

EFIKASNI ALGORITAM ANALIZE TOKOVA SNAGA, MODIFIKOVANI ALGORITAM TOKOVA SNAGA NAHMAN I PERIĆ

B.STOJANOVIĆ, Tehnički opitni centar, Srbija
M.MOSKOVLJEVIĆ, Tehnički opitni centar, Srbija
T.RAJIĆ, Elektrotehnički fakultet, Srbija

UVOD

Mnogi problemi vezani za primenu u realnom vremenu iz oblasti distributivnih sistema kao što su njihova optimizacija, kompenzacija, regulacija napona, planiranje, restauracija, procena stanja i tako dalje zahtevaju posedovanje efikasnog algoritma tokova snaga kojim se proračunavaju naponi mreže, (struje grana) i gubici Teng; Sarić i Čalović (1,2). Dobro poznate karakteristike električnih distributivnih mreža su:

- radijalna ili slabo upetljena konfiguracija;
- postojanje 3 faze koje mogu biti nesimetrično opterećene;
- opterećenje raspoređeno u čvorovima mreže;
- veliki broj grana i čvorova i
- širok opseg u kome se mogu kretati vrednosti rezistansi i reaktansi (1).

Ove karakteristike čine da su tradicionalne metode tokova snaga koje se koriste za prenosne mreže kao što su Gauss-Seidel i Newton-Raphson tehnike nedovoljno pouzdane da bi odgovorile na zahteve koji se postavljaju kod distributivnih sistema (1). Osobito pretpostavke neophodne za uprošćenja koja važe kod standardnog brzo-raspregnutog Newton-Raphson-ovog metoda nisu validne kod distributivnih mreža (1).

Nekoliko algoritama tokova snaga posebno dizajniranih za distributivne sisteme se nalaze u literaturi (1). Neke od ovih metoda su razvijene na principu topologije sa petljama kao što su prenosni sistemi. Kod ovih metoda Gauss implicitna Z-matrična metoda je najčešće primenjena ali ona ne koristi osobinu da su distributivne mreže radijalne ili slabo upetljane i zato zahteva rešavanje skupa jednačina čiji je broj proporcionalan broju čvorova (1). Skorašnja istraživanja predlažu neke nove ideje kako da se uvaži specifičnost topologije distributivnih sistema, ali ove ideje zahtevaju novi format ulaznih podataka ili zamornu manipulaciju ulaznim podacima (1). S obzirom da je često usvojena tehnika zamene unapred/unazad, šema rešenja zahteva zametno unošenje ulaznih podataka za mrežu šemiranu po nivoima (1). Glavni nedostatak ovih metoda je da se ulazne datoteke sa podacima o mreži moraju stalno generisati i učitavati što čini da su ove metode praktično neprimenjive kod dinamičnih problema kao što je rekonfiguracija distributivnih mreža ili njihovo ekstenzivno planiranje.

Algoritam predložen u ovom članku je novi ali i klasičan. On koristi generisanje matrice admitansi nezavisnih čvorova koja je jedini ulazni podatak koji se menja sa rekonfiguracijom dok svi ostali ulazni podaci ostaju isti i nikakva renumeracija čvorova koja do sada nije praktično programerski korektno rešena nije potrebna Strezoski i saradnici (3). Ovo znači da zamena unapred/unazad kod Jakobijan matrice ili matrice admitansi nezavisnih čvorova kako je to urađeno kod tradicionalnog Newton Raphson ili Gauss implicitnog Z matričnog algoritma nije potrebna (1). Proste iterativne matrične operacije su primenjene da bi se sračunali naponi čvorova i gubici. Mreža može biti kako radijalna tako i slabo upetljana. Predloženi metod je robusan ali zahteva da se na kraju primeni i efikasni algoritam tokova snaga Stojanović (4) zbog nedovoljne preciznosti. Za razliku od originalnog

algoritma Nahman i Perić ovaj algoritam radi sa fazovima napona čvorova a ne sa padovima napona u odnosu na referentni čvor (slack node).

Glavna svrha ovog algoritma je optimizacija u svrhu smanjenja rezistentnih gubitaka rekonfiguracijom i optimizacija pri istovremnoj (simultanoj) kompenzaciji reaktivne snage i rekonfiguraciji a sve u svrhu smanjenja pomenutih rezistentnih gubitaka.

ALGORITAM ANALIZE TOKOVA SNAGA

Efikasni algoritam analize tokova snaga je sproveden pod pretpostavkom da se struje potrošnje u čvorovima mreže mogu proračunati iz zadatih snaga potrošnje u čvorovima što je njačešći slučaj kod rekonfiguracije mreže. Mreža koja se proračunava je slabo upetljena i matrica admitansi nezavisnih čvorova joj je singularna Heydt (5, str.17) tako da se ne može invertovati i direktno upotrebiti za proračun napona čvorova. Umesto ovoga primenjena je prosta formula kojom je invertovanje singularne matrice preskočeno. Napojni čvor mreže (nulti čvor) je proglašen za balansni, slack čvor.

Rekurzivna formula kojom se iterativno proračunavaju naponi nezavisnih čvorova mreže glasi Nahman i Perić (6):

$$[U(k+1)]=[Y_{diaginv}]*[J(k)]+([UN]-[Y_{diaginv}]*[Y])*[U(k)] \quad (1)$$

[U(k+1)] - k+1 iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova a ne padova napona u odnosu na referentni čvor (slack node),

[Y_{diaginv}] - inverzna matrica, dijagonalne matrice čiji su elementi glavna dijagonala matrice [Y], matrice admitansi nezavisnih čvorova,

[J(k)] - k-ta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova,

[UN] - jedinična matrica dimenzije jednake broju nezavisnih čvorova mreže i

[Y] - matrica admitansi nezavisnih čvorova, kvadratna matrica dimenzije jednake broju nezavisnih čvorova mreže, gore već navedena.

Prva iteracija je onda:

$$[U(1)]=[Y_{diaginv}]*[J_{nulto}]+([UN]-[Y_{diaginv}]*[Y])*[U_{nulto}] \quad (2)$$

[J_{nulto}] - nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova i

[U_{nulto}] - nulta iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova=12,66 kV, flat start (za analiziranu mrežu).

Dimenzije vektora napona nezavisnih čvorova i vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova odgovaraju broju nezavisnih čvorova mreže.

Podrazumeva se da su sve veličine u gornjim izrazima kompleksne.

Može se smatrati da je za kriterijum konvergencije uzeta pretpostavka da maksimalna relativna greška odstupanja napona čvorova u poslednje dve iteracije ne bude veća od 0.0001.

Kompleksni gubici mreže sračunavaju se kao razlika između snage injektirane u nulti čvor i ukupne potrošnje mreže (suma svih snaga potrošačkih čvorova).

Sračunati gubici mreže, ovim algoritmom, mogu se koristiti samo indikativno, stvarna snaga gubitaka mora se proračunati pomoću efikasnog algoritma analize tokova snaga (4) jer algoritam greši (videti zaključak).

PROGRAM ANALIZE TOKOVA SNAGA

Napravljen je program u MATLAB-u:

GENERALNIPROGRAMPOLAZNAKONFIGURACIJABEZPETLJI Stojanović i Moskovljević (7), za mrežu, Slika 1, čiji su podaci dati u Tabeli I, Baran i Wu (8) a petlje su joj razvezane (admitanse spojnih grana petlji setovane na nulu).

Ulazni podaci u program su:

- impedanse grana, potrebne za sračunavanje admitansi grana to jest elemenata matrice [Y], za način definisanja i unošenja elemenata ove matrice pogledati referencu (5) str. 17.

- nulta iteracija sračunavanja vektora napona nezavisnih čvorova=12,66 kV flat start, za posmatranu mrežu i

- nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova.

[J(k)] - k-ta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja (smer ka čvoru) nezavisnih čvorova pa i [Jnulto] - nulta iteracija sračunavanja vektora injektiranih struja nezavisnih čvorova sračunava se iz izraza:

$$(j * Q_i - P_i) / V_i(k) \quad (3)$$

gde je,

Q_i – reaktivna potrošnja čvora i (pozitivna od čvora),

P_i – aktivna potrošnja čvora i (pozitivna od čvora) i

$V_i(k)$ – konjugovani napon čvora i u k-oj iteraciji.

Pretpostavljeno je da su snage potrošnje konstantne i poznate što je slučaj za mrežu iz (8).

Injektirana struja u nulti čvor se ne može izračunati iz gornjeg izraza. Ova struja je jednaka zbiru potrošačkih struja svih ostalih čvorova, dobija se kao negativna suma struja injektiranja u sve potrošačke čvorove, što je implementirano u programu

GENERALNIPROGRAMPOLAZNAKONFIGURACIJABEZPETLJI.

DOKAZ KONVERGENCIJE

Gledati obrazac (1). Pretpostavljeno je da posle dovoljno velikog broja iteracija ($k \rightarrow \infty$),

$$[U(k+1)] = [U(k)].$$

$$[U(k+1)] = [Y_{diagin}^{-1}] * [J(k)] + ([UN] - [Y_{diagin}^{-1}] * [Y]) * [U(k)] \quad (1)$$

Posle dovoljno velikog broja iteracija obrazac (1) postaje:

$$[U(\infty)] = [Y_{diagin}^{-1}] * [J(\infty)] + ([UN] - [Y_{diagin}^{-1}] * [Y]) * [U(\infty)]$$

$$[U(\infty)] = [Y_{diagin}^{-1}] * [Y] * [U(\infty)] + ([UN] - [Y_{diagin}^{-1}] * [Y]) * [U(\infty)]$$

$$[U(\infty)] = [UN] * [U(\infty)]$$

$$[U(\infty)] = [U(\infty)]$$

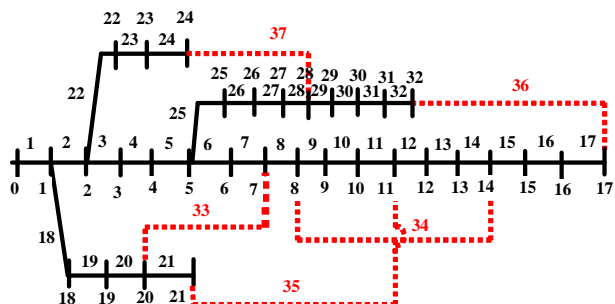
$$[J(\infty)] = [Y] * [U(\infty)], \text{ vidi referencu (5, str.16).}$$

Iz obrazca (1) se može naslutiti da je tokom proračuna moguće da napon napojnog čvora ne bude konstantan i bude veći od polazne vrednosti (po modulu). Program u MATLAB-u ga održava na konstantnoj vrednosti tako što ga uvek nakon proračuna jedne iteracije a pre proračuna nove iteracije setuje na njegovu zadatu vrednost 12,66kV.

Za sračunavanje struje injektirane u nulti čvor koristi se blok naredbi posle for petlje (7). Naponi nezavisnih čvorova poslednje iteracije kada je postignuta konvergencija su ulazni podaci u izraz (3) i oni definišu ovu struju na kraju proračuna ali sve preko injektiranih struja potrošačkih čvorova (ona je jednaka negativnoj sumi svih injektiranih struja potrošačkih čvorova, sračunatih u poslednjoj iteraciji).

PRIMENA

A) Primena modifikovanog efikasnog algoritma tokova snaga Nahman i Perić (6) na mrežu Baran i Wu (slika 1)



Slika 1- mreža Baran i Wu (8),

mreža ima 33 nezavisnih čvorova (0-slack node, 12.66 kV i još 32 čvora), 37 grana (32 grane, crne boje, sa običnim rastavljačima-normalno zatvoreni i 5 grana, crvene boje, sa spojnim rastavljačima-normalno otvoreni), može komutirati bilo koji rastavljač

U Tabeli I dati su podaci o mreži (aktivna i reaktivna otpornost grana, aktivna i reaktivna potrošnja u čvorovima i napon čvorova u relativnim jedinicama dobijen metodom Dujić, DMS Novi Sad (3) i A.Sarić (2))

Tabela I

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
7-20	2.000	2.000			
8-14	2.000	2.000			
11-21	2.000	2.000			
17-32	0.500	0.500			
24-28	0.500	0.500			

B) Rezultati primene modifikovanog efikasnog algoritma tokova snaga Nahman i Perić (6) na mrežu Baran i Wu (slika 1) (7)

$i = 347$ (broj iteracije kada je postignuta konvergencija, maksimalan broj iteracija 1000, što je i indeks for petlje, kriterijum konvergencije je maksimalna relativna vrednost, u odnosu na 12.66 kV, odstupanja modula napona nezavisnih čvorova u poslednje dve iteracije manja od 0.0001)

KONFIGURACIJA (slika 1):

Sve crne grane zatvorene, sve crvene otvorene, osnovna konfiguracija.

U Tabeli II dati su sledeći podaci:

ABSUit1 = vektor modula napona nezavisnih čvorova u poslednjoj iteraciji (i=347, broj iteracije),

12.6600 kV- nulti čvor (slack node=12.66 kV, 0 rad fazni stav);

ARGUit1 = vektor argumenata napona nezavisnih čvorova u poslednjoj iteraciji (i=347, broj iteracije),

0 rad- nulti čvor (slack node=12.66 kV, 0 rad fazni stav) i

DVMAX = postignuta relativna greška u odnosu na 12.66 kV (pretposlednja i poslednja iteracija sračunatog napona).

Tabela II

broj čvora	ABSUit1 (kV)	ARGUit1 (rad)	DVMAX (*0,0001)
nulti čvor	12.6600	0	0
1	12.6290	0.0002	0.0199
2	12.4855	0.0012	0.1243
3	12.4159	0.0021	0.2002
4	12.3478	0.0030	0.2755
5	12.1785	0.0019	0.4631
6	12.1506	-0.0008	0.5237
7	12.1141	-0.0005	0.5778
8	12.0744	-0.0013	0.7057
9	12.0390	-0.0019	0.7984
10	12.0331	-0.0019	0.8281
11	12.0205	-0.0019	0.8316
12	11.9688	-0.0035	0.9161
13	11.9504	-0.0046	0.9332
14	11.9393	-0.0052	0.9638
15	11.9272	-0.0056	0.9673
16	11.9091	-0.0067	0.9995
17	11.9029	-0.0069	0.9922
18	12.6224	-0.0000	0.0200
19	12.5774	-0.0012	0.0210
20	12.5686	-0.0015	0.0211
21	12.5605	-0.0019	0.0213
22	12.4408	0.0007	0.1268
23	12.3571	-0.0009	0.1288
24	12.3153	-0.0016	0.1300
25	12.1585	0.0024	0.4867
26	12.1308	0.0033	0.4928
27	12.0048	0.0045	0.5662
28	11.9136	0.0056	0.5932
29	11.8737	0.0072	0.6263
30	11.8309	0.0056	0.6418
31	11.8216	0.0052	0.6685
32	11.8189	0.0050	0.6517

Ukupna kompleksna potrošnja svih čvorova (Sload), kompleksna snaga gubitaka (Sloss) i aktivna snaga gubitaka (Ploss).

Sload =

3.7150e+003 +2.3000e+003i- sumarna potrošnja u svih 32 čvorova (kW+jkVar)

Sloss =

1.5343e+002 +1.0362e+002i- gubici (kW+jkVar)

Ploss =

153.4266- gubici aktivne snage (kW)

$i = 347$ (broj iteracije kada je postignuta konvergencija)

Struja injektiranja u slack node u i -oj iteraciji ($i=347$ kada je postignuta konvergencija), J_{itc0}

$J_{itc0} =$

$3.0556e+002 - 1.8986e+002i$

modul $J_{itc0} =$

359.7433 (A)

argumenat $J_{itc0} =$

-0.5560 (rad).

ZAKLJUČAK

1) dobijeni gubici modifikovanim efikasnim algoritmom tokova snaga iz članka Nahmana i Perića za mrežu Baran i Wu iznose 153kW dok je za iste gubitke metodom Dujića (DMS Novi Sad) (3) dobijeno 202kW,
2) razlika gornje dve vrednosti potiče iz činjenice da struja injektiranja u slack node, modifikovanom metodom Nahman i Perić iznosi $360(-0.556 \text{ rad})$ u [A] a metodom Dujić, Sarić (2) $364(-0.556 \text{ rad})$ u [A],
3) i ova mala razlika od 4A pomnožena sa 12,66kV daje nekih 48kVA razlike u gubicima prividne snage i adekvatnu razliku od 50kW u gubicima aktivne snage.

Efikasni algoritam analize tokova snaga Nahman i Perić može da posluži samo indikativno za proračun gubitaka u distributivnoj mreži.

On je vrlo pogodan za rešenje problema rekonfiguracije u svrhu smanjenja gubitaka, primenom metode simulacije kaljenja (simulated annealing).

Na žalost u članku Nahman i Perić rešen je problem konektivnosti ali ne i radijalnosti mreže.

Da bi se krenulo u proračun gubitaka u mreži simulated annealing metodom potrebno je generisati generatorom slučajnih brojeva stalno isti broj otvorenih grana da broj zatvorenih grana za jedan bude manji od broja čvorova Lavorato, Franco, Rider i Romero (9).

Upetljane konfiguracije mreže Baran i Wu su najjeftinije pa se ne mogu koristiti za iniciranje algoritma. Potrebno je odbacivanje konfiguracije jer nije radijalna to jest jer je sa petljama.

Nužna je provera neupetljanosti (radijalnosti) mreže što je urađeno u referenci (9).

Nafleksibilnost ili uprošćenost je karakteristika većine algoritama tokova snaga koji se zbog toga ne mogu koristiti za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža metodom simulacije kaljenja Sarić i Čalović; Stojanović (2,10). Problem sa kojim se suočava distributivni inženjer je unošenje podataka konkretne konfiguracije distributivne mreže u računar što je promenljivo od konfiguracije do konfiguracije i zahteva mnogo vremena za pripremu i puštanje programa. Na primer za Markovljev lanac čija je dužina 100 generiše se 100 različitih konfiguracija koje zahtevaju puštanje programa tokova snaga 100 puta čiji su ulazni podaci 100 puta drugačiji. Dvostruko uvezana struktura liste podataka (double linked-list data structure) za predstavljanje ulaznih podataka distributivne mreže nije dovoljno objašnjena Jiang; Jeon, Kim, Kim, Shin i Lee (11,12). U prezentovanom algoritmu potrebno je samo admitansu grane koja se prekida setovati na 0 nezavisno od toga da li se radi o radijalnoj ili slabo upetljanoj mreži. Model je podesan i u slučaju distribuirane proizvodnje (distributed generation) s tim što se onda mali generatori predstavljaju kao potrošači negativne aktivne snage i odgovarjuće reaktivne. Iz navedenih razloga razvijeni algoritam primenjen sa tačnim algoritmom tokova snaga predstavlja moćno oružje svakog distributivnog inženjera kada rešava dinamičke probleme distributivnih mreža kao što je njihova rekonfiguracija ili planiranje što je i glavni doprinos autora.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

1. Teng J.H., July 2003, "A direct approach for distribution system load flow solutions", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol. 18, No. 3", pp. 882-887
2. Sarić A. i Čalović M., 1992, „Jedan algoritam za proračun naponskih stanja, tokova snaga i gubitaka u radijalnom distributivnom sistemu“, „Elektrodistribucija“, „God.20, Br.3“, str. 127-140
3. V.Strezoski i saradnici, 1998, „Osnovni energetske proračuni za analizu i upravljanje distributivnim mrežama“, (studija), Institut za energetiku i elektroniku, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
4. Stojanović B., OTEH 2011, "Efficient automatic program for voltage and current calculation in large scale radial balanced distribution networks without transformers"
5. Heydt, G.T., Copyright 1986, "Computer analysis methods for power systems", Purdue University, "Macmillan Publishing Company, New York", 359 (p), pp. 11-15
6. Nahman J.M. and Perić D.M., May 2008, "Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol.23, No.2", pp. 790-795
7. Stojanović B. i Moskovljević M., Matlab Program,
GENERALNIPROGRAMPOLAZNAKONFIGURACIJABEZPETLJI, 2015
8. 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
9. Lavorato M., Franco J.F., Rider J.M. 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
10. Stojanović B., januar 1997, „Simulacija kaljenja i njena primena na kompenzaciju u radijalnim distributivnim mrežama“, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, osnovni deo rada, 94 str.
11. Jiang D., May 1994, "Electric distribution system reconfiguration and capacitor switching", Masters thesis, Worcester Polytechnic Institute, 77 p
12. Jeon Y.J., Kim J.C., Kim J.O., Shin J.R. and Lee K.Y., October 2002, "An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol. 17, No. 4", pp. 1070-1078