

Rene Prenc, dipl. ing. el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[rene.prenc@hep.hr](mailto:rene.prenc@hep.hr)

dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[vitomir.komen@hep.hr](mailto:vitomir.komen@hep.hr)

dr. sc. Srđan Žutobradić, dipl. ing. el.  
Hrvatska energetska regulatorna agencija, Zagreb  
[szutobradic@hera.hr](mailto:szutobradic@hera.hr)

## KRITERIJ POUZDANOSTI U PLANIRANJU RAZDJELNIH MREŽA

### SAŽETAK

Planiranje razdjelnih mreža ima za osnovni cilj definirati podloge za pravodobnu izgradnju i dogradnju mreže za raspodjelu električne energije, koja se direktno i putem transformacije na niskonaponsku razinu, predaje krajnjim kupcima uz zadovoljenje tri osnovna kriterija: kvalitete električne energije, raspoloživosti i ekonomičnosti. Postupak planiranja dodatno usložnjava činjenica da se prijenos električne energije odvija u uvjetima otvorenog tržišta električnom energijom, gdje se pojavljuje niz novih nesigurnosti pri planiranju. Upravo iz toga razloga u referatu će se ukratko obraditi pojam pouzdanosti opskrbe električnom energijom kao kriterija planiranja razdjelnih mreža. Pritom će se na jednoj varijanti planirane 20 kV razdjelne mreže koristiti softverski paket za analizu pouzdanosti. Rezultati će numerički prikazati koji je dio mreže skloniji kvarovima i ispadima, što u biti planeru omogućava da pristupi detaljnijoj analizi problematičnog segmenta mreže u cilju zadovoljenja potrebne razine pouzdanosti opskrbe električnom energijom.

**Ključne riječi:** planiranje, pouzdanost opskrbe, numerička analiza

## THE CRITERIA OF RELIABILITY IN DISTRIBUTION NETWORKS PLANNING

### SUMMARY

The primary purpose of distribution networks planning is the construction and reconstruction of distribution network, which delivers electrical energy directly, or via transformation on a low – voltage level, to overall customers. During the energy transfer three criteria must be met: quality of electrical energy, availability and cost minimization. The process of planning is furthermore complicated because of the fact that the aforementioned energy transfer is taking place in the new conditions of an open market of electrical energy. The uncertainty of deliverance is a very current problem in planning, and for that reason this paper will cover the basic principles of reliability as criteria in distribution networks planning. The analysis of reliability will be tested, with the help of a specialized software package, on one planned variant of 20 kV distribution network. The results will numerically display which part of network is prone to malfunctions and failures, which, in fact, will allow the planner to begin a more detailed analysis of the troublesome part in order to satisfy the requirements of supply reliability.

**Key words:** planning, reliability of supply, numerical analysis

## **1. UVOD**

Planiranje razvoja razdjelnih mreža veoma često podrazumijeva kompromis između niza uvjeta koje nameću kupci električne energije, te ciljeva Operatora distribucijskog sustava (ODS-a), koji mora posloovati u novim pravilima dereguliranog tržišta električnom energijom. Između ostaloga, dužnosti Operatora distribucijskog sustava su: siguran, pouzdan i učinkovit pogon distribucijske mreže, osiguravanje nepristranosti prema korisnicima distribucijske mreže, te briga o gubicima u mreži i godišnjoj analizi gubitaka. Prilikom planiranja, prirodno se nameće pitanje ekonomske opravdanosti ulaganja u pojačanje postojeće razdjelne mreže, a da se pritom zadovolje zadani kriteriji o kvaliteti opskrbe električnom energijom. U uvjetima suvremene tržišne utakmice potrebno je optimalno planirati razdjelnu mrežu, uzimajući u obzir, osim tendencije porasta opterećenja, i kriterij pouzdanosti opskrbe električnom energijom. Budući da se pod pojmom kvalitete usluge korisnicima električne energije, podrazumijeva i plaćanje penala ukoliko nije ispunjen minimum kvalitete električne energije, Operator distribucijskog sustava itekako treba implementirati pouzdanost kao kriterij za planiranje buduće mreže.

## **2. POUZDANOST RAZDJELNIH MREŽA**

Pouzdanost napajanje električnom energijom kupaca u uvjetima otvorenog tržišta električne energije je jedna od najvažnijih stavki kvalitete opskrbe električnom energijom. Prema većini svjetskih statistika pogonskih događaja, 80-90% svih prekida opskrbe realizira se upravo u distribucijskom sustavu. Stoga i najveća odgovornost za pouzdanost opskrbe pada upravo na Operatora distribucijskog sustava.

Pouzdanost razdjelnih mreža predstavlja vjerojatnost da je mreža sposobna isporučiti električnu energiju svim potrošačima u određenom vremenskom periodu uz prihvatljive radne uvjete (napon i frekvenciju).

U skladu sa globalnom tendencijom napuštanja vertikalno integriranih elektroenergetskih sustava, pouzdanost postaje obavezujući element operatora mreže u novijoj zakonodavnoj regulativi, a time i integralni dio planiranja i vrednovanja distribucijskog sustava. U prošlosti su se većinom statistički podaci o pogonskim događajima u razdjelnim mrežama prikupljali nesistematično, odnosno za druge potrebe u okviru mogućnosti koje je pružala tehnologija i informacijska potpora. Današnje energetske zakonodavstvo, međutim, izričito zahtijeva pregledno i transparentno prikupljanje podataka o pogonskim događajima u svrhu točnog izračuna pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže u nadležnosti dotičnog Operatora distribucijskog sustava.

Ti pokazatelji imaju veoma važnu ulogu u definiciji načina funkcioniranja suvremenog tržišta električnom energijom. Naime, praksa je nekih zapadnoeuropskih zemalja pokazala da se po procesu privatizacije distributivnih mreža, nažalost lako može dogoditi situacija da ODS iskoristi mogućnost ostvarivanja veće dobiti na način da smanji ulaganja u razvoj mreže, odnosno u sigurnost i pouzdanost napajanja potrošača, i to bez težih sankcija. Međutim, u svrhu zaštite potrošača, Regulator sustava (u Hrvatskoj HERA – Hrvatska regulatorna energetska agencija) snažno može utjecati na zaradu koju ostvaruju distributivne tvrtke. U pojedinim zemljama EU-a Regulator sustava od Operatora distribucijskog sustava zahtijeva ispunjavanje barem minimalnih standarda pouzdanosti pri planiranju razvoja mreže, te redovite i promptne godišnje izvještaje o radu u odnosu na regulirane standarde koji definiraju određenu razinu kvalitete usluge krajnjim kupcima električne energije.

U slučaju neispunjavanja zadanih obveza, te kada pokazatelji pouzdanosti ODS-a ne odgovaraju minimalno zadanim pokazateljima od strane Regulatornog tijela, predviđeno je da distribucijska organizacija plati novčanu kompenzaciju regulatoru u određenom iznosu ukupnog profita, dok one distribucijske tvrtke čija kvaliteta usluge premašuje kvalitetu usluge konkurenata, dobivaju poticaje na svoju već zarađenu dobit, i to od strane Regulatora sustava.

Logično je za pretpostaviti da su Operatori distribucijskih sustava diljem Europe veoma zainteresirani za analizu pouzdanosti svojih mreža, jer na taj način mogu dobiti novi i veoma kvalitetan uvid u kvalitetu varijantnih rješenja pri planiranju razvoja i proširenja razdjelnih mreža, te konačno, uspješno izvršiti tranziciju poslovanja u nove uvjete koji vladaju na tržištu električnom energijom.

## **3. PROGRAMSKI PAKETI ZA PLANIRANJE RAZDJELNIH MREŽA**

U današnjim uvjetima značajnog povećanja potrošnje električne energije, složenost postupka planiranja postavlja pred planera vrlo velike zahtjeve za točnošću, i njegovo iskustvo nije dovoljno da u ograničenom vremenu izračuna, te međusobno vrednuje dostatan broj varijantnih rješenja. Stoga na

tržištu postoji niz komercijalnih programskih paketa koji omogućavaju planiranje razdjelnih mreža. Te je komercijalne programske pakete moguće podijeliti u dvije osnovne grupe:

- analitičke i
- perskriptivne

Analitički alati služe analizi zadanog plana izgradnje mreže napravljenog od strane planera. Dakle, oni nemaju automatizirane postupke koji ta rješenja uz zadane parametre i tehnička ograničenja traže tj. optimiziraju, već služe samo kako bi planer što brže i jednostavnije analizirao različita varijantna rješenja koja on sam mora osmisлити. Najčešće analize su proračun tokova snaga, kratkog spoja, analiza stabilnosti, raspoloživosti, podešenje zaštite od kratkog spoja i slično. Toj grupi paketa pripadaju:

- PRM (EIHP, Hrvatska)
- PowerCad (Fractal d.o.o., Hrvatska)
- Gredos (Inštitut Milan Vidmar, Slovenija)
- PRAO (EDF, Francuska)
- CADOPS/CADPAD (ABB, Švicarska)
- NEPLAN 2000 (Busarello+Cott+Partner, Švicarska)
- WindMil (Milsoft, USA)
- itd.

Perskriptivne metode varijantna rješenja pronalaze same u automatiziranim postupcima rješavanjem kombinatoričkih optimizacijskih problema, čiji je najčešći kriterij pronalaženje minimalnih troškova izgradnje i vođenja pogona razdjelnih mreža. No, takvih je komercijalnih paketa puno manje.

Njima pripadaju, na primjer:

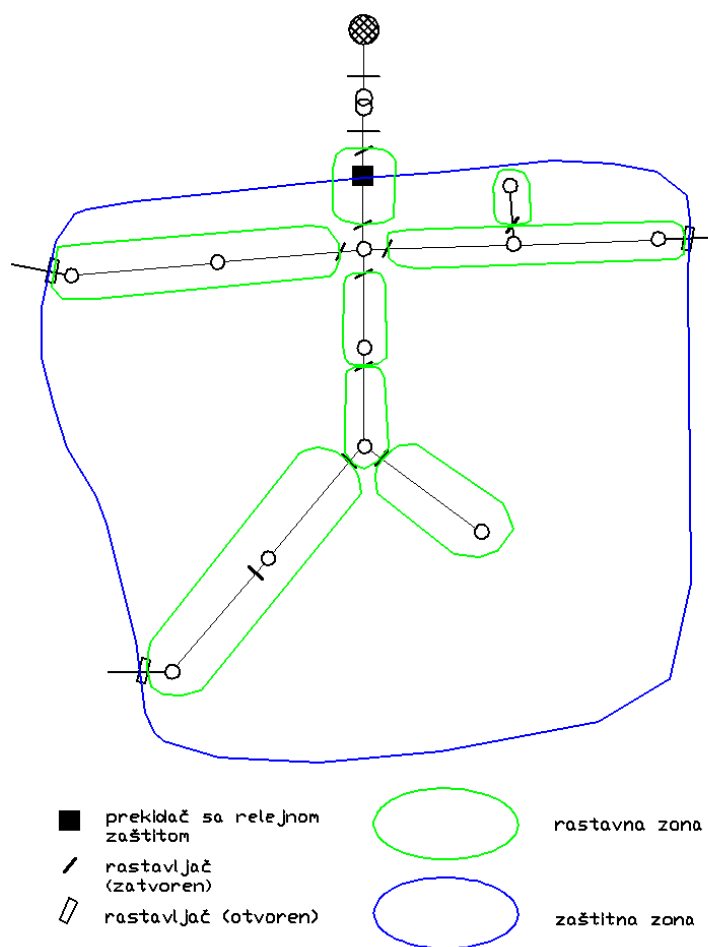
- HEP – CADDiN (FER, Hrvatska)
- SwedPower (Švedska)
- Hydro – Quebec (Kanada)
- itd.

U HEP ODS-u d.o.o. Elektroprimorje Rijeka se za izračun pouzdanosti razdjelnih mreža koristi analitički programski paket Gredos [L1]. Taj program korisniku omogućuje detaljni uvid u pokazatelje pouzdanosti promatrane mreže, poput frekvencije i godišnjeg trajanja ispada svakog potrošačkog čvora u planiranoj mreži. Na taj se način može vrednovati sigurnost opskrbe električne energije, te pristupiti eventualnoj rekonfiguraciji planirane mreže u cilju poboljšanja pokazatelja pouzdanosti.

### **3.1. Teorijska osnova proračuna pouzdanosti razdjelnih mreža [L6]**

U modelu za proračun pouzdanosti, promatrana razdjelna mreža se dijeli na zaštitne zone i rastavne zone, prema veličini dijela mreže koji ostaje bez napajanja električnom energijom u slučaju kvara nekog elementa mreže.

Zaštitna zona elementa u razdjelnoj mreži sa radijalnim pogonom je cjeloviti dio mreže koji je isključen na prvom prekidaču sa relejnom zaštitom u smjeru od elementa prema izvoru, u slučaju kvara na tom elementu. Rastavna zona elementa određena je najbližim rastavnim mjestima (rastavljačima) u svim smjerovima od elementa.

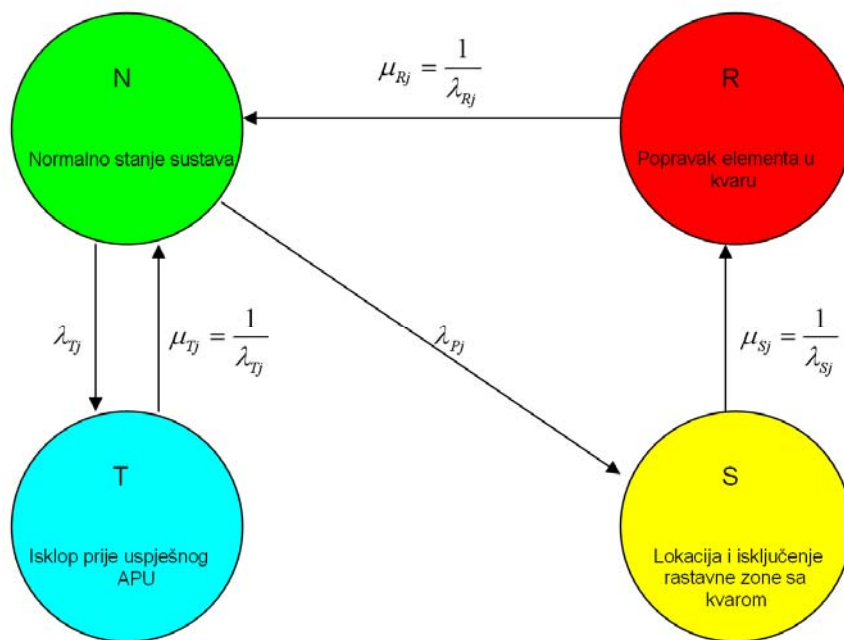


Slika 1. Definicija zaštitnih i rastavnih zona u razdjelnoj mreži

Pogonska se stanja u razdjelnoj mreži, u slučaju kvarova na elementima mreže, modeliraju sa modelom četiri stanja sustava:

- stanje N: normalno pogonsko stanje sustava – stanje bez kvara, a svi potrošači su normalno napajani
- stanje T: stanje sustava s prolaznim kvarom – stanje u kojem prekidač sa zaštitom isključi, a ponovni uklop prekidača je uspješan
- stanje S: stanje preklapanja kod trajnog kvara – stanje u kojem po neuspješnom ponovnom uklopu prekidač sa zaštitom trajno isključi zaštitnu zonu mreže, i svi potrošači u zaštitnoj zoni elementa u kvaru ostaju bez napajanja, a potom se locira i isključi rastavna zona sa kvarom i uspostavi stanje (R) rezervnog napajanja (zatvaranjem rastavljača koji su otvoreni u normalnom pogonu)
- stanje R: stanje popravka kod trajnog kvara – stanje u kojem je isključena samo rastavna zona sa elementom u kvaru i potrošači te zone su bez napajanja, dok se ostali potrošači rezervno napajaju električnom energijom

Iz stanja T sustav se automatski vraća u stanje N, iz stanja S nakon potrebnih preklapanja na rastavnim mjestima sustav prijeđe u stanje R, a nakon popravka elementa u kvaru i uspostave normalnog uklopnog stanja sustav prijeđe iz stanja R u stanje N. Ponovimo, ukupno 2 preklapanja karakteriziraju stanje S – prvo se odnosi na lociranje mjesta kvara i otvaranje rastavljača koji su najbliže elementu pogođenom kvarom, a drugo se odnosi na uspostavu rezervnog napajanja zatvaranjem rastavljača koji su u normalnom pogonu otvoreni. Potonje se kronološki zbiva prilikom završetka stanja S i ulaska u stanje rezervnog napajanja R.



Slika 2. Model četiri stanja sustava

Elementi modela za proračun pouzdanosti su standardno grane razdjelne mreže, pa je potrebno uz osnovne podatke grana mreže utvrditi i ulazne podatke o kvarovima grana i sklopnim aparatima na granama. Ti se podaci prikupljaju statističkim praćenjem ponašanja elemenata tijekom jedne godine (npr. promatra se koliko se puta pojedini transformator ili vod pokvario u godini dana i to se kao ulazni podatak unosi u proračun pouzdanosti za slijedeću godinu).

Ulazne podatke dijelimo na:

- podatke o trajnim kvarovima grana, prilikom kojih je potrebno popraviti ili zamijeniti pogođeni element grane
  - $\lambda_{Pj}$  učestalost trajnih kvarova grane  $j$  [kvarova/god]
  - $T_{Sj}$   $T_{Sj}$  vrijeme preklapanja kod trajnog kvara grane  $j$  [h] / [h]
  - $T_{Rj}$   $T_{Rj}$  vrijeme popravka kod trajnog kvara grane  $j$  [h]
- podatke o prolaznim kvarovima grana, kod kojih uzrok nestane s isklopom i nakon APU-a se ponovno uspostavi normalno pogonsko stanje
  - $\lambda_{Tj}$  učestalost prolaznih kvarova grane  $j$  [kvarova/god] / [kvarova/god.]
  - $T_{Tj}$  vrijeme ponovnog uklopa kod prolaznog kvara grane  $j$  [s] / [s]
- podaci o sklopnim aparatima i zaštitnim uređajima u granama
- osnovni podaci razdjelne mreže – topološka struktura mreže, opterećenja po čvorovima mreže, dozvoljena strujna opterećenja i impedancije elemenata mreže

Temeljem osnovnih ulaznih podataka, podataka o topologiji mreže i ulaznih podataka o pouzdanosti grana mreže (učestalost kvarova grana, vremena za pojedina stanja) izračunavaju se sva opisana stanja na modelu mreže simulacijom kvarova na svim granama čija su posljedica prekidi napajanja čvorova. Na taj način se iz učestalosti kvarova grana izračunava pokazatelje pouzdanosti svih čvorova mreže, a koji predstavljaju pokazatelje pouzdanosti napajanja potrošača u tim čvorovima.

U modelu se iz početnog normalnog stanja N simulira kvarove svih grana mreže. Simuliraju se stanja prolaznih kvarova T i stanja trajnih kvarova prije isključivanja rastavne zone sa kvarom S i stanja rezervnog napajanja R. Na taj se način određuje koji su potrošački čvorovi manje ili više podložni prekidima opskrbe električnom energijom.

Pokazatelji pouzdanosti potrošačkih čvorova, koje prikazuje programski paket Gredos, su:

- Frekvencija prolaznih prekida čvora  $i$  tijekom jedne godine  $F_{ti}$  [prekida/god]
- Frekvencija trajnih prekida čvora  $i$  tijekom jedne godine  $F_{pi}$  [prekida/god]

- Frekvencija ukupnih prekida čvora  $i$  tijekom jedne godine (prolaznih+trajnih)

$$F_i = F_{ti} + F_{pi} [\text{prekida/god}]$$

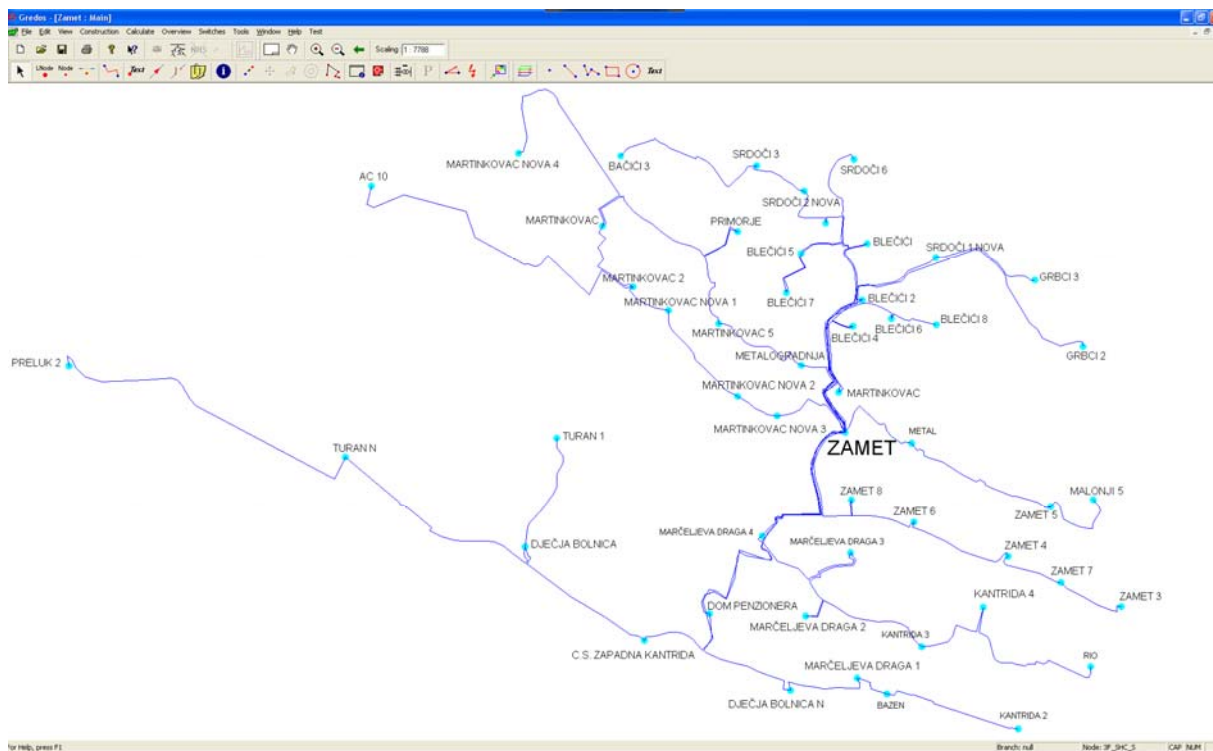
- Godišnje trajanje prolaznih prekida čvora  $i$   $H_{ti} [h/god]$
- Godišnje trajanje prekida čvora  $i$  zbog stanja S (preklapanja)  $H_{psi} [h/god]$
- Godišnje trajanje prekida čvora  $i$  zbog stanja R (popravka)  $H_{proi} [h/god]$
- Godišnje trajanje trajnih prekida čvora  $i$   $H_{pi} = H_{psi} + H_{proi} [h/god]$
- Ukupno godišnje trajanje prekida čvora  $i$  (trajnih+prolaznih)  $H_i = H_{ti} + H_{pi} [h/god]$
- Prosječno vrijeme trajanja trajnih prekida čvora  $i$   $T_{pi} [h/prekid]$

Pokazatelji pouzdanosti na razini razdjelne mreže, koje prikazuje programski paket Gredos, su:

- Očekivana godišnja neisporučena električna energija u sustavu  $E [MWh/god]$
- Troškovi godišnje neisporučene električne energije u sustavu  $T [€]$

### 3.2. Proračun pouzdanosti na primjeru varijante raspjeta buduće mreže TS 110/20 kV Zamet

Pokazatelji pouzdanosti će biti izračunati na primjeru raspjeta buduće TS 110/20 kV Zamet. Budući da je od početka sedamdesetih godina započeo proces uvođenja naponske razine 20 kV, odnosno daljnji razvoj mreža po koncepciji 110 – 20 – 0.4 kV, osnovna će funkcija buduće VN/SN trafostanice Zamet, smještene na području Martinkovca, biti zamjena dosadašnje TS 35/10 kV Zamet.



Slika 3. Prikaz dijela raspjeta buduće TS 110/20 kV Zamet

Izračunati pokazatelji pouzdanosti analiziranog raspjeta buduće razdjelne mreže će pomoći planeru da utvrdi dijelove mreže odnosno potrošačka područja s nedovoljno pouzdanim napajanjem, te da u postupku planiranja dugoročnog razvoja mreže nadogradi ili promijeni varijantno rješenje buduće mreže kako bi se poboljšala pouzdanost napajanja potrošača.

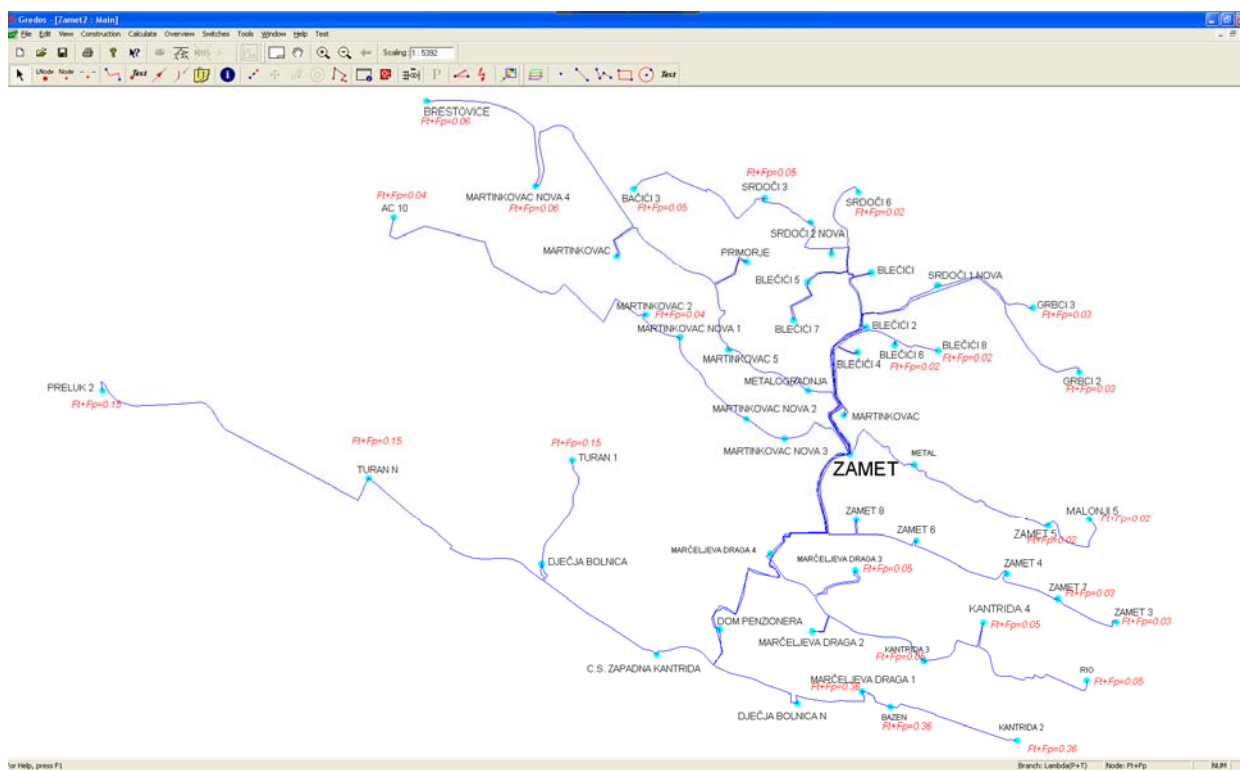
Za ulazne podatke o pouzdanosti elemenata mreže uzeti će se aproksimativne vrijednosti definirane u modulu pouzdanosti programskog paketa Gredos prikazane tablicom I. Budući da je mreža isključivo kabelska, uzeti će se da je intenzitet prolaznih kvarova 20 kV kabela jednak nuli.

Bilo bi idealno implementirati u buduće inačice Gredos-a mogućnost korištenja statistički bilježenih podataka pouzdanosti iz programa DISPO, kojim se integralno sagledavaju pogonski događaji u distribucijskom sustavu od naponske razine 110 kV do 0,4 kV. Pod pogonskim događajima smatraju se prisilni i planirani zastoji te zastoji nastali na temelju naloga Opskrbe ili NDC-a, a koji traju dulje od tri minute.

Tablica I. Prosječne vrijednosti ulaznih podataka za SN distribucijsko područje

Element	Učestalost trajnih kvarova: $\lambda_P$	Trajanje preklapanja: $T_S/h$	Trajanje popravka: $T_R/h$	Trajanje ciklusa: $T_{SR}/h$
SN kabel	0.200/km	1	48	49
Transformator VN/SN	0.01	0.1	96	96
Transformator SN/NN	0.05	0.5	11	12

Ideja koja stoji iza proračuna je pokazati kako se pokazatelji pouzdanosti mijenjaju u odnosu na topologiju mreže. Kao prvi primjer uzet je dio raspleta TS 110/20 kV Zamet koji je u potpunosti radijaliziran; dakle, ne sadrži poprečne veze ni prstenove koji omogućavaju uspostavu rezervnog napajanja. Rezultati su prikazani na slici 4. (samo za neke čvorove radi preglednosti) i u datoteci *ime\_projekta.RLB* (potpuni izvještaj za sve potrošačke čvorove).



Slika 4. Grafički prikaz proračuna pouzdanosti dijela raspleta buduće TS 110/20 kV Zamet

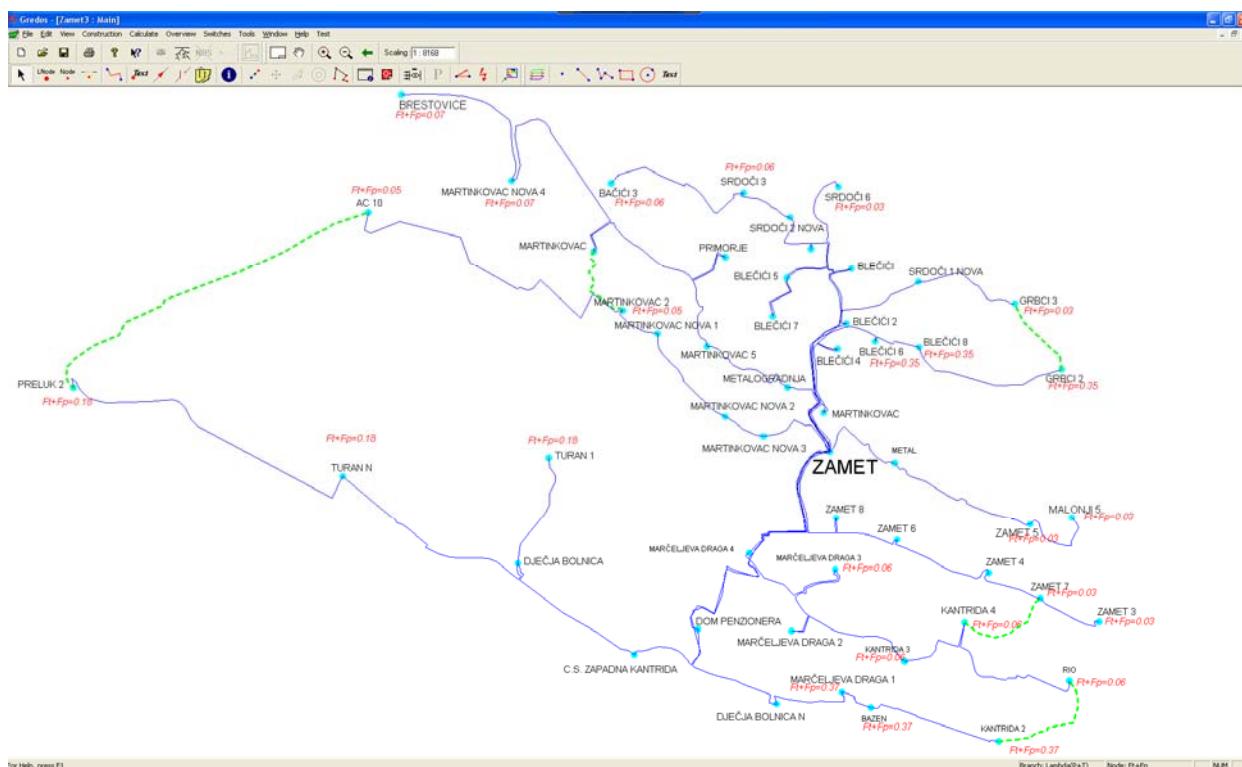


Zamet2.RLB - Notepad																
File Edit Format View Help																
RELIABILITY RESULTS:																
F-frequency, Tf=average hour/interruption, E -Total Energy Unsupplied																
t-(transient) ... SHORT																
p-(permanent) ... LONG																
H-Nb of hours interrupt/year, Hps- at reswitching, Hpr0-at repair																
wl- nodal energy insupplied, Pl- nodal consumption																
Tf=H/F, H=Hpr0+Hps; int-interruption, Y-year, h-hours																
Code	Name	Pl MW	Wl MWh	F int/Y	H h/Y	Ft int/Y	Ht h/Y	Fp int/Y	Hp h/int	Hp h/Y	Hps h/Y	Hpr0 h/Y	HprI h/L	Hpru h/L		
11010001	Preluk 2	0.400	2.702	0.1	6.76	0.00	0.00	0.15	46.08	6.76	0.15	6.61	0.0000	0.0000		
11010002	Turan N	0.250	1.424	0.1	5.69	0.00	0.00	0.15	38.84	5.69	0.15	5.55	0.0000	0.0000		
11010003	Dječja Bolnica	0.400	1.982	0.1	4.96	0.00	0.00	0.15	33.80	4.96	0.15	4.81	0.0000	0.0000		
11010004	C.S. Zapadna Kantrida	0.400	1.784	0.1	4.46	0.00	0.00	0.15	30.43	4.46	0.15	4.32	0.0000	0.0000		
11010005	Dom Penzionera	0.400	0.479	0.1	1.20	0.00	0.00	0.15	8.16	1.20	0.15	1.05	0.0000	0.0000		
11010006	Marčeljeva Praga 4	0.400	0.275	0.1	0.69	0.00	0.00	0.15	4.69	0.69	0.15	0.54	0.0000	0.0000		
11010007	Dječja Bolnica N	0.630	10.661	0.4	16.92	0.00	0.00	0.36	46.59	16.92	0.36	16.56	0.0000	0.0000		
11010008	Marčeljeva Praga 3	0.300	0.298	0.1	0.99	0.00	0.00	0.05	18.21	0.99	0.05	0.94	0.0000	0.0000		
11010009	Kantrida 3	0.300	0.540	0.1	1.80	0.00	0.00	0.05	32.98	1.80	0.05	1.75	0.0000	0.0000		
11010010	Marčeljeva Praga 1	0.400	6.880	0.4	17.20	0.00	0.00	0.36	47.36	17.20	0.36	16.84	0.0000	0.0000		
11010011	Bazen 1	0.630	10.909	0.4	17.32	0.00	0.00	0.36	47.68	17.32	0.36	16.95	0.0000	0.0000		
11010012	Kantrida 2	0.400	7.099	0.4	17.75	0.00	0.00	0.36	48.87	17.75	0.36	17.39	0.0000	0.0000		
11010013	Kantrida 4	0.300	0.627	0.1	2.09	0.00	0.00	0.05	38.26	2.09	0.05	2.04	0.0000	0.0000		
11010014	Zamet 6	0.250	0.184	0.0	0.74	0.00	0.00	0.03	22.95	0.74	0.03	0.71	0.0000	0.0000		
11010016	Martinkovac	0.250	0.060	0.0	0.24	0.00	0.00	0.02	11.28	0.24	0.02	0.22	0.0000	0.0000		
11010017	Metalogradnja	0.300	0.113	0.1	0.38	0.00	0.00	0.06	5.87	0.38	0.06	0.31	0.0000	0.0000		
11010018	Blečići 4	0.400	0.221	0.0	0.55	0.00	0.00	0.02	25.86	0.55	0.02	0.53	0.0000	0.0000		
11010019	Turan 1	0.400	2.134	0.1	5.33	0.00	0.00	0.15	36.39	5.33	0.15	5.19	0.0000	0.0000		
11010020	Rfo	0.300	0.788	0.1	2.63	0.00	0.00	0.05	48.10	2.63	0.05	2.57	0.0000	0.0000		
11010021	Marčeljeva Praga 2	0.300	0.406	0.1	1.35	0.00	0.00	0.05	24.81	1.35	0.05	1.30	0.0000	0.0000		
11010022	Zamet 3	0.630	0.960	0.0	1.52	0.00	0.00	0.03	47.48	1.52	0.03	1.49	0.0000	0.0000		
11010023	Zamet 7	0.400	0.519	0.0	1.30	0.00	0.00	0.03	40.45	1.30	0.03	1.27	0.0000	0.0000		
11010024	Zamet 4	0.400	0.435	0.0	1.09	0.00	0.00	0.03	33.87	1.09	0.03	1.06	0.0000	0.0000		
11010025	Zamet 8	0.400	0.193	0.0	0.48	0.00	0.00	0.03	15.03	0.48	0.03	0.45	0.0000	0.0000		
11010026	Malonji 5	0.800	0.890	0.0	1.11	0.00	0.00	0.02	46.94	1.11	0.02	1.09	0.0000	0.0000		
11010027	Zamet 5	0.400	0.334	0.0	0.83	0.00	0.00	0.02	35.19	0.83	0.02	0.81	0.0000	0.0000		
11010028	Metal	0.630	0.211	0.0	0.33	0.00	0.00	0.02	14.13	0.33	0.02	0.31	0.0000	0.0000		
11010029	AC 10	0.400	0.825	0.0	2.06	0.00	0.00	0.04	47.87	2.06	0.04	2.02	0.0000	0.0000		
11010030	Martinkovac 2	0.250	0.241	0.0	0.96	0.00	0.00	0.04	22.36	0.96	0.04	0.92	0.0000	0.0000		
11010031	Martinkovac Nova 1	0.400	0.324	0.0	0.81	0.00	0.00	0.04	18.80	0.81	0.04	0.77	0.0000	0.0000		
11010032	Martinkovac Nova 2	0.250	0.115	0.0	0.46	0.00	0.00	0.04	10.67	0.46	0.04	0.42	0.0000	0.0000		
11010033	Martinkovac Nova 3	0.400	0.128	0.0	0.32	0.00	0.00	0.04	7.44	0.32	0.04	0.28	0.0000	0.0000		
11010034	Martinkovac Nova 4	0.400	1.010	0.1	2.53	0.00	0.00	0.06	39.52	2.53	0.06	2.46	0.0000	0.0000		
11010035	Martinkovac 3	0.400	0.693	0.1	1.73	0.00	0.00	0.06	27.13	1.73	0.06	1.67	0.0000	0.0000		
11010036	Primorje	0.630	0.699	0.1	1.11	0.00	0.00	0.06	17.36	1.11	0.06	1.05	0.0000	0.0000		
11010037	Martinkovac 5	0.300	0.216	0.1	0.72	0.00	0.00	0.06	11.28	0.72	0.06	0.66	0.0000	0.0000		
11010038	Bačići 3	0.400	1.037	0.1	2.59	0.00	0.00	0.05	48.09	2.59	0.05	2.54	0.0000	0.0000		
11010039	Srdoči 3	0.400	0.826	0.1	2.06	0.00	0.00	0.05	38.30	2.06	0.05	2.01	0.0000	0.0000		
11010040	Srdoči 2 - Nova	0.400	0.751	0.1	1.88	0.00	0.00	0.05	34.82	1.88	0.05	1.82	0.0000	0.0000		
11010041	Blečići 3	0.300	0.506	0.1	1.68	0.00	0.00	0.05	31.26	1.68	0.05	1.63	0.0000	0.0000		
11010042	Srdoči 6	0.400	0.427	0.0	1.07	0.00	0.00	0.02	46.86	1.07	0.02	1.05	0.0000	0.0000		
11010043	Blečići 7	0.400	0.488	0.1	1.22	0.00	0.00	0.05	22.62	1.22	0.05	1.17	0.0000	0.0000		
11010044	Blečići 2	0.400	0.227	0.1	0.57	0.00	0.00	0.05	10.51	0.57	0.05	0.51	0.0000	0.0000		
11010045	Blečići 1	0.400	0.326	0.1	0.82	0.00	0.00	0.05	15.14	0.82	0.05	0.76	0.0000	0.0000		
11010046	Blečići 5	0.300	0.314	0.1	1.05	0.00	0.00	0.05	19.42	1.05	0.05	0.99	0.0000	0.0000		
11010047	Blečići 8	0.400	0.400	0.0	1.00	0.00	0.00	0.02	46.71	1.00	0.02	0.98	0.0000	0.0000		
11010048	Blečići 6	0.400	0.337	0.0	0.84	0.00	0.00	0.02	39.31	0.84	0.02	0.82	0.0000	0.0000		
11010049	Grbci 2	0.400	0.588	0.0	1.47	0.00	0.00	0.03	47.42	1.47	0.03	1.44	0.0000	0.0000		
11010050	Grbci 3	0.400	0.472	0.0	1.18	0.00	0.00	0.03	47.05	1.18	0.02	1.16	0.0000	0.0000		
11010051	Srdoči 1 - Nova	0.400	0.332	0.0	0.83	0.00	0.00	0.03	33.09	0.83	0.02	0.81	0.0000	0.0000		
11010053	BRESTOVICE	0.400	1.233	0.1	3.08	0.00	0.00	0.06	48.23	3.08	0.06	3.02	0.0000	0.0000		
E= 65.62 MWh																
COSTS:																
Load factor(fo)= 1.00																
Cost of Short Interruptions (ckwt): 0.00 EUR/kw																
Cost of Long Interruptions (ckwp): 0.00 EUR/kw																
Cost of Energy Unsupplied (ckwh) : 0.08 EUR/kwh																
Short Interruptions Costs: 0 EUR (Pl*Fo*Ft= 0 kw)																
Long Interruptions Costs: 0 EUR (Pl*Fo*Ft= 1792 kw)																
Energy Unsupplied Costs: 5250 EUR (E= 65624 kwh)																
TOTAL: 5250 EUR																
Branch Backup Supply Frequency:																

Slika 5. Tekstualni prikaz proračuna pouzdanosti dijela raspleta buduće TS 110/20 kV Zamet

Slijedeći je korak „pojačati mrežu“, tj. dodati poprečne grane i prstenove, te potom pokrenuti proračun pouzdanosti i usporediti rezultate sa prethodnim izračunom. Topologija mreže je modificirana na taj način da su dodane veze između TS Preluk2 i TS AC10, TS Martinkovac i TS Martinkovac2, TS Grbci2 i TS Grbci 3, TS Kantrida 4 i TS Zamet 7, i konačno TS Kantrida 2 i TS Rio. Na tim su vezama postavljene radijalizacije mreže (na slici 6. prikazano zelenom crtkanom bojom) kako bi se osigurala pogonska otvorenost prostorno zatvorene mreže. Ponovno je izvršen proračun pouzdanosti, pri čemu je grafički prikaz rješenja dan na slici 6.





Slika 6. Grafički prikaz proračuna pouzdanosti „pojačanog“ dijela raspleta buduće TS 110/20 kV Zamet

### 3.3. Analiza rezultata proračuna pouzdanosti

Iz analize tekstualnog prikaza rezultata proračuna na slici 7. vidljivo je kako su se promijenili pokazatelji pouzdanosti modificirane mreže. Za primjer će se uzeti potrošački čvor TS 20/0.4 kV Preluk 2, čiji će se najvažniji pokazatelji komparirati u tablici II.:

Tablica II. Usporedba pokazatelja pouzdanosti za potrošačku trafostanicu TS 20/0.4 kV Preluk 2

TS 20/0.4 kV Preluk 2	Prostorno otvorena mreža	Prostorno zatvorena mreža
Ukupna godišnja frekvencija prekida čvora $i$ $F_i$ [prekida/god]	0.1	0.2
Ukupno godišnje trajanje prekida čvora $H$ [h/god]	6.76	0.18
Godišnja neisporučena energija za čvor $i$ $W_i$ [MWh]	2.702	0.072
Prosječan broj sati pri trajnom prekidu čvora $i$ $T_P$ [h/prekid]	46.08	1

Također, tablicom III. su prikazani i uspoređeni podaci o ukupnoj godišnjoj neisporučenoj električnoj energiji  $E$  i troškovima neisporučene energije  $T$ , u oba primjera dijela raspleta TS 110/20 kV Zamet.

F-frequency, Tf=average hour/inerruption, E -Total Energy Unsupplied  
t-(transient) ... SHORT  
p-(permanent) ... LONG  
H-Nb of hours interrupt/year, Hps- at reswitching, Hpr0-at repair  
Wl- nodal energy insupplied, Pl- nodal consumption

Tf=H/F, H=Hpr0+Hps; int-interruption, Y-year, h-hours

Code	Name	Pl	Wl	F	H	Ft	Ht	Fp	Hp	Hps	Hpr0	HprI	HprU
		MW	MWh	int/Y	h/Y	int/Y	h/Y	int/Y	h/Y	h/Y	h/Y	h/L	h/L
11010001	Preluk 2	0.400	0.072	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010002	Turan N	0.250	0.045	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010003	Dječja Bolnica	0.400	0.072	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010004	C.S. Zapadna Kantrida	0.400	0.072	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010005	Dom Penzionera	0.400	0.072	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010006	Marčeljeva Draga 4	0.400	0.072	0.2	0.18	0.00	0.00	0.18	1.00	0.18	0.18	0.00	0.0000
11010007	Dječja Bolnica N	0.630	0.234	0.4	0.37	0.00	0.00	0.37	1.00	0.37	0.37	0.00	0.0000
11010008	Marčeljeva Draga 3	0.300	0.019	0.1	0.06	0.00	0.00	0.06	0.99	0.06	0.06	0.00	0.0000
11010009	Kantrida 3	0.300	0.019	0.1	0.06	0.00	0.00	0.06	0.99	0.06	0.06	0.00	0.0000
11010010	Marčeljeva Draga 1	0.400	0.149	0.4	0.37	0.00	0.00	0.37	1.00	0.37	0.37	0.00	0.0000
11010011	Bazen 1	0.630	0.234	0.4	0.37	0.00	0.00	0.37	1.00	0.37	0.37	0.00	0.0000
11010012	Kantrida 2	0.400	0.149	0.4	0.37	0.00	0.00	0.37	1.00	0.37	0.37	0.00	0.0000
11010013	Kantrida 4	0.300	0.019	0.1	0.06	0.00	0.00	0.06	0.99	0.06	0.06	0.00	0.0000
11010014	Zamet 6	0.250	0.008	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010016	Martinkovac	0.250	0.034	0.3	0.14	0.21	0.00	0.14	0.99	0.14	0.14	0.00	0.0000
11010017	Metalogradnja	0.300	0.022	0.1	0.07	0.00	0.00	0.07	0.99	0.07	0.07	0.00	0.0000
11010018	Blečić 4	0.400	0.055	0.3	0.14	0.21	0.00	0.14	0.99	0.14	0.14	0.00	0.0000
11010019	Turan 1	0.400	0.223	0.2	0.56	0.00	0.00	0.18	3.10	0.56	0.18	0.38	0.0000
11010020	Rio	0.300	0.019	0.1	0.06	0.00	0.00	0.06	0.99	0.06	0.06	0.00	0.0000
11010021	Marčeljeva Draga 2	0.300	0.019	0.1	0.06	0.00	0.00	0.06	0.99	0.06	0.06	0.00	0.0000
11010022	Zamet 3	0.630	0.162	0.0	0.26	0.00	0.00	0.03	8.00	0.26	0.03	0.23	0.0000
11010023	Zamet 7	0.400	0.012	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010024	Zamet 4	0.400	0.012	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010025	Zamet 8	0.400	0.012	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010026	Malonji 5	0.800	0.897	0.0	1.12	0.00	0.00	0.03	33.89	1.12	0.03	1.09	0.0000
11010027	Zamet 5	0.400	0.337	0.0	0.84	0.00	0.00	0.03	25.48	0.84	0.03	0.81	0.0000
11010028	Metal	0.630	0.217	0.0	0.34	0.00	0.00	0.03	10.40	0.34	0.03	0.31	0.0000
11010029	AC 10	0.400	0.021	0.1	0.05	0.00	0.00	0.05	0.98	0.05	0.05	0.00	0.0000
11010030	Martinkovac 2	0.250	0.013	0.1	0.05	0.00	0.00	0.05	0.98	0.05	0.05	0.00	0.0000
11010031	Martinkovac Nova 1	0.400	0.021	0.1	0.05	0.00	0.00	0.05	0.98	0.05	0.05	0.00	0.0000
11010032	Martinkovac Nova 2	0.250	0.013	0.1	0.05	0.00	0.00	0.05	0.98	0.05	0.05	0.00	0.0000
11010033	Martinkovac Nova 3	0.400	0.021	0.1	0.05	0.00	0.00	0.05	0.98	0.05	0.05	0.00	0.0000
11010034	Martinkovac Nova 4	0.400	0.346	0.1	0.86	0.00	0.00	0.07	11.79	0.86	0.07	0.79	0.0000
11010035	Martinkovac 3	0.400	0.029	0.1	0.07	0.00	0.00	0.07	0.99	0.07	0.07	0.00	0.0000
11010036	Primorje	0.630	0.046	0.1	0.07	0.00	0.00	0.07	0.99	0.07	0.07	0.00	0.0000
11010037	Martinkovac 5	0.300	0.022	0.1	0.07	0.00	0.00	0.07	0.99	0.07	0.07	0.00	0.0000
11010038	Bačići 3	0.400	1.041	0.1	2.60	0.00	0.00	0.06	41.10	2.60	0.06	2.54	0.0000
11010039	Srdoči 3	0.400	0.829	0.1	2.07	0.00	0.00	0.06	32.76	2.07	0.06	2.01	0.0000
11010040	Srdoči 2 - Nova	0.400	0.755	0.1	1.89	0.00	0.00	0.06	29.80	1.89	0.06	1.82	0.0000
11010041	Blečići 3	0.300	0.508	0.1	1.69	0.00	0.00	0.06	26.77	1.69	0.06	1.63	0.0000
11010042	Srdoči 6	0.400	0.431	0.0	1.08	0.00	0.00	0.03	33.47	1.08	0.03	1.05	0.0000
11010043	Blečići 7	0.400	0.492	0.1	1.23	0.00	0.00	0.06	19.41	1.23	0.06	1.17	0.0000
11010044	Blečići 2	0.400	0.230	0.1	0.58	0.00	0.00	0.06	9.10	0.58	0.06	0.51	0.0000
11010045	Blečići 5	0.400	0.330	0.1	0.83	0.00	0.00	0.06	13.04	0.83	0.06	0.76	0.0000
11010046	Blečići 8	0.300	0.317	0.1	1.06	0.00	0.00	0.06	16.68	1.06	0.06	0.99	0.0000
11010047	Blečići 6	0.400	0.055	0.3	0.14	0.21	0.00	0.14	0.99	0.14	0.14	0.00	0.0000
11010048	Grbci 2	0.400	0.055	0.3	0.14	0.21	0.00	0.14	0.99	0.14	0.14	0.00	0.0000
11010049	Grbci 3	0.400	0.055	0.3	0.14	0.21	0.00	0.14	0.99	0.14	0.14	0.00	0.0000
11010050	Grbci 1	0.400	0.013	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010051	Srdoči 1 - Nova	0.400	0.013	0.0	0.03	0.00	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03	0.00	0.0000
11010053	BRESTOVICE	0.400	0.568	0.1	1.42	0.00	0.00	0.07	19.39	1.42	0.07	1.35	0.0000

E= 9.48 MWh

#### COSTS:

Load factor(fo)= 1.00  
Cost of Short Interruptions (ckwt): 0.00 EUR/kw  
Cost of Long Interruptions (ckwp): 0.00 EUR/kw  
Cost of Energy Unsupplied (ckwh): 0.08 EUR/kwh  
Short Interruptions Costs: 0 EUR (Pl\*fo\*Ft= 392 kw)  
Long Interruptions Costs: 0 EUR (Pl\*fo\*Ft= 2220 kw)  
Energy Unsupplied Costs: 758 EUR (E= 9481 kwh)  
TOTAL: 758 EUR

Branch Backup Supply Frequency:  
-11010041 Martinkovac 3 Martinkovac 2 0.0540  
-11010064 Kantrida 2 Rio 0.3930  
-11010065 Kantrida 4 Zamet 7 0.0688  
-11010067 Preluk 2 AC 10 0.1664  
-11010068 Grbci 2 Grbci 3 0.1505

Slika 7. Tekstualni prikaz proračuna pouzdanosti „pojačanog“ dijela raspleta buduće TS 110/20 kV Zamet

Tablica III. Usporedba pokazatelja pouzdanosti za dio raspleta buduće TS 110/20 kV Zamet

Rasplet TS 110/20 kV Zamet	Prostorno otvorena mreža	Prostorno zatvorena mreža
Očekivana godišnja neisporučena električna energija u sustavu <i>E [MWh/god]</i>	65.62	9.48
Troškovi očekivane godišnje neisporučene električne energije u sustavu <i>T [€]</i>	5250	758

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan primjer proračuna pouzdanosti kao kriterija pri planiranju distribucijskih mreža. Usporedbom pokazatelja pouzdanosti očigledno je njihovo povećanje u slučaju prostorno zatvorene mreže, pri čemu se u programskom paketu numerički uzima u obzir mogućnost rezervnog napajanja. Vidljivo je da su pokazatelji pouzdanosti razdjelne mreže (očekivana godišnja neisporučena električna energija, troškovi neisporučene električne energije, ukupno godišnje trajanje prekida potrošačkih čvorova,...), znatno povoljniji za slučaj prostornog zatvaranja razdjelne mreže. Između ostaloga, za primjer trafostanice 20/0.4 kV Preluk 2, godišnje trajanje prekida  $H$  potrošačkog čvora se, sa 6.76 sati godišnje (u slučaju pogonski i prostorno otvorene mreže), smanjilo na 0.18 sati u godini dana. Također, ukupna godišnja neisporučena električna energija  $E$  dijela budućeg raspjeta TS 110/20 kV Zamet, se smanjila sa 65.62 MWh na 9.48 MWh.

Naravno da svako prostorno zatvaranje razdjelne mreže mora predstavljati ravnotežu kriterija ekonomičnosti i kriterija pouzdanosti. Pretjerana eksploatacija pouzdanosti odraziti će se kao preizgrađenost razdjelne mreže, što predstavlja financijski gubitak za Operatora distribucijskog sustava. S druge strane, pretjerana eksploatacija kriterija ekonomičnosti odraziti će se na podizgrađenost mreže i, s time u svezi, znatno učestalije ispade potrošačkih čvorišta. Potonje će u budućnosti daljnjeg otvaranja i reguliranja tržišta električnom energijom, također predstavljati gubitak za Operatora distribucijskog sustava, zbog realne mogućnosti uvođenja obveze plaćanja penala za neisporučenu električnu energiju.

Kao zaključak nameće se nužnost implementacije proračuna pouzdanosti pri planiranju razdjelnih mreža, kako bi se numerički mogli kvantificirati pokazatelji pouzdanosti buduće mreže. U kombinaciji sa rezultatima ostalih proračuna razdjelnih mreža (tokova snaga, padova napona, kratkog spoja, stabilnosti, ...), vrednovati će se kvaliteta varijantnog rješenja i sa aspekta zadovoljenja energetske parametra i sa aspekta očuvanja rentabilnosti poslovanja Operatora distribucijskog sustava.

#### LITERATURA

- [1] Mohar T., Valenčić L., Razvoj programa Gredos, Pregled novosti in uporabe programa do verzije Gredos 10.0 Študija št.: 1811, Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, 2006.
- [2] Šljivac D., Nikolovski S., Pouzdanost opskrbe u uvjetima dereguliranog tržišta električne energije – osnovni principi, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 6. savjetovanje, Cavtat, 09 – 13.11.2003.
- [3] Nikolovski S., Osnove analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava, Elektrotehnički fakultet sveučilišta J.J. Strossmayera, Osijek, 1995.
- [4] Komen V., Model potpore odlučivanju pri planiranju razdjelnih mreža, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računalstva sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [5] Skok M., Evolucijski algoritam za dinamičko planiranje razdjelnih mreža, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računalstva, Zagreb, 2005.
- [6] Valenčić L., Mohar T., Kriteriji načrtovanja razvoja distributivnih omrežij II. del (zanesljivost SN omrežij), Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, 2000.
- [7] Hrkec D., Vidović D., Pavić A., Bošković M., Pokazatelji pouzdanosti napajanja električnom energijom u distribucijskoj mreži, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 1. savjetovanje, Šibenik, 18 – 21.05.2008.
- [8] Short T.A., Distribution Reliability and Power Quality, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [9] Brown R.E., Electric Power Distribution Reliability, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009.