

ENEL OPTIMALNA REKONFIGURACIJA MREŽE**ENEL OPTIMAL NETWORK RECONFIGURATION**Vladan Rakić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je prikazan problem optimalne rekonfiguracije mreža sa osvrtom na minimalne gubitke aktivne električne energije kao optimizacionog kriterijuma. Detaljno su opisani algoritmi za proračune tokova snaga, proračune gubitaka električne energije i algoritam izmene grana za optimalnu rekonfiguraciju mreže koji objedinjeni sačinjavaju inovativni pristup rešenja postavljenog problema pod nazivom *Enel optimalna rekonfiguracija mreža*. Na kraju je izvršena verifikacija izloženog algoritma na test mreži.

Ključne reči: *Optimalna rekonfiguracija mreže, gubici električne energije, distributivni sistemi*

Abstract – *This paper displays a problem of Optimal Network Reconfiguration with emphasis on minimal active Energy Losses optimization criterion. Algorithms for Load Flow, Energy Losses and Network Reconfiguration, Branch Exchange combined comprise innovative solution for proposed problem named Enel Optimal Network Reconfiguration. Finally, proposed algorithm is verified on test scheme.*

Key words: *Optimal Network Reconfiguration, energy loss, distributive systems*

1. UVOD

Većina distributivnih mreža (DM) se projektuje u vidu radijalnih mreža, a sve u cilju postizanja efikasnije koordinacije zaštite pojedinih elemenata mreže [1]. U prisustvu kvara, prekidačkom opremom se može manipulirati u cilju izolovanja dela mreže sa kvarom i prebacivanja izolovane potrošnje na zdrav deo mreže. U normalnim uslovima, ovi prekidači se mogu koristiti za rekonfiguraciju, u cilju smanjenja gubitaka aktivne snage, povećanja pouzdanosti ili balansiranja opterećenja u mreži [2]. Isporuka električne energije od izvora do krajnjih potrošača je uvek praćena gubicima. Ako se u obzir uzme da su distributivna preduzeća suočena sa povećanim pritiskom za ostvarivanje veće efikasnosti, da su uvedeni podsticaji i penali koji elektrodistribucija plaća potrošačima zbog nenajavljenih prekida napajanja ili lošeg kvaliteta isporučene električne energije, i da gubici direktno utiču na finansijska pitanja i efikasnost distributivnih postrojenja, jasno je da redukcija gubitaka predstavlja cilj svakog distributivnog preduzeća [3]. Jedan od efikasnih načina za postizanje ovog cilja jeste optimalna rekonfiguracija DM (ORDM).

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Goran Švenda, red.prof.

2. PRORAČUN TOKOVA SNAGA

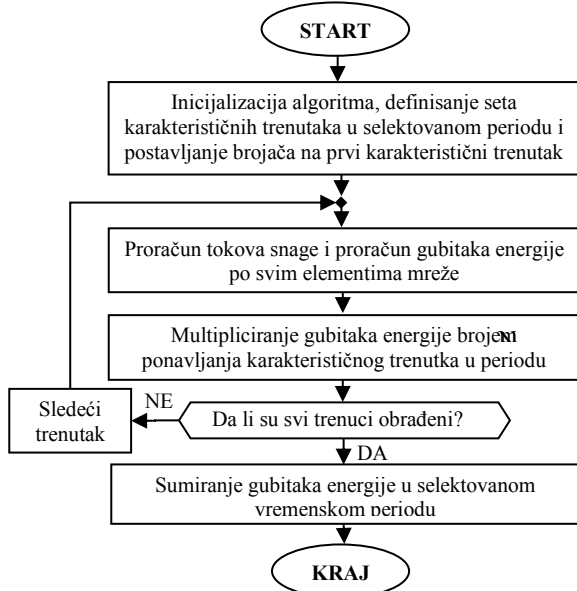
Proračun tokova snaga predstavlja proračun promenljivih stanja (režima) mreže, gde su poznati napon izvora napajanja mreže i potrošnje u svim čvorovima mreže. Na osnovu ovih vrednosti se proračunavaju vrednosti modula i faznih stavova napona u preostalim čvorovima mreže. Ovim je definisano stanje mreže. Dalje se vrši proračun ostalih režimskih promenljivih. Metode za proračun tokova snaga koje se koriste u DM razlikuju se od onih koje se koriste u prenosnim mrežama. Većina poznatih iterativnih postupaka koji se koriste u prenosnim mrežama bazirani su na matričnom postupku, dok se u DM koriste specijalizovani algoritmi koji su orijentisani ka granama [1]. Ovi postupci polaze od glavne pretpostavke, a to je da je DM radijalna. Kod metoda orijentisanih ka granama, sa porastom dimenzija, potrebe za memorijom i vreme proračuna rastu linearno, dok kod matričnih metoda potrebe za memorijom rastu kvadratno, a vreme proračuna sa trećim stepenom. Pored ovoga, pokazalo se da algoritmi orijentisani ka granama veoma brzo konvergiraju, postizujući vrlo veliku tačnost proračuna. Metoda izabrana za proračune u ovom radu je orijentisana ka granama, a to je metoda sumiranja struja, poznatija kao Shirmohammadi-ev algoritam [1].

3. ANALIZA GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Vrednost gubitaka je jedan od direktnih pokazatelja efikasnosti realizacije osnovne funkcije DM, prenosa energije od prenosne mreže do krajnjih potrošača. Analiza gubitaka u DM je funkcija koja se koristi za proračun gubitaka aktivne i reaktivne snage/energije u mreži kao celini, kao i gubitka na elementima te mreže. Kada se analiza odvija za neki proizvoljan vremenski trenutak, tada je u pitanju analiza gubitaka snage. Kod analize gubitaka energije potrebno je raspolagati sa vrednostima gubitaka snage u funkciji vremena. Integral gubitaka snage u intervalu od interesa predstavlja ukupnu vrednost gubitaka energije.

Algoritam za proračun gubitaka električne energije se u svojoj osnovi oslanja na rezultate tokova snaga [1]. Prvo se pristupa inicijalizaciji algoritma što podrazumeva selektovanje i postavljanje vremenskog perioda za koji će biti vršen proračun gubitaka električne energije, vremenski korak prolaska kroz selektovani vremenski period i deo mreže nad kojim će se vršiti proračuni gubitaka električne energije. Posle inicijalizacije algoritma na osnovu selektovanog vremenskog perioda, koraka iteracije kao i same mreže, kreira se set karakterističnih trenutaka. Skup karakterističnih trenutaka se dobija izvlačenjem sezona iz selektovanog vremenskog perioda, karakteri-

stičnih dana iz sezona i karakterističnih trenutaka iz karakterističnih dana. Karakterističan dan je dan koji se ciklično ponavlja jednom ili više puta svake sedmice unutar jedne sezone. Sezone su periodi u okviru kojih se promena režima DM ponavlja ciklično na nivou jedne sedmice. Kada se ima set karakterističnih trenutaka, pristupa se iterativnom postupku. Postavlja se na prvi karakteristični trenutak, za isti se vrši proračun tokova snage i računaju se gubici snage odnosno energije za svaki element selektovanog dela DM. Dobijeni gubici električne energije se multipliciraju brojem ponavljanja karakterističnog trenutka unutar selektovanog vremenskog perioda. Iterativni postupak se vrši sve dok se ne obrade svi karakteristični trenuci iz prethodno definisanog seta. Kada se obrade svi karakteristični trenuci sumiraju se gubici električne energije za ceo selektovani vremenski period po elementima mreže, a sumiranjem istih se dobijaju ukupni gubici aktivne i reaktivne električne energije. Ovim se završava algoritam proračuna gubitaka električne energije prikazan na slici 2.



Slika 1. Blok dijagram algoritma proračuna gubitaka električne energije

4. OPTIMALNA REKONFIGURACIJA DM

Problem određivanja optimalne konfiguracije mreže je kompleksan, kombinatoran, nelinearan i diskretan optimizacioni problem. Za rešenje ovog problema koriste se: optimizacione metode [1,4], kombinatorno pretraživanje [1] i heurističke metode [1,6]. Izvorni algoritmi vezani su za metode bazirane na heuristici i optimalnim tokovima snaga. Suština ovih algoritama je da se maksimalnim poznavanjem fizike problema na najkraći način dođe do kvalitetnih radijalnih konfiguracija.

Heuristički algoritam korišćen u radu je algoritam izmene grana. "Izmena grana" zapravo znači "izmena mesta" normalno otvorenog (NO) rasklopnog uređaja sa njime spregnutim normalno zatvorenim (NZ) rasklopnim uređajem [4]. Glavna prednost ovog algoritma jeste izvršavanje tokova snaga samo u slučaju kada je postignuto poboljšanje vrednosti kriterijumske funkcije. Osnovna mana algoritma jeste zavisnost konačnog rešenja od početnog režima i topološkog stanja mreže. Kako je u svakom trenutku proračuna radijalnost uvek održana,

mogu se primenjivati metode za proračun tokova snaga orijentisane ka granama. Blok dijagram algoritma prikazan je na slici 1.

Kao kriterijum, odabrana je minimizacija gubitaka aktivne snage. Kriterijumska funkcija (KF) za procenu smanjenja gubitaka aktivne snage nakon izmene mesta NO/NZ prekidača, može da se predstavi kao [3]:

$$IG^{(h)} = \sum_{i=1}^{n_{ev}} \sum_{j \in \alpha_{d_i}^h} r_{ij} (J_{ij}^h)^2, \quad (1)$$

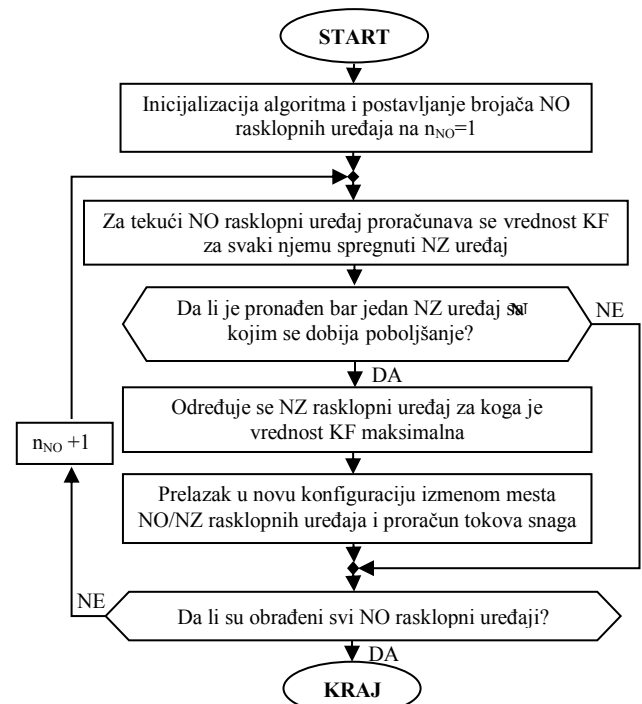
gde je:

n_{ev} – ukupan broj izvoda,

r_{ij} – rezistansa grane j koja pripada izvodu i ,

$\alpha_{d_i}^h$ – skup indeksa grana izvoda i u konfiguraciji h ,

J_{ij}^h – moduo struje grane j izvoda i u konfiguraciji h .



Slika 2. Blok dijagram algoritma izmene grana [1]

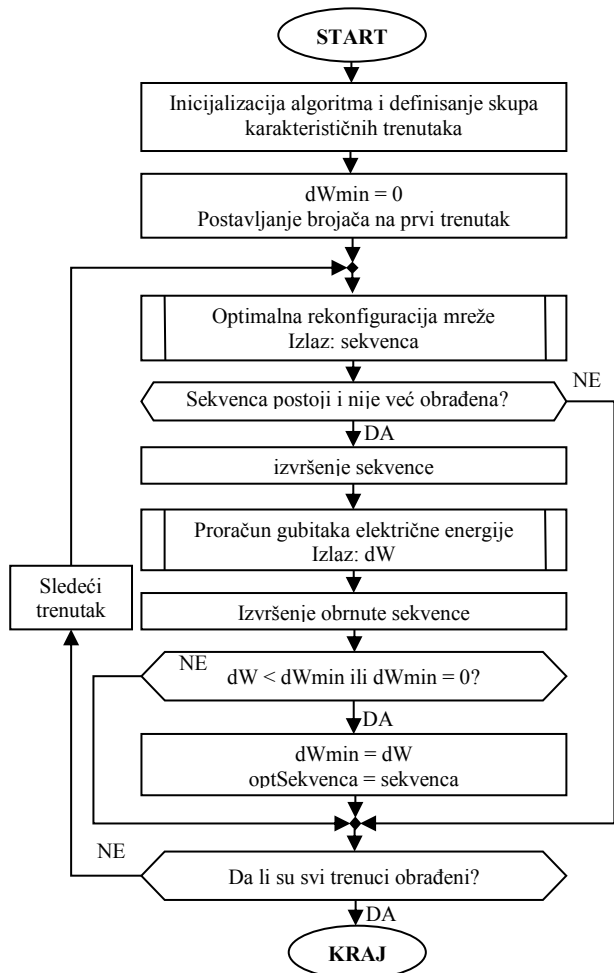
Ako je sa supskriptom h označena konfiguracija nakon izmene mesta NO/NZ rasklopnih uređaja, a sa $h-1$ konfiguracija pre te izmene, vrednost kriterijuma je [1]:

$$IG^{(h)} = IG^{(h-1)} - \Delta IG \quad (2)$$

$$\Delta IG^{(h-1)} = 2 \cdot \text{Re} \left[(J_j^{h-1})^* (\Delta V_k^{h-1} - \Delta V_m^{h-1}) \right] - |J_j^{h-1}|^2 \cdot R_{petlje} \quad (3)$$

gde su sa $IG^{(h)}$, $IG^{(h-1)}$ i ΔIG naznačene vrednosti gubitaka aktivne snage za konfiguracije h i $h-1$ i promena te vrednosti, respektivno; sa J_j^{h-1} struja grane j u radijalnoj konfiguraciji $h-1$; sa ΔV_k^{h-1} i ΔV_m^{h-1} vrednosti padova napona čvorova levo i desno od razmatranog NO rasklopnog uređaja i sa R_{petlje} rezistansa konture između dva napojna čvora koja sadrže granu sa NO rasklopnim uređajem. Pri izvođenju algoritma izmene grana dovoljno je proračunati samo vrednost izraza (1). Ako je ta vrednost veća od nule, tada su izmenom mesta razmatranog spregnutog para NO/NZ rasklopnih uređaja gubici aktivne snage smanjeni.

Pošto je problem rekonfiguracije vezan za određeni vremenski trenutak odnosno jedan režim, dok se gubici aktivne električne energije vezuju za određeni vremenski period, odnosno veći broj režima, postavlja se pitanje da li je moguće iskoristiti algoritam izmene grana za pronalaženje topološke konfiguracije mreže pri kojoj bi se imali minimalni gubici aktivne električne energije za selektovani vremenski period. Kao rešenje problema izneta je Enel optimalna rekonfiguracija DM, slika 3.



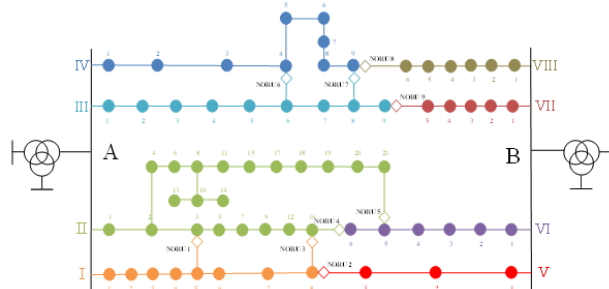
Slika 3 – Algoritam Enel optimalne rekonfiguracije mreže

Osnovna ideja metodologije je objedinjenje datih algoritma za proračun gubitaka električne energije DM i algoritma rekonfiguracije DM zasnovanog na razmeni grana. Početni korak algoritma je inicijalizaciji, što podrazumeva postavljanje željenog vremenskog perioda proračuna, odabir vremenskog korak prolaska kroz selektovani vremenski period i selektovanje dela mreže nad kojim će se vršiti proračuni. Posle inicijalizacije algoritma, na osnovu selektovanog vremenskog perioda, koraka i selektovane mreže, kreira se set karakterističnih trenutaka. Inicijalno, vrednost minimalnih gubitaka aktivne električne energije (dW_{min}) se postavlja na nulu. Zatim se pristupa iterativnom postupku sukcesivnog izvršenja algoritma izmene grana i po potrebi izvršenja algoritma proračuna gubitaka električne energije. Postavlja se na prvi karakteristični trenutak i nad istim se vrši algoritam rekonfiguracije DM. Koriste se minimalni gubici aktivne snage kao jedini optimizacioni kriterijum, željeni tipovi rasklopne opreme kao resursi i opterećenje sekcija i transformatora kao ograničenja. Kao rezultat se dobija

sekvenca manipulacija NO i NZ rasklopnih uređaja, čijim izvršenjem se prelazi u novo topološko stanje mreže. U slučaju da dobijena sekvenca nije prazna, niti prethodno obrađena, ista se izvrši i za novo dobijeno topološko stanje se proračunaju gubici električne energije nad selektovanim vremenskim periodom i sa istim korakom. Dobijena vrednost gubitaka aktivne električne energije (dW) se poredi sa trenutnom vrednošću dW_{min} i u slučaju da im je vrednost manja ili da je trenutna vrednost dW_{min} jednaka nuli, isti se postavljaju za minimalne, a trenutna sekvenca za optimalnu sekvencu ($optSekvenca$) manipulacija rasklopnim uređajima. Zatim se izvršava obrnuta sekvenca, sekvenca u kojoj su svi rasklopnih uređaji ostali isti, a redosled manipulacija i tip akcija (otvaranje, zatvaranje) koji se vrše nad rasklopnim uređajima obrnuti u odnosu na sekvencu dobijenu od strane optimalne rekonfiguracije DM. Ovim se selektovana mreža vraća u prvobitno topološko stanje, posle čega se prelazi na naredni karakteristični trenutak, odnosno iteraciju. U slučaju da je pak sekvenca prazna ili već obrađivana, prelazi se direktno na narednu iteraciju. Postupak se izvršava sve dok se ne obrade svi karakteristični trenuci. Kao rezultat proračuna se ima vrednost minimalnih gubitaka aktivne električne energije kao i optimalna sekvenca kojom se prelazi iz inicijalnog topološkog stanja u stanje za koje se imaju minimalni gubici. Dodatno pored optimalne sekvence i njoj korespondentnih gubitaka aktivne električne energije moguć je uvid u predložene sekvence tokom iterativnog postupka kao i vrednosti gubitaka aktivne električne energije svakog proračuna gubitaka električne energije.

5. VERIFIKACIJA ALGORITAMA

Verifikacija algoritama Enel optimalne rekonfiguracije mreže izvršena je na test mreži. Mreža se napaja preko dva transformatora nominalnog prenosnog odnosa 110/20 kV/kV i sastoji se od 8, 20 kV izvoda i 9 NO rasklopnih uređaja. Na mreži postoje dva tipa potrošača (po jedan za obe napojna transformatora) sa različitim normalizovanim dnevnim P, Q krivama potrošnje. Oba tipa karakterišu 4 sezone kojima odgovaraju 4 godišnja doba i po 2 karakteristična dana u sezoni, radni dan i dan vikenda. U nastavku su razmatrana 2 primera izvršavanja algoritma.



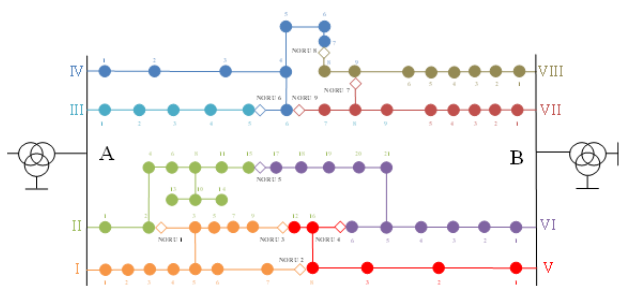
Slika 4 – Test mreža

5.1. Primer 1– Jednom godišnje

Proračun Enel optimalne rekonfiguracije mreže za period od godinu dana sa korakom iteracije od 1h. Prvi korak je izvršenje proračuna inicijalnih gubitaka električne energije na test mreži. Ukupni gubici aktivne električne energije za period od godinu dana iznose 24302420 kWh odnosno 4.08% ukupne godišnje injektirane aktivne

električne energije. Sledeći korak je izvršenje samog algoritma Enel optimalne rekonfiguracije mreže. Kako period od godinu dana obuhvata sve 4 sezone sa po 2 karakteristična dan, onda se sa korakom od 1h imaju ukupno 192 iteracije. Za 192 puštanja proračuna ORDM dobijene su ukupno 54 jedinstvene sekvence pa je izvršeno 54 proračuna gubitaka električne energije.

Sekvenca nakon čije primene se ostvaruju najmanji gubici aktivne električne energije od 22566240 kWh, odnosno 3.80%, je dobijena za trenutak 03:00 h, radni dan, jesen. Sekvenca se sastoji od 8 parova NO/NZ rasklopnih uređaja. Ostvareni benefit primenom optimalne sekvence iznosi **1736180 kWh** što je **0.28%** godišnje injektirane aktivne električne energije.

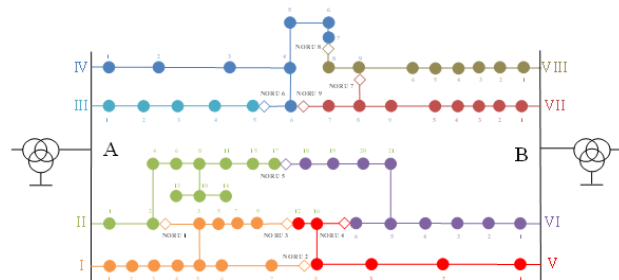


Slika 5 – Mreža nakon primene sekvence

5.2. Primer 2– Dva puta godišnje

Proračun Enel optimalne rekonfiguracije mreže 2 puta godišnje i to za period proleće-letno i period jesen-zima. Inicijalno topološko stanje i potrošnja su identični kao u prvom primeru. Period proleće-letno počinje 21. marta, a završava se zaključno sa 22. septembrom, dok period jesen-zima počinje 23. septembra, a završava se zaključno sa 20. martom naredne godine. Prvi se proračunavaju inicijalni gubici električne energije za period proleće-letno. Dobijeni ukupni gubici aktivne električne energije su 13690040 kWh odnosno 4.28%. Zatim se izvršava Enel optimalne rekonfiguracije mreža za period proleće-letno. Izabrani vremenski period obuhvata dve sezone pa se imaju ukupno 96 puštanja proračuna ORDM. Dobijeno je 40 jedinstvenih sekvenci i izvršeno je 40 proračuna gubitaka električne energije.

Optimalna sekvenca je dobijena za trenutak 03:00 h, radni dan, proleće i njenom primenom dobijeni su gubici od 12742850 kWh. Sekvenca se sastoji od 8 parova NO/NZ rasklopnih uređaja.

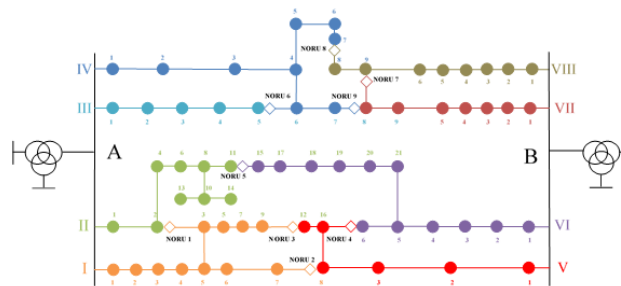


Slika 6 – Mreža nakon primene sekvence (proleće-letno)

Ponovo se pušta inicijalni proračun gubitaka električne energije za period jesen-zima i novo topološko stanje. Dobijena vrednosti gubitaka aktivne električne energije je 9827190 kWh. Potom se izvršava algoritma Enel opti-

malne rekonfiguracije mreže za period jesen-zima. Sada se za 96 puštanja ORDM ima jedinstvenih sekvenci, odnosno 12 proračuna gubitaka električne energije.

Optimalna sekvenca se javlja za karakteristični trenutak 09:00 h, dan vikenda, jesen i njenom primenom dobijaju se gubici od 9813981 kWh. Sekvenca se sastoji od 2 para NO/NZ rasklopnih uređaja. Za oba perioda, imaju se ukupni gubici aktivne električne energije koji iznose 22556831 kWh (12742850+9813981). U odnosu na gubitke koji su dobijeni inicijalnim puštanjem proračuna gubitaka za period od godinu dana, 24302420 kWh, ostvaren je benefit od **1745589 kWh** što predstavlja **0.29%** godišnje injektirane aktivne električne energije.



Slika 7 – Mreža nakon primene sekvence (jesen-zima)

6. ZAKLJUČAK

Enel optimalna rekonfiguracija DM, kao rešenje problema optimalne konfiguracije mreža spram vrednosti gubitaka aktivne električne energije je ostvarila svoj cilj. Metoda je uvek pronasla sekvencu kojom se ostvaruje smanjenje gubitaka aktivne električne energija za selektovani vremenski period.

7. LITERATURA

- [1] D.Popović, D.Bekut, V.Dabić: *Specijalizovani DMS Algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [2] D.Shirmohammadi, H.W.Hong: Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp 1492-1498
- [3] Y.Al-Mahrogi, I.A.Metwally, A.Al-Hinai, A.Al-Badi: Reduction of Power Losses in Distribution Systems; *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol:6, No:3, 2012.
- [4] M.F.Sulaima, M.F.Mohamad, M.H.Jali, W.M.Bukhari, M.F.Baharom: A Comparative Study of Optimization Methods for 33kV Distribution Network Feeder Reconfiguration; *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 6, No. 4, 2014, pp. 1169-1182
- [5] V.C.Strezoski: *Osnovi Elektroenergetike*; Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2014.
- [6] A.Charlangsut, N.Rugthaicharoencheep, S.Auchariyament: Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System; *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol. 6, No. 4, 2012, pp. 365-368

Kratka biografija:



Vladan Rakić rođen je u Užicu 03.09.1992. god. Srednju školu, završio je 2011. god. u Šapcu. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka i oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2017. god. Ist godine upisao se na master akademske studije.