

VIŠE-PERIODNA REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE PRIMENOM
DINAMIČKOG PROGRAMIRANJAMULTI-PERIOD RECONFIGURATION OF THE DISTRIBUTION NETWORK USING
DYNAMIC PROGRAMMINGOlivera Kojić, Neven Kovački, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu predstavljen je algoritam zasnovan na dinamičkom programiranju za određivanje optimalnog više-periodnog plana rekonfiguracije distributivne mreže. Kao kriterijumska funkcija postavljena je minimizacija ukupnih troškova gubitaka električne energije i prekidačkih akcija tokom razmatranog perioda planiranja. Predstavljena metoda testirana je na primeru realne distributivne mreže za različite troškove gubitaka električne energije i prekidačkih akcija, a rezultati su prikazani i komentarisani u radu.

Ključne reči: distributivna mreža, rekonfiguracija, metod izmene grana, dinamičko programiranje

Abstract – This paper presents the algorithm based on dynamic programming to determine the optimal multi-period reconfiguration plan for the considered distribution network. The objective is to minimize total costs of energy losses and switching manipulations. Presented method is verified on real-life distribution network for different costs of energy losses and switching manipulations and the results are presented and discussed in the paper.

Keywords: distribution network, reconfiguration, branch exchange method, dynamic programming

1. UVOD

Rekonfiguracija distributivnih mreža (DM) predstavlja proces izmene topološke strukture (konfiguracije), koji se postiže promenom uklopnog stanja prekidačke opreme. Rekonfiguracija se može posmatrati kao statički, ili kao dinamički (više-periodni) problem, u zavisnosti od dinamike promene konfiguracije DM [1]. Ako se posmatra kao statički problem tada se određuje jedna optimalna konfiguracija za jedan dati nivo potrošnje. S druge strane, ako se posmatra kao dinamički problem, onda se određuje skup konfiguracija koje je potrebno sukcesivno primeniti tokom jednog vremenskog perioda, u zavisnosti od promene potrošnje u DM.

Većina literature o rekonfiguraciji DM zanemaruje promene potrošnje u toku vremena. Pristup problemu rekonfiguracije DM kao statičkom problemu je mnogo jednostavniji sa matematičkog i računskog aspekta, dok je dinamički problem rekonfiguracije mnogo kompleksniji ali i pruža konzistentnije rezultate proračuna [2].

U ovom radu je razmatrana promena potrošnje u DM u toku jednog dana i određen je optimalan dnevni plan

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio docent dr. Neven Kovački.

rekonfiguracije. Određivanje optimalnog plana rekonfiguracije sastoji se iz tri koraka. U prvom koraku se pomoću metode izmena grana određuju optimalne konfiguracije DM za svaki sat u toku dana. U sledećem koraku vrši se proračun tokova snaga kojim se određuju gubici električne energije u svakom vremenskom periodu za sve konfiguracije DM dobijene u prethodnom koraku.

Takođe, proračunavaju se i troškovi prekidačkih akcija potrebnih za prelazak iz jedne konfiguracije u drugu.

Zatim se u trećem koraku primenjuje algoritam dinamičkog programiranja, pri čemu se koriste proračunate konfiguracije iz prethodna dva koraka. Kao rezultat dobija se optimalan plan rekonfiguracije DM za period od jednog dana kojim se minimizuju ukupni troškovi gubitaka električne energije i prekidačkih manipulacija.

2. OPŠTI OPTIMIZACIONI MODEL ZA REKONFIGURACIJU DISTRIBUTIVNE MREŽE

U ovoj glavi prikazan je optimizacioni model za rekonfiguraciju DM koji je zasnovan na mešovito-celobrojnom programiranju. Statusi grana (l) (otvorena/zatvorena) su predstavljeni binarnim (0/1) promenljivama x_l , dok je režim DM predstavljen modulima i faznim stavovima (V_i, θ_i) fazora napona u čvorovima (i) DM [1].

Kao funkcija cilja postavljena je minimizacija gubitaka aktivne snage P_{Loss} , što se zapisuje na sledeći način:

$$\min_{x_l, V_i, \theta_i} \left(P_{Loss} = \sum_{l=1}^{N_L} P_{Loss, l} = \sum_{i=1}^{N_L} (P_{ij} + P_{ji}) \right), \quad (1)$$

gde su sa P_{Loss} označeni ukupni gubici aktivne snage, sa $P_{Loss, l}$ gubici aktivne snage u grani l , N_L predstavlja ukupan broj grana u DM, dok P_{ij} (P_{ji}) predstavlja tok aktivne snage u grani l od čvora i (j) ka čvoru j (i).

U datom optimizacionom modelu važe sledeća ograničenja:

1. Zavisnost tokova snaga (P_{ij}, Q_{ij}) u granama DM

$l=1, 2, \dots, N_L$ od promenljivih odlučivanja (x_l, V_i, θ_i)

$$P_{ij} = x_l \{ G_l (V_i)^2 - V_i V_j [G_l \cos(\theta_i - \theta_j) + B_l \sin(\theta_i - \theta_j)] \} \quad (2)$$

$$Q_{ij} = x_l \{ -B_l (V_i)^2 - V_i V_j [B_l \cos(\theta_i - \theta_j) - G_l \sin(\theta_i - \theta_j)] \} \quad (3)$$

gde su G_l i B_l konduktansa i susceptansa grane l , respektivno.

2. Bilansi aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže $i=1, 2, \dots, N_N$:

$$P_{G,i} - P_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0, \quad (4)$$

$$Q_{G,i} - Q_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0. \quad (5)$$

gde su sa $P_{G,i}$, $P_{L,i}$ označeni proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru i , sa $Q_{G,i}$, $Q_{L,i}$ označeni su proizvodnja i potrošnja reaktivne snage u čvoru i , a sa Ω_i skup čvorova j koji su direktno povezani sa čvorom i ,

3. Specificirani moduo i fazni stav napona u napojnom čvoru ($i=0$):

$$V_\theta = V_S, \quad (6)$$

$$\theta_0 = 0, \quad (7)$$

gde je V_S specificirana vrednost modula fazora napona napojnog čvora.

4. Ograničenje modula napona u čvorovima DM $i=1,2,\dots,N_N$:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad (8)$$

gde su V_i^{\min} i V_i^{\max} minimalni i maksimalni dozvoljeni napon u čvoru i , respektivno.

5. Ograničenje tokova snaga u granama distributivne mreže $l=1,2,\dots,N_L$:

$$(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2 \leq (S_l^{\max})^2, \quad (9)$$

gde je S_l^{\max} maksimalna dozvoljena snaga grane l ,

6. Radijalna konfiguracija razmatrane DM:

$$\sum_{i=1}^{N_i} x_i = N_N - N_{SP}, \quad (10)$$

gde je N_{SP} broj napojnih čvorova u DM.

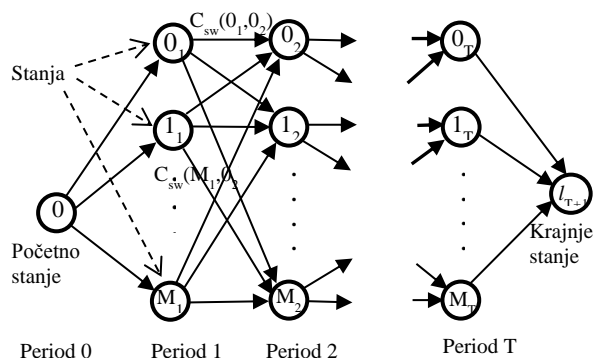
3. METODA IZMENE GRANA

Metod izmene grana (eng. *Branch Exchange*) jeste heuristički pristup koji se koristi da se na brz i jednostavan način ispitaju promene vrednosti zadate kriterijumske funkcije usled promene mesta normalno otvorenog (NO) rasklopnog uređaja u mreži.

Cilj heurističkih metoda jeste da se poznajući fiziku određenog problema u što kraćem roku dođe do kvalitetnih praktičnih, ali suboptimalnih (lokalnih) rešenja [1]. Izmena grana (IG) zapravo predstavlja izmenu mesta NO rasklopnog uređaja sa njime spregnutim normalno zatvorenim (NZ) rasklopnim uređajem. Pod spregnutim rasklopnim uređajima podrazumeva se par NO/NZ čijom se izmenom mesta održava napajanje svih čvorova u mreži i radijalnost mreže.

Velika prednost ovog metoda je da se promena mesta NO i NZ rasklopnih uređaja proračunava na bazi relacije u kojoj figurišu samo vrednosti iz baznog režima mreže. Na taj način, izbegnuta je potreba za proračunom tokova snaga (proračunom kompletnog režima) za svaku novu konfiguraciju mreže. Dakle, ispituje se vrednost kriterijumske funkcije za NO uređaj i svaki njemu spregnuti NZ rasklopnim uređaj, nakon čega se prihvata onaj slučaj gde je ostvareno poboljšanje kriterijumske funkcije.

Tek nakon tog koraka, vrši se proračun tokova snaga koji predstavlja bazni režim za sledeću iteraciju [3].



Slika 1. Grafavska predstava problema više-periodne rekonfiguracije [2]

4. PRIMENA DINAMIČKOG PROGRAMIRANJA ZA ODREĐIVANJE VIŠE-PERIODNOG PLANA REKONFIGURACIJE

Dinamičko programiranje je naziv popularne tehnike u matematičkoj optimizaciji kojom se značajno smanjuje složenost algoritama. Rešavanje jednog problema svodi na rešavanje potproblema koji su međusobno zavisni. Svaki potproblem se rešava najviše jednom, čime se izbegava ponovno računanje numeričkih karakteristika istog stanja.

Problem planiranja više-periodne rekonfiguracije prikazan je grafom na slici 1. Čvorovi grafa predstavljaju konfiguracije (stanja) DM tokom razmatranih perioda u planiranju. Za svaki čvor je poznato uklopno stanje, a samim tim i troškove gubitaka električne energije u datom periodu.

Troškovi tranzicije iz stanja (i), u periodu (t), u stanje (l), u periodu ($t+1$), jesu jednaki troškovima manipulacije prekidačkim uređajima potrebnih za prelazak iz jednog stanja u drugo [2].

Svaka putanja u grafu koja počinje iz početnog stanja (čvora) i završava u krajnjem stanju (čvoru) predstavlja jedan više-periodni plan rekonfiguracije. Cena plana više-periodne rekonfiguracije predstavlja sumu troškova u svakom periodu, što znači da ukupan trošak odgovara dužini putanje od početnog do krajnjeg čvora grafa. Posledično, optimalan plan više-periodne rekonfiguracije DM odgovara najkraćoj putanji u grafu, a putanje se dobijaju primenom algoritma dinamičkog programiranja opisanog jednačinama (3.2.1) – (3.2.6):

$$C(i, t) = \min \{C(j, t-1) + C_{sw}(j, i) + W(i, t) * C_{loss}\}, \quad (11)$$

$$(i, j) \{1, 2, \dots, N\}, t \in \{0, 1, 2, \dots, T\}$$

$$C_{sw}(i, j) = \sum_{b=1}^{N_b} \text{abs}(x(i, b) - x(j, b)) * C_{sw}, \quad (12)$$

$$(i, j) \{0, 1, 2, \dots, N\}$$

$$C(i, 0) = C_{sw}(i, 0) + W(i, 0) * C_{loss} \quad (13)$$

$$(i) \{0, 1, 2, \dots, N\},$$

gde su:

T – ukupan broj razmatranih perioda,

N – broj različitih konfiguracija,

$C(i, t)$ – trošak optimalnog plana rekonfiguracije za prvih (t) perioda koji se završava konfiguracijom (i),

C_{loss} – jedinična cena gubitaka električne energije USD/kWh ,

$W(i, t)$ – gubici električne energije za konfiguraciju (i) i u vremenskom trenutku (t),
 $C_{sw}(j, i)$ – trošak prekidačkih manipulacija potrebnih za prelazak iz konfiguracije i u konfiguraciju j ,
 C_{sw} – cena manipulacije prekidačkim uređajem,
 Nb – ukupan broj grana u distributivnoj mreži,
 $x(i, b)$ – stanje prekidača u grani (b) za konfiguraciju (i).
 Algoritam dinamičkog programiranja za rešavanje problema više-periodne rekonfiguracije DM može se predstaviti sledećim pseudo kodom:

Ulaz:

$brKonfig$ – broj različitih konfiguracija
 $switchCost$ – matrica troškova prekidačkih manipulacija između rekonfiguracija, dimenzija [$brKonfig \times brKonfig$]
 $lossesCost$ – matrica troškova gubitaka električne energije, dimenzija [$brKonfig \times T$]

Izlaz: $optimum$ - niz rednih brojeva konfiguracija koje čine optimalan plan

Za sve vrednosti $i = 1, brKonfig$
 $Cost[i][1] = lossesCost[i][1] + switchCost[i][1];$
 $prior[i][1] = -1;$

Kraj

Za sve vrednosti $t = 2, T$

Za sve vrednosti $m = 1, brKonfig$

$Cost[m][t] = \infty;$

$prior[m][t] = -1;$

Za sve vrednosti $j = 1, brKonfig$

$currCost = Cost[j][t - 1] + switchCost[j][m] + lossesCost[m][t];$

Ako je $currCost < Cost[m][t]$ onda

$Cost[m][t] = currCost;$

$prior[m][t] = j;$

Kraj

Kraj

Kraj

Kraj

$minCost = \infty;$

$opt = -1;$

Za sve vrednosti $m = 1, brKonfig$

Ako je $Cost[m][T] < minCost$ onda

$minCost = Cost[m][T];$

$opt = m;$

Kraj

Kraj

$optimum = \emptyset;$

Za sve vrednosti $t = T, 1$

dodaj opt u $optimum$;

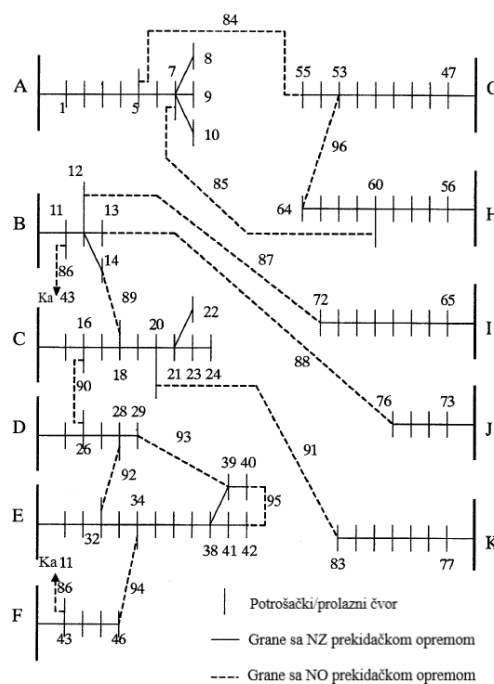
$opt = prior[opt][t];$

Kraj

Vrati $optimum$;

5. VERIFIKACIJA ALGORITMA

Proračun se vrši na distributivnoj mreži prikazanoj na slici 2. DM se sastoji od 11 srednjenaponskih izvoda označenih slovima od A do K. Nominalni napon DM mreže iznosi 11.4 kV. Parametri svih vodova i kablova dati su u [4]. Ukupan broj zatvorenih grana u mreži iznosi 83, dok je broj otvorenih grana 13. Svaka grana DM poseduje rasklopni uređaj a čvorovi su modelovani kao potrošači



Slika 2. Prikaz realne DM [4]

konstantne snage i pripada jednoj od tri grupe potrošača: stambena, komercijalna i industrijska potrošnja.

Potrošači različitih tipova se razlikuju po dinamici promene opterećenja u toku dana, vršnim vrednostima i periodu kada se dostiže maksimum opterećenja. Raspodela potrošača po čvorovima mreže, dnevni dijagrami potrošnje u toku 24h i vršne vrednosti su date u [5].

Najpre je određen skup konfiguracija DM koje mogu da se nađu u optimalnom dinamičkom planu. Date konfiguracije se dobijaju metodom izmena grana za svaki period. Dati skup je prikazan u tabeli 1, kao i sati u toku dana za koje je data konfiguracija optimalna. Na ovaj način dobijeno je 6 konfiguracija distributivne mreže, a kao kandidat uzima se u obzir i inicijalna konfiguracija označena indeksom 0.

Tabela 1. Konfiguracije dobijene metodom izmena grana

Konfiguracija	Redni brojevi otvorenih grana	Period (sat)
K0	83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95	-
K1	6, 12, 31, 34, 40, 60, 71, 83, 85, 88, 89, 90, 91	1, 2, 3, 7, 19, 20, 21, 22, 23, 24
K2	6, 12, 31, 34, 40, 60, 71, 82, 83, 85, 88, 89, 91	4, 6, 15, 16, 17
K3	6, 31, 34, 40, 60, 71, 81, 83, 85, 87, 88, 89, 91	5
K4	6, 12, 31, 34, 40, 60, 83, 85, 86, 88, 89, 90, 91	8, 9, 11, 12, 13, 14
K5	6, 31, 34, 40, 60, 81, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 91	9
K6	6, 12, 31, 34, 40, 60, 71, 81, 83, 85, 88, 89, 91	18

Prethodni korak predstavlja ulaz za algoritma dinamičkog programiranja. Koje konfiguracije i tačan raspored datih rekonfiguracija u optimalnom dinamičkom planu zavisi od jedinične cene gubitaka električne energije i cene manipulacija prekidačkim uređajem. Proračun je izvršen za dva para troškova prikazanih u tabeli 2.

Tabela 2. Opis razmatranih planova

Slučaj	C_{sw} [USD]	C_{loss} [USD]
A	0.05	0.20
B	1.00	0.20

U tabelama 3 i 4 dati su rezultati dinamičkog programiranja za planove A i B. Prikazane su konfiguracije za svaki sat u toku dana, takođe i ukupni gubici električne energije, troškovi gubitaka električne energije, troškovi prekidačkih manipulacija i ukupni troškovi za dobijene planove.

Tabela 3. Optimalan plan rekonfiguracije distributivne mreže – slučaj A

Sat	Konfiguracija	Ukupni gubici el. energije [kWh]	Troškovi gubitaka el. energije [USD]	Troškovi prekidačkih manipulacija [USD]	Ukupni troškovi [USD]
1-8	K1	3564,25	712,85	1,3	714,15
9	K6				
10-14	K5				
15-17	K3				
18	K6				
19-24	K1				

Tabela 4. Optimalan plan rekonfiguracije distributivne mreže – slučaj B

Sat	Konfiguracija	Ukupni gubici el. energije [kWh]	Troškovi gubitaka el. energije [USD]	Troškovi prekidačkih manipulacija [USD]	Ukupni troškovi [USD]
1-8	K1	3569,25	713,92	16	729,92
9-24	K2				

U tabeli 5 je prikazano poređenje ukupnih gubitaka električne energije za oba više-periodna plana rekonfiguracija i gubitaka kada bi DM ostala u inicijalnoj rekonfiguraciji tokom celog dana.

Može se uočiti značajno procentualno smanjenje ukupnih gubitaka električne energije i ušteda u ukupnim troškovima. Za plan A, ostvareno je smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage od 9,98%, dok je za plan B ostvareno smanjenje od 9,77%.

Tabela 5. Poređenje uštede i ukupnih gubitaka električne energije

	Gubici el. energije [kWh]	Aps. smanjenje gubitaka [kWh]	Rel. smanjenje gubitaka [%]	Ušteda [USD]
Inic. konf.	3955.66	–	–	–
Plan A	3564.25	391.41	9.98	76.98
Plan B	3569.25	386.41	9.77	61.21

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je određen skup konfiguracija koje je potrebno primeniti tokom posmatranog vremenskog perioda, dok se opterećenje menja. Izložen je jednostavan metod za određivanje plana više-periodne rekonfiguracije distributivne mreže, primenom optimizacionog algoritma dinamičkog programiranja. Značajni faktori prilikom određivanja dinamičkog plana rekonfiguracije DM jesu troškovi manipulacije prekidačke opreme i jedinični trošak gubita-

ka električne energije, koji mogu značajno da promene rezultat proračuna više-periodnog plana rekonfiguracije DM. U ovom radu su posmatrana dva para troškova. Prvi kojeg čini nešto manja cena prekidačkih manipulacija i drugi gde se posmatra značajno viša cena prekidačkih manipulacija. Jedinični trošak gubitaka električne energije je jednak u oba posmatrana slučaja.

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da smanjenje troškova prekidačkih manipulacija rezultira u povećanju broja prekidačkih manipulacija i smanjenju gubitaka električne energije.

S druge strane, ako je cena prekidačkih manipulacija viša, njih će biti manje jer ušteda u smanjenju gubitaka električne energije nije dovoljna da opravda rekonfiguraciju distributivne mreže. Svrha određivanja više-periodnog plana rekonfiguracije jeste ekonomičnije upravljanje, smanjenje ukupnih gubitaka energije i smanjenje troškova eksploatacije DM.

7. LITERATURA

- [1] N.Kovački: *Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža primenom višekriterijumske optimizacije*; Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [2] Ž.Popović, N.Kovački: *Multi-period reconfiguration planning considering distribution network automation*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 139 (2022) 107967
- [3] D.Popović, D.Bekut, V.Dabić: *Specijalizovani DMS Algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [4] Ching-Tyong Su, Chu-Sheng Lee: *Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution*; Power Delivery, IEEE Transactions on. 18. 2003; 1022 - 1027. 10.1109/TPWRD.2003.813641.
- [5] Z.Ghofrani-Jahromi, M.Kazemi, M.Ehsan: *Distribution switches upgrade for loss reduction and reliability improvement*; IEEE Transactions on Power Delivery, 10.1109/TPWRD.2014.2334645

Kratka biografija



Olivera Kojić rođena je u Sremskoj Mitrovici 1996. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2019. godine.



Neven Kovački rođen je u Zrenjaninu, 1987. god. Diplomirao je, masterirao i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi redom 2010, 2011. i 2018. godine.