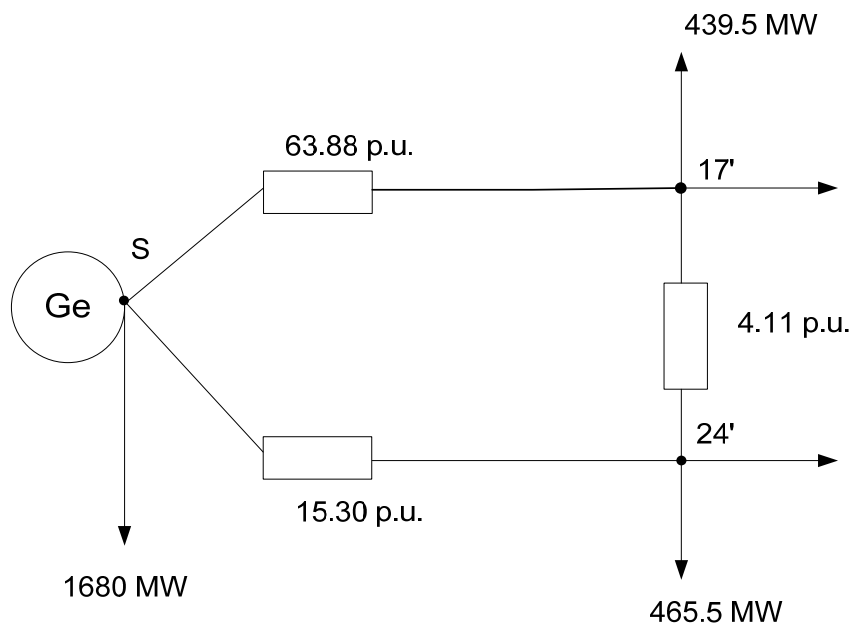
Proračunom se dobijaju snaga potrošnje susednog sistema koja je raspoređena u karakterističnim čvorovima ekvivalentne šeme. Vrednosti  $P_{L1}$ ,  $P_{L2}$  i  $P_{L3}$ , gde se indeks L1 se odnosi na fiktivni izvorni, L2 na granični čvor 17' i L3 na granični čvor 24'.

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{L1} \\ P_{L2} \\ P_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1945.0 \\ 439.5 \\ 465.5 \end{bmatrix}$$

Obzirom da je sopstvena potrošnja u referentnom, tj. izvornom ekvivalentnom čvoru jednaka 265 MW, onda je ukupna potrošnja u izvornom ekvivalentnom čvoru 1680 MW, kao što je prikazano na šemi razvijenog mrežnog DC ekvivalenta na slici 8.2.

Susceptanse ekvivalenta, dobijene proračunom iz matrica karakterističnih čvorova  $[B_{EST}]$  su: 63.8841 p.u., 15.3033 p.u. i 4.1051 p.u.

$$B_{EST} = \begin{bmatrix} 79.1874 & -63.8841 & -15.3033 \\ -63.8841 & 67.9892 & -4.1051 \\ -15.3033 & -4.1051 & 19.4085 \end{bmatrix}$$



Slika 8.2 Ekvivalentni DC mrežni model IEEE sistema

Proračunati parametri DC mrežnog ekvivalenta za susceptanse i snage u karakterističnim čvorovima predstavljeni su ekvivalentnom šemom IEEE RTS sistema na slici 8.2. Takođe, za sistem IEEE je urađeno istraživanje uticaja simultanih ispada vodova i generatorskih jedinica na parametre ekvivalenta susednog sistema. Proračun je urađen prema metodologiji opisanoj u poglavlju 5.3.

Za parametre ekvivalentnog stanja izvora interkonektivne oblasti, kojim se obuhvataju istovremeni ispadi unutrašnjih vodova i generatora u susednom sistemu proračunate su sledeće vrednosti snage, verovatnoće i učestanosti ekvivalentnog izvora:

$$P_{Ee} = 2925.32 \text{ MW}$$

$$p_{Ee} = 0.008983$$

$$f_{Ee} = 0.66196$$

Detaljan proračun i sva stanja ispada vodova i generatorskih jedinica, sa informacijama o parametrima dinamičkog ekvivalenta i mogućem dodatnom isporučenom opterećenju na interkonektivnim tačkama 17 i 24 opisani su detaljno u poglavlju 8.4. Za svako novo topološko stanje mreže proračunavaju se parametri ekvivalenta za susedni sistem, a njihov uticaj obuhvata se preko definisanih težinskih faktora.

## **8.2. Poređenje tokova snaga u IEEE RTS sistemu**

U cilju verifikovanja valjanosti ekvivalenta moguće je porediti i tokove snaga u jednom od IEEE sistema, za slučaj da je susedni, tj. drugi IEEE RTS sistem modelovan u potpunosti i kada je zamenjen ekvivalentom. Za proračun tokova snaga koristi se opisana DC metoda. Koliko je dobar razvijeni DC mrežni ekvivalent pokazuje poređenje tokova snaga u sopstvenom sistemu za slučaj kada je sused modelovan ekvivalentom i u potpunosti.

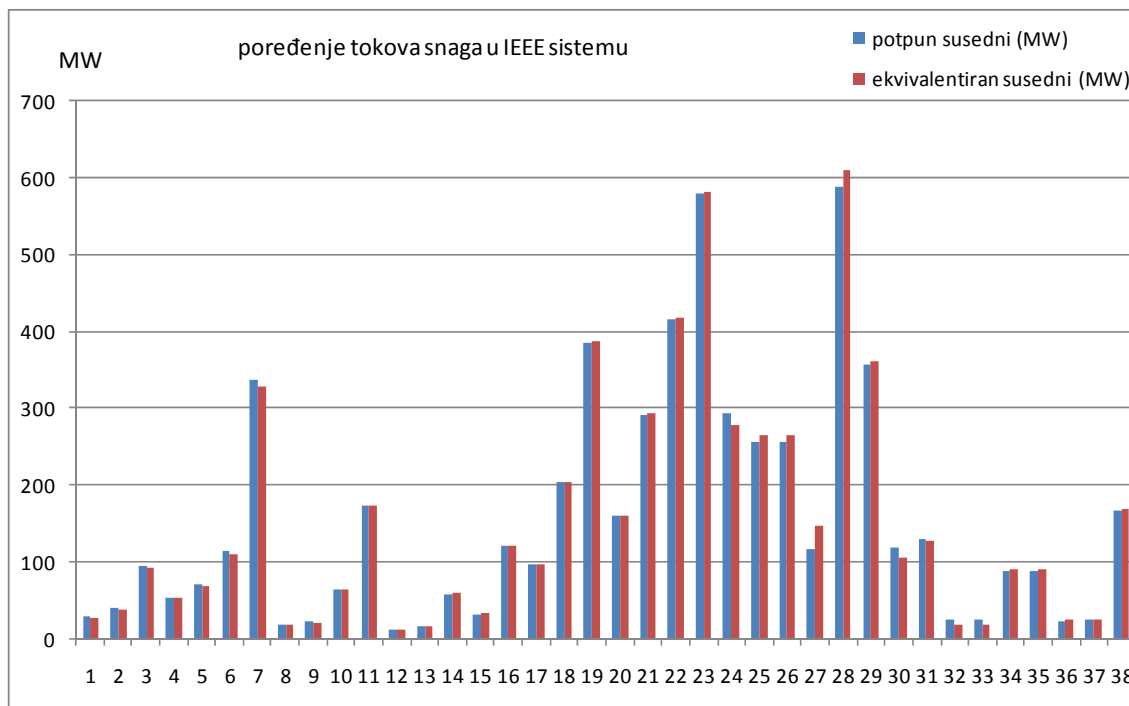
Rezultati proračuna tokova snaga prikazani su u tabeli 8.2. Date su precizne vrednosti tokova po pojedinim vodovima IEEE RTS sistema. Vrlo je uočljivo da su tokovi za slučaj da je sistem predstavljen ekvivalentom dobri, sem u slučajevima vodova koji su u blizini interkonektivnih čvorova. To su sledeći dalekovodi: 16-15, 24-15, 17-16 i 18-17.

Tabela 8.2. Poređenje tokova snaga u IEEE RTS sistemu kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i ekvivalentom

Br. grane	početni čvor	krajnji čvor	potpun susedni (MW)	ekvivalentiran susedni (MW)	odstupanje (MW)
1	1	2	29.94	28.81	-1.13
2	3	1	41.02	38.66	2.36
3	1	5	95.08	93.85	-1.23
4	2	4	53.97	53.59	-0.38
5	2	6	70.97	70.22	-0.75
6	3	9	116.20	111.14	-5.05
7	24	3	337.22	329.81	7.41
8	9	4	20.03	20.41	-0.38
9	5	10	24.08	22.85	-1.23
10	10	6	65.03	65.78	-0.75
11	7	8	175.00	175.00	0.00
12	9	8	13.13	12.79	0.34
13	8	10	17.13	16.79	-0.34
14	11	9	58.29	61.10	-2.81
15	12	9	33.67	35.95	-2.28
16	11	10	121.72	123.15	-1.42
17	12	10	97.10	97.99	-0.90
18	11	13	205.06	204.73	-0.33
19	14	11	385.08	388.98	-3.90
20	12	13	162.32	161.07	-1.24
21	23	12	293.08	295.02	-1.94
22	23	13	416.62	418.10	-1.48
23	16	14	579.08	582.98	-3.90
24	15	16	293.86	280.19	-13.67
25	21	15	257.28	265.34	-8.06
26	21	15	257.28	265.34	-8.06
27	15	24	118.70	148.50	29.80
28	17	16	588.92	609.91	-20.98
29	16	19	358.70	362.12	3.42
30	18	17	120.88	106.93	13.95
31	22	17	131.56	129.38	2.18
32	21	18	26.94	19.97	6.98
33	21	18	26.94	19.97	6.98
34	19	20	88.85	90.56	1.71
35	19	20	88.85	90.56	1.71
36	20	23	24.51	26.20	1.69
37	20	23	25.19	26.92	1.73
38	22	21	168.44	170.62	-2.18

Na slici 8.3 je prikazan dijagram aktivnih tokova snaga po pojedinim dalekovodima, za oba slučaja.





Slika 8.3. Poređenje tokova u IEEE RTS sistemu kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i ekvivalentom

### 8.3 Modelovanje izvora susednog sistema

Modelovanje izvora susednog sistema i ovde se oslanja na metodologiju o ekvivalentiranju stanja modela, opisanu u poglavlju 5.4. Kao što je već ranije pokazano, broj ekvivalentnih stanja izvora zavisi od dogovorene maksimalne ispomoći između sopstvenog sistema A i susednog sistema B.

Na primer, ako je za dogovorenu maksimalnu ispomoć sistema B sistemu A uzeta vrednost  $E = 100$  MW ukupan broj stanja sistema B sa aspekta ispada generatorskih jedinica je:  $3*3*3*3*4*4*6*2*2*2*2*7*3*2=5\ 225\ 472$

S obzirom na činjenicu da je proračunati broj stanja veoma veliki, analize će se raditi do koincidencije određenog stepena ispada elemenata sistema

- Ako se razmatraju ispadi do trećeg stepena za generatorske jedinice, bez ekvivalentiranja ukupno 202 stanja, nakon ekvivalentiranja stanja sistema B broj ekvivalentnih stanja je 21.
- Ako se razmatraju ispadi do četvrtog stepena bez ekvivalentiranja, ukupno 998, broj ekvivalentnih stanja sistema B je 64.
- Ako se razmatraju ispadi do petog stepena, uzimajući u obzir verovatnoće veće od 0.00001, broj stanja sistema B koja se ispituju bez ekvivalentiranja je 1559, a ekvivalentiranjem se dobija 89 stanja.

Ovim je ukazano značaj ekvivalenta ne samo u pogledu smanjenja broja grana mreže susednog sistema, već i u pogledu smanjenja broja ekvivalentnih stanja koja se razmatraju. Ovim se kompjutersko vreme potrebno za proračun drastično smanjuje.

### **8.3.1. Broj razmatranih situacija**

Prilikom prezentacije rezultata o pokazateljima pouzdanosti na IEEE RTS sistemu, za snagu razmene uzeta je maksimalna dogovorena snaga razmene  $E = 500$  MW. Obzirom da je broj stanja izvora susednog sistema 5 225 472, potrebno je obuhvatiti samo ona stanja od najvećeg uticaja. Jedna od opcija je da se obuhvati koincidencija ispada do zadatog stepena, a druga opcija je da se ide do neke usvojene vrednosti granične verovatnoće.

U prikazanoj analizi su obuhvaćena sva stanja jednog sistema (i susednog i sopstvenog) sa koincidencijom svih ispada četvrtog stepena i sva stanja čija je verovatnoća veća od 0.00001, pa je njihov ukupan broj 3788. 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. Znači da se u radu išlo do vrlo velikih tačnosti ispitivanja sistema

U proračunu pokazatelja pouzdanosti obuhvaćene su sledeće situacije

- svi mogući ispadi izvornih jedinica u oba sistema
- svi mogući ispadi jedne generatorske jedinice i jednog voda u sopstvenom sistemu A, u kombinaciji sa svim mogućim ispadima izvornih jedinica u susednom sistemu B.

### **8.3.2. Ispadi svih izvora u oba sistema**

Kada je susedni sistem B zamenjen ekvivalentom, za slučaj da je maksimalna snaga ugovorene havarijske ispomoći  $E = 500$  MW, broj situacija u ekvivalentnom modelu se rapidno smanjuje. Ukupan broj stanja izvora susednog sistema, koji se ekvivalentira prema metodologiji opisanoj u poglavlju 5.4. je 3788, a nakon grupisanja broj stanja izvora ovog sistema je 270.

Ukupan broj situacija kada su oba sistema modelovana u potpunosti je

$$3788 * 3788 = 14\,348\,944$$

U slučaju zamene susednog sistema ekvivalentom, broj ispitivanih situacija je

$$3788 * 270 = 1\,022\,760$$

što je bitno manje posebno sa aspekta potrebnog računarskog vremena.

### **8.3.3. Ispadi jednog izvora i jednog voda**

U sopstvenom sistemu A se ispituje ispad jedne generatorske jedinice u svakom od izvornih čvorova, njih ukupno 14 i jednog voda, njih ukupno 40 (zajedo sa interkonektivnim vodovima), dok se u susednom sistemu B razmatraju sva stanja izvora.

Ukupan broj vodova koji se ispituje je 40, gde se obuhvataju i ispadi interkonektivnih vodova. Ukupan broj ispada jedne generatorske jedinice u generatorskim čvorovima je 14 (čvorovi sa jedinicama različitih snaga su raspoređeni u čvorove u kojima figurišu jedinice istih snaga, i to čvorovi 1, 2, 15 i 23, radi lakšeg proračuna).

Za slučaj modelovanja susednog sistema B bez ekvivalenta, tj. u potpunosti, ukupan broj ispitivanih situacija je

$$14 \cdot 40 \cdot 3788 = 2\,121\,280$$

Za slučaj da je susedni sistem B zamenjen ekvivalentom, broj ekvivalentnih stanja izvora je 270, a broj ispitivanih situacija

$$14 \cdot 40 \cdot 270 = 151\,200$$

Na ovaj način se dobija da je ukupni broj razmatranih stanja kada se povezani sistemi razmatraju u celosti

$$14\,348\,944 + 2\,121\,280 = 16\,470\,224$$

a ukupni broj razmatranih stanja kada je sused zamenjen ekvivalentom

$$1\,022\,760 + 151\,200 = 1\,173\,960$$

Dogovorena snaga razmene između sistema je 500 MW, jer u slučaju da je  $E = 600$  MW, ne bi mogao da se vidi efekat ekvivalentiranja izvora suseda u opisanoj metodi. Maksimalno generisanje je  $P_{\text{gen}} = 3405$  MW, a potrošnja  $P_{\text{pot}} = 2850$  MW, pa je

$$P_{\text{gen}} - P_{\text{p}} = 555 \text{ MW}$$

Za slučaj da je

$$E = 600 \text{ MW} > 555 \text{ MW}$$

svako stanje izvora susednog sistema bilo bi razmatrano nezavisno. Zapravo ne bi postojalo ni jedno stanje koje bi ušlo u gornju granicu  $E + P_{\text{pot}}$ , tj. to su stanja koja se zamenjuju jednim ekvivalentnim stanjem generatora, dok se druga razmatraju nezavisno, bez ekvivalentiranja.

Procentualno smanjenje vremena proračuna kada se proračun radi sa ekvivalentom u odnosu na vreme potrebno za proračun sa potpuno modelovanim sistemom, prikazano je u tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Poređenje kompjuterskog vremena kod primene ekvivalenta

	potpun	ekvivalent
Broj ispitivanih stanja	16 470 224	1 173 960
Vreme	9717 min = 162 h	270 min = 4.5 h

Prema priloženim vremenima, vidi se da je samo 2.6% računarskog vremena potrebno ukoliko se za proračun pouzdanosti koristi ekvivalent. Ovakav efekat je postignut delom zbog broja stanja postignutim razvijenim aproksimacijama, a delom zbog smanjenja broja komponenti mreže, tj. uprošćenja mreže na kojoj se rade proračuni.

#### 8.4. Uticaj jednovremenih ispada vodova i generatora na parametre ekvivalenta

U ovom poglavlju dati su rezultati ispitivanja uticaja jednovremenih ispada vodova i generatora u susednom sistemu na parametre ekvivalenta. Za slučaj kada nema ispada voda i izvora u susednom sistemu proračunate admitanse ekvivalenta su

$$Y_{17'-S} = 63.884$$

$$Y_{24'-S} = 15.303$$

$$Y_{17'-24'} = 4.1051$$

Kako bi se obuhvatili i ovi uticaji, proračunati su parametri ekvivalenta za IEEE sistem kada su testirani jednovremeni ispadi vodova i izvora, prema metodologiji detaljno opisanoj u poglavlju 5.3.

Proračunom parametara ekvivalenta, kada se obuhvataju jednovremeni ispadi vodova i izvora i kada se na interkonektivne čvorove dodaje 2\*300MW, dobijeni su sledeći rezultati:

Proračunate admitanse su :

$$Y_{17'-S} = 63.361$$

$$Y_{24'-S} = 15.1703$$

$$Y_{17'-24'} = 4.069$$

Raspoloživa snaga, verovatnoća i učestanost ekvivalentnog stanja su:

$$P_{Ee} = \sum_i p_i (L_B + L_{Ti}) / \sum_i p_i = 2850 \text{ MW} + 75.32 \text{ MW} = 2925.32 \text{ MW}$$

gde je  $L_B = 2850 \text{ MW}$  potrošnja u sistemu B

$$p_{Ee} = \sum_i p_i = 0.008983$$

$$f_{Ee} = \sum_i \lambda_i p_i = 0.66196$$

Kako bi se došlo do jedinstvenog ekvivalentnog stanja izvora kojim se obuhvataju istovremeni ispadi vodova i generatora susednog sistema, razmatrane su sledeće situacije

- istovremeni ispadi jedne generatorske jedinice i jednog voda
- ispadi jednog voda
- istovremeni ispadi dva voda

U ovom slučaju se pojavljuju situacije koje imaju uticaj na parametre ekvivalenta, a u daljem tekstu su prikazane vrednosti proračuna admintansi za svaku od njih. Sumarni uticaj pojedinih situacija daje vrednosti korigovanih admintansi čime su obuhvaćeni uticaji pojedinih ispada u susednom sistemu:

$$Y_{17'-S} = 63.361$$

$$Y_{24'-S} = 15.17$$

$$Y_{17'-24'} = 4.069$$

U poređenju sa vrednostima u osnovnom modelu ( $Y_{17'-S} = 63.884$ ,  $Y_{24'-S} = 15.303$ ,  $Y_{17'-24'} = 4.1051$ ) vrednosti se vrlo malo razlikuju.

	$Y_{17'-S}$	$Y_{24'-S}$	$Y_{17'-24'}$
Osnovno stanje	63.884	15.303	4.1051
Obuhvaćen uticaj ispada	63.361	15.17	4.069

U narednim poglavljima svaka od ispitivanih situacija detaljno je opisana.

#### 8.4.1. Ispad jedne generatorske jedinice i jednog voda u susednom sistemu

Ispadom generatora u čvoru 21 i ispadom grane 11-13 preopterećuje se grana 12-13. Matrica karakterističnih čvorova je

$$[B_{EST}] = \begin{bmatrix} 77.2971 & -62.8897 & -14.4077 \\ -62.8897 & 67.4661 & -4.5764 \\ -14.4077 & -4.5764 & 18.9838 \end{bmatrix}$$

Moguće dodato opterećenje na interkonektivnim dalekovodima je po 120 MW. Ispadi ostalih kombinacija jedna grana i jedna generatorska jedinica, sa rezultatima o mogućem dodatom opterećenju na interkonektivnim čvorovima, i proračunatim admintansama za pojedine situacije dati su u tabeli 8.4.

Tabela 8.4. Ispadi jedne grane i jedne generatorske jedinica

Ispad generatorske Jedinice	Ispad voda	Prekorač. na vodu	Moguće dodato opterećenje	$Y_{17'-S}$	$Y_{24'-S}$	$Y_{17'-24'}$
čvor 1 (20MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 1 (76MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 2 (76MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 2 (20MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 13	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 15 (12MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 15 (155MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 16	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 18	12-13	11-13	2*210	63.7607	14.9359	4.1975
čvor 21	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 21	12-13	11-13	2*210	63.7607	14.9359	4.1975
čvor 22	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 23 (350MW)	12-13	11-13	2*210	63.7607	14.9359	4.1975
	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747
čvor 23 (155MW)	15-24	3-9	2*50	66.6720	4.2686	0.3747

#### 8.4.2. Ispad jedne grane

Ispadom grane 15-24 dolazi do preopterećenja grane 3-9. Matrica karakterističnih čvorova je

$$[B_{EST}] = \begin{bmatrix} 70.9406 & -66.6720 & -4.2686 \\ -66.6720 & 67.4661 & -0.3747 \\ -4.2686 & -0.3747 & 4.6433 \end{bmatrix}$$

Moguće dodato opterećenje na interkonektivnim dalekovodima je po 50 MW.

#### 8.4.3. Ispad dva voda

Detaljni rezultati proračuna za slučaj ispada dve grane dati su u tabeli 8.5. Date su vrednosti o mogućem dodatnom opterećenju u interkonektivnim čvorovima, kao i podaci o proračunatim admintasama.

Tabela 8.5. Istovremeni ispadi dve grane

Grana 1	Grana 2	Preopterećena grana	Moguće dodato opterećenje	Y <sub>17'-S</sub>	Y <sub>24'-S</sub>	Y <sub>17'-24'</sub>
2-4	15-24	3-9	2*90	66.6735	4.2501	0.3731
4-9	15-24	3-9	2*60	66.6735	4.2501	0.3731
5-10	15-24	3-9	2*60	66.6849	4.1084	0.3606
8-9	15-24	3-9	2*90	66.6733	4.2523	0.3733
9-11	15-24	1-3, 3-9, 9-12	2*90	66.7708	4.0333	0.2042
10-11	15-24	3-9	2*30	66.6852	4.2525	0.2997
11-13	20-23	20-23	2*210	62.1649	14.1983	4.7387
12-13	15-24	3-9	2*90	66.5471	3.9465	0.4647
15-24	17-18	3-9	2*90	30.6816	4.2686	0.3747
15-24	17-22	3-9	2*90	57.3289	4.2686	0.3747
15-24	19-20	3-9	2*90	65.6858	4.2459	0.3969
15-24	21-22	3-9	2*90	66.6720	4.2686	0.3747

## 8.5. Proračun pokazatelja pouzdanosti

Prema izrazima (5.18) - (5.21) proračunavaju se parametri pouzdanosti u pojedinim potrošačkim čvorovima sopstvenog sistema A za slučajeve:

- kada je susedni sistem B modelovan u potpunosti, rezultati prikazani u tabeli 8.6.
- kada je susedni sistem B modelovan preko ekvivalenta, rezultati prikazani u tabeli 8.7.

Tabela 8.6. Parametri pouzdanosti sopstvenog sistema kada je u potpunosti modelovan sused

Čvor	ENDm (MWh/god)	PNDm (MW/god)	pm	fm (1/god)
1	897.70	6.54	0.01845736	1.27782824
2	806.27	5.87	0.01845736	1.27782824
3	1496.17	10.89	0.01845736	1.27782824
4	615.09	4.48	0.01845736	1.27782824
5	590.16	4.30	0.01845736	1.27782824
6	1130.44	8.23	0.01845736	1.27782824
7	1039.01	7.56	0.01845736	1.27782824
8	1421.36	10.35	0.01845736	1.27782824
9	1458.55	10.70	0.01856709	1.30473766
10	1620.85	11.80	0.01845736	1.27782824
13	2202.70	16.04	0.01845736	1.27782824
14	1612.54	11.74	0.01845736	1.27782824
15	2634.92	19.18	0.01845736	1.27782824
16	883.36	6.59	0.02008893	1.45949331
18	3971.32	34.03	0.02292818	1.72371103
19	1504.48	10.95	0.01845736	1.27782824
20	1063.94	7.75	0.01845736	1.27782824

Tabela 8.7. Parametri pouzdanosti sopstvenog sistema kada je sused modelovan ekvivalentom

Čvor	END <sub>m</sub> (MWh/god)	PND <sub>m</sub> (MW/god)	p <sub>m</sub>	f <sub>m</sub> (1/god)
1	897.70	6.54	0.01845736	1.27782824
2	806.27	5.87	0.01845736	1.27782824
3	1496.17	10.89	0.01845736	1.27782824
4	615.09	4.48	0.01845736	1.27782824
5	590.16	4.30	0.01845736	1.27782824
6	1130.44	8.23	0.01845736	1.27782824
7	1039.01	7.56	0.01845736	1.27782824
8	1421.36	10.35	0.01845736	1.27782824
9	1458.55	10.70	0.01856709	1.30473766
10	1620.85	11.80	0.01845736	1.27782824
13	2202.70	16.04	0.01845736	1.27782824
14	1612.54	11.74	0.01845736	1.27782824
15	2634.92	19.18	0.01845736	1.27782824
16	847.35	6.18	0.01871919	1.31506149
18	3847.48	32.61	0.02306776	1.73739157
19	1504.48	10.95	0.01845736	1.27782824
20	1063.94	7.75	0.01845736	1.27782824

U prikazanim rezultatima obuhvaćena su ograničenja na poveznim dalekovodima i ispadi poveznih dalekovoda 17-17' i 24-24'.

Nema indikacija o prekidu napajanja u čvorovima 11, 12, 17 i od 21 do 24. Kao što se vidi u tabelama 8.6. i 8.7., prezentacija susednog sistema ekvivalentom daje praktično iste rezultate kao kada je sistem modelovan u potpunosti kada su u pitanju indeksi pouzdanosti koji se odnose na čvorove sopstvenog sistema A.

Najveća odstupanja se javljaju u čvoru 16 i čvoru 18, koji su u blizini graničnih čvorova sa susednim sistemom B. Najčešće je preopterećena grana 16-17, a na nju najviše utiče čvor 18. Ukoliko bi limit na grani 16-17 bio 10% veći, tj. ako bi umesto limita 500M W, limit bio 550 MW, tada bi se izbeglo prekoračenje na grani 16-17. U tom slučaju očekivana neisporučena snaga u čvoru 18 bila bi bitno manja, a precizni rezultati su prikazani u tabelama 8.8. i 8.9.



Tabela 8.8. Susjedni sistem modelovan u potpunosti (povećan limit na vodu16-17 )

Čvor	END <sub>m</sub> (MWh/god)	PND <sub>m</sub> (MW/god)	p <sub>m</sub>	f <sub>m</sub> (1/god)
1	897.70	6.54	0.01845736	1.27782824
2	806.27	5.87	0.01845736	1.27782824
3	1496.17	10.89	0.01845736	1.27782824
4	615.09	4.48	0.01845736	1.27782824
5	590.16	4.30	0.01845736	1.27782824
6	1130.44	8.23	0.01845736	1.27782824
7	1039.01	7.56	0.01845736	1.27782824
8	1421.36	10.35	0.01845736	1.27782824
9	1458.55	10.70	0.01856709	1.30473766
10	1620.85	11.80	0.01845736	1.27782824
13	2202.70	16.04	0.01845736	1.27782824
14	1612.54	11.74	0.01845736	1.27782824
15	2634.92	19.18	0.01845736	1.27782824
16	883.36	6.59	0.02008893	1.45949331
18	2729.34	20.48	0.01921123	1.39229101
19	1504.48	10.95	0.01845736	1.27782824
20	1063.94	7.75	0.01845736	1.27782824

Tabela 8.9. Susjedni sistem zamenjen ekvivalentom (povećan limit na vodu16-17 )

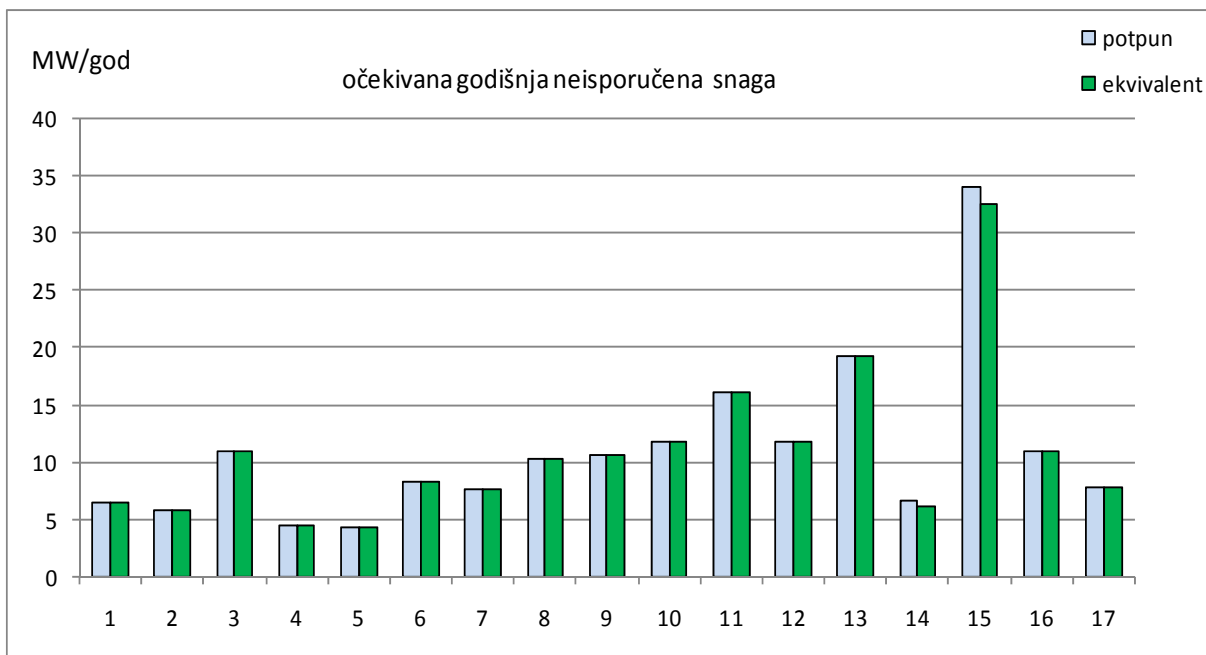
Čvor	END <sub>m</sub> (MWh/god)	PND <sub>m</sub> (MW/god)	p <sub>m</sub>	f <sub>m</sub> (1/god)
1	897.70	6.54	0.01845736	1.27782824
2	806.27	5.87	0.01845736	1.27782824
3	1496.17	10.89	0.01845736	1.27782824
4	615.09	4.48	0.01845736	1.27782824
5	590.16	4.30	0.01845736	1.27782824
6	1130.44	8.23	0.01845736	1.27782824
7	1039.01	7.56	0.01845736	1.27782824
8	1421.36	10.35	0.01845736	1.27782824
9	1458.55	10.70	0.01856709	1.30473766
10	1620.85	11.80	0.01845736	1.27782824
13	2202.70	16.04	0.01845736	1.27782824
14	1612.54	11.74	0.01845736	1.27782824
15	2634.92	19.18	0.01845736	1.27782824
16	847.35	6.18	0.01871919	1.31506149
18	2767.92	20.15	0.01845736	1.27782824
19	1504.48	10.95	0.01845736	1.27782824
20	1063.94	7.75	0.01845736	1.27782824

Poređenjem rezultata za slučaj kada je limit na kritičnoj grani povećan, upotrebom ekvivalenta susednog sistema dobijaju se vrlo slične vrednosti za parametre pouzdanosti i u razmatranom čvoru 18.

Kako bi se najbolje video efekat ekvivalentiranja uporedni prikaz rezultata pojedinih parametara dat je u tabelama i preko dijagrama. U tabelama 8.10. i 8.11. dato je poređenje po pojedinim potrošačkim čvorovima ukupne očekivane neisporučene energije i godišnje neisporučene snage, a na slikama 8.4. i 8.5. grafički prikaz odstupanja rezultata kada se sused predstavlja u potpunosti i kada se modeluje ekvivalentom.

Tabela 8.10. Očekivana godišnja neisporučena snaga

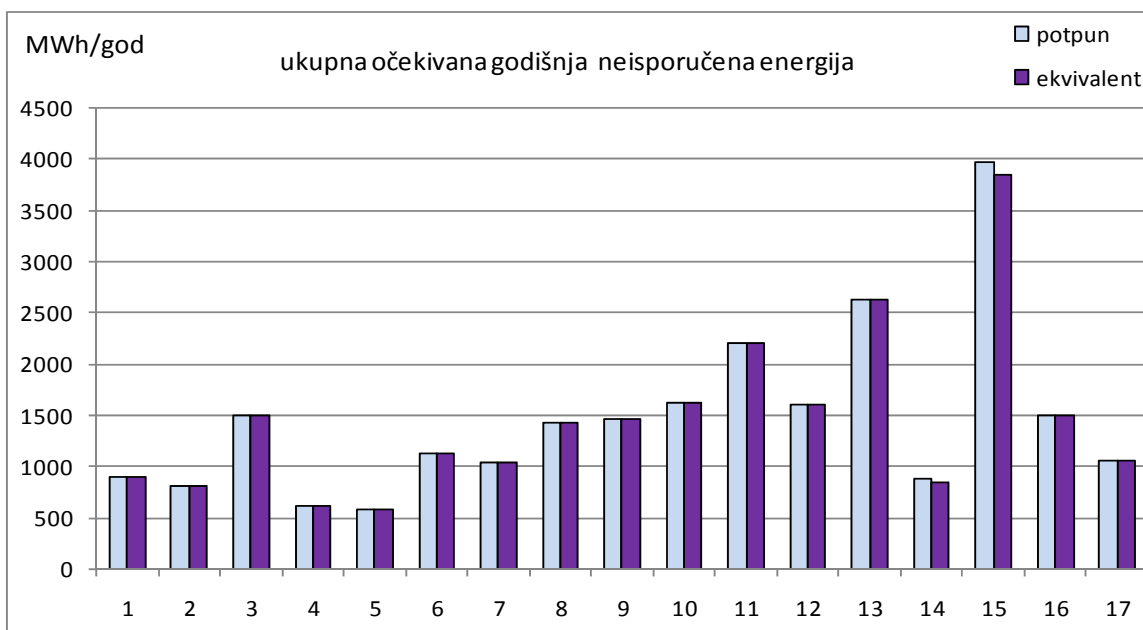
Čvor	PNDm (MW/god)	
	potpun	ekvivalent
1	6.54	6.54
2	5.87	5.87
3	10.89	10.89
4	4.48	4.48
5	4.3	4.3
6	8.23	8.23
7	7.56	7.56
8	10.35	10.35
9	10.7	10.7
10	11.8	11.8
13	16.04	16.04
14	11.74	11.74
15	19.18	19.18
16	6.59	6.18
18	34.03	32.61
19	10.95	10.95
20	7.75	7.75



Slika 8.4. Očekivana godišnja neisporučena snaga po čvorovima

Tabela 8.11. Ukupna očekivana godišnja neisporučena energija

Čvor	ENDm (MWh/god)	
	potpun	ekvivalent
1	897.7	897.7
2	806.27	806.27
3	1496.17	1496.17
4	615.09	615.09
5	590.16	590.16
6	1130.44	1130.44
7	1039.01	1039.01
8	1421.36	1421.36
9	1458.55	1458.55
10	1620.85	1620.85
13	2202.7	2202.7
14	1612.54	1612.54
15	2634.92	2634.92
16	883.36	847.35
18	3971.32	3847.48
19	1504.48	1504.48
20	1063.94	1063.94

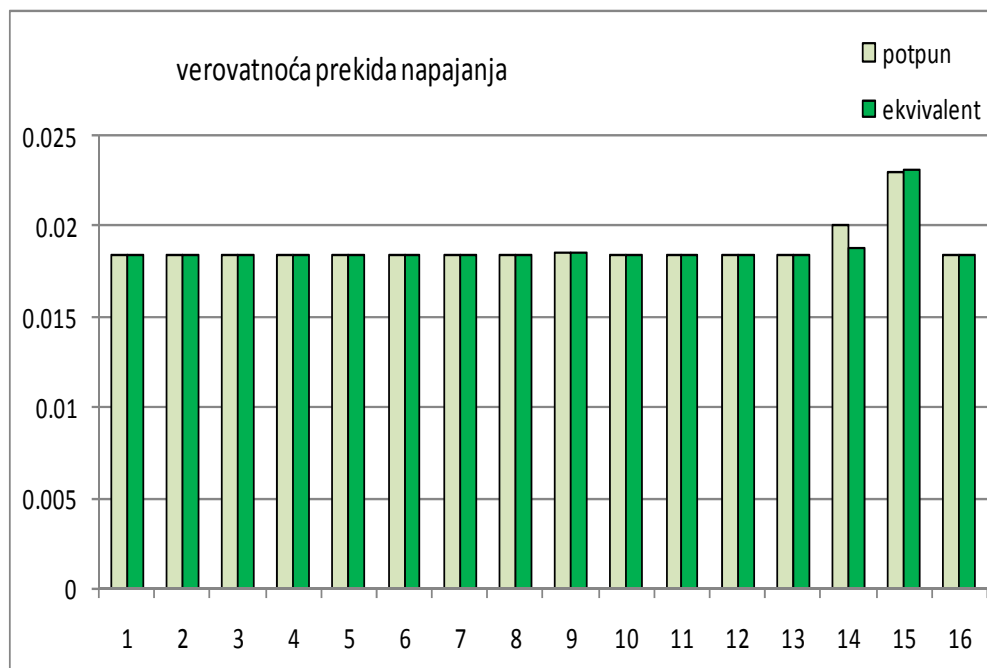


Slika 8.5. Ukupna očekivana godišnja neisporučena energija po čvorovima

U tabelama 8.12. i 8.13. dato je poređenje po pojedinim potrošačkim čvorovima ukupne verovatnoće prekida napajanja i ukupne učestanosti prekida napajanja, a na slikama 8.6. i 8.7. grafički prikaz odstupanja proračuna kada je susedni sistem modelovan ekvivalentom.

Tabela 8.12. Verovatnoća deficitarnih situacija

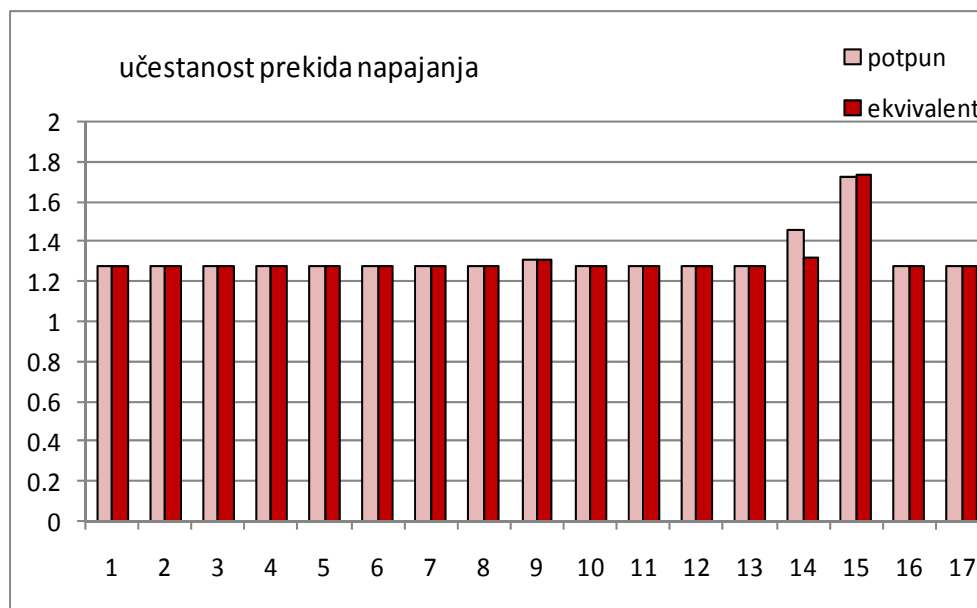
Čvor	$P_m$	
	potpun	ekvivalent
1	0.018457	0.0184574
2	0.018457	0.0184574
3	0.018457	0.0184574
4	0.018457	0.0184574
5	0.018457	0.0184574
6	0.018457	0.0184574
7	0.018457	0.0184574
8	0.018457	0.0184574
9	0.018567	0.0185671
10	0.018457	0.0184574
13	0.018457	0.0184574
14	0.018457	0.0184574
15	0.018457	0.0184574
16	0.020089	0.0187192
18	0.022928	0.0230678
19	0.018457	0.0184574
20	0.018457	0.0184574



Slika 8.6. Poređenje ukupne verovatnoća deficitarnih situacija

### 8.13. Učestanost deficitarnih situacija

Čvor	$f_m$ (1/god)	
	potpun	ekvivalent
1	1.277828	1.2778282
2	1.277828	1.2778282
3	1.277828	1.2778282
4	1.277828	1.2778282
5	1.277828	1.2778282
6	1.277828	1.2778282
7	1.277828	1.2778282
8	1.277828	1.2778282
9	1.304738	1.3047377
10	1.277828	1.2778282
13	1.277828	1.2778282
14	1.277828	1.2778282
15	1.277828	1.2778282
16	1.459493	1.3150615
18	1.723711	1.7373916
19	1.277828	1.2778282
20	1.277828	1.2778282



Slika 8.7. Poređenje učestanosti prekida napajanja

Pokazuje se da predstavljanje susednog sistema ekvivalentom daje parametre pouzdanosti za potrošačke čvorove sistema od interesa koji se vrlo malo razlikuju od onih dobijenih kada je susedni sistem kompletno modelovan. Najveća odstupanja od tačnih rezultata se javljaju u blizini graničnih čvorova sa interkonektivnim sistemom. Odstupanja u pomenutim čvorovima su u opsegu od 4% za očekivanu neisporučenu energiju do 10% za frekvenciju deficitarnih situacija.

### 8.6. Uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći na susedni sistem

Jedan od rezultata koji je ovaj rad pokazao je i uticaj ugovorene snage havarijske ispomoći između susednih sistema na parametre pouzdanosti u pojedinim potrošačkim čvorovima susednog sistema. U radu je maksimalna ugovorena snaga razmene između sistema varirala za vrednosti

$E = 100 \text{ MW}$

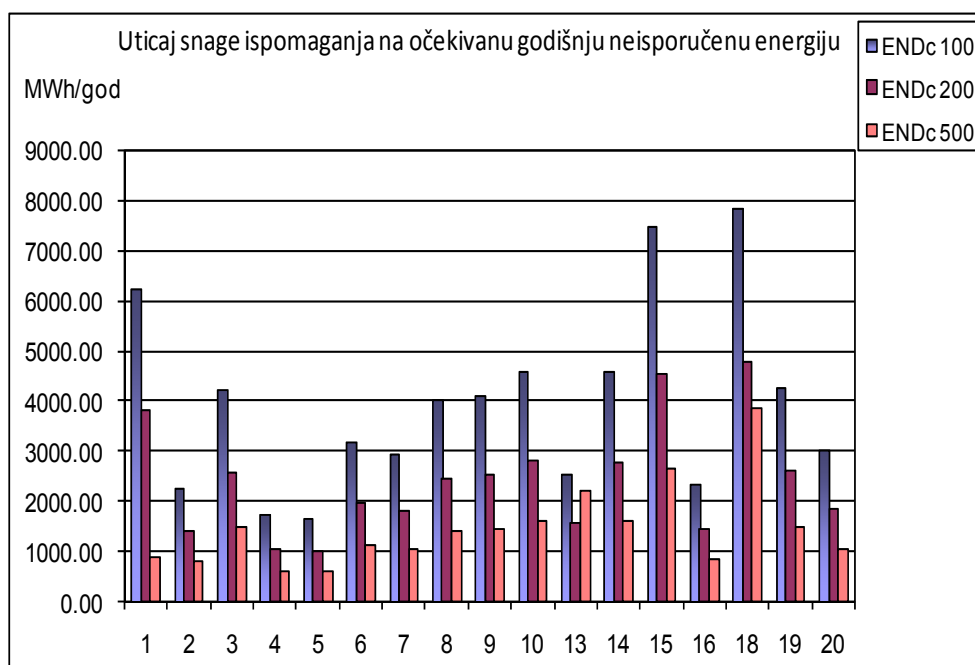
$E = 200 \text{ MW}$

$E = 500 \text{ MW}$

Proračuni su za sva tri slučaja urađeni sa ekvivalentnim susednim sistemom, zbog brzine proračuna. Inače, ovi rezultati su skoro isti i za slučaj kada je susedni sistem modelovan u potpunosti. Rezultati analize uticaja varijacije ugovorene snage havarijske ispomoći između sistema na ukupnu očekivanu neisporučenu energiju i očekivanu godišnju neisporučenu snagu prikazani su tabelama 8.14. i 8.15. i dijagramima 8.8. i 8.9., respektivno.

Tabela 8.14. Uticaj maksimalne snage razmene između suseda na očekivanu godišnju neisporučenu energiju ENDm

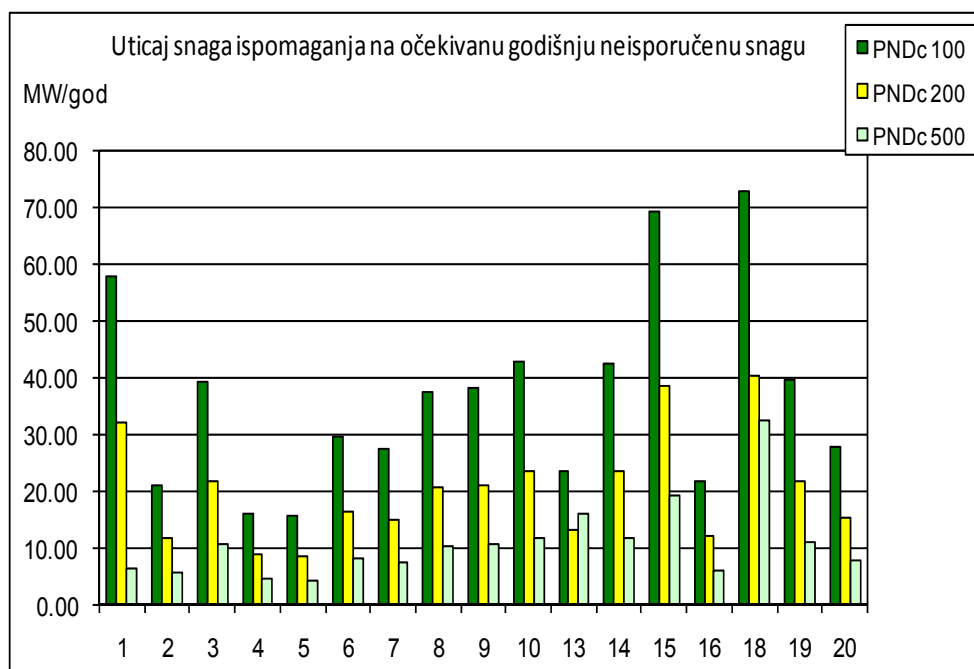
	ENDm (MWh/god)		
	E=100MW	E=200MW	E=500MW
1	6249.93	3806.03	897.70
2	2287.71	1393.15	806.27
3	4245.24	2585.23	1496.17
4	1745.26	1062.82	615.09
5	1674.51	1019.73	590.16
6	3207.51	1953.28	1130.44
7	2948.08	1795.30	1039.01
8	4032.98	2455.97	1421.36
9	4127.31	2513.42	1458.55
10	4599.01	2800.66	1620.85
13	2547.14	1551.14	2202.70
14	4575.42	2786.30	1612.54
15	7476.33	4552.88	2634.92
16	2358.47	1436.24	847.35
18	7853.69	4782.67	3847.48
19	4268.82	2599.59	1504.48
20	3018.84	1838.38	1063.94



Slika 8.8. Uticaj maksimalne snage razmene između suseda na očekivanu godišnju neisporučenu energiju

Tabela 8.15. Uticaj maksimalne snage razmene između suseda na očekivanu godišnju neisporučenu snagu PNDm

Čvor	PNDm (MW/god)		
	E=100MW	E=200MW	E=500MW
1	58.02	32.11	6.54
2	21.24	11.75	5.87
3	39.41	21.81	10.89
4	16.20	8.97	4.48
5	15.54	8.60	4.30
6	29.78	16.48	8.23
7	27.37	15.15	7.56
8	37.44	20.72	10.35
9	38.31	21.21	10.70
10	42.69	23.63	11.80
13	23.65	13.09	16.04
14	42.47	23.51	11.74
15	69.40	38.41	19.18
16	21.89	12.12	6.18
18	72.91	40.35	32.61
19	39.63	21.93	10.95
20	28.02	15.51	7.75



Slika 8.9. Uticaj maksimalne snage razmene između suseda na očekivanu godišnju neisporučenu snagu



## 8.7. Analiza parametara pouzdanosti u režimu povećane potrošnje

Komparativna analiza pouzdanosti je sprovedena i kada je povećana potrošnja u sopstvenom, tj. sistemu od interesa. Stanje u susednom sistemu, tj. sistemu koji se ekvivalentira, ostaje isto kao i u prethodnom istraživanju. U sopstvenom sistemu se razmatra povećanje ukupne potrošnje sistema za 5%, pa je u tom slučaju ukupna potrošnja 2992.5 MW.

Parametri koji se odnose na pouzdanost sopstvenog sistema se vrlo dobro slažu i u slučaju kada je susedni sistem u potpunosti razmatran i kao ekvivalent. Rezultati analize su dati u tabelama 8.16. i 8.17.

Tabela 8.16. Susedni sistem modelovan u potpunosti pri povećanoj potrošnji

Čvor	ENDm (MWh/god)	PNDm (MW/god)	P <sub>m</sub>	f <sub>m</sub> (1/god)
1	4866.91	35.23	0.037073	2.586795
2	1768.19	12.80	0.037073	2.586795
3	3308.80	23.95	0.037073	2.586795
4	1348.03	9.76	0.037073	2.586795
5	1295.51	9.38	0.037073	2.586795
6	2485.97	18.00	0.037073	2.586795
7	2293.40	16.60	0.037073	2.586795
8	3133.73	22.68	0.037073	2.586795
9	3683.84	33.66	0.037891	2.743075
10	3571.40	25.85	0.037073	2.586795
13	1978.28	14.32	0.037073	2.586795
14	3553.89	25.73	0.037073	2.586795
15	5812.28	42.07	0.037073	2.586795
16	2434.38	18.50	0.038672	2.708776
18	10533.63	93.86	0.050312	3.894693
19	3326.30	24.08	0.037073	2.586795
20	2345.92	16.98	0.037073	2.586795

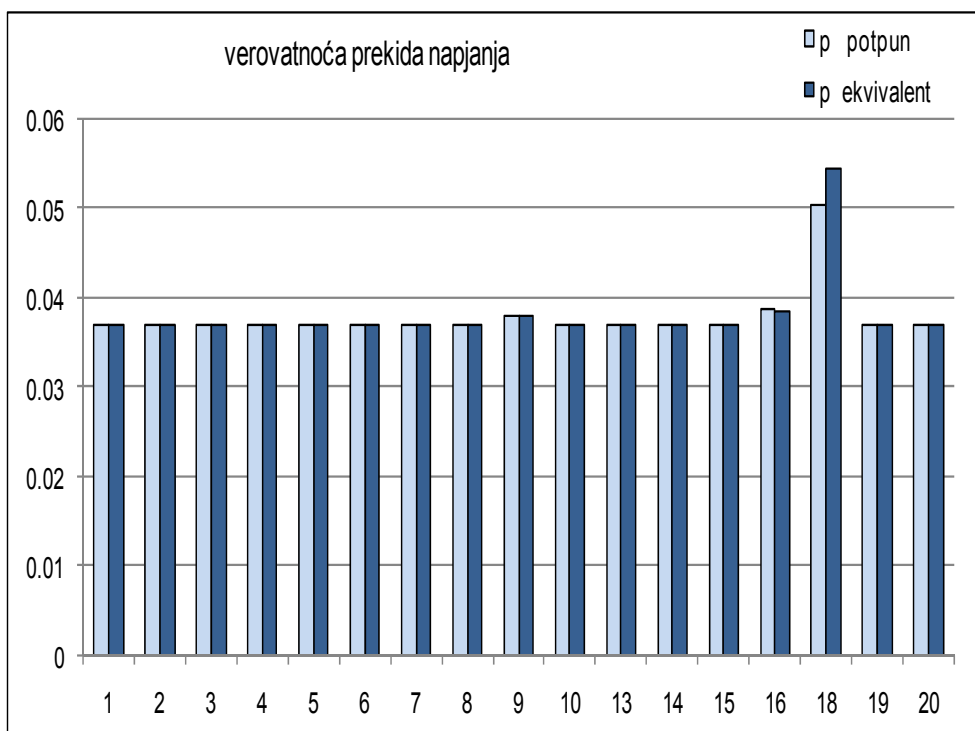
Tabela 8.17. Susedni sistem modelovan ekvivalentom pri povećanoj potrošnji

Čvor	ENDm (MWh/god)	PNDm (MW/god)	P <sub>m</sub>	f <sub>m</sub> (1/god)
1	4866.91	35.23	0.037073	2.586795
2	1768.19	12.80	0.037073	2.586795
3	3308.80	23.95	0.037073	2.586795
4	1348.03	9.76	0.037073	2.586795
5	1295.51	9.38	0.037073	2.586795
6	2485.97	18.00	0.037073	2.586795
7	2293.40	16.60	0.037073	2.586795
8	3133.73	22.68	0.037073	2.586795
9	3683.84	33.66	0.037891	2.743075
10	3571.40	25.85	0.037073	2.586795
13	1978.28	14.32	0.037073	2.586795
14	3553.89	25.73	0.037073	2.586795
15	5812.28	42.07	0.037073	2.586795
16	2320.87	17.56	0.038368	2.686769
18	11415.01	101.715	0.054521	4.220573
19	3326.30	24.08	0.037073	2.586795
20	2345.92	16.98	0.037073	2.586795

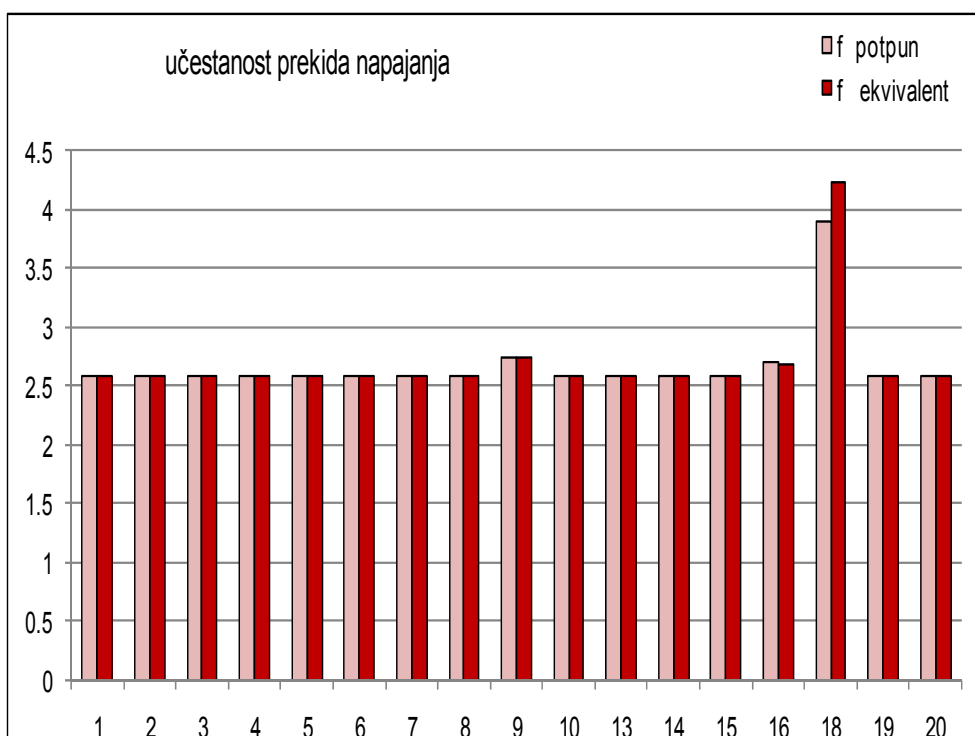
Poređenje rezultata za slučajeve kada je susedni sistem predstavljen ekvivalentom i u potpunosti u režimu povećane potrošnje dati su na slikama 8.10, 8.11, 8.12 i 8.13. Predstavljani su sledeći parametri pouzdanosti za pojedine čvorove IEEE sistema

- očekivana neisporučena snaga
- očekivana neisporučena energija
- verovatnoća prekida napajanja
- učestanost prekida napajanja.

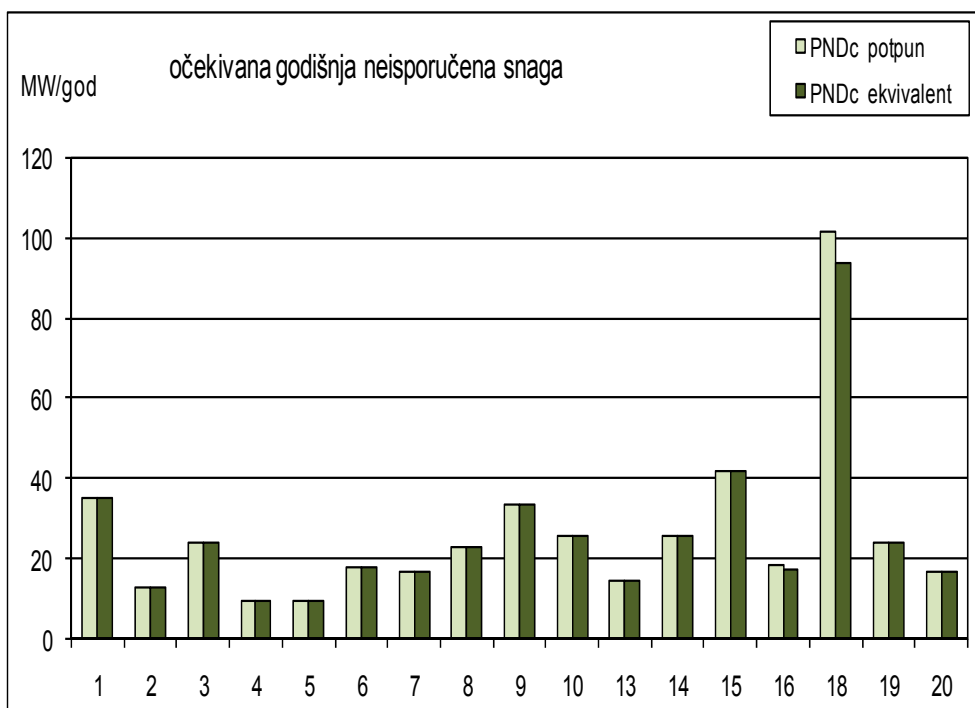
Kao što se vidi modelovanje susednog sistema ekvivalentom daje veoma dobre rezultate i u slučaju kada se menjaju operativni uslovi rada u sopstvenom sistemu. Dobijeni rezultati su veoma slični rezultatima dobijenim za slučaj kada je susedni sistem modelovan u potpunosti. Ponovo se pokazalo da ne postoji indikacija o prekidu napajanja u potrošačkim čvorovima koji su razmatrani, kao i u slučaju nivoa potrošnje u osnovnom stanju.



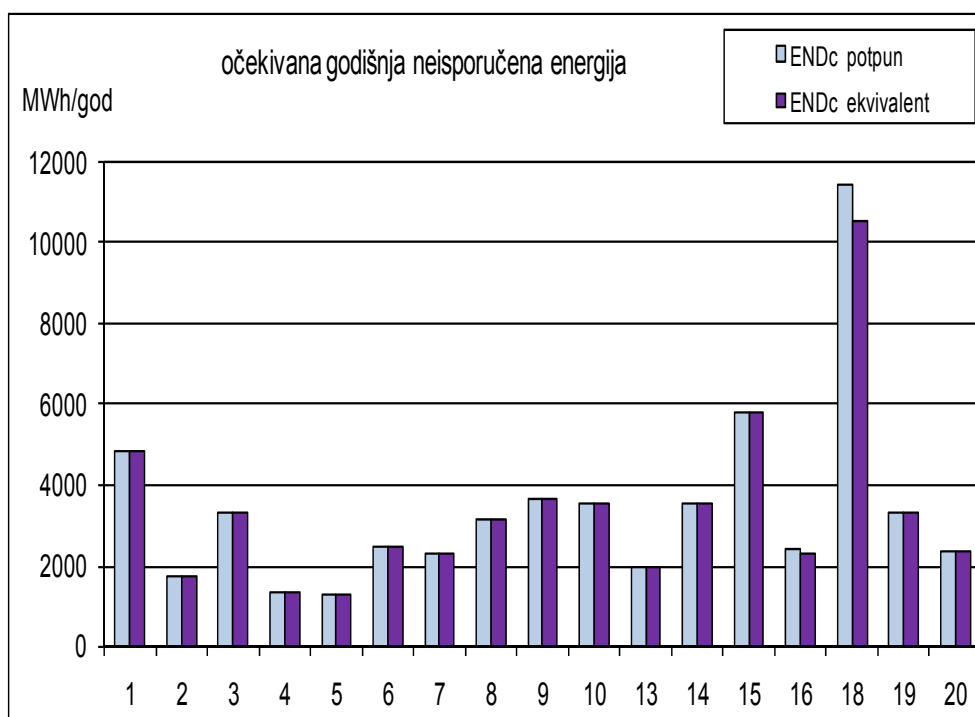
Slika 8.10 Režim povećane potrošnje, verovatnoća prekida napajanja



Slika 8.11 Režim povećane potrošnje, učestanost prekida napajanja



Slika 8.12 Režim povećane potrošnje, očekivana godišnja neisporučena snaga



Slika 8.13 Režim povećane potrošnje, očekivana godišnja neisporučena energija

## 9. ZAKLJUČAK

U savremenim uslovima, kada su elektroenergetski sistemi integrisani u šire interkonekcije, procena pouzdanosti sve više dobija na značaju. U sklopu planiranja razvoja i rada EES mora se vršiti procena pouzdanosti EES kako bi se utvrdilo da li pouzdanost zadovoljava postavljene kriterijume. U novom ekonomskom okruženju procena pouzdanosti interkonekcija i međusobno povezanih sistema postaje složenija pošto je neophodno modelovati nove funkcije interkonekcije (upravljanje i ugovore o razmenama) i predstaviti složeniji rad sistema. Neophodno je da se više pažnje posveti ulozi koju pouzdanost interkonekcija ima u planskim i operativnim odlukama u okvirima liberalizovanog tržišta i decentralizovanog rada.

Proračuni pouzdanosti zahtevaju pretraživanje prostora stanja sistema koji je određen usvojenim pravilima eksploatacije i raspoloživošću elemenata sistema. Kod velikog broja generatorskih jedinica i elemenata mreže, kojim se karakterišu interkonektivni sistemi, broj mogućih stanja ovih sistema i obim ulaznih podataka izuzetno su veliki, što otežava analize pouzdanosti. Jedna od glavnih teškoća kod analiza pouzdanosti realnih interkonektivnih sistema je kompjutersko vreme potrebno za analizu velikog broja mogućih situacija. Zaista, ogromna veličina sistema (broj proizvodnih jedinica i komponenti prenosnog sistema), kao i veliki skup višestrukih ispada drastično utiču na dimenzionalnost problema pouzdanosti sistema.

Da bi se razmatrani proračuni pojednostavili i ubrzali, u literaturi se predlažu različiti ekvivalenti za pojednostavljeno predstavljanje susednih EES. Primenom ekvivalenata pouzdanosti vrši se redukcija velike i složene energetske mreže u jednostavniji model koji zadržava sve bitne informacije koje su važne za sprovođenje daljih analiza pouzdanosti. Važno je definisati i kompletno prepoznati bitne parametre koji moraju biti zadržani kao i one koji mogu da budu zanemareni u procesu uprošćavanja.

U ovom radu je predložen DC mrežni ekvivalent za aproksimaciju interkonektivnih sistema u analizama pouzdanosti sistema sa unapređenjima u odnosu na do sada primenjivane ekvivalente. DC mrežni ekvivalent za aproksimaciju interkonektivnih sistema u proceni pouzdanosti sistema izgrađuje se paralelnim povezivanjem svih izvornih čvorova u jedan izvorni čvor. Mreža je u analizi transformisana u mrežni REI ekvivalent koji sadrži samo ekvivalentni izvorni čvor i interkonektivne, granične čvorove sa sistemom koji se istražuje. Tačnost ekvivalenta je popravljena time što je potrošnja susednog EES umesto da je koncentrisana u jednom, fiktivnom čvoru, raspoređena među zadržanim čvorovima strogo u okviru metodologije za eliminaciju nekarakterističnih čvorova mreže. Pri tome se kod analize raspoloživih viškova susednog EES pomenuta potrošnja modeluje u svakom čvoru proporcionalno prema dijagramu trajanja ukupne potrošnje, a ekvivalentni izvor prema tabeli verovatnoća raspoloživih kapaciteta izvornih jedinica suseda. Navedenim pristupom se realnije izračunavaju tokovi snaga preko interkonektivnih vodova što povećava tačnost ekvivalenta.

Prekoračenja u aproksimiranom sistemu vezana za ispade prenosnih dalekovoda i generatorskih jedinica su modelovana preko jednog ekvivalentnog stanja izvora i preko modifikovanja admitansi ekvivalentne mreže prema verovatnoćama ovih prekoračenja. Na ovaj način je dobijen mrežni ekvivalent sa prirodnim vrednostima admitansi koji ima jedinstven izvorni čvor koji obuhvata stanja svih pojedinih izvornih čvorova. Spajanje

stanja koja imaju istu raspoloživu snagu u ekvivalentna stanja značajno smanjuje njihov broj u poređenju sa slučajem kada su izvori posebno predstavljeni. Dodatno smanjenje broja stanja se postiže 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 je spoljni sistem u proračunima tokova snaga tretiran kao sastavni deo ove mreže, što nije slučaj kada je korišćen „tabularni“ metod. Primena predloženog modela je demonstrirana na sistemima: Garverovom, IEEE RTS sistemu i na realnim sistemima Srbije, Crne Gore i Albanije. Pored navedenog, u okviru razvijene metode procenjeni su parametri pouzdanosti u pojedinim čvorovima sistema od interesa, kao što su ukupna verovatnoća prekida napajanja, ukupna učestanost prekida napajanja, ukupna očekivana neisporučena energija i godišnja neisporučena snaga sa i bez primenjenog ekvivalenta. U radu je razvijen softverski alat u MATLAB - programskom okruženju. Alat omogućava automatsko izvršavanje sledećih funkcija:

- konstrukciju DC mrežnog ekvivalenta
- obuhvatanje uticaja istovremenih ispada vodova i generatora u ekvivalentiranom susednom sistemu
- analizu parametara pouzdanosti kada je susedni sistem modelovan u potpunosti
- analizu parametara pouzdanosti kada je susedni sistem zamenjen ekvivalentom
- poređenje proračunatih parametara pouzdanosti sa i bez upotrebe ekvivalenta

U radu je razvijeno softversko rešenje koje je uniformno čime se obezbeđuje testiranje sistema različitih dimenzionalnosti, kao što je Garverov sistem od 6 čvorova ili pak realni i IEEE RTS koji su relativno veliki sistemi. Na osnovu izvršenog poređenja parametara pouzdanosti za slučajeve kada je susedni sistem predstavljen u potpunosti i kada je zamenjen predloženim ekvivalentom predlaže se korišćenje uprošćenog modela u analizama pouzdanosti. U radu su sprovedeni proračuni do visokog nivoa tačnosti obzirom da su istraženi svi slučajevi sa verovatnoćama većim ili jednakim  $10^{-8}$ .

Ispitivanje na malom sistemu kao što je Garverov pokazalo je da pojednostavljeni model daje rezultate veoma bliske rezultatima dobijenim potpunim modelovanjem susednog sistema, sa odstupanjima koja ne prelaze nekoliko procenata. Ovo se može smatrati kao veoma dobar rezultat za tako mali sistem koji je osetljiv na ispad. Upotrebom ekvivalentnog modela, broj razmatranih stanja je redukovano sa 1224 za potpun sistem na 255 ukoliko se susedni sistem aproksimira svojim ekvivalentom.

Rezultati razvijene metodologije su prezentovani na dobro poznatom IEEE RTS sistemu. U analizi kompletnog modela sistema i u modelu u kome je interkonektivno područje prezentovano mrežnim ekvivalentom, razmatrani su svi ispadi sa verovatnoćama većim ili jednakim  $10^{-8}$ . Ukupna verovatnoća svih ispitanih stanja je 0.993066. Pokazano je da prezentovanje susednog sistema ekvivalentom daje parametre pouzdanosti za potrošačke čvorove sistema od interesa koji se vrlo malo razlikuju od onih dobijenih kada je susedni sistem kompletno modelovan. Najveća odstupanja od tačnih rezultata se javljaju u blizini graničnih čvorova sa interkonektivnim sistemom. Odstupanja u pomenutim čvorovima su u opsegu od 4% za očekivanu neisporučenu energiju do 10% za frekvenciju deficitarnih situacija. Ukupan broj razmatranih stanja za potpuno modelovane sisteme je 16 470 224. Upotrebom ekvivalenta taj broj je

redukovan na 1 173 960. Proračunsko vreme ako je upotrebljen ekvivalent je 2.6% od vremena potrebnog kod potpunog prezentovanja interkonektivnog područja. Ovo je postignuto delom zbog redukcije broja komponenti sistema i delom zbog redukcije broja stanja postignutih aproksimacijama u susednom sistemu. Komparativna analiza je urađena i kada je potrošnja u sopstvenom sistemu povećana za 5%, i ponovo je pokazano da ekvivalent eksternog sistema obezbeđuje rezultate koji veoma dobro odgovaraju rezultatima dobijenim kada je interkonektivni sistem modelovan u potpunosti.

Predloženi model je ispitan i na realnim sistemima. Sistem Srbije, kao veći sistem modelovan je ekvivalentom i u potpunosti, a ispitivani su parametri pouzdanosti u manjim sistemima Crne Gore i Albanije. Ispitivanjem su obuhvaćeni svi ispadi generatorskih jedinica petog reda u oba sistema. Ukupan broj stanja sa aspekta ispada generatorskih jedinica u susednom sistemu je 4848, dok se primenom predložene metodologije ekvivalentni broj stanja izvora koji se razmatra svodi na 22 stanja. Ovim se ukupan broj stanja za ispitivanje 7 621 056, kada su sistemi modelovani u potpunosti svodi na 34 584, kada je sistem Srbije zamenjen ekvivalentom. Pokazano je da se parametri pouzdanosti proračunati za sopstveni sistem, vrlo dobro slažu kada je sused modelovan ekvivalentom. Najveća odstupanja su u blizini interkonektivnih čvorova. U radu je data zavisnost parametra pouzdanosti od ugovorene snage razmene između razmatranog sistema i interkonektivnog područja. Takođe je predstavljen dijagram DC tokova snaga u sopstvenom sistemu kada je susedni, u ovom slučaju sistem Srbije, predstavljen ekvivalentom i u potpunosti.

Razvijeni DC mrežni ekvivalent ima jednostavnu strukturu i redukovani broj stanja u poređenju sa originalnim sistemom, što je postignuto grupisanjem 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 ovog ekvivalenta razumno smanjuje proračunske zahteve u proceni pouzdanosti sistema od interesa. Kvalitet predloženog pristupa je verifikovan na dobro poznatim sistemima (IEEE-RTS) 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 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.

## 10. LITERATURA

- [1] R. Billinton , R. N. Allan , L Salvadery, "Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems", IEEE Pres, New York, 1991.
- [2] Endrenyi J, "Reliability Modeling in Electric Power Systems", J. Wiley & Sons, New York, 1978.
- [3] R. Billinton, H. J. Koglin, "Reliability equivalents in composite system reliability evaluation" , IEE proc. Pt. C, 1987 134 (3): 224-232.
- [4] S. Kumar, R. Billinton, "Adequacy equivalents in composite power system evaluation", IEEE trans. on power syst. 1988 3 (3): 1167- 1173.
- [5] W. Zhang W., R. Billinton, "Application of an adequacy equivalent method in bulk power system reliability evaluation", IEEE trans. on power syst. 1998 13 (2): 661-666.
- [6] D. T. Philips, A. Garzia-Diaz, "Fundamentals of Network Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- [7] A. D. Patton, S. K. Sung, "A transmission network model for multi-area reliability studies", IEEE trans. on power syst. 1993, 8 (2): 459-466.
- [8] S. C. Savulescu, "Equivalents for security analysis of power systems", IEEE trans. on power appar. and syst. 1981, PAS-100(5): 2672-2682.
- [9] 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 syst. 1990 5(2) : 547-555.
- [10] F. F. Wu, A. Monticelli, "Critical review of external network modeling for online security analysis", Electr. power & energy syst. 1983 5(4): 222-235.
- [11] E. C. Housos, G. Irisarri, R. M. Porter, A. M. Sasson, "Steady state network equivalents for power system planning applications", IEEE trans. on power appar. & syst. 1980, PAS-99(6) : 2113-2118.
- [12] R. Billinton, W. Zhang, "Adequacy equivalent development of composite generation and transmission systems", Reliab. eng. & syst. saf. 2001, 74(1) : 1-12.
- [13] H. A. M. Maghraby, R. N. Allan, "Application of DC equivalents to the reliability evaluation of composite power systems", IEEE trans. on power syst. 1999, 14(1) : 355-361.
- [14] P. Wang, R. Billinton, L. Goel, "Unreliability cost assessment of an electric power system using reliability network equivalent approaches", IEEE trans. on power syst. 2002, 17 (3) : 549-556.
- [15] X. Cheng, T. J. Overbye, "PTDF-based power system equivalents", IEEE trans. on power syst. 2005, 20 (4) : 1868-1876.
- [16] I. Dobson, "Voltages across an area of a network", IEEE trans. on power syst. 2012, 27 (2) : 993-1002.
- [17] L. L. Garver, P. R. Van Horne, K. A. Virgau, "Load supplying capability of generation-transmission networks", IEEE trans. on power appar. & syst. 1979, 8 (3) : 957-961.
- [18] IEEE Reliability Test System, IEEE trans. on power appar. & syst. "Report prepared by the Reliability Test System Task Force", 1979, 98 (6) : 2047-2054.
- [19] U. G. Knight, "Power Systems Engineering and Mathematics", Pergamon Press, Oxword 1972.



- [20] Jovan Nahman, "Metode ananize pouzdanosti elektroenergetskih sistema", Beograd,1992
- [21] Rahimi F.A., Vojadani A., Meet the Emerging Transmission Market Segments-IEEE Computer Applications in Power, January 1999, Vol.12
- [22] Cseau P. "CIGRE facing several organisations of the electricity supply industry". ELECTRA 02.1994
- [23] CIGRE WG 38.03 "Power System Reliability Analysis Application Guide". CIGRE publication, 1988
- [24] Allan R.N., Billinton R.N. "Reliability evaluation of power systems". Plenum Publishing, New York, 1984.
- [25] Billinton R. "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation". IEEE Trans, PAS-91,1972, pp.649-660.
- [26] IEEE Subcommittee Report. "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1971-1977". IEEE Trans,PAS-97, 1978, pp.2235-2242.
- [27] Allan R.N., Billinton R., Lee S.H. "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1977-1982". IEEE Trans, PAS-103, 1984, pp.275-282.
- [28] Allan R.N., Billinton R., Shahidehpour S.M., Singh C. "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation,1982-1987". IEEE Trans on Power Systems, 3, 1988, pp. 1555-1564.
- [29] Allan R.N., Billinton R., Briepohl A.M., Grigg C.H. "Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1987-1991". IEEE Winter Power Meeting, Columbus, Feb. 1993, paper 93 WM 166-9 PWRS.
- [30] Allan R.N., Billinton R.N. "Reliability assessment of large electric power systems". Kluwer Academic Publisher, Bosto, 1988.
- [31] "Reliability Assessment of composite Generation and Transmission Systems", IEEE Tutorial Course 90EH0311-1-PWR, 1989
- [32] Billinton R., Wenyuam L. "A novel method for incorporating weather effects in composite system adequacy evaluation". IEEE Trans, PWRS-6, 1991, pp.1154-1160.
- [33] Bhuiyan M.R., Allan R.N. "Inclusion of weather effects in comosite system reliability evaluation using seqential simulation".
- [34] "Electricity Transfers and Reliability". NERC, 10-89
- [35] Milan Čalović, "Analiza elektroenergetskih sistema" - skripta, Beograd,
- [36] Billinton R., Hossain K.L., "Reliability Equivalents - Basic Concepts", Reliability Engineering, Vol. 5, No. 4, pp.239-257, 1983
- [37] Billinton R., Hossain K.L., "Reliability Equivalents - Power System Aplications", Reliability Engineering, Vol. 5, No. 4, pp.239-257, 1983
- [38] Billinton R., Koglin H.J., Roos E. "Reliability Equivalents in Composite Reliability Evaluation". IEE Proceedings, Vol. 134, Pt.C., No. 3, pp.224-231, 1987
- [39] Kumar S.,Billinton R., "Adequacy Evaluation of Small Area in a Large Composite Power Network ". IEEE Transactions, Vol. PWRS-4, 1989, pp.551-558.

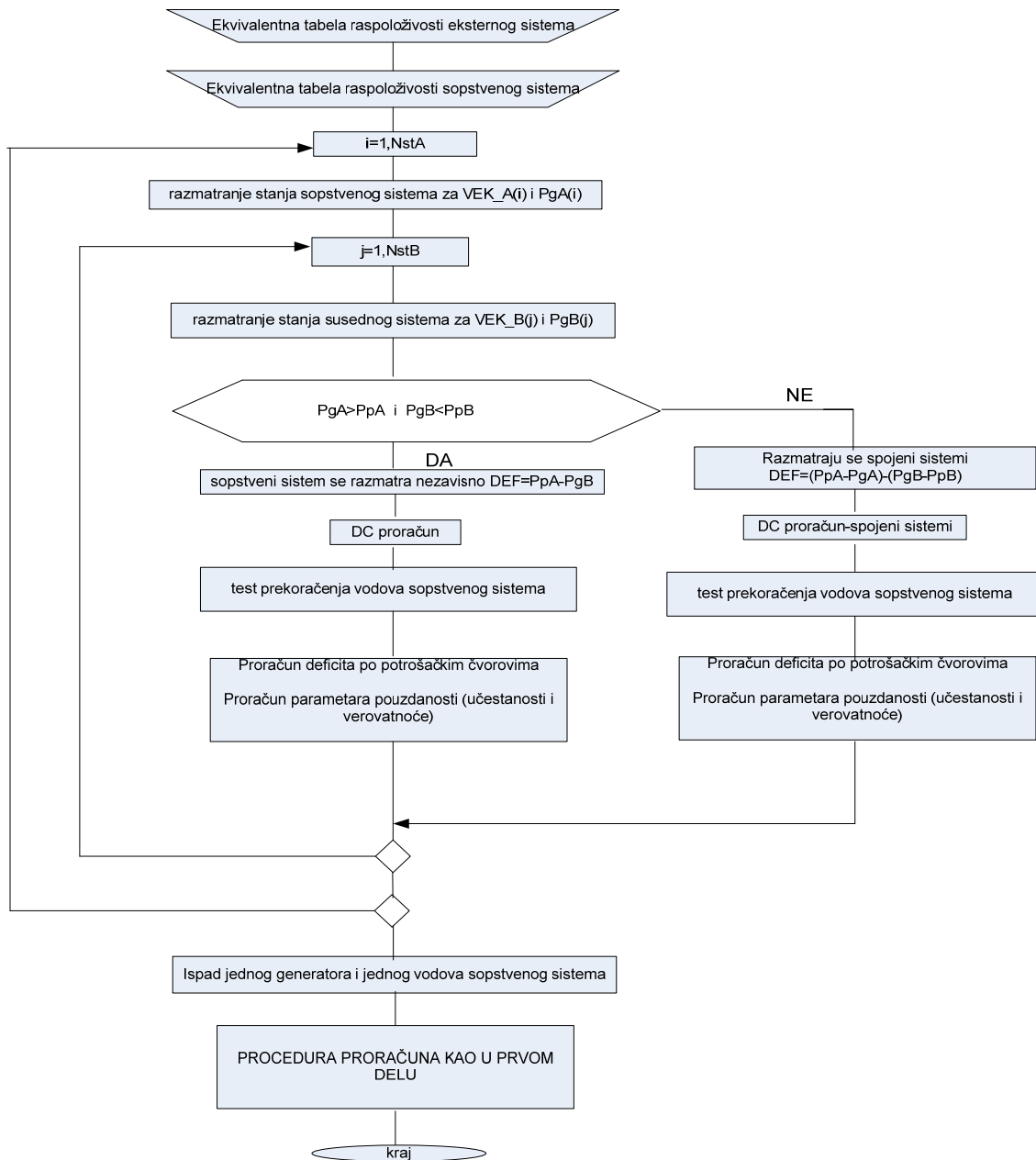
- [40] Bertoldi O., Tagliabue C., Salvaderi L., "Adequacy Equivalents for Large Interconnected Power Systems ",CIGRE Symposium on Electric Power Systems Reliability, Montreal, Septembar, 1991, pp. 4-08.
- [41] Parker B.J., Denzinger E., Porretta B., Anders G.J., Mirsky M.S. "Optimal Economic Power Transfers". IEEE Transactions on Power Systems, Vol.Pas-4, No.3, 1989,pp. 1167-1175
- [42] A.J. Wood and B.F.Wolleberg, "Power Generation, Operation and Control", Wiley, New-York, NY, USA, 1984.
- [43] Milan Čalović, Andrija Sarić "Eksploatacija elektroenergetskih sistema" - 1999., Beograd,

## 11. PRILOZI

Prilog 6.1. Vektor stanja jedinica u Garverovom sistemu

stanje sistema	Vektor stanja Garverovog sistema		
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	1	4
5	1	2	1
6	1	2	2
7	1	2	3
8	1	2	4
9	1	3	1
10	1	3	2
11	1	3	3
12	1	3	4
13	2	1	1
14	2	1	2
15	2	1	3
16	2	1	4
17	2	2	1
18	2	2	2
19	2	2	3
20	2	2	4
21	2	3	1
22	2	3	2
23	2	3	3
24	2	3	4

## Prilog 6.2. Dijagram toka za algoritam ispitivanja



NstA- ukupan broj stanja izvora u sistemu A  
 NstB- ukupan broj stanja izvora u sistemu B

Prilog 6.3. Tabela prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused kompletno modelovan (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	Verovatnoća
1	0	0	0	0	0	0	0	0.1603
2	0	0	0	0	0	0	0	0.071857
3	0	0	0	0	0	0	0	0.010737
4	0	0	0	0	0	0	0	0.0005348
5	0	0	0	0	0	0	0	0.080148
6	0	0	0	0	0	0	0	0.035928
7	0	0	0	0	0	0	0	0.0053686
8	0	0	0	0	0	0	0	0.0002674
9	0	0	0	0	0	0	0	0.010018
10	0	0	0	0	0	0	0	0.0044911
11	0	0	0	0	0	0	0	0.00067108
12	0	0	0	0	0	0	0	3.34E-05
13	0	0	0	0	0	0	0	0.0084366
14	0	0	0	0	0	0	0	0.0037819
15	0	0	0	0	0	0	0	0.00056512
16	0	0	0	0	0	0	0	2.81E-05
17	0	0	0	0	0	0	0	0.0042183
18	0	0	0	0	0	0	0	0.001891
19	0	0	0	0	0	0	0	0.00028256
20	0	0	0	0	0	0	0	1.41E-05
21	0	0	0	0	0	0	0	0.00052729
22	0	0	0	0	0	0	0	0.00023637
23	0	0	0	0	0	0	0	3.53E-05
24	0	0	0	0	0	0	0	1.76E-06
25	0	18.824	0	12.353	18.824	0	16.831	0.071857
26	0	56.471	0	37.059	56.471	0	7.545	0.032212
27	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.1274	0.0048132
28	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.056154	0.00023974
29	0	56.471	0	37.059	56.471	0	11.29	0.035928

Prilog 6.3. Tabela prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je susjed kompletno modelovan (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	Verovatnoća
<b>30</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	3.7725	0.016106
<b>31</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.5637	0.0024066
<b>32</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.028077	0.00011987
<b>33</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.0519	0.0044911
<b>34</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.47156	0.0020132
<b>35</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.070463	0.00030083
<b>36</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0035097	1.50E-05
<b>37</b>	0	18.824	0	12.353	18.824	0	3.0416	0.0037819
<b>38</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.3971	0.0016954
<b>39</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.059337	0.00025333
<b>40</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0029555	1.26E-05
<b>41</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.6721	0.001891
<b>42</b>	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.19855	0.00084768
...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>485</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.19246	0.00026364
<b>486</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.076821	0.00011819
<b>487</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.011479	1.77E-05
<b>488</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.00057175	8.80E-07
<b>489</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.021421	3.30E-05
<b>490</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0096026	1.48E-05
<b>491</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0014349	2.21E-06
<b>492</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	7.15E-05	1.10E-07
<b>493</b>	0	0	0	0	97.412	0	0.033858	2.78E-05
<b>494</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0080864	1.24E-05
<b>495</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0012083	1.86E-06
<b>496</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	6.02E-05	9.26E-08
<b>497</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.018039	1.39E-05
<b>498</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0040432	6.22E-06
<b>499</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.00060415	9.29E-07
<b>500</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	3.01E-05	4.63E-08

Prilog 6.3. Tabela prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused kompletno modelovan (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	Verovatnoća
<b>501</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0011274	1.73E-06
<b>502</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.0005054	7.78E-07
<b>503</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	7.55E-05	1.16E-07
<b>504</b>	0	37.647	0	24.706	65.516	0	3.76E-06	5.79E-09
<b>505</b>	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.20901	0.00023637
<b>506</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.093693	0.00010596
<b>507</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.014	1.58E-05
<b>508</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.00069732	7.89E-07
<b>509</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.11396	0.00011819
<b>510</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.046846	5.30E-05
<b>511</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.007	7.92E-06
<b>512</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.00034866	3.94E-07
<b>513</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.013063	1.48E-05
<b>514</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.0058558	6.62E-06
<b>515</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.000875	9.90E-07
<b>516</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	4.36E-05	4.93E-08
<b>517</b>	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.018091	1.24E-05
<b>518</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.0049312	5.58E-06
<b>519</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.00073684	8.33E-07
<b>520</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	3.67E-05	4.15E-08
<b>521</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.0095434	6.22E-06
<b>522</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.0024656	2.79E-06
<b>523</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.00036842	4.17E-07
<b>524</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	1.84E-05	2.08E-08
<b>525</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.00068752	7.78E-07
<b>526</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.0003082	3.49E-07
<b>527</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	4.61E-05	5.21E-08
<b>528</b>	0	131.76	0	86.471	131.76	0	2.29E-06	2.59E-09
<b>529</b>	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.031231	3.53E-05
<b>530</b>	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.014	1.58E-05

Prilog 6.3. Tabela prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je susjed kompletno modelovan (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	Verovatnoća
531	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.002092	2.37E-06
532	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.0001042	1.18E-07
533	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.017028	1.77E-05
534	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.007	7.92E-06
535	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.001046	1.18E-06
536	0	225.88	0	148.24	225.88	0	5.21E-05	5.89E-08
537	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.0019519	2.21E-06
538	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.000875	9.90E-07
539	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.00013075	1.48E-07
540	0	225.88	0	148.24	225.88	0	6.51E-06	7.37E-09
541	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.0027033	1.86E-06
542	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.00073684	8.33E-07
543	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.0001101	1.25E-07
544	0	225.88	0	148.24	225.88	0	5.48E-06	6.20E-09
545	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.001426	9.29E-07
546	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.00036842	4.17E-07
547	0	225.88	0	148.24	225.88	0	5.51E-05	6.23E-08
548	0	225.88	0	148.24	225.88	0	2.74E-06	3.10E-09
549	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.00010273	1.16E-07
550	0	225.88	0	148.24	225.88	0	4.61E-05	5.21E-08
551	0	225.88	0	148.24	225.88	0	6.88E-06	7.78E-09
552	0	225.88	0	148.24	225.88	0	3.43E-07	3.88E-10
553	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.0015556	1.76E-06
554	0	320	0	210	320	0	0.00069732	7.89E-07
555	0	320	0	210	320	0	0.0001042	1.18E-07
556	0	320	0	210	320	0	5.19E-06	5.87E-09
557	0	320	0	210	320	0	0.00084815	8.80E-07
558	0	320	0	210	320	0	0.00034866	3.94E-07
559	0	320	0	210	320	0	5.21E-05	5.89E-08
560	0	320	0	210	320	0	2.60E-06	2.93E-09



Prilog 6.3. Tabela prikazuje deficit po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je susjed kompletno modelovan (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	Verovatnoća
561	0	320	0	210	320	0	9.72E-05	1.10E-07
562	0	320	0	210	320	0	4.36E-05	4.93E-08
563	0	320	0	210	320	0	6.51E-06	7.37E-09
564	0	320	0	210	320	0	3.24E-07	3.67E-10
565	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.00013465	9.26E-08
566	0	320	0	210	320	0	3.67E-05	4.15E-08
567	0	320	0	210	320	0	5.48E-06	6.20E-09
568	0	320	0	210	320	0	2.73E-07	3.09E-10
569	0	320	0	210	320	0	7.10E-05	4.63E-08
570	0	320	0	210	320	0	1.84E-05	2.08E-08
571	0	320	0	210	320	0	2.74E-06	3.10E-09
572	0	320	0	210	320	0	1.37E-07	1.54E-10
573	0	320	0	210	320	0	5.12E-06	5.79E-09
574	0	320	0	210	320	0	2.29E-06	2.59E-09
575	0	320	0	210	320	0	3.43E-07	3.88E-10
576	0	320	0	210	320	0	1.71E-08	1.93E-11
								Σ1.00000

Prilog 6.4. Tabela prikazuje deficit po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je susjed modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
1	0	0	0	0	0	0	0	0.14949
2	0	0	0	0	0	0	0	0.082613
3	0	0	0	0	0	0	0	0.013277
4	0	0	0	0	0	0	0	0.15498
5	0	18.824	0	12.353	18.824	0	21.393	0.067015

Prilog 6.4. Tabelarni prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verova- tnoća
6	0	56.471	0	37.059	56.471	0	8.6744	0.037033
7	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.3941	0.005952
8	0	56.471	0	37.059	56.471	0	16.273	0.069475
9	0	112.94	0	74.118	112.94	0	3.1967	0.010014
10	0	150.59	0	98.824	150.59	0	1.2962	0.0055337
11	0	150.59	0	98.824	150.59	0	0.20832	0.0008894
12	0	150.59	0	98.824	150.59	0	2.4316	0.010381
13	0	207.06	0	135.88	207.06	0	0.15922	0.0004988
14	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.06456	0.0002756
15	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.010376	4.43E-05
16	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.12112	0.0005171
17	0	0	0	0	0	0	0	0.074747
18	0	0	0	0	0	0	0	0.041307
19	0	0	0	0	0	0	0	0.0066387
20	0	0	0	0	0	0	0	0.077492
21	0	56.471	0	37.059	56.471	0	13.377	0.033507
22	0	94.118	0	61.765	94.118	0	5.8185	0.018517
23	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.93515	0.002976
24	0	94.118	0	61.765	94.118	0	10.916	0.034738
25	0	150.59	0	98.824	150.59	0	1.9989	0.0050068
26	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.86944	0.0027669
27	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.13973	0.0004447
28	0	188.24	0	123.53	188.24	0	1.6311	0.0051907
29	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.099561	0.0002494
30	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.043305	0.0001378
31	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.00696	2.21E-05
32	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.081241	0.0002585
33	0	0	0	0	97.412	0	1.5417	0.0093434
34	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.41307	0.0051633

Prilog 6.4. Tabelarni prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verova- tnoća
35	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.066387	0.0008298
36	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.77492	0.0096864
37	0	94.118	0	61.765	94.118	0	1.6721	0.0041884
38	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.72732	0.0023146
39	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.11689	0.000372
40	0	131.76	0	86.471	131.76	0	1.3645	0.0043422
41	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.24986	0.0006259
42	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.10868	0.0003459
43	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.017467	5.56E-05
44	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.20388	0.0006488
45	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.012445	3.12E-05
46	0	320	0	210	320	0	0.0054131	1.72E-05
47	0	320	0	210	320	0	0.00086999	2.77E-06
48	0	320	0	210	320	0	0.010155	3.23E-05
49	0	0	0	0	0	0	0	0.0078681
50	0	0	0	0	0	0	0	0.0043481
51	0	0	0	0	0	0	0	0.0006988
52	0	0	0	0	0	0	0	0.008157
53	0	18.824	0	12.353	18.824	0	3.1364	0.0035271
54	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.5676	0.0019491
55	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.25193	0.0003133
56	0	56.471	0	37.059	56.471	0	2.9407	0.0036566
57	0	112.94	0	74.118	112.94	0	0.46866	0.000527
58	0	150.59	0	98.824	150.59	0	0.23423	0.0002913
59	0	150.59	0	98.824	150.59	0	0.037645	4.68E-05
60	0	150.59	0	98.824	150.59	0	0.43942	0.0005464
61	0	207.06	0	135.88	207.06	0	0.023343	2.63E-05
62	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.011667	1.45E-05
63	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.0018751	2.33E-06

Prilog 6.4. Tabelarni prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verova- tnoća
64	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.021887	2.72E-05
65	0	0	0	0	0	0	0	0.0039341
66	0	0	0	0	0	0	0	0.002174
67	0	0	0	0	0	0	0	0.0003494
68	0	0	0	0	0	0	0	0.0040785
69	0	56.471	0	37.059	56.471	0	1.7093	0.0017635
70	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.86174	0.0009746
71	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.1385	0.0001566
72	0	94.118	0	61.765	94.118	0	1.6166	0.0018283
73	0	150.59	0	98.824	150.59	0	0.25541	0.0002635
74	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.12877	0.0001456
75	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.020695	2.34E-05
76	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.24157	0.0002732
77	0	244.71	0	160.59	244.71	0	0.012722	1.31E-05
78	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.0064136	7.25E-06
79	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.0010308	1.17E-06
80	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.012032	1.36E-05
81	0	0	0	0	97.412	0	0.36144	0.0004918
82	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.17664	0.0002718
83	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.028389	4.37E-05
84	0	37.647	0	24.706	65.516	0	0.33138	0.0005098
85	0	94.118	0	61.765	94.118	0	0.21366	0.0002204
86	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.10772	0.0001218
87	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.017312	1.96E-05
88	0	131.76	0	86.471	131.76	0	0.20208	0.0002285
89	0	188.24	0	123.53	188.24	0	0.031926	3.29E-05
90	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.016096	1.82E-05
91	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.0025869	2.93E-06
92	0	225.88	0	148.24	225.88	0	0.030196	3.41E-05

Prilog 6.4. Tabelarni prikaz deficita po čvorovima za sve ispitivane situacije ispada generatorskih jedinica kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
93	0	282.35	0	185.29	282.35	0	0.0015902	1.64E-06
94	0	320	0	210	320	0	0.0008017	9.07E-07
95	0	320	0	210	320	0	0.00012885	1.46E-07
96	0	320	0	210	320	0	0.001504	1.70E-06

Σ0.99999

Prilog 6.5. Tabela isapad jednog voda i jednog generatora, sused modelovan u potpunosti (prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
1	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.08365	5.63E-05
2	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12548	8.45E-05
3	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.041825	2.82E-05
4	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.041825	2.82E-05
5	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.08365	5.63E-05
6	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.18905	0.00012725
7	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.08365	5.63E-05
8	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12548	8.45E-05
9	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12548	8.45E-05
10	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.037913	2.55E-05
11	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.05687	3.83E-05
12	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.018957	1.28E-05
13	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.018957	1.28E-05
14	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.037913	2.55E-05
15	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.085684	5.77E-05
16	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.037913	2.55E-05
17	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.05687	3.83E-05
18	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.05687	3.83E-05
19	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0056652	3.81E-06

Prilog 6.5. Tabela ispad jednog voda i jednog generatora, sused modelovan u potpunosti  
(prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
20	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0084978	5.72E-06
21	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0028326	1.91E-06
22	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0028326	1.91E-06
23	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0056652	3.81E-06
24	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.012803	8.62E-06
25	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0056652	3.81E-06
26	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0084978	5.72E-06
27	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0084978	5.72E-06
28	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0002822	1.90E-07
29	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0004233	2.85E-07
30	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0001411	9.50E-08
31	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0001411	9.50E-08
...	...	...	...	...	...	...	...	...
597	0	0	0	0	31.585	0	1.07E-05	5.89E-09
598	0	0	0	0	31.585	0	1.07E-05	5.89E-09
599	0	0	0	0	31.585	0	2.15E-05	1.18E-08
600	0	0	0	0	31.585	0	4.85E-05	2.66E-08
601	0	0	0	0	31.585	0	2.15E-05	1.18E-08
602	0	0	0	0	31.585	0	3.22E-05	1.77E-08
603	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	1.77E-08
604	0	0	0	0	31.585	0	1.07E-06	5.87E-10
605	0	0	0	0	31.585	0	1.60E-06	8.80E-10
606	0	0	0	0	31.585	0	5.34E-07	2.93E-10
607	0	0	0	0	31.585	0	5.34E-07	2.93E-10
608	0	0	0	0	31.585	0	1.07E-06	5.87E-10
609	0	0	0	0	31.585	0	2.42E-06	1.33E-09
610	0	0	0	0	31.585	0	1.07E-06	5.87E-10
611	0	0	0	0	31.585	0	1.60E-06	8.80E-10
612	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	8.80E-10

Prilog 6.5. Tabela ispad jednog voda i jednog generatora, sused modelovan u potpunosti  
(prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
613	0	0	0	0	31.585	0	4.00E-05	2.20E-08
614	0	0	0	0	31.585	0	6.01E-05	3.30E-08
615	0	0	0	0	31.585	0	2.00E-05	1.10E-08
616	0	0	0	0	31.585	0	2.00E-05	1.10E-08
617	0	0	0	0	31.585	0	4.00E-05	2.20E-08
618	0	0	0	0	31.585	0	9.05E-05	4.97E-08
619	0	0	0	0	31.585	0	4.00E-05	2.20E-08
620	0	0	0	0	31.585	0	6.01E-05	3.30E-08
621	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	3.30E-08
622	0	0	0	0	31.585	0	1.80E-05	9.86E-09
623	0	0	0	0	31.585	0	2.69E-05	1.48E-08
624	0	0	0	0	31.585	0	8.98E-06	4.93E-09
625	0	0	0	0	31.585	0	8.98E-06	4.93E-09
626	0	0	0	0	31.585	0	1.80E-05	9.86E-09
627	0	0	0	0	31.585	0	4.06E-05	2.23E-08
628	0	0	0	0	31.585	0	1.80E-05	9.86E-09
629	0	0	0	0	31.585	0	2.69E-05	1.48E-08
630	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	1.48E-08
631	0	0	0	0	31.585	0	2.68E-06	1.47E-09
632	0	0	0	0	31.585	0	4.02E-06	2.21E-09
633	0	0	0	0	31.585	0	1.34E-06	7.36E-10
634	0	0	0	0	31.585	0	1.34E-06	7.36E-10
635	0	0	0	0	31.585	0	2.68E-06	1.47E-09
636	0	0	0	0	31.585	0	6.06E-06	3.33E-09
637	0	0	0	0	31.585	0	2.68E-06	1.47E-09
638	0	0	0	0	31.585	0	4.02E-06	2.21E-09
639	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	2.21E-09
640	0	0	0	0	31.585	0	1.34E-07	7.34E-11
641	0	0	0	0	31.585	0	2.00E-07	1.10E-10

Prilog 6.5. Tabela ispadnog voda i jednog generatora, sused modelovan u potpunosti  
(prikazan je početak i kraj tabele)

Situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
642	0	0	0	0	31.585	0	6.68E-08	3.67E-11
643	0	0	0	0	31.585	0	6.68E-08	3.67E-11
644	0	0	0	0	31.585	0	1.34E-07	7.34E-11
645	0	0	0	0	31.585	0	3.02E-07	1.66E-10
646	0	0	0	0	31.585	0	1.34E-07	7.34E-11
647	0	0	0	0	31.585	0	2.00E-07	1.10E-10
648	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	1.10E-10

Prilog 6.6. Ispad jednog voda i jednog generatora, kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
1	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.082891	5.28E-05
2	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12434	7.92E-05
3	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.041446	2.64E-05
4	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.041446	2.64E-05
5	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.082891	5.28E-05
6	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.18733	0.00011927
7	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.082891	5.28E-05
8	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12434	7.92E-05
9	0	18.824	0	12.353	18.824	0	0.12434	7.92E-05
10	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.043588	2.93E-05
11	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.065383	4.40E-05
12	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.021794	1.47E-05
13	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.021794	1.47E-05
14	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.043588	2.93E-05
15	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.09851	6.63E-05
16	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.043588	2.93E-05



Prilog 6.6. Ispad jednog voda i jednog generatora, kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
17	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.065383	4.40E-05
18	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.065383	4.40E-05
19	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0070055	4.72E-06
20	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.010508	7.07E-06
21	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0035027	2.36E-06
22	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0035027	2.36E-06
23	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.0070055	4.72E-06
24	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.015832	1.07E-05
25	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.0070055	4.72E-06
26	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.010508	7.07E-06
27	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.010508	7.07E-06
28	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.081772	5.50E-05
29	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.12266	8.26E-05
30	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.040886	2.75E-05
31	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.040886	2.75E-05
32	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.081772	5.50E-05
33	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.18481	0.0001244
34	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.081772	5.50E-05
35	0	56.471	0	37.059	56.471	0	0.12266	8.26E-05
36	0	56.471	0	37.059	279.06	0	0.12266	8.26E-05
37	0	0	0	0	31.585	0	0.078844	5.92E-05
38	0	0	0	0	31.585	0	0.11827	8.88E-05
39	0	0	0	0	31.585	0	0.039422	2.96E-05
40	0	0	0	0	31.585	0	0.039422	2.96E-05
41	0	0	0	0	31.585	0	0.078844	5.92E-05
42	0	0	0	0	31.585	0	0.17819	0.00013383
43	0	0	0	0	31.585	0	0.078844	5.92E-05
44	0	0	0	0	31.585	0	0.11827	8.88E-05
45	0	0	0	0	288.42	0	0.11827	8.88E-05

Prilog 6.6. Ispad jednog voda i jednog generatora, kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
46	0	0	0	0	31.585	0	0.043571	3.27E-05
47	0	0	0	0	31.585	0	0.065356	4.91E-05
48	0	0	0	0	31.585	0	0.021785	1.64E-05
49	0	0	0	0	31.585	0	0.021785	1.64E-05
50	0	0	0	0	31.585	0	0.043571	3.27E-05
51	0	0	0	0	31.585	0	0.09847	7.40E-05
52	0	0	0	0	31.585	0	0.043571	3.27E-05
53	0	0	0	0	31.585	0	0.065356	4.91E-05
54	0	0	0	0	288.42	0	0.065356	4.91E-05
55	0	0	0	0	31.585	0	0.0070026	5.26E-06
56	0	0	0	0	31.585	0	0.010504	7.89E-06
57	0	0	0	0	31.585	0	0.0035013	2.63E-06
58	0	0	0	0	31.585	0	0.0035013	2.63E-06
59	0	0	0	0	31.585	0	0.0070026	5.26E-06
60	0	0	0	0	31.585	0	0.015826	1.19E-05
61	0	0	0	0	31.585	0	0.0070026	5.26E-06
62	0	0	0	0	31.585	0	0.010504	7.89E-06
63	0	0	0	0	288.42	0	0.010504	7.89E-06
64	0	0	0	0	31.585	0	0.081739	6.14E-05
65	0	0	0	0	31.585	0	0.12261	9.21E-05
66	0	0	0	0	31.585	0	0.040869	3.07E-05
67	0	0	0	0	31.585	0	0.040869	3.07E-05
68	0	0	0	0	31.585	0	0.081739	6.14E-05
69	0	0	0	0	31.585	0	0.18473	0.00013875
70	0	0	0	0	31.585	0	0.081739	6.14E-05
71	0	0	0	0	31.585	0	0.12261	9.21E-05
72	0	0	0	0	288.42	0	0.12261	9.21E-05
73	0	0	0	0	31.585	0	0.011354	6.23E-06
74	0	0	0	0	31.585	0	0.017031	9.35E-06

Prilog 6.6. Ispad jednog voda i jednog generatora, kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatnoća
75	0	0	0	0	31.585	0	0.0056769	3.12E-06
76	0	0	0	0	31.585	0	0.0056769	3.12E-06
77	0	0	0	0	31.585	0	0.011354	6.23E-06
78	0	0	0	0	31.585	0	0.02566	1.41E-05
79	0	0	0	0	31.585	0	0.011354	6.23E-06
80	0	0	0	0	31.585	0	0.017031	9.35E-06
81	0	0	0	0	0	0	0	9.35E-06
82	0	0	0	0	31.585	0	0.0062743	3.44E-06
83	0	0	0	0	31.585	0	0.0094115	5.17E-06
84	0	0	0	0	31.585	0	0.0031372	1.72E-06
85	0	0	0	0	31.585	0	0.0031372	1.72E-06
86	0	0	0	0	31.585	0	0.0062743	3.44E-06
87	0	0	0	0	31.585	0	0.01418	7.79E-06
88	0	0	0	0	31.585	0	0.0062743	3.44E-06
89	0	0	0	0	31.585	0	0.0094115	5.17E-06
90	0	0	0	0	0	0	0	5.17E-06
91	0	0	0	0	31.585	0	0.0010084	5.54E-07
92	0	0	0	0	31.585	0	0.0015126	8.30E-07
93	0	0	0	0	31.585	0	0.0005042	2.77E-07
94	0	0	0	0	31.585	0	0.0005042	2.77E-07
95	0	0	0	0	31.585	0	0.0010084	5.54E-07
96	0	0	0	0	31.585	0	0.002279	1.25E-06
97	0	0	0	0	31.585	0	0.0010084	5.54E-07
98	0	0	0	0	31.585	0	0.0015126	8.30E-07
99	0	0	0	0	0	0	0	8.30E-07
100	0	0	0	0	31.585	0	0.011771	6.46E-06
101	0	0	0	0	31.585	0	0.017656	9.69E-06
102	0	0	0	0	31.585	0	0.0058853	3.23E-06
103	0	0	0	0	31.585	0	0.0058853	3.23E-06

Prilog 6.6. Ispad jednog voda i jednog generatora, kada je sused modelovan ekvivalentom

situacije	čvor 1	čvor 2	čvor 3	čvor 4	čvor 5	čvor 6	učestanost (1/god)	verovatoća
104	0	0	0	0	31.585	0	0.011771	6.46E-06
105	0	0	0	0	31.585	0	0.026602	1.46E-05
106	0	0	0	0	31.585	0	0.011771	6.46E-06
107	0	0	0	0	31.585	0	0.017656	9.69E-06
108	0	0	0	0	0	0	0	9.69E-06

Prilog 7.1. Parametri pouzdanosti sistema Srbije

Elektrana	$P_n$ (MW)	$\lambda$ (isp./god.)	U	A
TENT A	191	41.67	0.1391	0.86092
	191	30.05	0.1148	0.8852
	280	50.49	0.2008	0.7992
	280	40.12	0.1912	0.8088
	280	32.31	0.1011	0.8989
	280	45.51	0.1217	0.8783
TENT B	580	15.7	0.0513	0.9487
	580	17.46	0.0357	0.9643
KOLUBARA	29	16.82	0.0625	0.9375
	29	31.6	0.3683	0.6317
	58	37.66	0.4751	0.5249
	29	23.36	0.1323	0.8677
	100	137.73	0.5612	0.4388
MORAVA	108	29.64	0.1607	0.8393
KOSTOLAC A	90	21.2	0.1045	0.8955
	191	34.08	0.1555	0.8445
KOSTOLAC B	320	85.55	0.2553	0.7447
	320	76.84	0.2583	0.7417
KOSOVO A	55	61.93	0.4042	0.5958
	99	44.51	0.3642	0.6358
	153	31.12	0.244	0.756
	153	34.35	0.1897	0.8103
	157	15.7	0.1294	0.8706
KOSOVO B	309	62.12	0.1857	0.8143
	309	88.02	0.282	0.718

Za HE Đerdap se može uzeti da je raspoloživost 0.9, a za ostale HE 0.7, s obzirom na hidrološke prilike. Takođe, za hidro elektrane Crne Gore i Albanije uzeta je raspoloživost 0.7, a za termoelektrane Gacko i Pljevlja 0.8

## Prilog 7.2. Podaci o čvorovima sistema Srbije

UCTE ime čvora	naponski nivo (kV)	broj izvornih jedinica u čvoru	Snaga proizvodnje (MW)	Snaga potrošnje (MWh)	Raspol.	Ispad/ god
JHDJE111	400	6	1080	0	0.9	5
JBBAST21	220	4	360	0	0.7	5
JHBIST2	220	2	100	0	0.7	5
JTENTA11	400	2	560	0	0.89	38.91
JTENTA21	220	2	380	0	0.87	35.86
JTENTA21	220	2	560	0	0.8	45.3
JTENTB11	400	2	1160	0	0.95	16.58
JTKOSA2	220	2	450	0	0.81	27.06
JKOSB 11	400	2	600	0	0.76	75.07
JTDRMN11	400	2	640	0	0.74	81.19
JNIS2 11	400	0	0	331.3		
JNIS2 2	220	0	0	149.3		
JNSAD311	400	0	0	291.2		
JNSAD321	220	0	0	0		
JHIP 2	220	0	0	37.5		
JKRUS12	220	0	0	187.2		
JPANC211	400	0	0	352.6		
JKRAG21	400	0	0	191		
JPANC22	220	0	0	0		
JFERON2	220	0	0	18.1		
JCACAK2	220	0	0	72.3		
JBOR 21	400	0	0	87.7		
JBGD8 21	220	0	0	442		
JBGD8 11	400	0	0	0		
JBGD3 21	220	0	0	144		
JBGD5 21	220	0	0	533		
JKRALJ2	220	0	0	147.7		
JZREN22	220	0	0	170.6		
JVALJ321	220	0	0	131.3		
JKOSB 21	220	0	0	410		
JSUBO311	400	0	0	387		
JSRBOB2	220	0	0	85.1		
JVARDI21	220	0	0	0		
JSMIT221	220	0	0	156.3		
JSMIT21	400	0	0	0		
JSABA32	220	0	0	129.4		
JRPMLA11	400	0	0	0		
JPOZEG2	220	0	0	172.2		
JJAGO41	400	0	0	136.4		
JPODUJ2	220	0	0	33.9		
JPRIZ22	220	0	0	224.1		
XSO_NI11	400	0	0	-250		

Prilog 7.2. Podaci o čvorovima sistema Srbije

<b>UCTE ime čvora</b>	<b>naponski nivo (kV)</b>	<b>broj izvornih jedinica u čvoru</b>	<b>Snaga proizvodnje (MW)</b>	<b>Snaga potrošnje (MWh)</b>	<b>Raspol.</b>	<b>Ispad/ god</b>
XPF DJ11	400	0	0	-200		
XSA SU11	400	0	0	-260		
XER SM11	400	0	0	213		
XSK KB11	400	0	0	326		
XUG SM11	400	0	0	183		
XVI VA21	220	0	0	-12		

Prilog 7.3. Podaci o čvorovima sistema Crne Gore i Albanije

<b>UCTE ime čvora</b>	<b>Naponski nivo</b>	<b>broj izvornih jedinica u čvoru</b>	<b>Snaga proi- zvodnje (MW)</b>	<b>Snaga potrošnje (MW)</b>	<b>Raspo- loži-vost</b>	<b>(ispa da /god)</b>
WGACKO1	400	1	100	0	0.8	10
WTREBI2	220	3	180	0	0.7	10
0HPERU2	220	7	297	0	0.7	10
0HPIVA2	220	3	300	0	0.7	10
AFIERZ2	220	4	250	0	0.7	10
AVDEJA2	220	5	150	0	0.7	10
AKOMAN2	220	4	300	0	0.7	10
0RPRIB1	400	0	0	0	0	0
0TPLJE2	220	1	150	0	0.8	10
0MOJKO2	220	0	0	33.5	0	0
0MOJKT2	220	0	0	0	0	0
0PODG12	220	0	0	28.7	0	0
0PODG21	400	0	0	319	0	0
0TPLJE1	400	0	0	0	0	0
WTREBI1	400	0	0	0	0	0
WSAR202	220	0	0	5	0	0
ATIRAN2	220	0	0	295	0	0
AELBS12	400	0	0	105	0	0
AELBS22	220	0	0	0	0	0
AELBS21	400	0	0	0	0	0
AFIER 2	220	0	0	95	0	0
ASHARR2	220	0	0	97	0	0
ABURRE2	220	0	0	35	0	0
ARRAZH2	220	0	0	90	0	0
ABABIC2	220	0	0	45	0	0
AZEMLA1	400	0	0	45	0	0
AKOPLI2	220	0	0	7	0	0
AVLOTP2	220	0	0	0	0	0
0HPERU2P	220	0	0	27.8	0	0
0TPLJE2P	220	0	0	48.2	0	0



Prilog 7.4. Geografska karta elektroenergetskog sistema Srbije, Crne Gore i Albanije - naponski nivo 400kV i 220kV



Prilog 8.1. Podaci o generatorskim čvorovima

<b>izvorni cvor</b>	<b>gen. 1</b>	<b>gen. 2</b>	<b>gen. 3</b>	<b>gen. 4</b>	<b>gen. 5</b>	<b>gen. 6</b>
	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
1	20	20	76	76		
2	20	20	76	76		
7	100	100	100			
13	197	197	197			
15	12	12	12	12	12	155
16	155					
18	400					
21	400					
22	50	50	50	50	50	50
23	155	155	350			

Prilog 8.2. Podaci o parametrima pouzdanosti generatorskih jedinica

<b>snaga jedinice (MW)</b>	<b>Broj jedinica</b>	<b>MTTF (h)</b>	<b>MTTR (h)</b>
12	5	2940	60
20	4	450	50
50	6	1980	20
76	4	1960	40
100	3	1200	50
155	4	960	40
197	3	950	50
350	1	1150	100
400	2	1100	150

MTTF-vreme do ispada

MTTR-vreme između popravke

Prilog 8.3. Podaci o potrošačkim čvorovima

<b>Potrošački čvor</b>	<b>MW</b>	<b>MVAr</b>
1	108	22
2	97	20
3	180	37
4	74	15
5	71	14
6	136	28
7	125	25
8	171	35
9	175	36
10	195	40
13	265	54
14	194	39
15	317	64
16	100	20
18	333	68
19	181	37
20	128	26

Prilog 8.4. Podaci o vodovima IEEE RTS sistema

od	do	R	X	Limit (MW)	Limit (MW)	Limit (MW)	Ispad / god	vreme popravke (h)	Nap.nivo (kV)	Oprema
1	2	0.0026	0.0139	175	200	193	0.24	16	138	Kabl
1	3	0.0546	0.2112	175	220	208	0.51	10	138	Vod
1	5	0.0218	0.0845	175	220	208	0.33	10	138	Vod
2	4	0.0328	0.1267	175	220	208	0.39	10	138	Vod
2	6	0.0497	0.192	175	220	208	0.48	10	138	Vod
3	9	0.0308	0.119	175	220	208	0.38	10	138	Vod
3	24	0.0023	0.0839	400	600	510	0.02	768		Tran.
4	9	0.0268	0.1037	175	220	208	0.36	10	138	vod
5	10	0.0228	0.0883	175	220	208	0.34	10	138	vod
6	10	0.0139	0.0605	175	200	193	0.33	35	138	kabl
7	8	0.0159	0.0614	175	220	208	0.3	10	138	vod
8	9	0.0427	0.1651	175	220	208	0.44	10	138	vod
8	10	0.0427	0.1651	175	220	208	0.44	10	138	vod
9	11	0.0023	0.0839	400	600	510	0.02	768		Tran.
9	12	0.0023	0.0839	400	600	510	0.02	768		Tran.
10	11	0.0023	0.0839	400	600	510	0.02	768		Tran.
10	12	0.0023	0.0839	400	600	510	0.02	768		Tran.
11	13	0.0061	0.0476	500	625	600	0.4	11	230	vod
11	14	0.0054	0.0418	500	625	600	0.39	11	230	vod
12	13	0.0061	0.0476	500	625	600	0.4	11	230	vod
12	23	0.0124	0.0966	500	625	600	0.52	11	230	vod
13	23	0.0111	0.0865	500	625	600	0.49	11	230	vod
14	16	0.005	0.0389	500	625	600	0.38	11	230	vod
15	16	0.0022	0.0173	500	625	600	0.33	11	230	vod
15	21	0.0063	0.049	500	625	600	0.41	11	230	vod
15	21	0.0063	0.049	500	625	600	0.41	11	230	vod
15	24	0.0067	0.0519	500	625	600	0.41	11	230	vod
16	17	0.0033	0.0259	500	625	600	0.35	11	230	vod
16	19	0.003	0.0231	500	625	600	0.34	11	230	vod
17	18	0.0018	0.0144	500	625	600	0.32	11	230	vod
17	22	0.0135	0.1053	500	625	600	0.54	11	230	vod
18	21	0.0033	0.0259	500	625	600	0.35	11	230	vod
18	21	0.0033	0.0259	500	625	600	0.35	11	230	vod
19	20	0.0051	0.0396	500	625	600	0.38	11	230	vod
19	20	0.0051	0.0396	500	625	600	0.38	11	230	Vod
20	23	0.0028	0.0216	500	625	600	0.34	11	230	Vod
20	23	0.0028	0.021	500	625	600	0.34	11	230	Vod
21	22	0.0087	0.0678	500	625	600	0.45	11	230	Vod

## Biografija autora

Marija Đorđević je rođena 7. decembra 1972. u Čačku. Osnovnu školu i gimnaziju je završila sa odličnim uspehom. Nosilac je „Vukove“ i „Alasove“ diplome. Školske godine 1991/92 upisuje Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 1997. godine na Energetskom odseku, na smeru za Energetske pretvarače i pogone, sa ocenom na diplomskom radu 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*“, je odbranila 28. novembra 2003. godine i stekla zvanje magistra elektotehničkih nauka.

Od 1998. do 2003. godine radila je u Direkciji za razvoj i investicije JP EPS na problematici prognoze potrošnje, ekonomskog dispečinga, modelovanje pomoću neuralnih mreža i klastera u EES. Učestvovala je u izradi studije za procenu gubitaka EPS-a, gde su klasteri i neuralne mreže primenjeni kao metod za grupisanje podataka. Učestvovala je u implemetaciji paketa za prognozu potrošnje i paketa za ekonomski dispečing.

Od 2003. do 2005. godine radi u Direkciji za upravljanje EES-om JP EPS, a od 2005. godine u JP EMS, na problematici proračuna tokova snaga, analiza sigurnosti, proračuna prenosnih kapaciteta prema NTC metodologiji, izradi DACF modela. Učestvovala je u implemetaciji novog SCADA/EMS sistema u JP EMS, na implementaciji mrežnih aplikacija (estimatora, tokova snaga, analiza sigurnosti, DACF modela, omogućavanje izlaznih rezultata u UCT i PTI format). U okviru JP EMS je aktivirala aplikaciju za prognozu potrošnje. Učestvuje u izradi petogodišnjih i desetogodišnjih planova razvoja JP EMS-a.

Učestvuje u mesečnim proračunima prenosnih kapaciteta prema NTC metodi, koje Elektromreža Srbije svakog meseca alocira. Aktivno učestvuje u razvoju novih metodologija za upravljanje zagušenjima, trenutno aktuelnim na evropskom nivou. Učestvovala u „dry-run“ projektu 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“ za Jugoistočnu Evropu, pod pokroviteljstvom ENTSO-E Market Komiteta. Kao rukovodilac podgrupe doprinela je istraživanju metodologije za proračun prenosnih kapaciteta, zasnovanih na tokovima snaga, i kada je u pitanju „Border Capacity“ i „Max Flow“ pristup. 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 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.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а МАРИТА М. ЈОРЂЕВИЋ

број уписа \_\_\_\_\_

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УПРОЦЕНАВАЊЕ МОДЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА У АНАЛИЗАМА ПОУЗДАЈНОСТИ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 4.09. 2013

Марица Јорђевић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора МАРИЈА М. ЂОРЂЕВИЋ

Број уписа \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада УПРОВОЂАВАЊЕ МОДЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА

Ментор Др ДРАГУТИН САЛАМОН

Потписани Марија М. Ђорђевић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 4.09.2013

Марија М. Ђорђевић

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УПРВЉИВАВАЊЕ МОДЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА У АНАЛИЗАМА ПОУЗДАНОСТИ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 2013, 4. септембар

Марко Јоковић