

Analiza pouzdanosti i optimalnog uklopnog stanja distribucijske mreže

Markić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:597308>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**ANALIZA POUZDANOSTI I OPTIMALNOG
UKLOPNOG STANJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE**

Diplomski rad

Nikola Markić

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 08.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Nikola Markić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1253, 06.10.2019.
OIB studenta:	73577073164
Mentor:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić
Naslov diplomskog rada:	Analiza pouzdanosti i optimalnog uklopnog stanja distribucijske mreže
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Definicija pokazatelje pouzdanosti disribucijske mreže. Optimalan način obnove distribucijske mreže nakon kvara. Izračun pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže za različita uklopna stanja i održavanje pojedinih elemenata mreže (vod, trafo..)
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	08.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Nikola Markić

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1253, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza pouzdanosti i optimalnog uklopnog stanja distribucijske mreže**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Srete Nikolovski

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POUZDANOST	2
2.1. Osnovni pojmovi i teorije pouzdanosti.....	2
2.2. Model pouzdanosti komponente.....	3
2.2.1. Model neobnovljive komponente	4
2.2.2. Model obnovljive komponente	6
2.3. Metode proračuna pouzdanosti.....	9
2.3.1. Metoda stabla kvara	10
2.3.2. Monte Carlo metoda	11
2.4. Pokazatelji pouzdanosti	16
2.4.1. Statistički i raspodijeljeni pokazatelji	17
2.4.2. Pokazatelji usmjereni potrošaču	19
2.4.3. Pokazatelji usmjereni opterećenju i energiji.....	21
2.4.4. Pokazatelji s obzirom na hijerarhijske razine u elektroenergetskom sustavu.....	23
3. MARKOVLJEV MODEL PROSTORA STANJA.....	28
3.1. Markovljev model obnovljive komponente.....	28
3.2. Model komponente sa planiranim remontom.....	31
3.3. Model kvara dviju komponenata	33
3.3.1. Paralelni spoj komponenata	35
3.3.2. Serijski spoj komponenata	36
3.4. Markovljev lanac	37
4. ANALIZA POUZDANOSTI I OPTIMIZACIJE DISTRIBUCIJSKE MREŽE.....	39
4.1. Podaci o modelu mreže.....	40
4.2. Optimizacija distribucijske mreže nakon kvara kabela	42
4.2.1. Parametri simulacije	42

4.2.2. Podaci o modelu mreže dobiveni simulacijom	47
4.3. Utjecaj primarne trafostanice sa napajanim područjem na pouzdanost	48
4.4. Izračun pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže	50
4.4.1. Pokazatelji pouzdanosti sustava	50
4.4.2. Pokazatelji pouzdanosti sabirnica i potrošača	52
4.4.3. Pokazatelji pouzdanosti dobiveni rekonfiguracijom mreže.....	53
5. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA.....	56
SAŽETAK.....	58
ABSTRACT	59
ŽIVOTOPIS	60

1. UVOD

Kako je elektroenergetski sustav vrlo kompleksan zbog svoje geografske raspršenosti, državne i međunarodne povezanosti, on je često izložen raznim poremećajima i kvarovima. Nepredviđeno ponašanje sustava u jednoj njegovoj točki može imati veliki utjecaj na rad cjelokupnog sustava. Njegov primarni cilj jest proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije do potrošača, uz zadovoljavajući stupanj kvalitete frekvencije i napona. U cilju ispunjenja ovih uvjeta rade se analize pouzdanosti s kojima se inženjeri stalno susreću. Da bi se prikazala pouzdanost pojedinog sustava (komponente), važno je poznavati njihove pokazatelje utemeljene na metodama proračuna pouzdanosti, koje ovise o hijerarhijskoj razini, poznavanju podataka iz prošlosti o ponašanju sustava, vrsti mreže i slično.

U ovom radu će se objasniti osnovni pojmovi pouzdanosti te definirati modeli komponente. Zatim će se obrazložiti metode proračuna i pokazatelji pouzdanosti, osim Markovljevog modela koji se analizira kao zasebna cjelina. U tom poglavlju objašnjen je model komponente sa planiranim remontom, paralelni i serijski model komponente te Markovljev lanac. U obnovljive komponente se ubrajaju i elementi elektroenergetskog sustava, za koje će se definirati Markovljev model. Posljednje poglavlje ovog rada je simulacijski dio u kojem će se upotrijebiti programski paket DIgSILENT PowerFactory prikladan za razne proračune kratkih spojeva, tokova snaga te analiza pouzdanosti. Simulirat će se optimizacija distribucijske mreže, a kao rezultat će se dobiti podaci o mreži koji se odnose na razdoblje kvara. Nakon toga prikazat će se utjecaj trafostanice sa napajanim područjem na pokazatelje pouzdanosti. U posljednjem dijelu simulacije provodi se analiza pouzdanosti i rekonfiguracija distribucijske mreže.

2. POUZDANOST

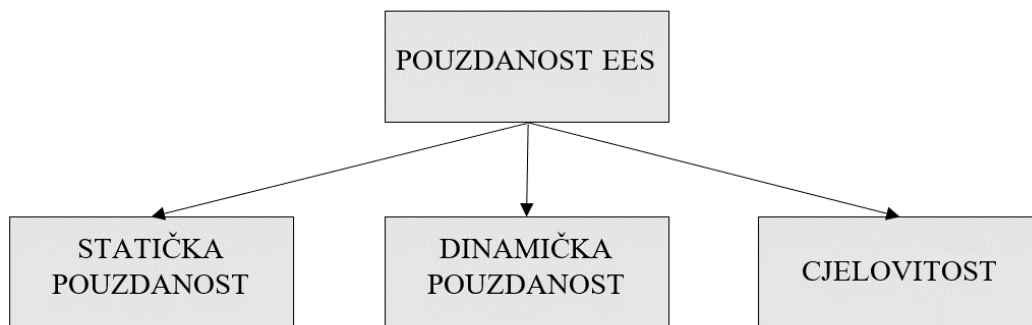
Pouzdanost distribucijskog sustava je više okrenuta potrošačima, a manje cijelom sustavu, što je glavna razlika između primjene konceptata pouzdanosti tog sustava u odnosu na primjenu pouzdanosti proizvodnog i prijenosnog sustava [1, str. 4]. Zbog svoje velike kompleksnosti, EES postavlja zahtjev da se zbog nemogućnosti analiziranja njegove pouzdanosti kao cjeline bez bitnijih pojednostavljenja, metode pouzdanosti koriste u proizvodnom, prijenosnom i distribucijskom podsustavu [2, str. 4]. Kod proizvodnog sustava pojam pouzdanosti je povezan sa nedostatkom proizvodnih kapaciteta, u prijenosnom sustavu uglavnom se odnosi na ispad terminala ili voda, a kod distribucijskog sustava označava prekid napajanja krajnjeg korisnika. Više od 80% prekida koji nastaju kod potrošača uzrokovani su kvarovima u distribucijskoj mreži te upravo ona predstavlja najslabiju „točku“ sustava [1, str. 4]. Stoga je pri analizi pouzdanosti sustava neophodno pažnju usmjeriti na distribucijsku mrežu [3, str. 12].

2.1. Osnovni pojmovi i teorije pouzdanosti

Pouzdanost kao samostalna znanstvena disciplina, koja se upotrebljava u svim etapama planiranja, proizvodnje i eksploatacije tehničkih sustava, je temeljena na teoriji vjerojatnosti i matematičkoj statistici. Ona se bavi razvojem modela za procjenu pouzdanosti i raspoloživosti komponenata sustava, matematičkih modela te metodama predviđanja ponašanja komponenata [2, str. 6]. Kako pojam pouzdanosti sa različitih aspekata ima različito značenje, u ovom radu će naglasak biti na aspektu pogodnom za elektroenergetiku. Prema [4, str. 36], pojam pouzdanosti je definiran kao matematička vjerojatnost zadovoljavajućeg rada, pri definiranim radnim uvjetima, tijekom predviđenog vremena. Kako je mjera pouzdanosti matematička vjerojatnost, primjećuje se da pouzdanost sadrži četiri pojma [2, str. 6]:

- matematičku vjerojatnost
- kriterij zadovoljavajućeg rada
- definirane radne uvjete
- vrijeme promatranja

Pojam pouzdanost ima širok spektar značenja te se može podijeliti na sljedeće kategorije, prikazane slikom 2.1.:



Slika 2.1. Podjela pouzdanosti na kategorije [2, str. 7].

Statička pouzdanost (adekvatnost, dostatnost) se odnosi na postojanje dovoljnih kapaciteta u sustavu da zadovolje potrošačko opterećenje ili operativna opterećenja sustava [5, str. 4]. Dinamička pouzdanost (sigurnost) je sposobnost sustava da se suprotstavi smetnjama koje nastaju unutar tog sustava [5, str. 4]. Tu pripadaju ispadi elemenata uslijed kvarova u elektroenergetskom sustavu te je bitno napomenuti da oba pojma uključuju vrijeme kao bitan faktor pri definiranju pojma pouzdanosti. Cjelovitost EES-a je definirana kao svojstvo sustava da održi rad u interkonekciji sa drugim sustavima [2, str. 7].

2.2. Model pouzdanosti komponente

Razmatranje pouzdanosti elektrotehničke opreme obuhvaća dvije razine – komponente i sustava, pri čemu komponenta može biti vod, otpor ili grupa jedinica koja se ne rastavlja na sastavne dijelove, dok pojam „sustav“ podrazumijeva skup komponenata spojenih tako da se omogući rad istog [4, str. 32]. U većini slučajeva kvarovi komponenata mogu utjecati na pouzdanost ostalih, mijenjajući im parametre koji definiraju pouzdanost komponente. Na temelju statističkih podataka kvarovi se mogu podijeliti na sljedeće kategorije [4, str. 34]:

- potpuni kvarovi komponenata
- kvarovi nastali zbog postupne degradacije komponenata
- kvarovi nastali zbog fizičke istrošenosti komponenata

Potpuni kvarovi su definirani mijenjanjem parametara koji određuju kvalitetu komponente i oni se ne mogu predvidjeti. Kvarovi zbog postupne degradacije se javljaju jer je kvaliteta komponente ovisna o vremenu te se ti kvarovi otklanjaju zamjenom. Kvarovi zbog fizičke istrošenosti se mogu predvidjeti na temelju karakteristika istrošenosti i izbjeći preventivnim zamjenama [4, str. 34-35].

2.2.1. Model neobnovljive komponente

Sama riječ „neobnovljivo“ asocira da se nešto nakon kvara ne može popraviti i dalje koristiti. Kako bi se u potpunosti shvatilo djelovanje takve komponente, potrebno je definirati njezine funkcije. To su [4, str. 39-52]:

- 1) Funkcija razdiobe kvara (nepouzdanosti) – predstavlja vjerojatnost kvara prije isteka vremena t :

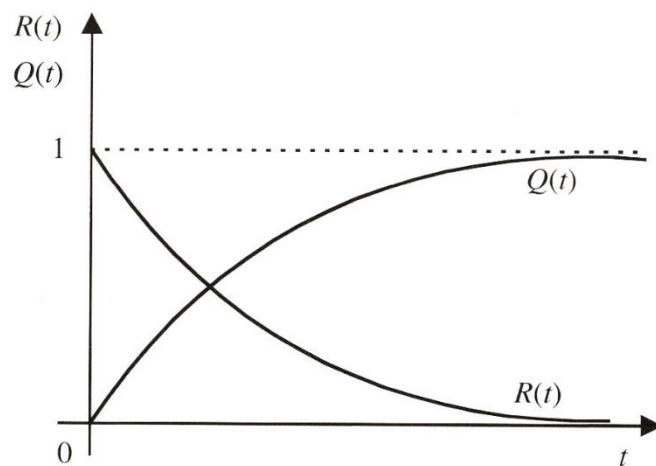
$$Q(t) = P\{\tau \leq t\} \quad (2-1)$$

gdje je τ vrijeme rada bez kvara komponente.

Funkcija $Q(t)$ predstavlja vjerojatnost kvara komponente prije isteka vremena t .

- 2) Funkcija pouzdanosti – funkcija koja kroz vrijeme t određuje vjerojatnost rada bez kvara komponente, pri čemu su navedene funkcije prikazane na slici 2.2.:

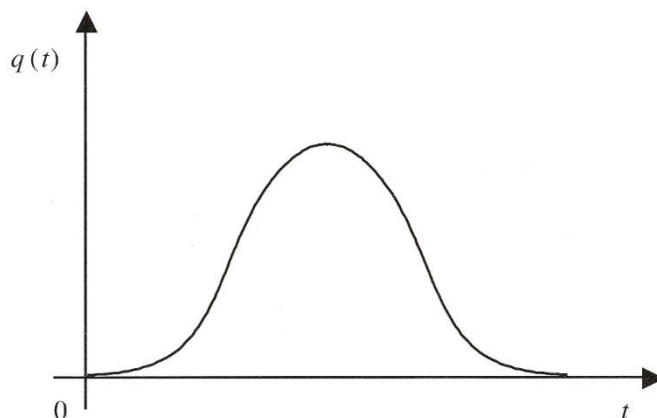
$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - P\{\tau \leq t\} = P\{\tau \geq t\} \quad (2-2)$$



Slika 2.2. Funkcija pouzdanosti $R(t)$ i funkcija razdiobe kvara $Q(t)$ [4, str. 40].

- 3) Funkcija gustoće vjerojatnosti kvara – predstavlja brzinu kojom se zbivaju kvarovi, prikazana na slici 2.3. [2, str. 10-11]:

$$q(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2-3)$$



Slika 2.3. Funkcija gustoće vjerojatnosti kvara komponente [4, str. 48].

- 4) Intenzitet kvara – predstavlja vjerojatnost da će komponenta biti u kvaru unutar intervala vremena $(t, t + \Delta t)$, ako je bila ispravna u trenutku $t = 0$ (stavljanja u pogon) i ako je ostala ispravna do $t = t$ (u čitavom vremenu):

$$\lambda(t) = \frac{q(t)}{R(t)} \quad (2-4)$$

- 5) Srednje vrijeme do kvara – matematičko očekivanje slučajne (kontinuirane) varijable τ :

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-5)$$

2.2.2. Model obnovljive komponente

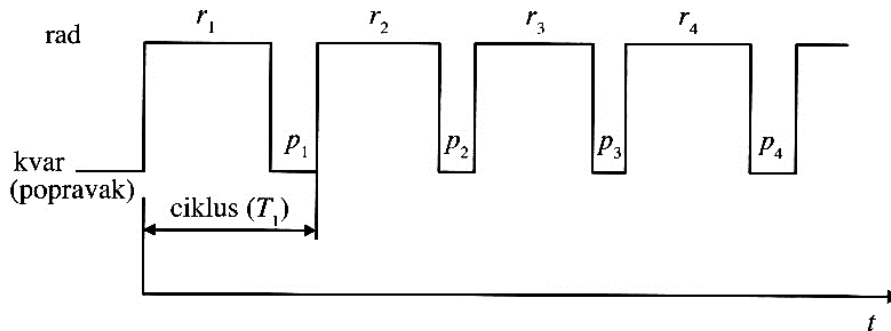
Obnovljiva komponenta je ona koja se u slučaju kvara može popraviti i vratiti u normalno pogonsko stanje. Takvi elementi su naprimjer generatori, transformatori, vodovi i sabirnice [2, str. 12]. Kako bi se analizirao utjecaj popravka komponente na pouzdanost sustava, potrebno je razmotriti svojstva koja su specifična za sustave koji dopuštaju da kvar traje određeno vrijeme. Jedno od najvažnijih svojstava je funkcija raspoloživosti $A(t)$ [4, str. 154]. Definirana je kao vjerojatnost da će komponenta (sustav) u nekom proizvoljno odabranom trenutku ispravno raditi i prikazana je izrazom (2-6) [4, str. 222]:

$$A = \frac{\bar{r}}{\bar{T}} = \frac{\bar{r}}{\bar{p} + \bar{r}} \quad (2-6)$$

gdje je:

- \bar{r} - prosječno vrijeme trajanja rada,
- \bar{p} - prosječno vrijeme trajanja popravka,
- \bar{T} - prosječno vrijeme trajanja ciklusa rad-kvar.

Promatranjem rada (popravka) komponente tijekom vremenskog intervala (Slika 2.4.), prikazani ciklus se može opisati obnovljivim procesom, ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti: statistička neovisnost ciklusa, postojanje očekivanih vrijednosti vremena do kvara i vremena trajanja popravka i da se takve vrijednosti mogu procijeniti izrazima (2-7) i (2-8). Svaki od prethodno navedenih uvjeta je ispunjen [4, str. 222].



Slika 2.4. Raspodjela vremena rada i kvara komponente [4, str. 222].

Prosječno vrijeme trajanja rada definirano je sljedećim izrazom [2, str. 13]:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} r_i}{n} \quad (2-7)$$

gdje je:

- n - broj ciklusa rad-kvar,
- r_i - vrijeme do kvara i -tog ciklusa.

Prosječno vrijeme trajanja popravka određeno je idućim izrazom [2, str. 13]:

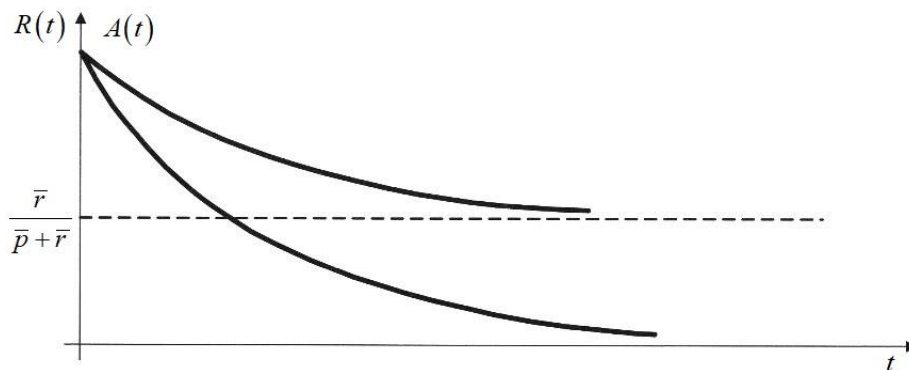
$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} p_i}{n} \quad (2-8)$$

gdje je p_i vrijeme trajanja popravka i -tog ciklusa.

Komplementarno raspoloživosti, može se odrediti neraspoločivost komponente, definirane kao omjer prosječnog vremena trajanja popravka \bar{p} i vremena \bar{T} [4, str. 223]:

$$N = 1 - A = \frac{\bar{p}}{\bar{T}} = \frac{\bar{p}}{\bar{p} + \bar{r}} \quad (2-9)$$

Bitno je napomenuti razliku između funkcije pouzdanosti i raspoloživosti komponente. Kada vrijeme promatranja komponente neograničeno raste i funkcija pouzdanosti asimptotski teži k nuli, funkcija raspoloživosti komponente postiže svoju konačnu vrijednost, što je prikazano na slici 2.5. [2, str. 13-14].

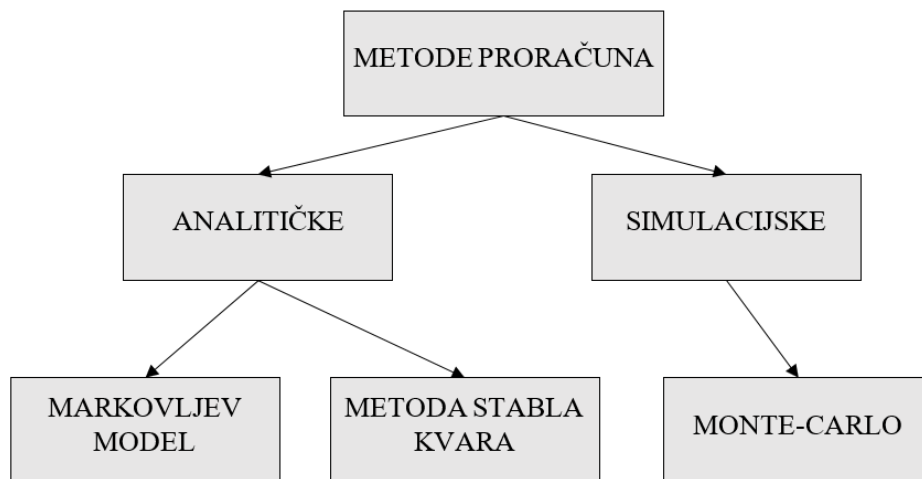


Slika 2.5. Funkcija pouzdanosti $R(t)$ i funkcija raspoloživosti komponente $A(t)$ [2, str. 14].

Osim funkcije raspoloživosti, primjer pokazatelja obnovljivih komponenata je frekvencija kvara, koja predstavlja recipročnu vrijednost prosječnog vremena trajanja ciklusa \bar{T} . Ovakav model će biti prikazan Markovljevim modelom prostora stanja, gdje se uz funkciju intenziteta kvara $\lambda(t)$ uvodi funkcija intenziteta popravka komponente $\mu(t)$ [2, str. 14].

2.3. Metode proračuna pouzdanosti

Analiza pouzdanosti sustava se temelji na poznavanju podataka o raspoloživosti i pouzdanosti komponenata koje čine taj sustav te na osnovu kojih se mogu izračunati pokazatelji pouzdanosti cijelog sustava ili njegovih dijelova. Kako je prikazano na slici 2.6., metode proračuna pouzdanosti se dijele na analitičke metode (Markovljev model i Model stabla kvara) te simulacijske (Monte-Carlo) [2, str. 18].



Slika 2.6. Podjela metoda proračuna pouzdanosti [2, str. 18].

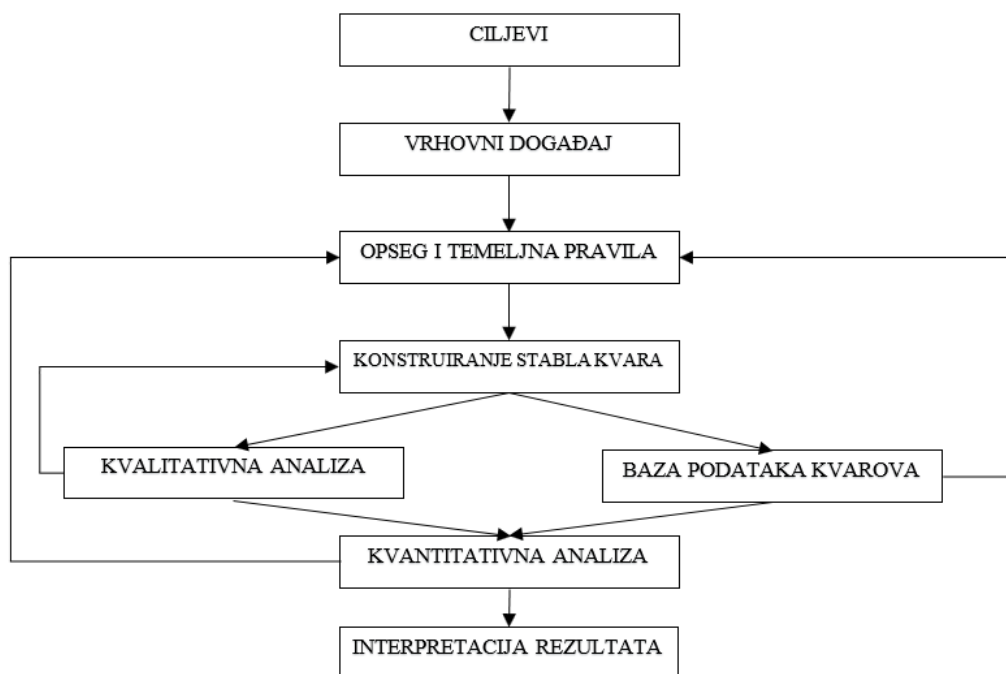
Razlika između navedenih metoda je u pristupu na koji se računaju pokazatelji pouzdanosti. Analitičke metode predstavljaju sustav modelom koji je često pojednostavljen, dok Monte Carlo metoda simulira stvarni proces i različito ponašanje sustava brojeći koliko se puta neželjeni događaj dogodio [6, str. 372]. Obje metode imaju svoje prednosti i nedostatke, od kojih su neki [6, str. 372-373]:

- Analitički model će uvijek dati isti rezultat za isti sustav, model i skup ulaznih podataka, dok rezultat simulacijske metode ovisi o broju simulacija i načinu generiranja slučajnih brojeva,
- Model koji se koristi u analitičkom pristupu je ponekad pojednostavljen do te mjere da je potpuno nerealan, dok simulacijska metoda može uzeti u obzir bilo koju karakteristiku sustava,
- Simulacijske metode pružaju velik raspon izlaznih parametara, za razliku od analitičkih koje su ograničene samo na određene veličine.

Nijedan od navedenih pristupa se ne može koristiti za svaki sustav koji će se analizirati. Razlozi odabira metode za proračun ovise o promatranom sustavu, njegovim karakteristikama i potrebnoj kompleksnosti analize [6, str. 373]. Stoga će se u nastavku opisati metoda stabla kvara i Monte Carlo metoda, dok će Markovljev model prostora stanja, na kojem se temelji analitička metoda pobrojavanja stanja i koji se u ovom radu koristi za analizu pouzdanosti, biti detaljnije razrađen.

2.3.1. Metoda stabla kvara

Metoda stabla kvara je analitička metoda kojom se utvrđuju neželjena stanja sustava te se potom sustav analizira u kontekstu njegovog funkcioniranja i okruženja, s ciljem utvrđivanja svih načina na koje se nepoželjni događaj može pojaviti [3, str. 61]. Analiza stabla kvara je pojam koji obuhvaća grafički model (model stabla kvara) te kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Grafički model se sastoji od raznih kombinacija kvarova koji mogu dovesti do neželjenih događaja. Zbog toga stablo kvara predstavlja logičke međudnose osnovnih događaja, koji vode k neželjenom događaju (vršni događaj stabla kvara) [3, str. 61]. Na slici 2.7. prikazan je dijagram analize stabla kvara sa svojim međusobnim vezama.



Slika 2.7. Dijagram analize stabla kvara [3, str. 63].

Proces analize stabla kvara se sastoji od sljedećih koraka [3, str. 62]:

- Identifikacija ciljeva
- Utvrđivanje vrhovnog događaja
- Definiranje opsega i temeljnih pravila stabla kvara
- Konstruiranje stabla kvara
- Kvalitativna analiza
- Izrada baze podataka o probabilističkom kvaru te povezivanje osnovnih događaja sa podacima o probabilističkom kvaru
- Kvantitativna analiza
- Interpretacija rezultata analize stabla kvara

Prednost ove metode u odnosu na ostale je deduktivnost. Model se izgrađuje postupno i inženjer je zaokupljen samo jednim dijelom sustava u jednom trenutku, što je pogodno kod velikih i složenih sustava. Sljedeće prednosti su raznovrsnost i broj izlaznih podataka. Kvalitativnim rezultatima dobivaju se važni podaci o pouzdanosti i raspoloživosti sustava te komponenti [7].

Kvantitativni rezultati omogućavaju usporedbu raspoloživosti drugih sustava sa analiziranim. Nedostaci metode stabla kvara su statičnost, zahtjevnost i nesigurnost ulaznih podataka. Statičnost podrazumijeva da unutar stabla kvara nije moguće modelirati događaje za koje je važan njihov redoslijed. Pojam zahtjevnosti se odnosi na kompleksnost rada, tj. potreban je cijeli tim stručnjaka na jednom projektu. Nesigurnost ulaznih podataka može uzrokovati netočnost dobivenih rezultata analize [7].

2.3.2. Monte Carlo metoda

Kako je navedeno u potpoglavlju 2.3., osim analitičkih metoda proračuna pouzdanosti postoje i simulacijske metode (Monte-Carlo). Osnovno načelo te metode je generiranje slučajnih brojeva, tj. oponaša se rad sustava tijekom određenog vremena uz stvaranje umjetne povijesti ponašanja sustava iz poznate funkcije razdiobe vjerojatnosti kvara [2, str. 88]. Budući da će se u simulacijskom dijelu rada primjenjivati analitička metoda pobrojavanja stanja, Monte Carlo metoda će biti samo opisana.

Osnovni parametar u računanju pouzdanosti je matematičko očekivanje promatranog pokazatelja pouzdanosti. Ako je N stacionarna neraspoloživost te ako je X slučajna varijabla koja poprima vrijednosti 0 i 1 ($x_i = 0$ u slučaju da je sustav u ispravnom stanju te $x_i = 1$ u slučaju njegovog zastoja), procjena njegove neraspoloživosti sa n stanja (uzorka) dana je izrazom [8, str. 35]:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-10)$$

Točnost Monte Carlo metode može se opisati koeficijentom varijacije α :

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - \bar{N}}{n \cdot \bar{N}}} \quad (2-11)$$

Iz prethodne jednadžbe proizlazi broj simulacija potreban u uzorku n :

$$n = \frac{1 - \bar{N}}{\alpha^2 \cdot \bar{N}} \quad (2-12)$$

U cilju postizanja željene točnosti, potreban broj simulacija ovisi o neraspoloživosti sustava, ali je neovisan o njenoj veličini. Stoga je ova metoda pogodna za računanje pouzdanosti velikih sustava, što predstavlja bitnu prednost u odnosu na analitičke metode proračuna pouzdanosti. Nadalje, kako je neraspoloživost elektroenergetskih sustava obično puno manja od 1, može se pisati [8, str. 36]:

$$n \approx \frac{1}{\alpha^2 \cdot \bar{N}} \quad (2-13)$$

To znači da je potreban broj simulacija (veličina uzorka) približno obrnuto proporcionalan neraspoloživosti sustava, odnosno u slučaju njegove visoke pouzdanosti, potreban je veliki broj simulacija kako bi se zadovoljila željena točnost [8, str. 37].

Kako je opisano na početku potpoglavlja, Monte Carlo metoda se temelji na generiranju slučajnih brojeva. Oni se generiraju najčešće matematičkim putem, pri čemu je osigurana mogućnost njihove reprodukcije. Temeljni zahtjevi za generiranje slučajnih brojeva su [8, str. 39]:

- Uniformnost: slučajni brojevi trebaju imati uniformnu razdiobu u intervalu [0,1],
- Neovisnost: između slučajnih brojeva potrebna je minimalna korelacija,
- Razdoblje ponavljanja bi trebalo biti dovoljno dugo.

Kako je primjerice nužan uvjet za korištenje Markovljevih modela eksponencijalni karakter funkcije gustoće razdiobe vjerojatnosti vremena trajanja ispravnog rada i vremena trajanja popravka, tako je i za Monte Carlo simulacije potrebno poznavati funkcije razdiobe vjerojatnosti kvara i ispravnog rada [2, str. 88].

Neka je X slučajna varijabla na diskretnome prostoru definirana sa:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_i & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots & p_i & \dots \end{pmatrix} \quad (2-14)$$

tj. poprima vrijednosti x_i sa vjerojatnosti p_i , može se definirati funkcija gustoće vjerojatnosti [9, str. 126]:

$$f(x) = P\{X = x\} = \begin{cases} 0 & x \neq x_i \\ p_i, & x = x_i \end{cases} \quad (2-15)$$

Kumulativna funkcija razdiobe slučajne varijable se definira kao [10, str. 120]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad (2-16)$$

Funkcija koja je usko povezana sa funkcijom gustoće vjerojatnosti i kumulativnom funkcijom je intenzitet kvara λ , koja je prema teoriji pouzdanosti definirana kao funkcija hazarda te predstavlja vjerojatnost da će komponenta zatajiti [10, str. 120-121]:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (2-17)$$

Funkcije razdiobe vjerojatnosti mogu biti često karakterizirane očekivanim (srednjim) vrijednostima, varijancom i standardnom devijacijom. Očekivana vrijednost je geometrijska sredina funkcije i definirana je kao [10, str. 121]:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2-18)$$

Varijanca je mjera koliko će funkcija odstupati od srednje vrijednosti, dok se standardna devijacija računa kao kvadratni korijen iz varijance, što je prikazano izrazom [10, str. 122]:

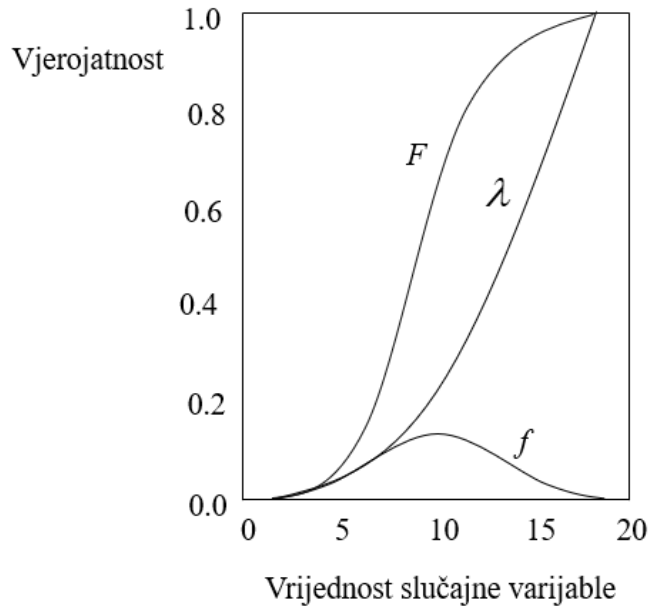
$$\text{Varijanca} = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - \bar{x}]^2 dx \quad (2-19)$$

Može se primijetiti kako nisu upotrijebljene oznake za varijancu i standardnu devijaciju, iz razloga što se iste mijenjaju ovisno o vrsti razdiobe.

Nakon što je objašnjena osnovna teorija o funkcijama razdioba vjerojatnosti, mogu se definirati neke od najbitnijih razdioba slučajne varijable. Jedna od najpoznatijih razdioba slučajne varijable je normalna, koja je karakterizirana očekivanom vjerojatnošću μ i standardnom devijacijom σ [10, str. 122]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (2-20)$$

Normalna razdioba je prikladna za primjenu, jer se njezini parametri mogu odrediti iz mjerenih podataka o vrijednostima slučajne varijable, ali se rijetko koristi u području pouzdanosti. Slučajne varijable koje opisuju pouzdanost komponenata sustava ograničene su na pozitivne vrijednosti, dok kod normalne razdiobe slučajne varijable mogu sadržavati i negativne vrijednosti [10, str. 124]. Na slici 2.8. prikazane su funkcije intenziteta zastoja (hazarda), gustoće vjerojatnosti i razdiobe slučajne varijable pri srednjoj vrijednosti $\mu = 10$ i standardnoj devijaciji $\sigma = 3$.



Slika 2.8. Normalna razdioba [10, str. 123].

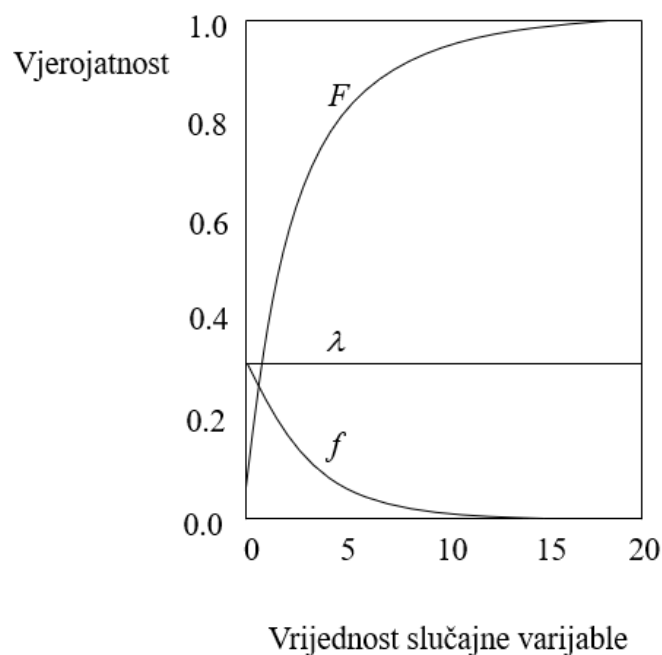
U analizama pouzdanosti najviše se koristi eksponencijalna razdioba, iz razloga što je funkcija intenziteta zastoja λ , jedini parametar o kojem ova razdioba ovisi, konstantne vrijednosti. Njezina funkcija gustoće opisana je izrazom [10, str. 124-125]:

$$f(x) = \lambda \cdot \exp[-\lambda \cdot x]; x \geq 0 \quad (2-21)$$

Na osnovu prethodnog izraza može se odrediti njezina kumulativna funkcija i intenzitet zastoja [10, str. 125]:

$$F(x) = 1 - \exp[-\lambda \cdot x]; \lambda(x) = \lambda \quad (2-22)$$

Na slici 2.9. prikazana je eksponencijalna razdioba sa parametrom $\lambda = 0.3$. Parametar λ računa se kao recipročna očekivana (srednja) vrijednost, dok varijanca kao kvadrat recipročne vrijednosti intenziteta zastoja [10, str. 125].

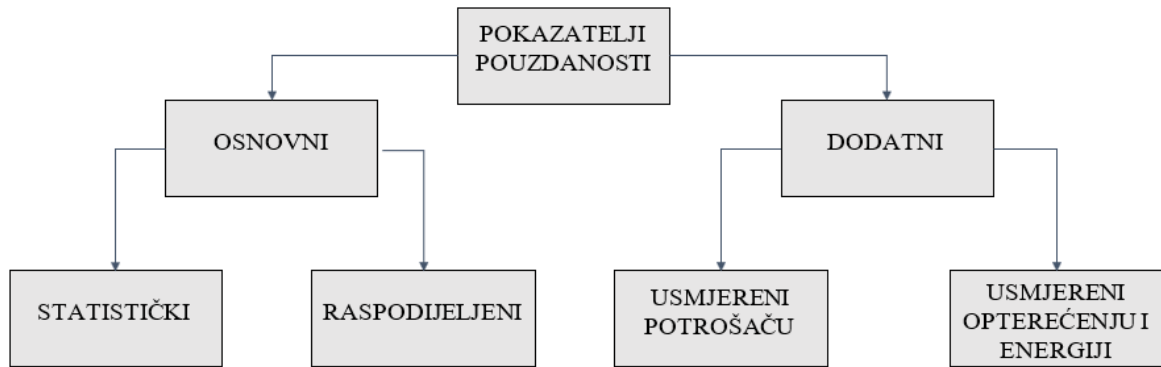


Slika 2.9. Eksponencijalna razdioba [10, str. 123].

Osim navedenih razdioba, još se koriste druge poput Weibullove, Gamma ili Rayleighove, ali zbog opsežnosti u ovom radu se neće razmatrati. Na temelju metoda proračuna koje su prethodno obrađene, pojasnit će se pokazatelji pouzdanosti koji se temelje na tim proračunima, dok će Markovljev model kao jedna od metoda biti zasebno i detaljno razrađen nakon pokazatelja pouzdanosti.

2.4. Pokazatelji pouzdanosti

Razina pouzdanosti i raspoloživosti EES-a iskazuje se različitim pokazateljima pouzdanosti, čiji proračun omogućava određivanje načina poboljšanja pouzdanosti i raspoloživosti [11]. To su veličine od ključnog značaja za razumijevanje ponašanja elemenata, tj. sustava u cjelini [12]. Oni se dijele na osnovne i dodatne pokazatelje. Osnovni se dijele na statističke i raspodijeljene, dok dodatni obuhvaćaju one usmjerene potrošaču i usmjerene opterećenju i energiji, što je prikazano slikom 2.10. [13].



Slika 2.10. Podjela pokazatelja pouzdanosti [13].

Osnovni pokazatelji ne daju cijelu sliku ponašanja sustava, pa se iz tog razloga, kako bi se opisao značaj ispada u mreži, procjenjuju i dodatni pokazatelji pouzdanosti [14, str. 223]. Oni definiraju svojstva mreže u pogledu broja i trajanja prekida te se procjenjuju s obzirom na broj korisnika ili isporučenu električnu energiju. Mogu biti prikazani na razini cijelog sustava ili pojedinačnog potrošača [15, str. 259].

2.4.1. Statistički i raspodijeljeni pokazatelji

U ovom odjeljku definirani su neki od statističkih pokazatelja pouzdanosti, koji se određuju za obnovljive sustave i komponente te prikazuju ponašanje komponente tijekom duljeg vremenskog perioda [2, str. 46]:

- Srednji intenzitet kvara opskrbe potrošača [5, str. 156]:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[\frac{1}{\text{god.}} \right] \quad (2-23)$$

gdje je λ_i intenzitet kvara komponente i ,

- Srednje vrijeme trajanja kvara [5, str. 156]:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot r_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \left[\frac{h}{\text{prekid}} \right] \quad (2-24)$$

gdje je r_i trajanje kvara komponente i ,

- Srednje godišnje vrijeme trajanja kvara [5, str. 156]:

$$N_s = r_s \cdot \lambda_s = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot r_i) \left[\frac{h}{\text{god.}} \right] \quad (2-25)$$

- Srednje vrijeme trajanja rada (eng. *Mean Time To Failure*) [3, str. 205]:

$$MTTF = \bar{r} = \frac{1}{\lambda} \quad (2-26)$$

- Srednje vrijeme trajanja popravka (eng. *Mean Time To Repair*) [3, str. 205]:

$$MTTR = \bar{p} = \frac{1}{\mu} \quad (2-27)$$

gdje je μ intenzitet popravka.

- Srednje vrijeme između kvarova (eng. *Mean Time Between Failures*) [3, str. 205]:

$$MTBF = MTTR + MTTF \quad (2-28)$$

Druga podjela osnovnih pokazatelja pouzdanosti je na raspodijeljene (dinamičke), koji se definiraju za obnovljive i neobnovljive komponente [2, str. 46]. Takvi pokazatelji su funkcija pouzdanosti, nepouzdanosti i intenziteta kvara [13], koji su objašnjeni u odjeljku 2.2.1.

2.4.2. Pokazatelji usmjereni potrošaču

Pokazatelji pouzdanosti potrošača i potrošačkih čvorišta od velikog su značaja za same potrošače. Osim što prikazuju podatke poput trajanja prekida te raspoloživosti napajanja, oni pružaju informaciju o troškovima. Kod proračuna pokazatelja definiraju se tri osnovna, na temelju kojih se računaju opći pokazatelji. Osnovni pokazatelji su intenzitet, trajanje i godišnje trajanje kvara [8, str. 252], dok su opći opisani u nastavku:

- SAIFI (eng. *System Average Interruption Frequency Index*) je indeks prosječnog godišnjeg prekida sustava [8, str. 27]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} N_j} \left[\frac{1}{\text{potr., god.}} \right] \quad (2-29)$$

gdje je:

- λ_j - intenzitet kvara potrošačkog čvorišta j ,
- N_j - broj potrošača na potrošačkom čvorištu j ,
- R - skup svih potrošačkih čvorišta u sustavu.

- CAIFI (eng. *Customer Average Interruption Frequency Index*) je indeks prosječnog godišnjeg prekida po potrošaču [8, str. 27]:

$$CAIFI = \frac{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} M_j} \left[\frac{1}{\text{potr., god.}} \right] \quad (2-30)$$

gdje je M_j broj pogođenih potrošača na potrošačkom čvorištu j .

- SAIDI (eng. *System Average Interruption Duration Index*) je indeks prosječnog trajanja prekida sustava [8, str. 27]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} N_j} \left[\frac{h}{\text{potr., god.}} \right] \quad (2-31)$$

gdje je U_j godišnje vrijeme neraspoloživosti na potrošačkom čvorištu j .

- CAIDI (eng. *Customer Average Interruption Duration Index*) je indeks prosječnog trajanja prekida po potrošaču [8, str. 28]:

$$CAIDI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \left[\frac{h}{\text{god.}} \right] \quad (2-32)$$

- ASAI (eng. *Average Service Availability Index*) je indeks raspoloživosti napajanja [8, str. 28]:

$$ASAI = \frac{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j) - \sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j)} \quad (2-33)$$

- ASUI (eng. *Average Service Unavailability Index*) je indeks srednje neraspoloživosti napajanja [8, str. 28]:

$$ASUI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j)} \quad (2-34)$$

- MAIFI (eng. *Momentary Average Interruption Frequency Index*) je indeks prosječne učestalosti kratkih prekida [16]:

$$MAIFI = \frac{\sum (\lambda_{t_j} \cdot N_{m_j})}{\sum N_j} \left[\frac{1}{\text{potr., god.}} \right] \quad (2-35)$$

gdje je:

- λ_{t_j} - intenzitet trenutnih prekida na potrošačkom čvorištu j ,
- N_{m_j} - broj potrošača pogođenih trenutnim prekidima na potrošačkom čvorištu j .

Svi navedeni pokazatelji odnose se na dugotrajne prekide napajanja, koji su definirani kao prekidi koji traju dulje od tri minute [17]. Međutim, zbog sve veće osjetljivosti potrošača, kao posljedica razvoja tehnologije, razvila se potreba za definiranjem pokazatelja s obzirom na kratke prekide, te se u tu svrhu koristi pokazatelj MAIFI [10, str. 51].

2.4.3. Pokazatelji usmjereni opterećenju i energiji

Osim pokazatelja orijentiranih potrošaču, bitno je naglasiti one koji su usmjereni opterećenju i pružaju podatke o neisporučenoj električnoj energiji (snazi) ili se temelje na istima. Neki od tih pokazatelja su opisani u nastavku:

- ASIFI (eng. *Average System Interruption Frequency Index*) je ekvivalent pokazatelja SAIFI, ali se izračun više temelji na opterećenju, nego na pogođenim potrošačima[16]:

$$ASIFI = \frac{\sum L_j}{L_T} \left[\frac{1}{\text{god.}} \right] \quad (2-36)$$

gdje je:

- L_j - neisporučena snaga potrošača ili potrošačkog čvorišta j ,
- L_T - ukupna snaga potrošača.

- ASIDI (eng. *Average System Interruption Duration Index*) je jednak pokazatelju SAIDI, ali je izračun utemeljen kao i kod prethodnog pokazatelja [16]:

$$ASIDI = \frac{\sum (r_j \cdot L_j)}{L_T} \left[\frac{h}{god.} \right] \quad (2-37)$$

gdje je r_j vrijeme popravka za svaki prekid na potrošačkom čvorištu j .

- ENS (eng. *Energy Not Supplied*) je indeks neisporučene električne energije [8, str. 28]:

$$ENS = \sum_{j \in R} (P_{a_j} \cdot U_j) \left[\frac{kWh}{god.} \right] \quad (2-38)$$

gdje je P_{a_j} iznos prosječnog opterećenja na potrošačkom čvorištu j .

- AENS (eng. *Average Energy Not Supplied*) je indeks prosječne godišnje neisporučene energije po potrošaču [8, str. 28]:

$$AENS = \frac{ENS}{\sum_{j \in R} N_j} \left[\frac{kWh}{potr., god.} \right] \quad (2-39)$$

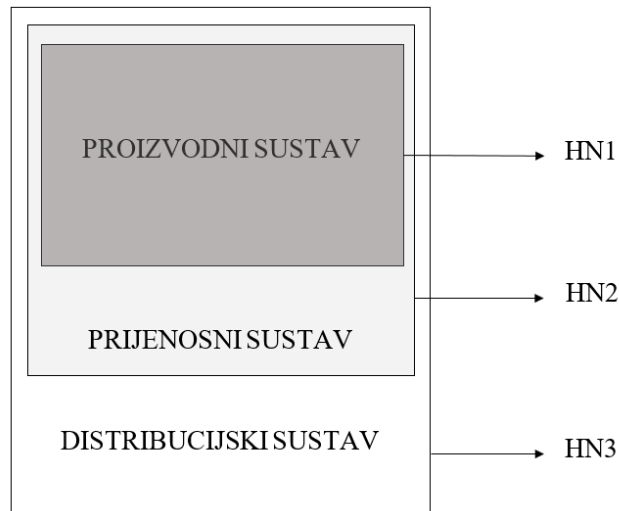
- ACCI (eng. *Average Customer Curtailment Index*) je indeks prosječne neisporučene električne energije svakog pogođenog potrošača [8, str. 28]:

$$ACCI = \frac{ENS}{\sum_{j \in R} M_j} \left[\frac{kWh}{potr., god.} \right] \quad (2-40)$$

Iako postoji još mnogo pokazatelja pouzdanosti, prethodno su objašnjeni samo oni koji su dobiveni u simulacijskom dijelu rada.

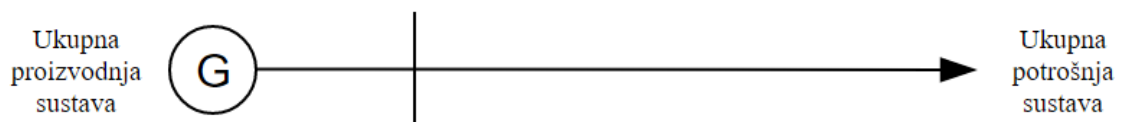
2.4.4. Pokazatelji s obzirom na hijerarhijske razine u elektroenergetskom sustavu

Kako bi se lakše mogli izračunati pokazatelji pouzdanosti i raspoloživosti EES-a, sustav je podijeljen na hijerarhijske razine [2, str. 47]. Prva predstavlja proizvodni, druga proizvodno-prijenosni, dok treća predstavlja distribucijski sustav i ona obuhvaća sve tri razine, što je prikazano slikom 2.11., gdje HN označava hijerarhijsku razinu pojedinog sustava:



Slika 2.11. Hijerarhijske razine u EES-u [2, str. 47].

Prije definiranja pokazatelja pouzdanosti, potrebno je odrediti modele na pojedinim hijerarhijskim razinama. U proizvodnom sustavu, kao što je prikazano slikom 2.12., prijenosni sustav i njegova sposobnost da prenese električnu energiju do potrošača se zanemaruje. Bitan faktor je procjena proizvodnog kapaciteta, kako bi se ispunili zahtjevi sustava i zadovoljile potrebe za preventivnim održavanjem samih proizvodnih jedinica [5, str. 8].

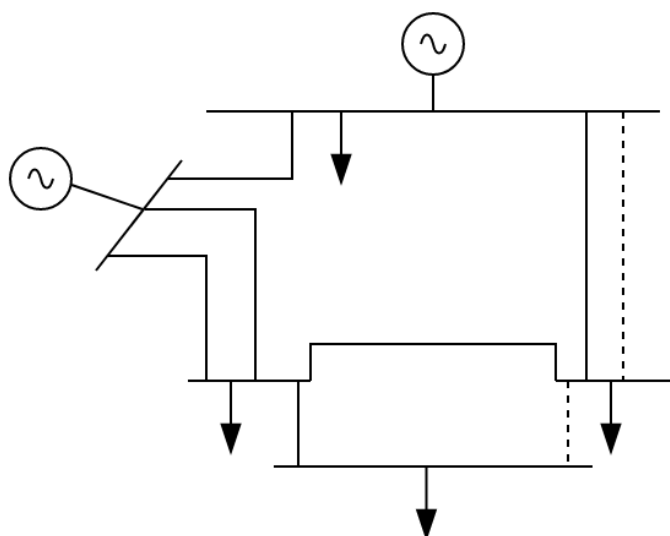


Slika 2.12. Model sustava za hijerarhijsku razinu 1 [5, str. 8].

Pokazatelji pouzdanosti proizvodnog sustava su:

- LOLE (*eng. Loss of Load Expectation*) – broj dana tijekom kojih se očekuje da će dnevno vršno opterećenje premašiti raspoloživi proizvodni kapacitet. To je najčešće korišteni pokazatelj u prijenosnom sustavu [5, str. 9],
- LOEE (*eng. Loss of Energy Expectation*) – očekivana količina energije koja neće biti isporučena kada opterećenje premaši raspoloživi proizvodni kapacitet [5, str. 9],
- LOLP (*eng. Loss of Load Probability*) – vjerojatnost nedostupnosti proizvodnih kapaciteta da potrošači budu opskrbljeni dostatnom količinom energije i snage [2, str. 47],
- EENS (*eng. Expected Energy Not Served*) – iznos vjerojatno neisporučene energije [2, str. 47],
- SOD (*eng. Severity of Disturbance*) – normalizirana neisporučena energija zbog nedostatka proizvodnih resursa [2, str. 47].

Na drugoj hijerarhijskoj razini uzima se u obzir utjecaj i proizvodnog i prijenosnog sustava (Slika 2.13.). Procjenjuje se utjecaj elemenata mreže kroz dvije skupine pokazatelja pouzdanosti: potrošačkih čvorišta i sustava kao cjeline. Pokazatelji orijentirani potrošačkim čvorištima promatraju utjecaj elemenata na pojedinačnim sabirnicama i pružaju ulazne podatke za treću hijerarhijsku razinu, dok pokazatelji sustava promatraju cijeli sustav [5, str. 13].



Slika 2.13. Model proizvodno – prijenosnog sustava [5, str. 13].

Najveći problem kod treće hijerarhijske razine je njezina kompleksnost, jer obuhvaća sve tri razine pa se zbog toga distribucijski sustav analizira kao zasebna cjelina. Stoga, na ovoj razini računaju se pokazatelji potrošačkih čvorišta na temelju podataka koje pruža proizvodno – prijenosni sustav [5, str. 15]. Kao prema slici 2.10., oni se dijele na osnovne i dodatne. Osnovni pokazatelji su definirani izrazima (2-23), (2-24), (2-25), dok su dodatni [2, str. 48-49]:

- Srednja vrijednost neisporučene snage čvora j :

$$\Delta L = \sum_{i=1}^n (L_{i_j} \cdot f_i) \left[\frac{MW}{god.} \right] \quad (2-41)$$

gdje je:

- L_{i_j} - srednja vrijednost snage u čvoru j uslijed kvara i ,
- f_i - učestalost kvara i .

- Očekivana neisporučena električna energija u čvoru j :

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (L_{i_j} \cdot f_i \cdot r_{i_j}) \left[\frac{MWh}{god.} \right] \quad (2-42)$$

gdje je r_{ij} srednje vrijeme prekida opskrbe električnom energijom u čvoru j pri kvaru i .

- Srednja neisporučena snaga po prekidu:

$$\Delta \bar{L} = \frac{\sum_i (L_{ij} \cdot f_i)}{\sum_i f_i} \left[\frac{MW}{prekid} \right] \quad (2-43)$$

- Srednja neisporučena energija po prekidu:

$$\Delta \bar{W} = \frac{\sum_i (L_{ij} \cdot f_i \cdot r_{ij})}{\sum_i f_i} \left[\frac{MWh}{prekid} \right] \quad (2-44)$$

- Srednje vrijeme trajanja jednog prekida:

$$\bar{r} = \frac{\sum_i (r_{ij} \cdot f_i)}{\sum_i f_i} \left[\frac{h}{prekid} \right] \quad (2-45)$$

Navedeni pokazatelji mogu se poboljšati na mnogo načina, od kojih će se neki opisati u nastavku. Jedna od najnaprednijih i najučinkovitijih metoda je dodavanje zaštitnih uređaja, čime se smanjuju prekidi, odnosno povećava njihova selektivnost. Korištenjem naprednih sustava automatike smanjuje se vrijeme promjene uklopnog stanja, što je ujedno i prednost automatskih prekidača u odnosu na ručne, no s druge strane njihov nedostatak jest veća vjerojatnost zatajenja prorade. Jedan od najvažnijih aspekata modeliranja pouzdanosti distribucijskog sustava jest mogućnost lakog izračuna pouzdanosti s različitim konfiguracijama sustava.

Njegova struktura može biti modificirana promjenom uklopnog stanja prekidača, čime se mijenja smjer napajanja potrošača i tokovi snaga [10, str. 234-248], što će biti prikazano u četvrtom poglavlju.

Pokazatelji pouzdanosti od velike su važnosti jer predstavljaju kvantitativnu odrednicu kvalitete rada nekog sustava, odnosno oni određuju razine poremećaja, koji su posljedica pojedinih problema do kojih može doći tijekom njegovog rada [11]. Ako se promatrani sustav želi detaljnije analizirati, potrebno je koristiti metode koje se temelje na prostoru stanja, poput već spomenutog Markovljevog modela [10, str. 152].

3. MARKOVLJEV MODEL PROSTORA STANJA

Analitičke metode za računanje pouzdanosti su zasnovane na analizi prostora stanja, logičkim dijagramima ili analizi stabla događaja (kvara). Takvim metodama je zajedničko da koriste prostor stanja komponente, gdje se komponenta (sustav) opisuje sa svojim stanjima ovisnim o vremenu [2, str. 18]. Dvije su pretpostavke za primjenu Markovljevih modela, a to su da je sustav bez pamćenja i da je stacionaran. Sustav bez pamćenja označava da je vjerojatnost budućih događaja funkcija isključivo postojećeg stanja sustava, dok pretpostavka stacionarnosti sustava znači da su vjerojatnosti prijelaza između stanja konstantne i ne mijenjaju se s vremenom [10, str. 152]. U ovom poglavlju će biti objašnjeni neki od Markovljevih modela prostora stanja, kao što su model obnovljive komponente, paralelni i serijski spoj elemenata, Markovljev lanac te model komponente sa planiranim remontom. Markovljev proces, koji je vrsta Markovljevih modela, je stohastički proces kod kojeg su buduća stanja uvjetovana samo sadašnjim stanjem i neovisna su o prethodnim stanjima te se takav proces može opisati sljedećim varijablama [2, str. 18]:

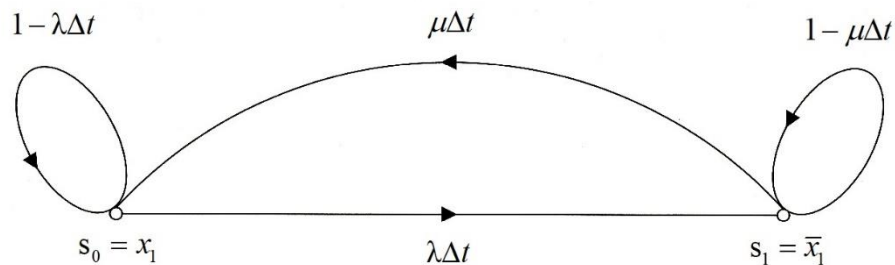
- stanje sustava (komponente)
- vrijeme promatranja sustava (komponente)

Objekte navedene varijable mogu biti ili kontinuirane ili diskretne pa postoje četiri mogućnosti promatranja, tj. četiri modela, od kojih su dva u području pouzdanosti interesantni [2, str. 18]. Diskretan model s obzirom na stanje komponente i vrijeme promatranja naziva se Markovljevim lancem, a model kontinuiranog vremena i diskretnih stanja se naziva Markovljevim procesom [4, str. 138].

3.1. Markovljev model obnovljive komponente

Za analizu utjecaja popravaka komponenata na pouzdanost pomoću Markovljevog modela razmatraju se i svojstva određena stupnjem korisnosti popravaka u sustavu. Najvažnija od tih svojstava je funkcija raspoloživosti $A(t)$, koja je definirana kao vjerojatnost da će u nekom odabranom trenutku sustav raditi ispravno.

Nužan uvjet za korištenje Markovljevih procesa je da funkcije gustoće vjerojatnosti kvara i popravka imaju eksponencijalni karakter, tj. funkcije intenziteta kvara i popravka su konstantne [4, str. 154-155]. Na slici 3.1. prikazan je Markovljev graf obnovljive komponente, koja se može nalaziti u ispravnom i neispravnom stanju.



Slika 3.1. Markovljev graf obnovljive komponente [4, str. 156].

gdje je:

- $s_0 = x_1$ - ispravno stanje komponente,
- $s_1 = \bar{x}_1$ - stanje kvara komponente,
- $\lambda\Delta t$ - vjerojatnost da se komponenta pokvarila u vremenu Δt ,
- $1 - \lambda\Delta t$ - vjerojatnost da komponenta nije u vremenu Δt prešla iz stanja s_0 u s_1 ,
- $\mu\Delta t$ - vjerojatnost da će komponenta biti popravljena u vremenu Δt ,
- $1 - \mu\Delta t$ - vjerojatnost da komponenta u vremenu Δt nije popravljena.

Vjerojatnost da je komponenta popravljena u vremenu Δt je jednaka $\mu\Delta t$ i tada dobivamo vjerojatnost da će se sustav u vremenu $t + \Delta t$ nalaziti u ispravnom stanju, kao produkt vjerojatnosti da je u vremenu t bio u stanju s_0 , $P_{s_0}(t)$ i vjerojatnosti da u vremenu Δt nije prešao iz ispravnog stanja u stanje kvara, plus produkt vjerojatnosti da se u vremenu t nalazio u stanju s_1 , $P_{s_1}(t)$ i vjerojatnosti da je u vremenu Δt prešao iz stanja kvara u ispravno stanje [4, str. 155-156]:

$$P_{s_1}(t + \Delta t) = P_{s_0}(t) \cdot (\lambda\Delta t) + P_{s_1}(t) \cdot (1 - \mu\Delta t) \quad (3-1)$$

Vjerojatnost da je sustav u stanju s_1 u vremenu $t + \Delta t$ je suma produkta vjerojatnosti da je u vremenu t bio u stanju s_0 , $P_{s_0}(t)$ i vjerojatnosti da se pokvario u vremenu Δt te produkta vjerojatnosti da je u vrijeme t bio u stanju s_1 i vjerojatnosti da u vremenu Δt nije popravljen [4, str. 156]:

$$P_{s_1}(t + \Delta t) = P_{s_0}(t) \cdot (\lambda \Delta t) + P_{s_1}(t) \cdot (1 - \mu \Delta t) \quad (3-2)$$

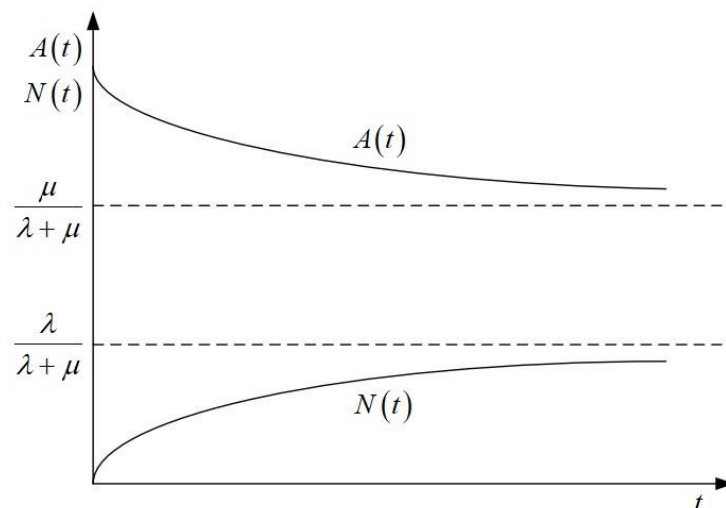
Vjerojatnost da komponenta radi u trenutku t definirana je funkcijom raspoloživosti $A(t)$ [4, str. 157]:

$$A(t) = P_{s_0}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3-3)$$

Vjerojatnost da je komponenta u kvaru u trenutku t definirana je funkcijom neraspoloživosti $N(t)$ [4, str. 157]:

$$N(t) = P_{s_1}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3-4)$$

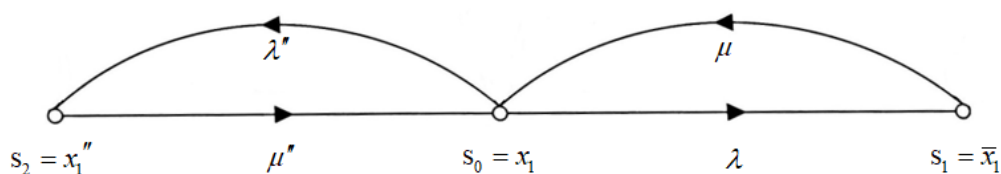
Vremenski ovisne funkcije $A(t)$ i $N(t)$ asimptotski teže krajnjim, odnosno stacionarnim vrijednostima (Slika 3.2.), a s obzirom da postoje dva moguća stanja u ovom modelu u kojima se komponenta može nalaziti, vrijedi da je njihov zbroj jednak 1.



Slika 3.2. Funkcija raspoloživosti $A(t)$ i neraspoločivosti $N(t)$ komponente [2, str. 23].

3.2. Model komponente sa planiranim remontom

Osim u ispravnom stanju i stanju kvara, komponenta se može nalaziti u stanju remonta. U određenom vremenskom periodu vrši se njihov planski remont te se upravo njima i redovitim pregledima povećava njihova pouzdanost i raspoloživost, zbog smanjenja rasta funkcije intenziteta kvarova [2, str. 24]. Markovljev model komponente sa popravkom i planskim remontom prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Markovljev graf komponente sa popravkom i planskim remontom [2, str. 25].

gdje je:

- λ'' - intenzitet remonta,
- μ'' - intenzitet izlaska iz stanja remonta,
- $s_1 = \bar{x}_1$ - stanje popravka komponente,
- $s_2 = x_1''$ - stanje komponente u planskom remontu.

Za dani graf se može napisati sustav algebarskih jednažbi [2, str. 25]:

$$\begin{bmatrix} -(\lambda + \lambda'') & \mu & \mu'' \\ \lambda & -\mu & 0 \\ \lambda'' & 0 & -\mu'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{s_0} \\ P_{s_1} \\ P_{s_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

gdje je:

- P_{s_1} - vjerojatnost da će se komponenta nalaziti u stanju kvara,
- P_{s_2} - vjerojatnost da će se komponenta nalaziti u stanju planskog remonta.

Nadalje se može definirati raspoloživost komponente [2, str. 26]:

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda + \frac{\lambda''}{\mu''} \cdot \mu} \approx \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (3-6)$$

Neraspoloživost komponente zbog kvara [2, str. 26]:

$$N = \frac{\lambda}{\mu + \lambda + \frac{\lambda''}{\mu''} \cdot \mu} \approx \lambda \cdot r \quad (3-7)$$

Neraspoloživost komponente zbog remonta [2, str. 26]:

$$N'' = \frac{\lambda''}{\mu'' + \lambda'' + \frac{\lambda}{\mu} \cdot \mu''} \approx \lambda'' \cdot r'' \quad (3-8)$$

gdje je r'' vrijeme trajanja remonta.

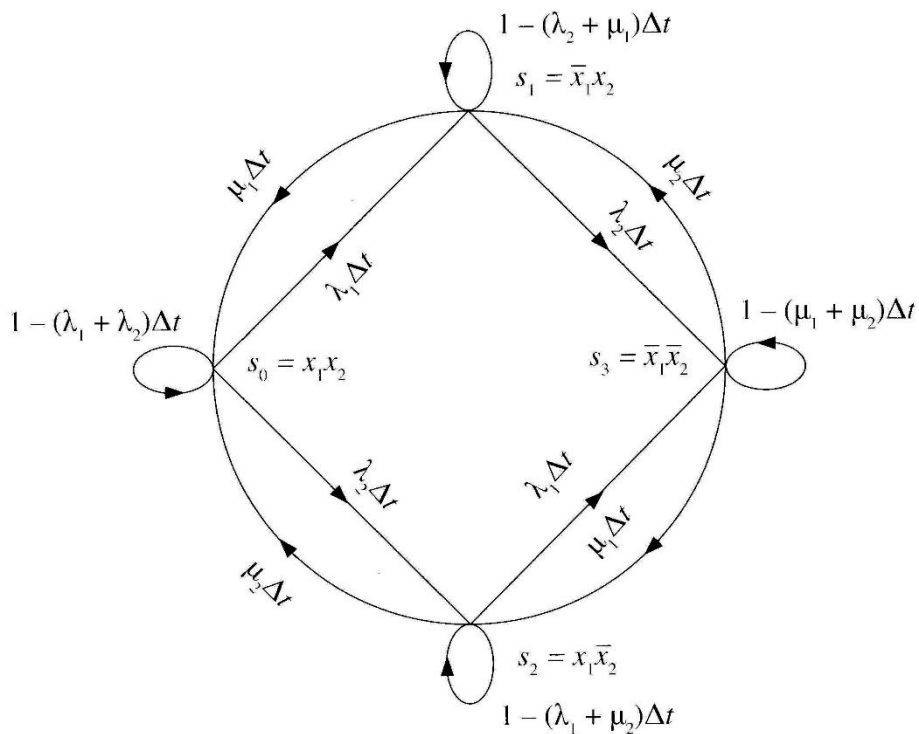
3.3. Model kvara dviju komponenata

Promatrajući sustav sa dvije obnovljive komponente (prikazan na slici 3.4.), kod kojih kvar jedne komponente ne utječe na kvar druge i obrnuto, spojene serijski ili paralelno, moguća su četiri stanja:

$s_0 = x_1 x_2$ - obje komponente u radu

$s_1 = \bar{x}_1 x_2$; $s_2 = x_1 \bar{x}_2$ - jedna komponenta u radu, druga u kvaru i obrnuto

$s_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2$ - obje komponente u kvaru.



Slika 3.4. Markovljevi graf sustava s dvije komponente [4, str. 170].

U slučajevima složenije građe sustava, određivanje vremenskih funkcija raspoloživosti predstavlja vrlo težak zadatak pa se iz tog razloga treba zadovoljiti poznavanjem raspoloživosti stacionarnog stanja sustava. Na osnovu Markovljevog grafa sa slike 3.4., dobivamo jednadžbe za stacionarne vjerojatnosti pojedinih stanja uz uvjet da je $P_{s_0}(\infty) + P_{s_1}(\infty) + P_{s_2}(\infty) + P_{s_3}(\infty) = 1$

[4, str. 170]:

$$P_{s_0}(\infty) = \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (\lambda_2 + \mu_2)} \quad (3-9)$$

$$P_{s_1}(\infty) = \frac{\lambda_1 \cdot \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (\lambda_2 + \mu_2)} \quad (3-10)$$

$$P_{s_2}(\infty) = \frac{\mu_1 \cdot \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (\lambda_2 + \mu_2)} \quad (3-11)$$

$$P_{s_3}(\infty) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (\lambda_2 + \mu_2)} \quad (3-12)$$

Također se može izračunati učestalost napuštanja pojedinog stanja f_{s_i} i vrijeme boravka u pojedinom stanju T_{s_i} . Jednadžbe za stanje s_0 [2, str. 27-28]:

$$f_{s_0} = P_{s_0} \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (3-13)$$

$$T_{s_0} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (3-14)$$

Na osnovu ovog modela mogu se izvesti jednadžbe za neraspoloživost i učestalost kvara za serijski i paralelni spoj više komponenata, što je u nastavku objašnjeno [2, str. 28].

3.3.1. Paralelni spoj komponenata

Kod paralelnog spoja dviju obnovljivih komponenata, prema slici 3.4., stanja ispravnog rada spoja su stanja s_0 , s_1 i s_2 dok je stanje kvara, tj. neraspoloživosti, stanje s_3 [2, str. 29]. Neraspoloživost sustava je određena neraspoloživošću komponenata 1 i 2, jer obje komponente moraju biti u kvaru da bi i sustav bio u kvaru [4, str. 229].

Neraspoloživost sustava je dana sljedećim izrazom [4, str. 229]:

$$P_{s_3}(\infty) = N_p = \frac{(\lambda_1 \cdot p_1) \cdot (\lambda_2 \cdot p_2)}{[1 + (\lambda_2 \cdot p_2)] \cdot [1 + (\lambda_1 \cdot p_1)]} \quad (3-15)$$

gdje je:

- $p_1 ; p_2$ - srednje vrijeme trajanja popravka prve, odnosno druge komponente,
- N_p - neraspoloživost paralelnog sustava.

Frekvencija kvara sustava jednaka je sumi frekvencije događaja kvara komponente 2 za vrijeme dok se komponenta 1 popravljiva i frekvencije kvara komponente 1 za vrijeme kvara komponente 2 [4, str. 230]:

$$f_p = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (p_1 + p_2)}{(1 + \lambda_1 \cdot p_1) \cdot (1 + \lambda_2 \cdot p_2)} \quad (3-16)$$

Ekvivalentni sustav može biti opisan sa srednjim vremenom trajanja rada r_p i srednjim vremenom trajanja popravka p_p [4, str. 230]:

$$p_p = \frac{N_p}{f_p} = \frac{p_1 \cdot p_2}{p_1 + p_2} \quad (3-17)$$

Prethodnim izrazom određeno je vrijeme kroz koje se popravci preklapaju, tj. vrijeme kroz koje se kvarovi u sustavu preklapaju. Vrijeme r_p definirano je sljedećim izrazom [4, str. 231]:

$$r_p = \frac{1 + \lambda_1 \cdot p_1 + \lambda_2 \cdot p_2}{(\lambda_1 \cdot \lambda_2) \cdot (p_1 + p_2)} \quad (3-18)$$

3.3.2. Serijski spoj komponenata

Prema slici 3.4. stanje ispravnog rada kod serijskog spoja komponenata je s_0 , dok su neraspoloživa stanja s_1 , s_2 i s_3 [2, str. 29]. Uz pretpostavku da dvije neovisne komponente trebaju raditi istodobno, pri čemu se svaka komponenta ponaša prema stacionarnom obnovljivom procesu sa srednjim vremenom do kvara i trajanja popravka, potrebno je utvrditi stacionarnu raspoloživost sustava [4, str. 224-225]:

$$A_s = \frac{r_s}{p_s + r_s} \quad (3-19)$$

Zatim je potrebno odrediti izraz za frekvenciju kvara sustava, koja je jednaka sumi prosječnih frekvencija događaja kada komponenta 2 radi, a komponenta 1 je u kvaru i frekvencije događaja kvara komponente 2 i rada komponente 1 [4, str. 225]:

$$f_s = \frac{1}{p_s + r_s} = \frac{r_2}{p_2 + r_2} \cdot \frac{1}{p_1 + r_1} + \frac{r_1}{p_1 + r_1} \cdot \frac{1}{p_2 + r_2} \quad (3-20)$$

Potom se može odrediti srednje vrijeme trajanja rada [4, str. 226-227]:

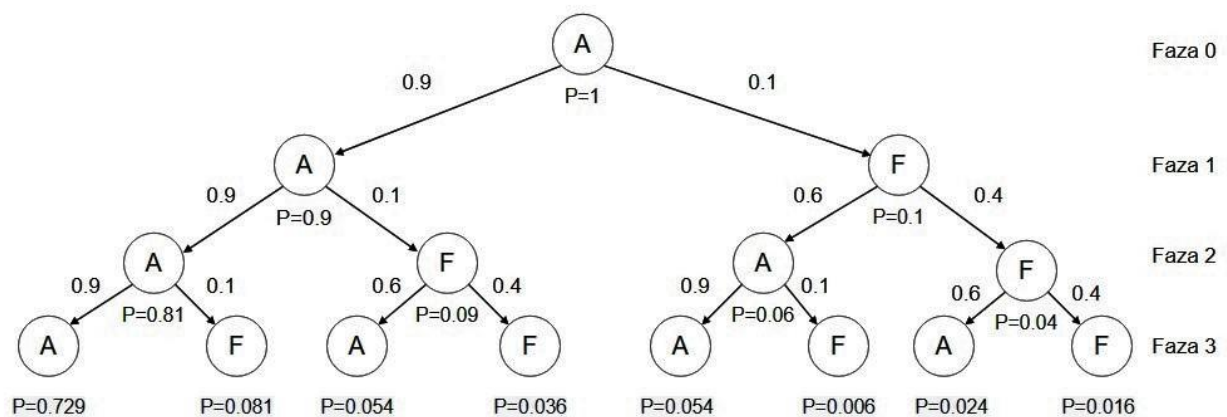
$$r_s = \frac{A_s}{f_s} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (3-21)$$

Srednje vrijeme trajanja popravka se određuje iz stacionarne raspoloživosti sustava [4, str. 226]:

$$A_s = \frac{r_s}{p_s + r_s} \rightarrow p_s = \frac{1 - A_s}{f_s} \quad (3-22)$$

3.4. Markovljev lanac

Markovljev lanac je vrsta Markovljevog procesa, koji predstavlja sustav sa nizom stanja i prijelaza u diskretnim vremenskim intervalima. Primjer takvog sustava, sastavljenog od jedne komponente i dva moguća stanja (raspoloživo stanje „A“ i stanje kvara „F“), prikazan je na slici 3.5., gdje kružnice predstavljaju stanje, strelice prijelaze između stanja, brojevi pokraj strelica označavaju vjerojatnost prijelaza te brojevi ispod kružnica vjerojatnost da će sustav biti u pojedinom stanju [10, str. 153].



Slika 3.5. Primjer Markovljevog lanca [10, str. 153].

Promatranje sustava počinje u fazi „0“ sa vjerojatnošću od 100% da isti bude u stanju „A“. Pri prijelazu u fazu „1“ postoji 90% šanse da ostane u raspoloživom stanju „A“ i 10% šanse prijelaza u stanje kvara „F“. Faza „2“ se može dostići iz stanja „A“ ili „F“ pa postoje dva moguća „puta“ za dostizanje tih stanja (A→A→A ili A→F→A). Prvi „put“ će se ostvariti u 81% slučajeva, dok će se drugi „put“ ostvariti u 6% slučajeva. Vjerojatnosti stanja u fazi „n+1“ se računaju na temelju matrice prijelaza stanja i vjerojatnosti stanja u fazi „n“ [10, str. 153-154]:

$$\begin{bmatrix} P_{n+1}(A) \\ P_{n+1}(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_n(A) \\ P_n(F) \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

gdje je:

- P_{n+1} - vjerojatnost stanja u fazi „n+1“,
- P_n - vjerojatnost stanja u fazi „n“.

Modeli pouzdanosti su povezani sa vjerojatnostima u ustaljenom stanju sa velikim brojem faza. Ako svako stanje konvergira u konstantnu vrijednost, sustav se naziva ergodičkim i zadovoljava sljedeći sustav jednažbi [10, str. 154]:

$$\begin{bmatrix} P(A) \\ P(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(A) \\ P(F) \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

Jednažba (3-24) predstavlja sustav jednažbi sa više nepoznanica nego jednažbi te se izmjenom jednog od redova dobiva sustav jednažbi koji se rješava standardnim metodama [10, str. 154]:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ P(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(A) \\ P(F) \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

U ovom slučaju stanje kvara konvergira u vjerojatnost od 14,3 %, dok stanje „A“ u vjerojatnost od 85,7 %. Ovaj model, osim u prikazanom jednostavnijem primjeru, može se primijeniti u distribucijskim mrežama sa većim brojem stanja i kompleksnijim prijelazima između tih stanja [10, str. 154].

4. ANALIZA POUZDANOSTI I OPTIMIZACIJE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Vođenjem pogona omogućuje se optimalno uklopno stanje i normalan pogon mreže te sprječavanje nastanka izvanrednog ili poremećenog stanja. Vođenje se provodi putem centara vođenja, u skladu sa odredbama Mrežnih pravila, internim uputama i pravilima kojima se uređuje pogon mreže te važećim propisima [18].

Vođenje pogona obuhvaća [18]:

- provođenje sklopnih operacija za potrebe pogona
- nadzor i upravljanje radom jedinicama mreže
- regulaciju napona
- planiranje potreba i uključenje pomoćnih usluga
- upravljanje tokovima snaga
- nadzor, ispitivanje i analiza djelovanja uređaja zaštite
- koordinaciju radova održavanja pojedinih jedinica mreže
- obavještanje korisnika mreže, korisnika mjernih podataka i javnosti o prekidu napajanja
- ostvarivanje propisane kvalitete napajanja električnom energijom
- održavanje sustava daljinskog vođenja distribucijske mreže te
- poduzimanje svih ostalih radnji u svrhu osiguranja normalnog pogona mreže

Jedinice mreže (vodovi, transformatori, polja, sabirnice i uređaji za kompenzaciju jalove snage) ni u jednom trenutku ne smiju biti strujno opterećene iznad nazivne struje opterećenja te se isto odnosi i na uklopna stanja u normalnom pogonu mreže te uklopna stanja s ciljem osiguranja napajanja iz pričuvnog smjera opskrbe. Načini provjere navedenog kriterija su mjerenje opterećenja postojeće mreže i proračun očekivanog opterećenja kod planiranja iste. U svrhu uspješne provedbe načina provjere kriterija prilikom proračuna očekivanog opterećenja, potrebno se osvrnuti na promjene i postojeća opterećenja, zahtjeve za novo priključenje, procjenu opterećenja na osnovu prostorno-planske dokumentacije promatranog područja te na pogonski napon u mreži [18].

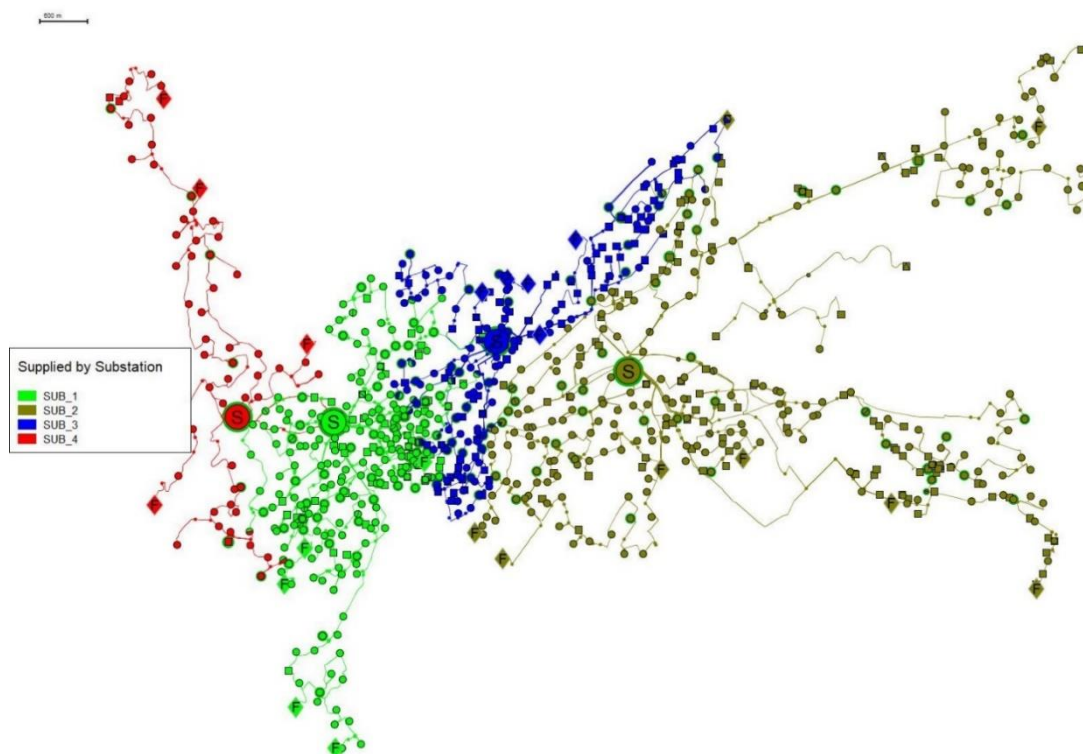
Zahvati u mreži s ciljem ostvarivanja kriterija za SN i NN mrežu [18]:

- izgradnja (interpolacija) novih trafostanica VN/SN i SN/SN (SN/NN) i novih vodova SN (NN)
- prijelaz sa manje na veću naponsku razinu (samo za SN mrežu)
- zamjena postojećih jedinica mreže sa jedinicama veće prijenosne moći

Za uspostavljanje optimalnog uklopnog stanja mreže potrebno je minimizirati gubitke i povećati raspoloživost mreže. Gubici se općenito dijele na tehničke i netehničke. Tehnički gubici su posljedica tehničkih značajki jedinica mreže i pogonskog stanja u mreži. Netehnički gubici su posljedica neobračunate i neizmjerene energije od strane kupaca [18].

4.1. Podaci o modelu mreže

U posljednjem poglavlju ovoga rada će biti analizirana pouzdanost 20 kV-ne srednjenaponske distribucijske mreže koja je radijalne strukture. Distribucijska mreža je dio elektroenergetskog sustava koju čine vodovi, transformatorske stanice, rasklopna postrojenja, potrošači, prigušnice i kondenzatorske baterije te se dijeli na srednjenaponsku i niskonaponsku mrežu. Srednjenaponsku mrežu u ovom modelu čine naponske razine od 63 kV i 20 kV, dok je niskonaponska mreža naponske razine 0,41 kV. Model mreže prikazan na slici 4.1. je za potrebe rada preuzet iz programskog paketa DIgSILENT PowerFactory.



Slika 4.1. Model mreže prema području napajanja određenom trafostanicom.

Model se sastoji od 4 primarne trafostanice koje napajaju manje distribucijske trafostanice, označene krugovima na slici 4.1. Detaljnijim uvidom u primarne i manje distribucijske trafostanice moguće je dobiti više informacija o transformatorima, prekidačima, opterećenjima i sabirnicama koji su prethodno definirani. Pokretanjem izbornika *Load Flow* dostupni su podaci o broju pojedinih elemenata te tokovima snaga, što je prikazano slikom 4.2.

No. of Substations	866	No. of Busbars	872	No. of Terminals	3457	No. of Lines	1848
No. of 2-w Trfs.	8	No. of 3-w Trfs.	0	No. of syn. Machines	0	No. of asyn.Machines	0
No. of Loads	950	No. of Shunts	3	No. of SVS	0		
Generation	= 31221,94	kW	2906,41	kvar	31356,93	kVA	
External Infeed	= 143047,22	kW	67889,60	kvar	158339,84	kVA	
Load P(U)	= 172937,02	kW	68348,48	kvar	185953,56	kVA	
Load P(Un)	= 172938,00	kW	68349,47	kvar	185954,84	kVA	
Load P(Un-U)	= 0,98	kW	1,00	kvar			
Motor Load	= 0,00	kW	0,00	kvar	0,00	kVA	
Grid Losses	= 2467,68	kW	12660,88	kvar			
Line Charging	=		-6114,95	kvar			
Compensation ind.	=		0,00	kvar			
Compensation cap.	=		-8854,70	kvar			
Installed Capacity	= 31622,06	kW					
Spinning Reserve	= 0,00	kW					
Total Power Factor:							
Generation	= 1,00	[-]					
Load/Motor	= 0,93 / 0,00	[-]					

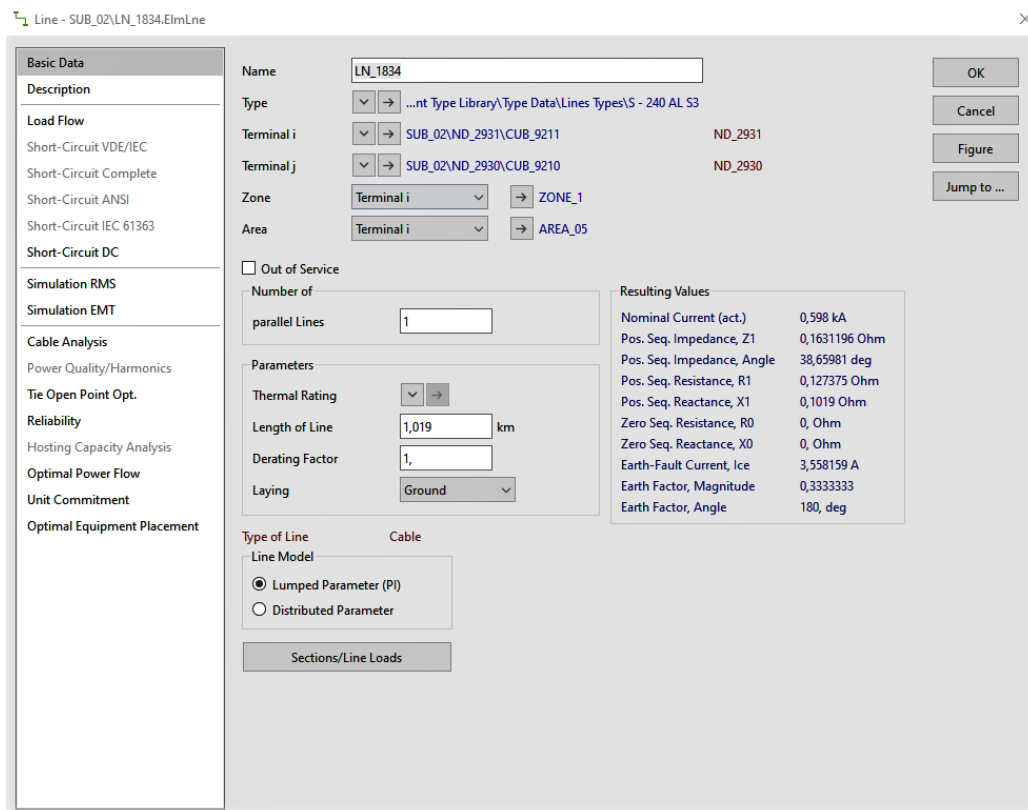
Slika 4.2. Prikaz tokova snaga modela mreže.

4.2. Optimizacija distribucijske mreže nakon kvara kabela

U ovom potpoglavlju će se simulirati kvar (kratki spoj) na kabelu, gdje će se vidjeti njegov utjecaj na parametre mreže, pri čemu su podaci o pouzdanosti kabela unaprijed definirani. Važno je napomenuti da program koristi deterministički (n-1) kriterij, da bi se u slučaju neraspoloživosti jednog elementa osiguralo napajanje određenih korisnika ili grupe korisnika mreže. Isti je zadovoljen ukoliko ne postoji element mreže (vod ili transformator) čija neraspoloživost dovodi do prekida napajanja [19]. Prvo će biti objašnjeni opći podaci o kabelu i njegovoj pouzdanosti, a zatim podaci vezani za samo izvođenje simulacije, poput postupka preklapanja prekidača, odabira tarifnog modela i termičkih ograničenja. Na kraju će biti prikazani rezultati simulacije.

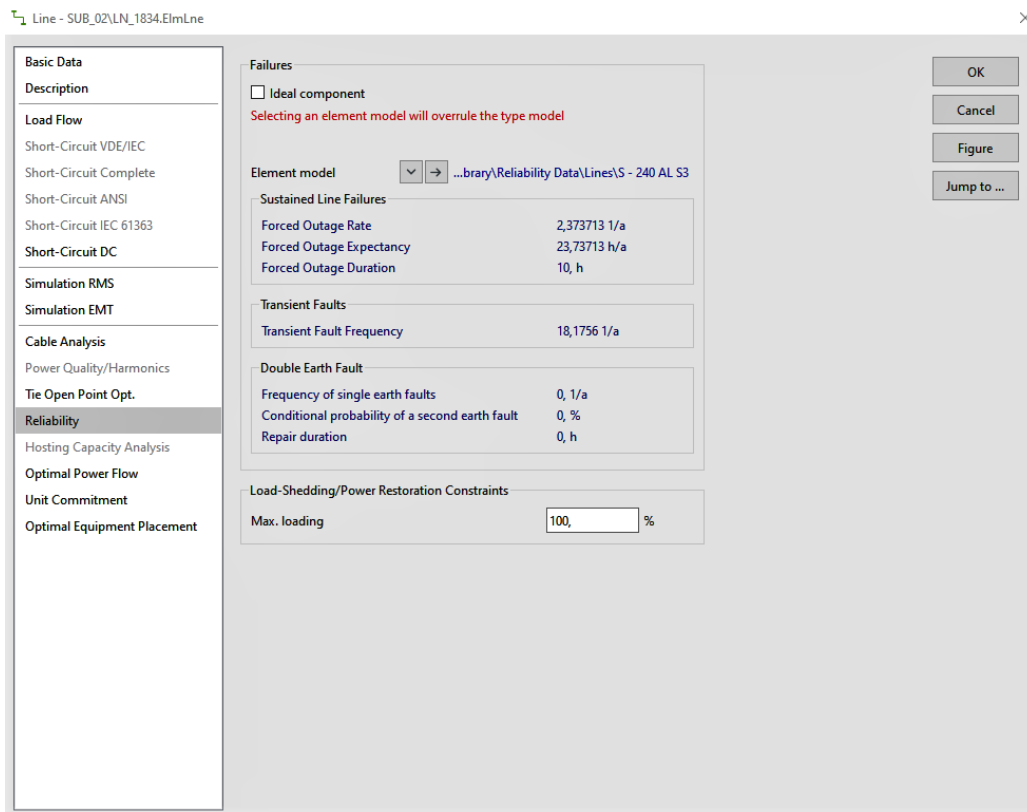
4.2.1. Parametri simulacije

Analiza započinje određivanjem kabela na kojemu će se simulirati kvar. Kabel je izrađen od aluminijskog napona 24 kV, nazivne struje 0,598 kA, duljine 1,019 kilometara. Na temelju podataka o izolaciji, njezinoj debljini, vanjskom plaštu, dubini polaganja i ostalim podacima mogu se izračunati podaci poput impedancije i reaktancije, što je prikazano slikom 4.3.



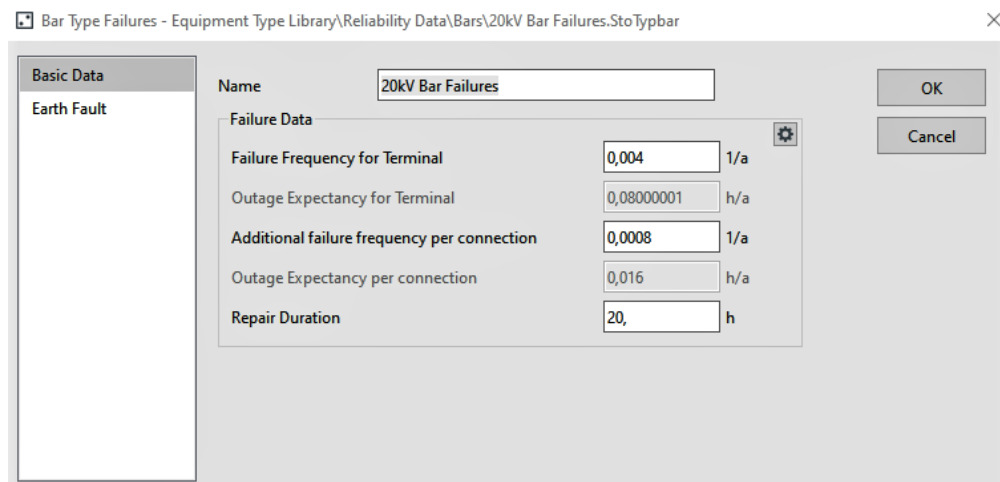
Slika 4.3. Opći parametri kabela.

Slikom 4.4. prikazani su parametri vezani za kvarove na kabele, od kojih će se opisati samo oni koji su značajni za simulaciju. *Forced Outage Rate* pokazuje koliko će puta godišnje kabele biti u kvaru, dok *Forced Outage Expectancy* predstavlja vjerojatnost kvara kabela izražena brojem sati godišnje. Koliko sati će kabele biti u kvaru iskazuje *Forced Outage Duration*, a učestalost tranzijentnih kvarova označava *Transient Fault Frequency*.



Slika 4.4. Parametri pouzdanosti kabela.

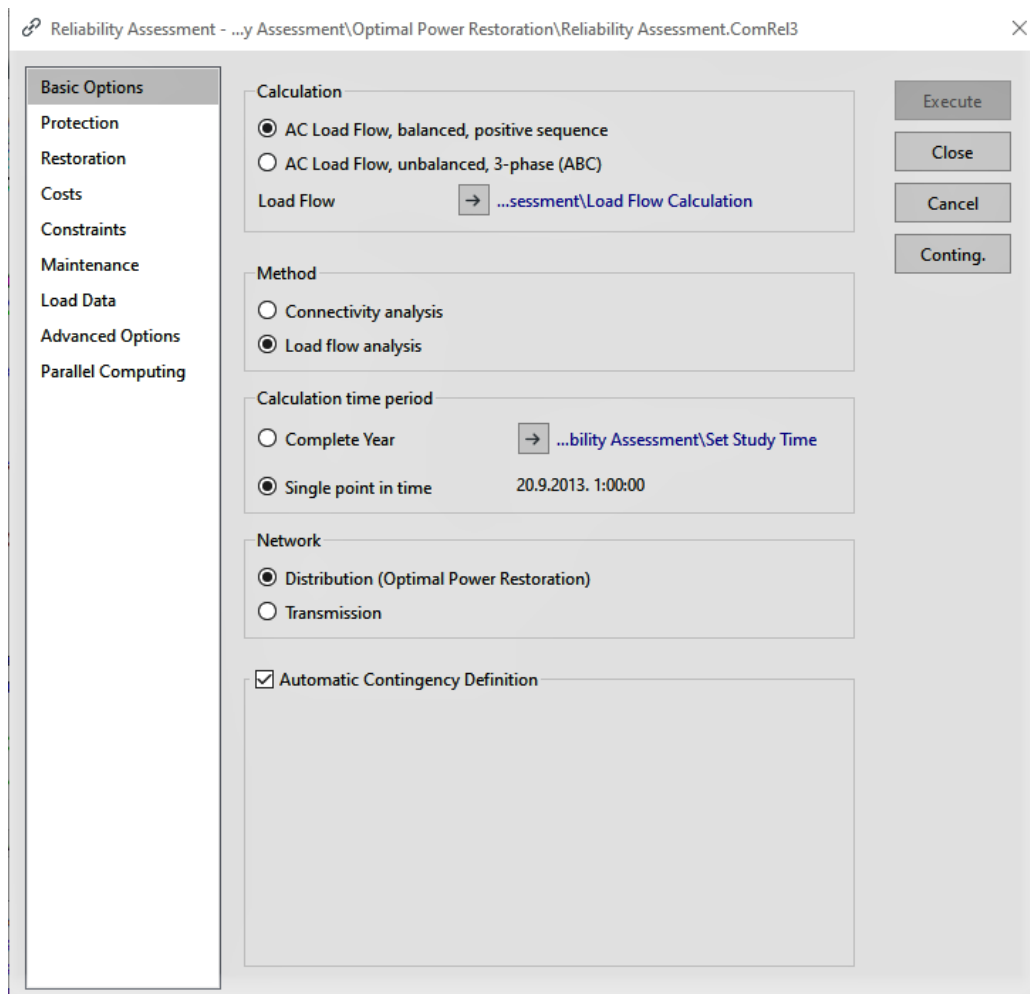
Osim podataka za kabel, u modelu su definirani podaci vezani za pouzdanost transformatora i sabirnica. Podaci za transformator sadrže sve parametre sa slike 4.4., osim za učestalost tranzijentnih kvarova, dok su podaci vezani za sabirnice prikazani slikom 4.5. Ako se zbroje kvarovi na sabirnici i kvarovi po broju priključenih elemenata, dobije se ukupna učestalost kvarova na sabirnici.



Slika 4.5. Parametri pouzdanosti sabirnice.

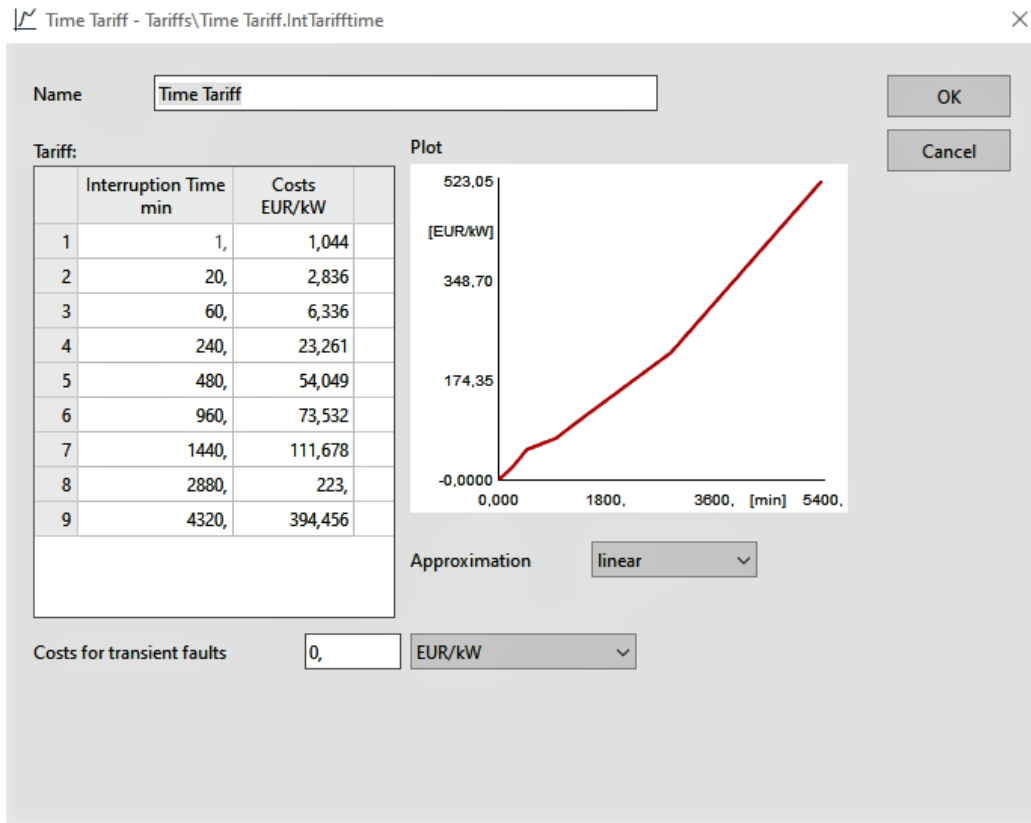
Program koristi jednadžbe čvorova koje predstavljaju analiziranu mrežu i implementirane su kroz Newton–Raphson-ovu metodu za proračun tokova snaga. Ovisno o vrsti mreže, može se izabrati metoda temeljena na strujnim jednadžbama ili jednadžbama snage. U ovom radu analizirana je distribucijska mreža, tako da se odabire metoda temeljena na jednadžbama snage. Zatim se pretpostavlja da su potrošači napajani električnom energijom, ako su priključeni na izvor napajanja prije nastanka kvara i da će ostati bez napajanja ako ih se tijekom postupka uklanjanja kvara odvoji od izvora napajanja. Nadalje je bilo potrebno odabrati tip mreže. Odabirom opcije *Distribution Network* naponske razine na elementima se nastoje održati unutar dozvoljenih granica optimiranjem položaja prekidača u sustavu.

Važni elementi kod uklanjanja kvarova su prekidači te program ovdje nudi dvije opcije – korištenje samih prekidača ili prekidača sa relejima ili osiguračima. U ovoj mreži nisu definirani ni osigurači ni releji, stoga će se koristiti samo prekidači. U cilju što bržeg otklanjanja kvara, potrebno je odrediti preklapne postupke prekidača, odnosno hoće li prekidači uklopiti, tj. isklopiti istovremeno ili sekvencijalno. Kod istovremenog postupka preklapanja pretpostavlja se istovremeno preklapanje prekidača sa definiranim vremenom. Kod sekvencijalnog preklapanja postupak se izvodi u koracima te je odvajanje kvara od ostalog dijela mreže sporije, što je i očekivano. U ovom slučaju odabran je istovremeni postupak preklapanja prekidača te je podijeljen na tri razine. Prvu razinu čine daljinski upravljani prekidači sa vremenom prorade od 1 minute. Drugu razinu čine prekidači sa indikatorom, što omogućuje korisniku brzo uočavanje njegovog statusa, dok treću razinu čine ručni prekidači. Izbornik proračuna pouzdanosti prikazan je slikom 4.6.



Slika 4.6. Izbornik proračuna pouzdanosti.

Potrošačima je osim kvalitetne opskrbe električnom energijom bitna i cijena iste. U ovom radu su uzeti u obzir troškovi za neisporučenu električnu energiju i troškovi s obzirom na vrijeme prekida napajanja. Troškovi za neisporučenu električnu energiju su konstantni i iznose 1 EUR/kWh, dok su troškovi za vrijeme prekida definirani grafom na slici 4.7.



Slika 4.7. Graf troškova prekida.

Na kraju definiranja parametara simulacije bilo je potrebno odrediti termička ograničenja koja su postavljena na 110% te naponska ograničenja (0,9 p.u. i 1,1 p.u.). Kako bi rezultati analize bili što realniji, kod računanja pouzdanosti takvih mreža obično se definiraju promjene opterećenja u sustavu (opterećenje čvorišta i vodova) i to na godišnjoj ili mjesečnoj razini. U radu su ta opterećenja zanemarena, jer je izračunata pouzdanost za točno određen datum i vrijeme.

4.2.2. Podaci o modelu mreže dobiveni simulacijom

Na temelju prethodno definiranih parametara, rezultati simulacije prikazani su slikom 4.8. Dobiveni su podaci poput broja godišnjeg prekida napajanja, količine neisporučene električne energije i redoslijeda uklapanja, tj. isklapanja prekidača.

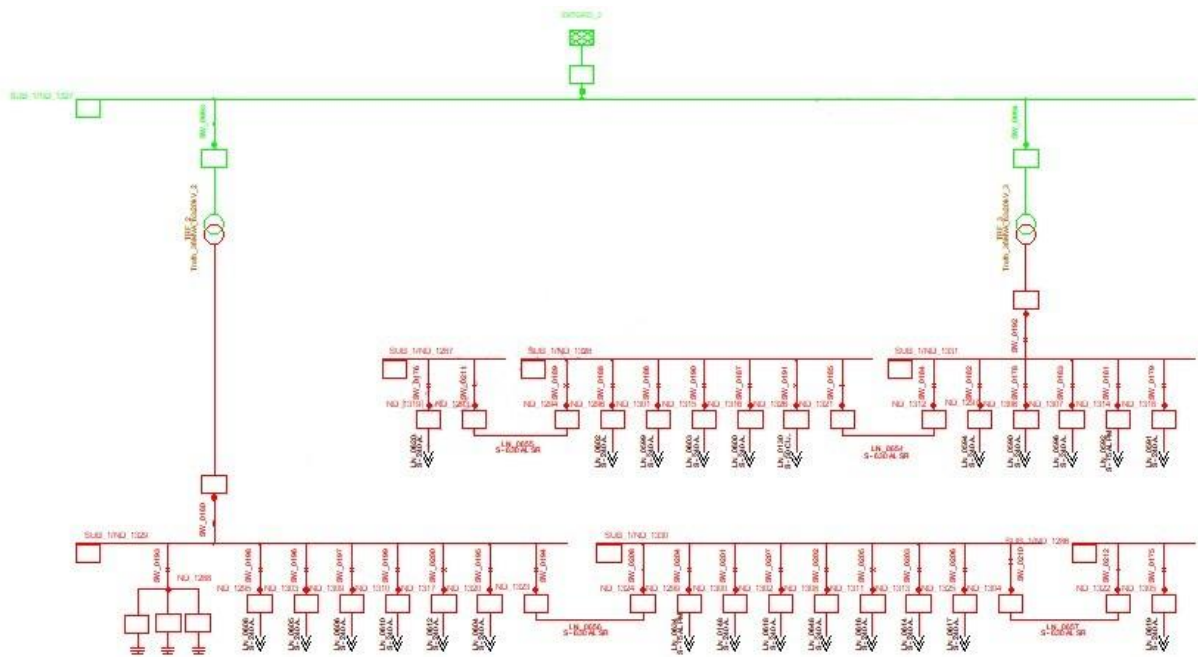
Contingency: %n-1					
Fault location (n-1)					
Component:	LN_1834	Line			
Network:	SUB_02				
Repair Duration:	10,00 h (600 min)				
Failure frequency:	2,374 1/a				
Summary of failure effects					
	Power		Customers		
Interrupted:	1053,0 kW		41		
Restored:	1053,0 kW (100,0 %)		41 (100,0 %)		
Energy not supplied	526,5 kWh				
Interruption costs:	1/failure	Yearly	Yearly (load state)		
	4,4 k€	10,525 k€/a	*100,00 % = 10,525 k€/a		
Time [min]	Step	Action	Device	Station:	
0:00	Protection	Open	SW_1637	SUB_2	
					Interrupted: 1053,0 kW
30:00	Short Circuit Indicator	Open	SW_2244	TRFSTAI_60	
30:00		Close	SW_1637	SUB_2	
30:00	Manual	Open	SW_1676	TRFSTAI_00	
30:00		Close	SW_2284	TRFSTAI_69	
					Interrupted: 0,0 kW
					Newly interrupted: 0,0 kW
					Restored Power: 1053,0 kW (100,0 %)
					Restored Customers: 41 (100,0 %)
					Newly interrupted Customers: 0
					Totally Restored Power: 1053,0 kW (100,0 %)
					Totally Restored Customers: 41 (100,0 %)
					ENS: (0:00 - 30:00) 526,5 kWh
					Total ENS: 526,5 kWh

Slika 4.8. Rezultati simulacije.

Uočava se kako prvo isklapa prekidač u glavnoj trafostanici, dok preostali isklapaju kasnije. Razlog tome je kraće vrijeme djelovanja (1 minuta) od ostalih prekidača, koji su podešeni na 30 minuta. Također u glavnoj trafostanici prekidač je daljinski upravljani, dok su preostali ručno upravljani ili imaju indikator. Ovdje dolazi do izražaja svojstvo selektivnosti zaštite, tj. da se automatski izolira element koji je u kvaru.

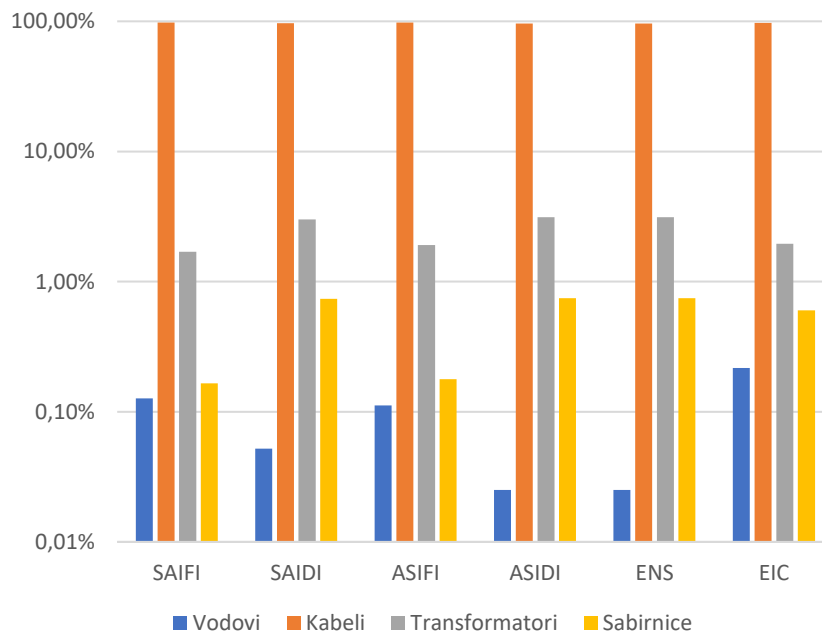
4.3. Utjecaj primarne trafostanice sa napajanim područjem na pouzdanost

Pod pojmom utjecaja trafostanice na pouzdanost sustava podrazumijeva se doprinos kvarova na pokazatelje pouzdanosti svih ili određenih potrošača. Ovim postupkom se može analizirati utjecaj pojedine komponente ili grupe komponenata na pokazatelje pouzdanosti te ako je potrebno zamijeniti jednu komponentu drugom veće pouzdanosti. Na slici 4.1. zelenom bojom označeno je područje napajano trafostanicom, dok je njena shema prikazana slikom 4.9.



Slika 4.9. Jednopolna shema TS 63/20 kV.

Trafostanica se sastoji od dva transformatora 63/20 kV, izvoda koji napajaju manje trafostanice te tri *shunt* prekidača ugrađenih na srednjenaponske sabirnice. Postupak započinje odabirom opcije *Contribution to Reliability Indices*, gdje se između ostalog pojavljuje izbornik proračuna pouzdanosti, sa slike 4.6., koji je već objašnjen. Stoga su dobivene vrijednosti simulacije prikazane grafom 4.1.



Graf 4.1. Utjecaj elemenata mreže na pokazatelje pouzdanosti.

Uočava se kako na sve pokazatelje pouzdanosti kabeli imaju najveći utjecaj, dok iza njih slijede transformatori, sabirnice i vodovi. Na odabranoj trafostanici kabeli dominantno utječu na pouzdanost, što je bilo i za očekivati, s obzirom na to da je promatrana mreža uglavnom kabelska. Transformatorima je u programskom alatu modelirana veća učestalost kvarova od ostalih elemenata, zbog čega imaju i veći utjecaj na pouzdanost. Također se može primijetiti da pokazatelji ASIDI i ENS imaju identične postotne vrijednosti. To znači da koliki je dio ukupnog vremena neki sustav bio u prekidu, toliki se dio ukupne neisporučene energije nije isporučio, odnosno ta dva pokazatelja su proporcionalna.

4.4. Izračun pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže

U drugom dijelu simulacije će biti izračunati pokazatelji pouzdanosti cijelog sustava uz planirani prekid rada voda od 5 mjeseci, a zatim pokazatelji opterećenja i sabirnica na primjeru distribucijske trafostanice. Analiza je provedena analitičkom metodom pobrojavanja stanja (eng. *State Enumeration Method*). Ona se temelji na pobrojavanju svih mogućih stanja sustava (komponenata) na osnovi poznatih podataka o pouzdanosti i raspoloživosti komponente te utvrđivanju koja od tih stanja uzrokuju zastoj sustava [16]. Potrebno je napomenuti kako se ova metoda zasniva na Markovljevom modelu prostora stanja, koji je objašnjen u prethodnom poglavlju.

4.4.1. Pokazatelji pouzdanosti sustava

Nakon definiranja prekida rada voda, pojavljuje se izbornik proračuna pouzdanosti kao sa slike 4.6. Zbog sličnosti istog, bit će objašnjene samo razlike. Pokazatelji će se izračunati na godišnjoj razini i u obzir su uzeti samo kvarovi prvog reda (sabirnica, vodova, tj. kabela i transformatora) definirani stohastičkim modelom. Pokretanjem izbornika *Reliability Assessment* dobiju se rezultati prikazani tablicom 4.1.

Tablica 4.1. Sustavni pokazatelji pouzdanosti.

POKAZATELJ POUZDANOSTI	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Broj prekida u jednoj godini	SAIFI	21,693	1/potr.,god.
Prosječan godišnji broj prekida po potrošaču	CAIFI	21,693	1/potr.,god.
Prosječno godišnje trajanje prekida sustava	SAIDI	51,311	h/potr.,god.
Prosječno trajanje prekida po potrošaču u godini	CAIDI	2,365	h/god.
Raspoloživost napajanja	ASAI	0,994	-
Neraspoloživost napajanja	ASUI	0,006	-
Godišnja neisporučena električna energija	ENS	8692,981	MWh/god.
Prosječna godišnja neisporučena električna energija po potrošaču	AENS	0,097	MWh/potr.,god.
Prosječno ograničenje potrošača	ACCI	0,000	MWh/potr.,god.
Očekivani troškovi prekida	EIC	62,229	M€/god.
Očekivani troškovi prekida po neisporučenom kWh	IEAR	7,159	€/kWh
Prosječna učestalost prekida sustava	ASIFI	22,806	1/god.
Prosječno trajanje prekida sustava	ASIDI	50,226	h/god.
Trenutna prosječna učestalost prekida sustava	MAIFI	0,000	1/potr.

Iz tablice se može uočiti kako su pokazatelj SAIFI (broj prekida u jednoj godini) i pokazatelj CAIFI (prosječan godišnji broj prekida po potrošaču) jednake vrijednosti. Razlog tome jest što se prekid računa jednom za svakog potrošača, što je posljedica jednakog promatranja prekida sustava i potrošača. Prosječno trajanje prekida u godini izraženo pokazateljima SAIDI i CAIDI ima veliki iznos, posebice SAIDI koji iznosi 51,311 h/potr.god. Pokazatelj ASAI prikazuje raspoloživost napajanja potrošača i kreće se u rasponu od nula do jedan. Komplementarno njemu definira se pokazatelj ASUI, na osnovu kojeg se može zaključiti da je većinu vremena tijekom jedne godine potrošaču bilo dostupno napajanje. Pokazatelj ENS u ovom slučaju iznosi 8692,981 MWh/god., a može se reducirati odabirom povoljne lokacije ugradnje prekidača, odnosno u simulacijskom sučelju korištenjem alata *Optimal Remote Control Switch Placement*, čime se mogu smanjiti očekivani troškovi prekida (EIC). Uočava se kako je indeks ACCI jednak nuli, odnosno da niti jednom potrošaču nije bilo uskraćeno korištenje električne energije.

4.4.2. Pokazatelji pouzdanosti sabirnica i potrošača

Pouzdanost svakog potrošačkog čvorišta se može prikazati pripadajućim pokazateljima, koji se koriste i kod izračuna onih koji se odnose na sustav. Oni uglavnom služe za prikaz broja, trajanja i troškova prekida u odabranoj godini, a izračun istih na primjeru distribucijske trafostanice prikazan je tablicama 4.2. i 4.3.

Tablica 4.2. Pokazatelji pouzdanosti sabirnica.

POKAZATELJ POUZDANOSTI	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Prosječno trajanje prekida	AID	0,179	h
Trajanje prekida godišnje	AIT	2,794	h/god.
Broj prekida godišnje	AIF	15,636	1/god.

Prosječno trajanje prekida iznosi 0,179 sati, odnosno 10 minuta, što prema [17] spada u dugotrajne prekide. Očekivano je da prekid na godišnjoj razini bude u trajanju od 2,794 sati, dok je broj tih prekida 15,636 u razdoblju od godine dana. Prosječno trajanje prekida (AID) zapravo predstavlja umnožak trajanja i broja godišnjih prekida.

Tablica 4.3. Pokazatelji pouzdanosti potrošača.

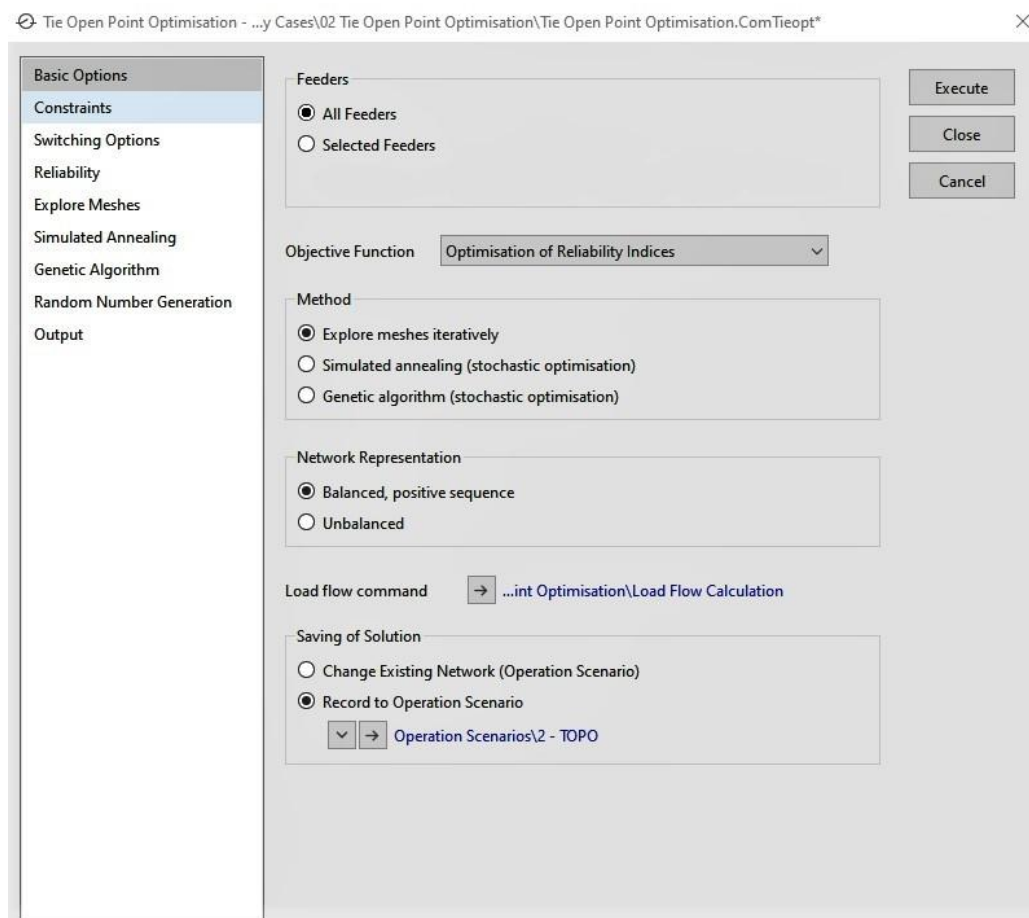
POKAZATELJ POUZDANOSTI	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Broj prekida godišnje	LPIF	15,636	1/god.
Trajanje prekida godišnje	LPIT	2,794	h/god.
Troškovi prekida godišnje	LPIC	6545,402	€/god.

Uspoređujući tablicu 4.2. i 4.3. uočava se da su broj i trajanje prekida napajanja na sabirnicama i kod potrošača jednakih vrijednosti. S obzirom na broj i trajanje godišnjih prekida, troškovi električne energije iznose 6545,402 €/god. i mogu se smanjiti korištenjem optimalnog tarifnog modela.

4.4.3. Pokazatelji pouzdanosti dobiveni rekonfiguracijom mreže

Kao što je objašnjeno u drugom poglavlju, postoji mnogo metoda za poboljšanje pouzdanosti, a u nastavku će biti opisan postupak rekonfiguracije mreže kao jedna od njih. Njime je promijenjeno uklopno stanje prekidača u trafostanicama uz dodavanje istih korištenjem alata *Tie Open Point Optimization* (koji će prvi biti opisan) i *Optimal Remote Control Switch (RCS) Placement*. Postupak započinje određivanjem glavnih „puteva“ između izvoda spojenih preko otvorenih točaka mreže (eng. *Backbone Calculation*), što je zajedničko za oba alata.

Prvo je bilo potrebno odabrati svrhu ovog postupka. Ovdje program nudi četiri opcije – smanjenje gubitaka, optimizacija troškova, minimiziranje postupaka preklapanja prekidača te optimizacija pokazatelja pouzdanosti, što je odabrano u ovom slučaju. Što se tiče metode, odabire se opcija *Explore meshes iteratively*, gdje se određuje najveći broj petlji, tj. koliko će se puta ponavljati postupak optimizacije (u ovom slučaju tri), zatim se određuje prag iznad kojeg se razmatra promjena gubitaka u otvorenoj točki mreže (postavljeno je na 100 kW) te naponska ograničenja i opterećenja elemenata, što je prikazano slikom 4.10.



Slika 4.10. Izbornik alata *Tie Open Point Optimization*.

Nadalje, alat *Optimal RCS Placement* optimizira mrežu dodavanjem prekidača (u ovom slučaju broj prekidača po izvodu je 1) sa svrhom smanjenja neisporučene energije (ENS) ili očekivanih troškova prekida (EIC), ali što će rezultirati poboljšanjem i ostalih pokazatelja (tablica 4.4.).

Tablica 4.4. Usporedba pokazatelja pouzdanosti.

POKAZATELJ POUZDANOSTI	PRIJE REKONFIGURACIJE	NAKON REKONFIGURACIJE	JEDINICA
SAIFI	21,693	21,690	1/potr.,god.
SAIDI	51,311	50,971	h/potr.,god.
CAIDI	2,365	2,350	h/god.
ENS	8692,981	8632,723	MWh/god.
EIC	62,229	61,896	M€/god.
ASIFI	22,806	22,803	1/god.
ASIDI	50,266	49,918	h/god.

Ako se usporede vrijednosti navedenih pokazatelja pouzdanosti u tablici prije i nakon rekonfiguracije mreže, vidljivo je poboljšanje u smislu smanjenja broja, trajanja i troškova prekida, neisporučene električne energije i drugih. Kada bi se dodao veći broj prekidača, pokazatelji bi se još više poboljšali, ali zbog većeg broja komponenata smanjila bi se ukupna pouzdanost.

5. ZAKLJUČAK

Temeljem provedene analize može se zaključiti kako je pouzdanost bitan segment za stalnost opskrbe električnom energijom. Da bi se ona poboljšala potrebno je poznavanje načina funkcioniranja svake komponente, odnosno hoće li kvar iste uzrokovati zastoj cijelog sustava, što je temeljna svrha modela pouzdanosti. Zatim je bilo potrebno definirati pokazatelje pouzdanosti, kako bi se mogla izraziti brojčana vrijednost pouzdanosti nekog sustava i metode proračuna istih. Monte Carlo metoda se koristi za analizu velikih sustava, odnosno kada je broj neželjenih događaja relativno velik, dok su analitičke metode učinkovite kada su vjerojatnosti kvarova komponenti male, tj. sustav je pouzdan.

U posljednjem poglavlju analizirana je pouzdanost distribucijske mreže analitičkom metodom pobrojavanja stanja utemeljena na Markovljevom modelu prostora stanja. Optimizacijom mreže nakon kratkog spoja na kabelu ponovno je uspostavljeno napajanje uz određene posljedice za potrošača. U cilju smanjenja tih posljedica postoji niz mjera za poboljšanje pouzdanosti napajanja, a neke od njih su povećanje brzine djelovanja i osjetljivosti prekidača te korištenje opreme veće pouzdanosti. Prikazan je utjecaj pojedinih elemenata primarne trafostanice na pokazatelje pouzdanosti, čime se utvrdila proporcionalnost pokazatelja ASIDI i ENS. Na kraju su se izračunali pokazatelji pouzdanosti cijelog sustava koji su objašnjeni u teorijskom dijelu. Oni se mogu poboljšati raznim metodama, a u ovom radu primijenjen je postupak promjene uklopnog stanja i dodavanja novih prekidača, koje nudi program DIGSILENT. Navedeni postupci su rezultirali smanjenjem broja, troškova i trajanja prekida te neisporučene električne energije.

LITERATURA

- [1] Ali A. Chowdhury, D. Koval, „Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications“, John Wiley & Sons, New Jersey, 2009.
- [2] S. Nikolovski, „Osnove analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava“, Elektrotehnički fakultet sveučilišta u Osijeku, Osijek, 1995.
- [3] M. Čepin, „Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications“, Springer-Verlag, London, 2011.
- [4] V. Mikuličić, Z. Šimić, „Modeli pouzdanosti, raspoloživosti i rizika u elektroenergetskom sustavu“, 1.dio „Analitičke metode proračuna pouzdanosti i raspoloživosti“, Kigen, Zagreb, 2008.
- [5] R. Billinton, R.N. Allan, „Reliability Assessment of Large Electric Power Systems“, Kluwer Academic Publishers, 101 Phillip drive, Assinippi Park, Norwell, Massachusetts 02061, 1988.
- [6] R. Billinton, R. N. Allan, „Reliability Evaluation of Engineering Systems“, Springer US, New York, 1992.
- [7] D. Žigman, K. Meštrović, G. Malčić, „Određivanje raspoloživosti rasklopnog postrojenja metodom stabla kvara“, 7. savjetovanje HRO CIGRE, B3 – 07, Cavtat, 2005.
- [8] R. Billinton, W. Li „Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods“, Plenum Press, New York, 1994.
- [9] N. Sarapa, „Teorija vjerojatnosti, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [10] R.E. Brown, „Electric Power Distribution Reliability“, ABB Electric Systems Technology Institute Raleigh, North Carolina, 2002.
- [11] S. Nikolovski, D. Šljivac, V. Mikuličić, B. Štefić, „Procjena pouzdanosti prijenosne mreže Slavonije i Baranje nakon obnove i izgradnje vodova 110 kV“, „Četvrto savjetovanje HR Cigre“, 38-02, str. 14 - 15, Cavtat, 1999.

- [12] V. Komen, S. Krajcar, R. Čučić, „Utjecaj vrste sustava za vođenje pogona na pouzdanost razdjelnih mreža“, Engineering review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva, No. 1, Vol. 28, str. 27 - 37, lipanj 2008., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/25758>
- [13] D. Bokal, J. Hostnik, F. Gubina, „Zanesljivost delovanja DEES, I. del – Teoretične osnove“, 3. konferenca slovenskih elektroenergetikov CIGRE – Nova Gorica 1997., 31 – 05, str. 31 – 33 do 31 – 35
- [14] R. Billinton, R.N. Allan, „Reliability Evaluation of Power Systems“, Plenum Press, New York, 1996.
- [15] J. Northcote - Green, R. Wilson, „Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems“, CRC Press, Florida, 2006.
- [16] DIgSILENT PowerFactory 2021, User Manual, Gomaringen, 2021.
- [17] Hrvatska energetska regulatorna agencija, Uvjeti kvalitete opskrbe električnom energijom, NN 37/17, 14.04.2017., dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_04_37_795.html [19.06.2021.]
- [18] HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/18, 17.08.2018., dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html [18.06.2021.]
- [19] HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., Metodologija i kriteriji planiranja razvoja distribucijske mreže, Listopad, 2013.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analizira se pouzdanost na modelu distribucijske mreže u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. Najprije su objašnjeni osnovni modeli pouzdanosti komponente, a zatim metode proračuna i pokazatelji pouzdanosti. Markovljev model prostora stanja sa pripadajućim modelima opisan je kao zasebna cjelina, što je važno za razumijevanje metode pobrojavanja stanja koja se koristi u simulacijskom dijelu. Zadnje poglavlje rada odnosi se na simulacijski dio koji je podijeljen na tri segmenta. U prvom segmentu analizira se utjecaj kvara (kratkog spoja) kabela na napajanje potrošača. Utjecaj trafostanice sa napajanim područjem na pouzdanost sustava predstavlja drugi segment, u kojem se analizirao doprinos elemenata mreže na pokazatelje. Treći segment prikazuje izračun pokazatelja pouzdanosti sustava i potrošačkih čvorišta, uz primijenjenu metodu rekonfiguracije mreže, što je rezultiralo smanjenjem pokazatelja pouzdanosti.

Ključne riječi: distribucijska mreža, Markovljev model, metode proračuna, pokazatelji, pouzdanost

ANALYSIS OF RELIABILITY AND OPTIMAL SWITCHING STATE OF THE DISTRIBUTION NETWORK

ABSTRACT

The paper analyzes the reliability of the distribution network model in the software package DIgSILENT PowerFactory. The basic component reliability models are explained first, followed by calculation methods and reliability indices. The Markov model of state space with corresponding models is described as a separate unit, which is important for understanding the method of state enumeration, used in the simulation part. The last chapter of the paper refers to the simulation part, which is divided into three segments. The first segment analyzes the impact of cable failure (short circuit) on consumer power supply. The influence of the substation with supplied area on the reliability of the system is the second segment, in which the contribution of network elements to indices was analyzed. The third segment shows the calculation of system and consumer node reliability indices, where the network reconfiguration method was applied, which improved the reliability indices.

Key words: calculation methods, distribution network, indices, Markov model, reliability

ŽIVOTOPIS

Nikola Markić rođen je 11. siječnja 1995. godine u Zagrebu. Osnovno obrazovanje započinje od prvog do trećeg razreda u Područnoj školi Budrovac, a nastavlja od četvrtog do osmog razreda u Osnovnoj školi Đurđevac te upisuje Strukovnu školu Đurđevac, smjer Tehničar za mehatroniku. Godine 2013. upisuje Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Stručni studij je završio 2017. godine obranom završnog rada pod nazivom „Sustav za mjerenje i kontrolu razine“. Godine 2018. upisuje Razlikovne obveze na istom fakultetu te po završetku istih upisuje Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika.

Potpis autora