PROGRAM ZA PROVERU POVEZANOSTI ENERGETSKOG SISTEMA

T.RAJIĆ, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, Srbija
B.STOJANOVIĆ, Tehnički opitni centar, Srbija

UVOD

U radu je predstavljen program za proveru povezanosti energetskog sistema. Energetski sistemi postaju sve složeniji. Jedna od najvažnijih karakteristika energetskog sistema je njegova povezanost. Rekonfiguracija distributivne mreže definiše se kao promena topološke strukture distributivnih fidera promenom stanja otvoren/zatvoren sekcionih i poveznih prekidača u cilju postizanja optimalne konfiguracije. Jedan od razloga za rekonfiguraciju je postizanje smanjenih gubitaka u mreži Rajaković (1), Ćalović i Sarić (2), Nahman (3). Problem kod rekonfiguracije je radijalna struktura razgranatog stabla koje mora biti povezano Lavorato, Franco, Rider i Romero (4), Carreno, Romero i Padilha-Feltrin (5), Heydt (6). Jedna od metoda za utvrđenje povezanosti je i algoritam dubinskog prvog pretraživanja (depth-first search) Sedgewick (7). Njegova primena kod problema rekonfiguracije i planiranja distributivnih mreža nije dovoljna jer treba zadovoljiti i ograničenje broja grana za ostvarenje radijalne konfiguracije. Takođe, u objavljenom članku Nahman i Perić (8) rešen je problem konektivnosti ali ne i radijalnosti mreže. Program koji je predstavljen u radu prevazilazi ovo ograničenje i realizovan je pomoću programskog paketa MATLAB. Algoritam se sastoji u generisanju različitih konfiguracija zadate mreže i proveravanju da li je mreža u tom slučaju povezana i radijalna. Na izlazu iz programa dobija se konfiguracija koja zadovoljava oba uslova. Nakon toga moguće je primeniti neku od metoda proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i dobiti informaciju o gubicima u mreži. Program je primenjen na mrežu opisanu u članku Baran i Wu (9).

REKONFIGURACIJA ENERGETSKOG SISTEMA

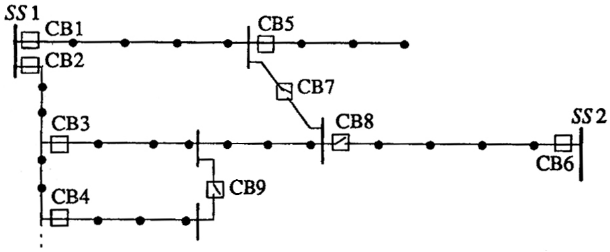
U današnje vreme postaje sve važnije da distribucije što efikasnije zadovolje potrebe svojih potrošača. To znači da im je jedan od ciljeva da pronađu radni režim u kome će se uz najmanji mogući trošak isporučivati električna energija i zadovoljavati zahtevi potrošača.

Rekonfiguracija se može posmatrati kao planerski zadatak ili kao zadatak u realnom vremenu. Rekonfiguracija kao zadatak dnevnog, mesečnog ili sezonskog planiranja oslanja se u velikoj meri na procenu opterećenja. Sa druge strane rekonfiguracija u realnom vremenu, koja je moguća jedino u potpuno automatizovanim sistemu, zahteva brzu akviziciju podataka kao i izuzetno brze algoritme rekonfiguracije. U kontekstu smanjenja gubitaka, analiza se usmerava na određivanje poveznog i secionog prekidača čijim se zatvaranjem i otvaranjem respektivno, postiže smanjenje gubitaka (1), (2), (3).

U radijalnim distributivnim mrežama sekcioni rastavljači se koriste radi zaštite, da bi izolovali kvar, a i da bi se njihovom primenom rekonfigurisala mreža. Na Slici 1 dat je šematski prikaz dela distributivne mreže sa ugrađenim sekcionim rastavljačima (označeni sa CB). Podebljanim tačkama označena su mesta gde su priključeni potrošači. Na Slici 1 razlikujemo dva tipa rastavljača: normalno zatvoreni rastavljači koji povezuju

master Tomislav Rajić, dipl.inž.el., Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, e-mail:rajic@etf.rs

sekcije vodova (CB1-CB6), i normalno otvoreni rastavljači koji povezuju dva primarna voda (CB7), ili dve trafo-stanice (CB8) ili bočne grane vodova koje čine petlju (CB9). Transformatorske stanice označene su sa SS.



Slika 1: Šematski prikaz distributivnog sistema (SS=TS)

PROVERA POVEZANOSTI ENERGETSKOG SISTEMA

Topologija distributivnog sistema se može pretstaviti grafom koji ima *m* grana i *n* čvorova (sabirnica). Može se tvrditi da je topologija distributivne mreže radijalna ako zadovoljava sledeća dva uslova (4), (5), (6).

1) konfiguracija mora da poseduje *n-1* granu;
2) konfiguracija mora biti povezana.

Rešenje problema rekonfiguracije i ekspanzionog planiranja je prihvatljivo ako zadovoljava tehničke uslove i održava konektivnost mreže. Kako mreža kod procesa minimizacije menja konfiguraciju generalne metode za efikasni algoritam tokova snaga i povezanost treba da su primenjene na sve programski izgenerisane konfiguracije. Ako rekonfigurisana mreža ostavlja neke grane nepovezanim ili formira petlje kao što je slučaj kod većine poznatih algoritama dobiće se nepodobna konfiguracija koja se mora odbaciti (4). Iz tog razloga, razvijen je program kojim se na jednostavan i brz način može proverti da li je mreža radijalna i povezana. Ovo je pre svega korisno jer distributivne mreže predstavljaju veliku i razgranatu strukturu.
Energetski sistem je povezan ako postoji putanja između bilo koje njegove dve sabirnice. Kod distributivne mreže, posmatrane kao energetski sistem, to znači da su sve sabirnice opterećenja povezane sa izvornom sabirnicom i da se mogu napajati iz te sabirnice. Povezanost energetskog sistema se može prosto proveriti (5), (6). uz pomoć matrice *NC* definisane kao:

$$NC = B^{(n-1)} \tag{1}$$

Gde je:
n-broj sabirnica energetskog sistema a
B- matrica povezanosti sistema.

Matrica *B* je dimenzija *n* x *n*. Element matrice na poziciji (*i,j*) jednak je jedinici ako postoji vod između sabirnica *i* i *j* ili je jednak nuli ako vod ne postoji. Kada je *i* = *j*, element *B* (*i,j*) jednak je jedinici. Prilikom računanja stepena matrice *B*, primenjuju se operacije Bulove algebre, što znači da važi:

0+0=0;
0+1=1+1=1;
0*0=0 i
1*1=1.

Gde je
+ sabiranje Bulove algebre a
* množenje Bulove algebre.

Sistem je povezan ako su svi elementi matrice *NC* jednaki jedinici. Ukoliko matrica *NC* sadrži makar jednu nulu sistem nije povezan [6].U daljem tekstu, matematičkom indukcijom biće naveden dokaz ove tvrdnje.

Za *n-1*=1 dokaz je očigledan.
Za *n-1*≥2, sledi:

$$B^{n}_{(i,j)} = B^{n-1}_{(i,1)} \cdot B^{n-1}_{(1,j)} + B^{n-1}_{(i,2)} \cdot B^{n-1}_{(2,j)} + \cdots + B^{n-1}_{(i,n)} \cdot B^{n-1}_{(n,j)} \tag{2}$$

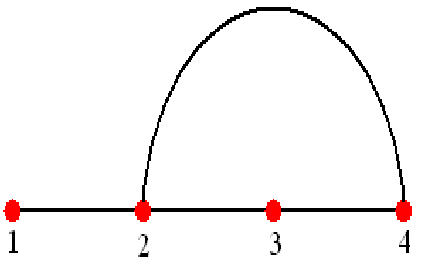
Gde je:
B^n-matrica B na n-ti stepen a
B^{n-1}-matrica B na $(n-1)$-i stepen.

Ako se za bilo koje k ($2 \leq k \leq n$) dogodi da je $B(i,k) \cdot B(k,j)$ jednako jedinici, može se zaključiti da su elementi matrice $B(i,k)\cdot$ i $B(k,j)$ jedinice. Ovo znači da je sabirnica i povezana sa sabirnicom k i da je sabirnica k povezana sa sabirnicom j. Stoga su sabirnice i i j povezne preko dva voda (to su vodovi ik i kj). Očigledno je da je za $i=j$ element matrice $B(i,j)$ jednak jedinici.
Pretpostavimo da svojstvo važi za $n=l$ onda treba dokazati da svojstvo važi i za $n=l+1$. Kako svojstvo važi za $n=l$, onda je:

$$B_{(i,j)}^{l+1} = B_{(i,1)}^{l} \cdot B_{(1,j)} + B_{(i,2)}^{l} \cdot B_{(2,j)} + \cdots + B_{(i,n)}^{l} \cdot B_{(n,j)} \tag{3}$$

Da bi ovaj izraz bio 1 potrebno je da makar jedan sabirak bude 1. Kada je izraz jednak 1 onda je i jedan element $B_{(i,k)}^{l} \cdot B_{(k,j)}$ jednak jedinici, što znači da je $B_{(i,k)}^{l} = 1$ i $B_{(k,j)} = 1$ i da su sabirnice i i j spojene preko drugih sabirnica čiji je broj jednak $l+1$ ili manje. Ovim je dokaz matematičkom indukcijom završen.

Na Slici 2, jednostavna mreža prikazana je grafom. Mreža sadrži četiri čvora i isto toliko grana. Da bi mreža bila radijalna, potrebno je da budu uključene tri grane i da matrica povezanosti (B), podignita na treći stepen, sadrži samo jedinice.



Slika 2- Primer jednostavne mreže prikazane grafom.

$$B=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B^2=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ i}$$

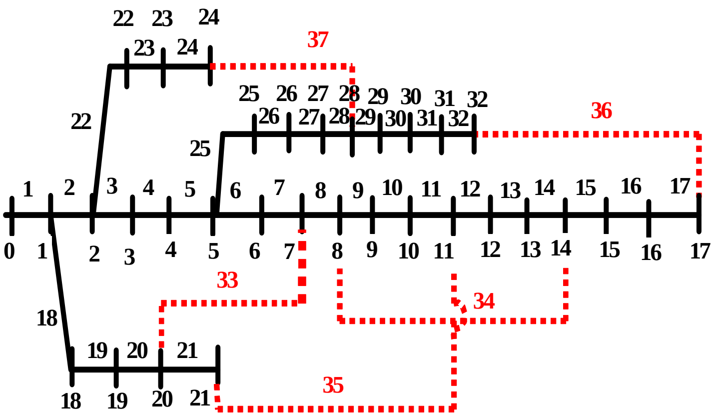
$$NC=B^3=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ovim je prethodna tvrdnja praktično potvrđena.
Program kao ulazne podatke prihvata ukupan broj čvorova i ukupan broj grana. Da bi bio zadovoljen prvi uslov radijalnosti mreže, potrebno je da broj uključenih grana bude za jedan manji od broja čvorova. Samim tim se može odmah izračunati koliko grana treba da bude isključeno. U svakoj iteraciji, generatorom slučajnih brojeva formira se niz koji u sebi sadrži onoliko elemenata koliko grana treba da bude isključeno. Elementi niza su zapravo redno brojevi grana za koje se pretpostavlja da su isključene. U nastavku se automatski formira matrica povezanosti i računa se odgovarajući stepen te matrice kako bi se proverilo da li je zadovoljen drugi uslov radijalnosti (matrica NC sadrži samo jedinice).
Algoritam se sastoji u generisanju različitih konfiguracija zadate mreže i proveravanju da li je mreža u tom slučaju povezana i radijalna. Na izlazu iz programa dobija se konfiguracija koja zadovoljava oba uslova za

postizanje radijalnosti. Nakon toga moguće je primeniti neku od metoda proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i dobiti informaciju o gubicima u mreži.

REZULTATI

Program je primenjen na mrežu opisanu u članku (9). Mreža je prikazana na Slici 3.



Slika 3: Distributivna mreža (Baran i Wu).

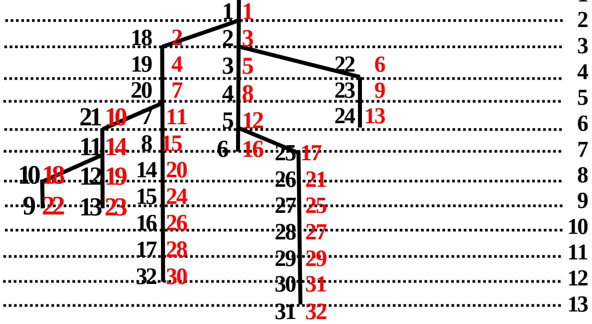
Mreža od interesa ima 33 čvora (označeni sa 0-32) i 37 grana (označene sa 1-32, sa običnim rastavljačima i crvene grane označene sa 33-37 sa spojnim rastavljačima), pri rekonfiguraciji može se otvoriti bilo koja grana. Generatorom slučajnih brojeva formira se niz od pet brojeva (37-(33-1)=5).

Provere programa su vršene za sledeće slučajeve:
1) mreža upetljana kao na Slici 3, dobilo se MREŽA JE RADIJALNA.
2) grane koje spajaju čvorove 2-3, 24-28, 20-7, 21-11 i 13-14 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.
3) grane koje spajaju čvorove 3-4, 24-28, 20-7, 21-11 i 2-22 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.
4) grane koje spajaju čvorove 15-16, 17-32, 4-5, 1-18 i 21-11 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.
5) grane koje spajaju čvorove 7-8, 17-32, 21-11, 22-23 i 1-2 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.
6) grane koje spajaju čvorove 5-6, 17-32, 19-20, 12-13 i 2-3 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.
7) grane koje spajaju čvorove 1-2, 2-3, 24-28, 11-12 i 19-20 otvorene, dobilo se MREŽA NIJE RADIJALNA.

I svaka druga provera bi pokazala da program ispravno radi.

PRORAČUN GUBITAKA

U savremenoj praksi gotovo svih distributivnih mreža, osnovni metod koji se koristi u analizi, eksploataciji i planiranju distributivnih mreža je Širmohamadijev metod. Ovaj metod zasniva se na direktnoj primeni I i II Kirhofovog zakona. Da bi algoritam bio efikasan poželjno je da se izvrši numeracija tako da se grane rasporede po nivoima kao što je prikazano na Slici 4. Nakon obavljene numeracije uvodi se polazna pretpostavka da su naponi u svim čvorovima mreže jednaki naponu napojnog čvora, da bi se zatim kroz iterativni proces vrednosti napona menjale dok se ne odrede tačne vrednosti napona čvorova.



Slika4- Način numeracije čvorova i grana radijalne distributivne mreže.

Proračun gubitaka rezultat je nekoliko koraka koji se primenjuju u ovoj metodi. Nakon usvajanja početnih vrednosti napona, računaju se vrednosti snaga u čvorovima. Izračunavaju se ukupne snage koje se predaju preko svakog od čvorova i snaga gubitaka u granama koje se nalaze iza posmatranog čvora. Ovo je iteracija od krajnjih čvorova ka napojnom čvoru. Polazeći od napojnog čvora, i krećući se ka čvorovima koji pripadaju poslednjem sloju, sračunavaju se naponi potrošačkih čvorova. Ovo je iteracija od krajnjih čvorova ka napojnom čvoru. Poređenjem vrednosti napona u dve uzastopne iteracije proverava se da li je postignuta željena tačnost. Ako nije, vraća se na korak u kome se proračunavaju snage. U suprotom, iterativna procedura je završena, i sračunavaju se gubici.
U Tabeli 1 dati su podaci o mreži (aktivna i reaktivna otpornost grana, aktivna i reaktivna potrošnja u čvorovima i napon čvorova u relativnim jedinicama dobijenih primenom Širmohamadijeve metode). Dobijeni su gubici od 202 kW.

TABELA 1- PODACI O MREŽI NAKON PRORAČUNA TOKOVA SNAGA

Grana	R (Ω)	X (Ω)	PL (kW)	QL (kVar)	| V | r.j.
0-1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.9970
1-2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.9829
2-3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.9755
3-4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.9681
4-5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.9497
5-6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.9462
6-7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.9413
7-8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.9351
8-9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.9292
9-10	0.1966	0.0650	45.00	30.00	0.9284
10-11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.9269
11-12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.9208
12-13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.9185
13-14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.9171
14-15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.9157
15-16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.9137
16-17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.9131
1-18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.9965
18-19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.9929
19-20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.9922
20-21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.9916
2-22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.9794
22-23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.9727
23-24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.9694
5-25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.9477
25-26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.9452
26-27	1.0590	0.9337	60.00	20.00	0.9337
27-28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.9255
28-29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.9220
29-30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.9178
30-31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.9169
31-32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.9166

ZAKLJUČAK

Povezanost energetskog sistema je jedna od njegovih bitnih karakteristika. Povezanost je veoma bitna u pogledu rekonfiguracije mreže. Jedna od metoda za utvrđenje povezanosti je i algoritam dubinskog prvog pretraživanja (depth-first search). Njegova primena kod problema rekonfiguracije i ekspanzionog planiranja distributivnih mreža nije dovoljna jer treba zadovoljiti i ograničenje broja grana za ostvarenje radijalne konfiguracije. Algoritam koji je predstavljen u radu sastoji se u generisanju različitih konfiguracija zadate mreže i proveravanju da li je mreža u tom slučaju povezana i radijalna. Na izlazu iz programa dobija se konfiguracija koja zadovoljava oba uslova. Nakon toga moguće je primeniti neku od metoda proračuna tokova snaga u distributivnim mrežama i dobiti informaciju o gubicima u mreži. Poseban doprinos ovog rada je što se relativno brzo generiše veliki broj različitih konfiguracija mreže. Uz dodatak proračuna tokova snaga, predstavljeni program može biti od velike pomoći distributivnim inženjerima pri rekonfiguraciji mreže.

ZAHVALNICA

Prvi autor se zahvaljuje Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije odnosno Projektu III 42009 Inteligentne energetske mreže.

LITERATURA

1. Rajaković N,‟Distributivne i industrijske mreže‟, ‟Akademska misao‟, Beograd, 2008.
2. Ćalović M, Sarić A, ‟Planiranje elektroenergetskog sistema‟, ‟Beopres‟, Beograd, 2000.
3. Nahman J, ‟Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema‟, ‟Naučna knjiga‟, Beograd, 1992.
4. Lavorato M, Franco J, Rider J and Romero R, February 2012, "Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.27, No.1", pp. 172-180.
5. Carreno E, Romero R and Padilha-Feltrin A, November 2008, "An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 23, No.4", November 2008, pp. 1542-1551.
6. Heydt G, Computer analysis methods for power systems, Purdue University, Macmillan Publishing Company, New York, Copyright 1986, 359 (p), pp. 11-15
7. Sedgewick R, Algorithms in C++, Part 5 Graph Algorithm, Addison Wesle.
8. Nahman J, and Perić D, May 2008, "Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.23, No.2, pp. 790-795.
9. Baran M E and Wu F F, April 1989, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol.4, No.2", pp. 1401-1407.