

## PRIMERJAVA METOD ZA IZRAČUN PRETOKOV ENERGIJE V NIZKONAPETOSTNEM DISTRIBUCIJSKEM OMREŽJU S PRIKULJUČENIMI RAZPRŠENIMI VIRI

Nevena SREČKOVIĆ, Ernest BELIČ, Gorazd ŠTUMBERGER

### POVZETEK

*Izračuni pretokov energije predstavljajo enega izmed temeljev obratovanja modernega distribucijskega omrežja. Zato je potrebno zagotoviti zmožljive algoritme za izračun pretokov energije, ki hitro konvergirajo, imajo minimalno porabo pomnilniškega prostora in predstavljajo numerično robustno metodo, prilagodljivo za različne obratovalne scenarije. V prispevku sta predstavljeni, primerjani in ovrednoteni dve učinkoviti metodi za izračune pretokov energije distribucijskega omrežja – backward/forward sweep metoda in direktna metoda. Prikazan je postopek modeliranja elementov distribucijskega omrežja – vodov, bremen, razpršenih proizvodnih enot ter implementacija algoritmov obeh metod. Analiza je izvedena na primeru dela nizkonapetostnega distribucijskega omrežja.*

### ABSTRACT

*Load flow analysis represents one of the core methods used in modern distribution system operation. Therefore, it is necessary to provide efficient, numerically robust load flow algorithms with fast convergence and minimum usage of memory, suitable for variety of operating scenarios. The paper presents, compares and evaluates two efficient methods for load flow calculation in distribution network – backward/forward sweep method and direct method. The procedure of modeling the distribution network elements – line sections, loads, distributed generation units, as well as the implementation of algorithms, has been presented. The analysis has been performed on low voltage distribution network system.*

### 1. UVOD

Analiza pretokov energije se uporablja za določitev učinkovite vrednosti napetosti ter kota napetosti v vsakem vozlišču sistema, pretoka energije v vsaki veji, moči dovedene s priključenimi generatorji, ter izgub v sistemu [1]. Pomembna je pri načrtovanju, avtomatizaciji in optimizaciji energetskega sistema. Njena pomembnost še posebej narašča s težnjo po uvajanju t.i. pametnih omrežij. Delovanje modernega sistema vodenja distribucijskega omrežja (DMS – distribution management system), kot tudi aplikacije, ki jih DSM omogoča (FDIR – fault detection, isolation and service restoration, IVVC – integrated

voltage/var control), temeljijo na podatkih dobljenih s pomočjo merjenja in izračunavanja pretokov energije [2].

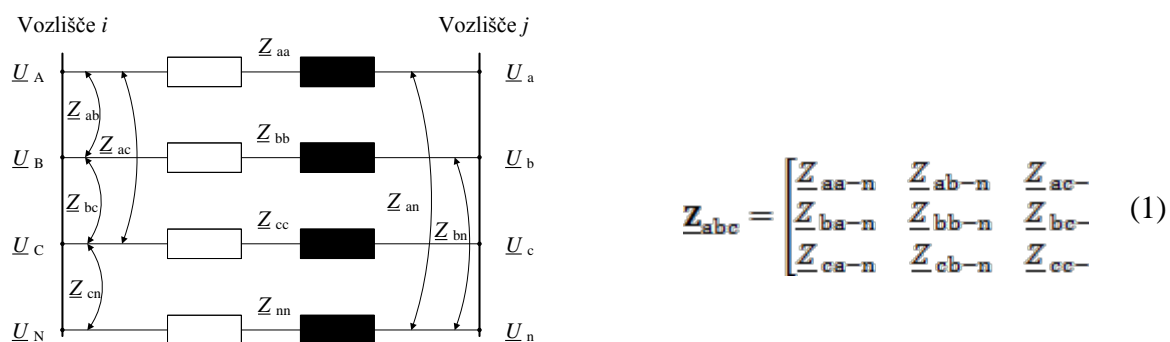
Standardni algoritmi izračuna pretokov energije v prenosnem omrežju (Newton – Raphson, Gauss – Seidl, metoda hitre razklopitve), niso primerni za izračune obratovalnih stanj distribucijskega omrežja (DO). Omenjeni algoritmi v večini primerov ne bodo konvergirali oz. bo njihova formulacija slabo pogojena zaradi naslednjih značilnosti DO: radialna, oz. šibko zazankana topologija z nizkim  $X/R$  razmerjem, večfazni, nesimetrični sistemi, nesimetrična/porazdeljena bremena, priključitev RV ... Diskretni algoritmi razviti z namenom učinkovitega izračuna pretokov energije v DO lahko razdelimo v dve kategoriji [6]. V prvo štejemo algoritme nastale z prilagoditvijo klasičnih metod za izračun pretokov energije v prenosnih omrežjih (Gauss-ove metode z uporabo implicitne vozliščne impedančne matrike, modificirane Newton-ove metode...). V drugo skupino pa metode, ki temeljijo na izrabi radialne topologije DO in uporabi Kirchhoffovih zakonov (backward/forward sweep (BFS), direktne metode, ...). Ker so se v pregledu literature, BFS in direktne metode izkazale za bolj učinkovite glede na metode prve skupine [1],[4],[5], so v tem delu te metode primerjane na primeru nizkonapetostnega (NN) radialnega omrežja z priključenimi razpršenimi viri.

Prispevek je razdeljen na 7 poglavij. V drugem poglavju je predstavljen model trifaznega DO, in sicer model voda, bremena ter razpršenih virov (RV). V tretjem in četrtem poglavju sta podana opisa izvedb algoritmov metode BFS ter direktne metode. Testni model je opisan v petem, rezultati analize pretokov energije s pomočjo predstavljenih algoritmov so podani v šestem poglavju.

## 2. TRIFAZNI MODEL

### 2.1 Model voda

Večji delež odsekov DO predstavljajo trifazni nadzemni vodi ter kablovodi, z dvofaznimi in enofaznimi odseki. Slika 1 prikazuje trifazni model voda med vozlišči  $i$  in  $j$ .



Slika 1: Model odseka trifaznega voda

Model trifaznega odseka, predstavljenega na sl. 1 opišemo z Carson-ovo impedančno matriko  $\underline{Z}_{abc}$ , ki jo s pomočjo Kron-ove redukcije iz  $4 \times 4$  preoblikujemo v  $3 \times 3$  matriko (1), v kateri je še vedno zajet vpliv ničelnega vodnika [7]. Napetostni enačbi modela (sl.1), sta podani v tretjem in četrtem razdelku.

V primeru testnega modela DO, je bilo (1) potrebno preoblikovati, glede na podatke vodnikov/kablovodov, ki so bili podani od strani proizvajalcev (tabela 1) [9].

Tabela 1: Kataloški podatki kablovodov testnega omrežja

Tip kabla	Presek vodnika (mm <sup>2</sup> )	Fazna vrednost upornosti $r \left( \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$	Fazna vrednost reaktance $x \left( \frac{\Omega}{\text{km}} \right)$	$X/R$
NAYY	4 × 35	0,868	0,0790	0,0919
NAYY	4 × 70	0,443	0,0750	0,169
NAYY	4 × 240	0,125	0,0720	0,576
NFA2X	4 × 35	0,868	0,0750	0,0919

Podane so torej samo obratovalne vrednosti upornosti ter reaktanc, ki jih v matematičnem modelu upoštevamo kot vrednosti pozitivnega zaporedja  $\underline{Z}_+(2)$ , v sistemu simetričnih komponent. Spremenljivka  $l$  predstavlja dolžino voda med dvema vozliščima. Na osnovi podanih vrednosti, lahko predpostavimo vrednost ničelnega zaporedja  $\underline{Z}_0$ , ki bo enaka  $3 \div 5$  kratniku impedance pozitivnega zaporedja [8].

$$\underline{Z}_+ = (r + jx)l \quad (2)$$

Če predpostavimo, da so fazni vodniki prepleteni, lahko vpeljemo aproksimacijo fazne impedančne matrike (3), ki je v nadaljevanju upoštevana pri izračunih. Ta vsebuje člena, ki predstavljata lastno ( $\underline{Z}_l$ ) ter medsebojno ( $\underline{Z}_m$ ) impedanco vodnika. Vrednosti dozemnih kapacitivnosti se lahko zanemarijo, ker so dolžine vodov med posameznimi vozlišči zelo majhne [7].

$$\underline{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_l & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_l & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_l \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (2\underline{Z}_+ + \underline{Z}_0) & (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_+) & (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_+) \\ (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_+) & (2\underline{Z}_+ + \underline{Z}_0) & (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_p) \\ (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_+) & (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_+) & (2\underline{Z}_+ + \underline{Z}_0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.2 Model bremena in RV

Tok  $\underline{I}_{brm}$ , ki ga v  $i$ -to vozlišče sistema vsiljuje priključeno breme, lahko predstavimo s pomočjo modela bremena konstantne moči  $\underline{S}_{brm}$  – CP (4a), konstantnega toka  $\underline{I}_{brm}$  – CI (4b) ali konstante impendance  $\underline{Z}_{brm}$  – CZ (4c) [3].

$$\begin{bmatrix} I_{brm,a}(i) \\ I_{brm,b}(i) \\ I_{brm,c}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{S_{brm,a}(i)}{U_a(i)} \right)^* \\ \left( \frac{S_{brm,b}(i)}{U_b(i)} \right)^* \\ \left( \frac{S_{brm,c}(i)}{U_c(i)} \right)^* \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_{brm,a}(i) \\ I_{brm,b}(i) \\ I_{brm,c}(i) \end{bmatrix} = const \quad \begin{bmatrix} I_{brm,a}(i) \\ I_{brm,b}(i) \\ I_{brm,c}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{U_a(i)}{Z_{brm,a}(i)} \right) \\ \left( \frac{U_b(i)}{Z_{brm,b}(i)} \right) \\ \left( \frac{U_c(i)}{Z_{brm,c}(i)} \right) \end{bmatrix} \quad (4a) \quad (4b) \quad (4c)$$

S pravilno vključitvijo razpršenih virov v distribucijsko omrežje lahko izboljšamo napetostni profil, zmanjšamo izgube sistema, omogočimo pomožno napajanje, povečamo kvaliteto in zanesljivost oskrbe in zmanjšamo potrebo po večjih investicijah v prenosnem in razdelilnem omrežju [1]. Razpršene vire pri modeliranju DO predstavimo tako kot bremena konstantne moči (4a) – s podano delovno  $\underline{P}_{gen}$  in jalovo močjo  $\underline{Q}_{gen}$ , le da sta te nasprotnega predznaka kot vrednosti  $\underline{S}_{brm}$ .

## 3. ALGORITEM BFS METODE

Backward/forward sweep metodo je prvič predstavil Berg leta 1964 in je do danes v nekoliko spremenjenih oblikah, postala pogosto uporabljena metoda za izračune pretokov energije radialnih in zazankanih distribucijskih omrežij [1]. BFS metode izkoriščajo radialno strukturo DO in v osnovi temeljijo na dveh korakih – backward ter forward sweep-u. V prvem koraku računamo toke in/ali moči vej od vozlišča najbolj oddaljenega bilančnemu vozlišču, proti bilančnemu vozlišču, (»vzvodno«-backward). V forward sweep koraku preračunavamo vrednosti vozliščnih napetosti od bilančnega proti najbolj oddaljenemu vozlišču omrežja (»nizvodno«-forward). Postopek se iterativno ponavlja, dokler konvergenčni kriterij ni izpolnjen [5.]

Izbrano metodo je podal Thukaram leta 1999 [3] in je primerna za uporabo na simetričnih ali nesimetričnih, radialnih DO. V backward sweep koraku s pomočjo drugega

Kirchhoffovega zakona računamo vrednost tokov v vejah. Tako je v veji  $m$ , ki je omejena z vozlišči  $i$  in  $j$  vrednost toka  $\underline{I}$  opisana s (6a) in (6b). S posebnim načinom številčenja vozlišč in vej, ki bo opisano v petem razdelku, je zagotovljeno, da bo zaporedna številka veje vedno za ena manj kot številka sprejemnega vozlišča obravnavane veje, torej je  $m = j - 1$ .

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a(j-1) \\ \underline{I}_b(j-1) \\ \underline{I}_c(j-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_a^0(j-1) \\ \underline{I}_b^0(j-1) \\ \underline{I}_c^0(j-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{brm,a}(j) \\ \underline{I}_{brm,b}(j) \\ \underline{I}_{brm,c}(j) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{gen,a}(j) \\ \underline{I}_{gen,b}(j) \\ \underline{I}_{gen,c}(j) \end{bmatrix} \quad (6a)$$

Vektor  $\underline{I}^0$ , prisoten v (6a), predstavlja vrednost toka veje, dobljen z izračunom tokov v vejah, lociranih višje od obravnavane veje. Podobno je potrebno vrednost toka dobljeno z (6a), prišteti veji locirani višje od obravnavane veje (6b).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a(i-1) \\ \underline{I}_b(i-1) \\ \underline{I}_c(i-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_a^0(i-1) \\ \underline{I}_b^0(i-1) \\ \underline{I}_c^0(i-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_a(j-1) \\ \underline{I}_b(j-1) \\ \underline{I}_c(j-1) \end{bmatrix} \quad (6b)$$

V drugem koraku (forward sweep-u), na osnovi izračunanih tokov vej računamo napetosti vozlišč (7).

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a(j) \\ \underline{U}_b(j) \\ \underline{U}_c(j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_a(i) \\ \underline{U}_b(i) \\ \underline{U}_c(i) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_1(m) & \underline{Z}_m(m) & \underline{Z}_m(m) \\ \underline{Z}_m(m) & \underline{Z}_1(m) & \underline{Z}_m(m) \\ \underline{Z}_m(m) & \underline{Z}_m(m) & \underline{Z}_1(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a(m) \\ \underline{I}_b(m) \\ \underline{I}_c(m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Koraka se iterativno ponavljata, dokler konvergenčni pogoj ni izpolnjen. Pri tej implementaciji je konvergenca dosežena, ko je razlika med vektorjema napetosti dveh zaporednih korakov, za vsako vozlišče  $i$ , manjša od predpisane vrednosti  $\varepsilon$  (8). V  $k$ -ti iteraciji mora veljati:

$$\max\left(\operatorname{Re}\left(\underline{U}^k(i) - \underline{U}^{k-1}(i)\right), \operatorname{Im}\left(\underline{U}^k(i) - \underline{U}^{k-1}(i)\right)\right) < \varepsilon \quad (8)$$

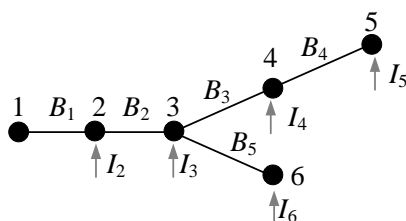
#### 4. ALGORITEM DIREKTNE METODE

J. H. Teng je leta 2003 objavil metodo, ki temelji na formulaciji dveh matrik **BIBC** (bus injection to bus current) ter **BCBV** (bus current to bus voltage). Matrika **BIBC** je zgornja trikotna matrika, sestavljena iz 0 in 1 in nam poda povezavo med toki  $\underline{I}_{voz}$  vsiljenimi v omrežje s strani bremena/generatorja ter toki vej  $\underline{I}_{vej}$  (9). **BCBV** je spodnja trikotna s členi 0 in  $\underline{Z}_{ij}$  in povezuje toke vej s padci napetosti v vejah  $\Delta \underline{U}$  in posledično – z napetostmi v vozliščih (10).

$$\underline{\mathbf{I}}_{vej} = \underline{\mathbf{BIBC}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{voz} \quad (9)$$

$$\underline{\Delta \mathbf{U}} = \underline{\mathbf{BCBV}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{vej} \quad (10)$$

Za enofazni primer DO na sliki 2 [4], sta zapisani **BIBC** in **BCBV** (11a), (11b).



Slika 2: Radialno omrežje s šestimi vozlišč

$$\underline{\mathbf{BIBC}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{BCBV}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{12} & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{23} & 1 & 1 & 1 \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{23} & \underline{Z}_{34} & 1 & 0 \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{23} & \underline{Z}_{34} & \underline{Z}_{34} & 0 \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{23} & 0 & 0 & \underline{Z}_{36} \end{bmatrix} \quad (11a),(11b).$$

Matriki se določita le na osnovi topologije omrežja in ne potrebuje dekompozicije **LU** matrike in forward/backward substitucije Jakobijeve matrike oz. admitančne matrike, ki sta potrebni pri algoritmi nastalih s prilagajanjem klasičnih metod za izračun pretokov energije v prenosnih omrežjih. Za trifazni sistem, matriki prilagodimo tako, da namesto posameznih elementov matrik upoštevamo  $3 \times 3$  matrike, ki zajamejo medsebojne vplive vodnikov [4].

Po tem, ko sta izračunani matriki **BIBC**, **BCBV** in njun produkt **DLF**, iterativno določimo toke  $\underline{\mathbf{I}}_{voz}$  (12), ki jih v vozlišče  $i$  vsilijo bremena  $\underline{\mathbf{I}}_{brm}$ , predstavljena z modeli konstantne moči, toka ali impedance (3a, 3b, 3c), ter razpršeni viri  $\underline{\mathbf{I}}_{gen}$ , opisani s pomočjo modela bremena konstantne moči [5]. Iterativno računamo tudi padce napetosti v vsaki veji (13) ter napetosti vozlišč (14). Tako kot v primeru BFS metode, je veja  $m$  omejena z vozlišči  $i$  in  $j$ , kjer je  $m = j - 1$ . Konvergenčni pogoj je enak, kot pri BFS algoritmu (8).

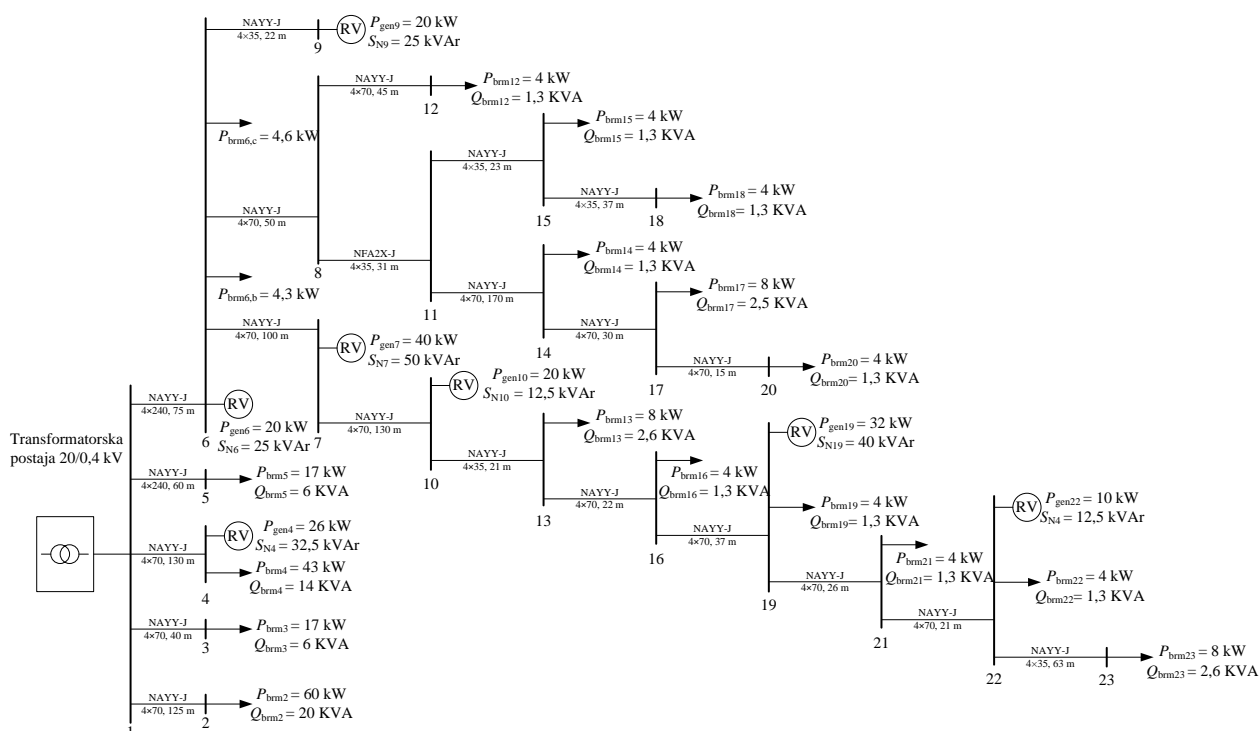
$$\underline{\mathbf{I}}_{voz}^k(i) = \underline{\mathbf{I}}_{brm}^k(i) + \underline{\mathbf{I}}_{gen}^k(i) = \left( \frac{\underline{\mathbf{S}}_{brm}^k(i)}{\underline{\mathbf{U}}^k(i)} \right)^* + \left( \frac{\underline{\mathbf{S}}_{gen}^k(i)}{\underline{\mathbf{U}}^k(i)} \right)^* \quad (12)$$

$$\underline{\Delta \mathbf{U}}^{k+1}(m) = \underline{\mathbf{DLF}} \cdot \underline{\mathbf{I}}_{voz}^k(i), \quad (13)$$

$$\underline{\mathbf{U}}^{k+1}(i) = \underline{\mathbf{U}}^{k+1}(1) - \underline{\Delta \mathbf{U}}^{k+1}(m), \quad (14)$$

## 5. TESTNI MODEL

Model distribucijskega omrežja, uporabljen za analizo učinkovitosti BFS in direktne metode, je podan na sliki 3. RV so predpostavljene sončne elektrarne, ki so v omrežje priključene preko razsmernikov.



Slika 3: Testni model NN DO

Številke vozlišč in vej je bilo potrebno ustrezno oštevilčiti tako, da se pri obeh algoritmih radialna topologija omrežja direktno izkoristi. Postopek številčenja vozlišč je takšen, da jih razdelimo v plasti, glede na oddaljenost od bilančnega vozlišča. Prvemu – bilančnemu vozlišču dodelimo številko 1, in potem številčimo vozlišča po vrsti, tako da vozlišča naslednje plasti številčimo šele po tem, ko so vsa vozlišča prejšnje plasti že oštevilčena. Vsaka veja je omejena z dvema vozliščema – oddajnim (i) in sprejemnim (j). Veje številčimo tako, da je številka veje za ena manjša od številke sprejemnega vozlišča te veje.

## 6. REZULTATI

BFS in direktna metoda sta primerjani na testnem modelu nizkonapetostnega radialnega DO, predstavljenega v poglavju 5. Vrednost konvergenčnega pogoja – parametra  $\epsilon$ , je v vseh primerih bila postavljena na vrednost  $\epsilon = 10^{-5}$ . Izračun poteka v sistemu enotnih vrednosti, na koncu pa vse spremenljivke pretvorimo v SI sistem enot. Tabela 2 prikazuje vrednosti

faznih napetosti v vozliščih in kotov napetosti, za model bremena konstantne moči pri nazivni obremenitvi. Rezultati napetosti vozlišč in faznih kotov obeh metod se ujemajo.

Tabela 2: Vrednosti napetosti v vozliščih in kotov napetosti obeh metod

Vozl.	$U_{rms,a}$ (V)		$\delta_a$ (°)		$U_{rms,b}$ (V)		$\delta_b$ (°)		$U_{rms,c}$ (V)		$\delta_c$ (°)	
	BFS	Direktna	BFS	Direktna	BFS	Direktna	BFS	Direktna	BFS	Direktna	BFS	Direktna
1	235,000	235,000	0,000	0,000	235,000	235,000	-120,000	-120,000	235,000	235,000	120,000	120,000
2	234,045	234,045	-0,047	-0,047	234,045	234,045	-120,047	-120,047	234,045	234,045	119,953	119,953
3	234,782	234,782	-0,010	-0,010	234,782	234,782	-120,010	-120,010	234,782	234,782	119,990	119,990
4	233,405	233,405	0,223	0,223	233,405	233,405	-119,777	-119,777	233,405	233,405	120,223	120,223
5	234,546	234,546	0,019	0,019	234,546	234,546	-119,981	-119,981	234,546	234,546	120,019	120,019
6	241,138	241,138	0,616	0,616	238,569	238,569	-119,244	-119,244	238,703	238,703	120,323	120,323
7	244,621	244,621	0,910	0,910	242,109	242,109	-118,945	-118,945	242,237	242,237	120,627	120,627
8	240,227	240,227	0,646	0,646	237,643	237,643	-119,211	-119,211	237,775	237,775	120,354	120,354
9	241,686	241,686	0,638	0,638	239,126	239,126	-119,222	-119,222	239,260	239,260	120,346	120,346
10	246,027	246,027	1,161	1,161	243,540	243,540	-118,689	-118,689	243,663	243,663	120,885	120,885
11	239,300	239,300	0,696	0,696	236,702	236,702	-119,159	-119,159	236,832	236,832	120,405	120,405
12	240,118	240,118	0,652	0,652	237,533	237,533	-119,205	-119,205	237,664	237,664	120,360	120,360
13	246,247	246,247	1,226	1,226	243,764	243,764	-118,623	-118,623	243,885	243,885	120,952	120,952
14	237,524	237,524	0,756	0,756	234,896	234,896	-119,095	-119,095	235,023	235,023	120,466	120,466
15	239,072	239,072	0,709	0,709	236,470	236,470	-119,146	-119,146	236,599	236,599	120,418	120,418
16	246,465	246,465	1,259	1,259	243,985	243,985	-118,589	-118,589	244,106	244,106	120,986	120,986
17	237,289	237,289	0,764	0,764	234,658	234,658	-119,087	-119,087	234,784	234,784	120,474	120,474
18	238,888	238,888	0,719	0,719	236,283	236,283	-119,135	-119,135	236,412	236,412	120,428	120,428
19	246,925	246,925	1,312	1,312	244,453	244,453	-118,535	-118,535	244,573	244,573	121,040	121,040
20	237,249	237,249	0,766	0,766	234,618	234,618	-119,085	-119,085	234,744	234,744	120,475	120,475
21	246,818	246,818	1,327	1,327	244,345	244,345	-118,520	-118,520	244,464	244,464	121,055	121,055
22	246,785	246,785	1,337	1,337	244,311	244,311	-118,509	-118,509	244,430	244,430	121,066	121,066
23	246,177	246,177	1,369	1,369	243,694	243,694	-118,476	-118,476	243,812	243,812	121,098	121,098

Časi izračuna in potrebno število iteracij za različne obratovalne pogoje, so prikazani za različna obratovala stanja. Tabela 3 prikazuje rezultate, ob upoštevanju različnih modelov bremen, tabela 4 rezultate za model bremena CI (glej poglavje 2.2) in različne vrednosti  $X/R$  razmerja in tabela 5 rezultate za model bremena CI, pri različni obremenitvi sistema.

Tabela 3: Rezultati izračuna za različne modele bremen

Model bremena	Čas izračuna (s)		Število iteracij	
	BFS	Direktna	BFS	Direktna
CP	0,05492	0,06986	4	5
CI	0,05523	0,07145	5	6
CZ	0,05874	0,07185	7	8

Tabela 4: Rezultati izračuna za različna  $X/R$  razmerja, za CI model bremena

$\frac{X}{R}$	Čas izračuna (s)		Število iteracij	
	BFS	Direktna	BFS	Direktna



$k = 0,2$	0,05489	0,07103	5	6
$k = 5$	0,05562	0,06857	5	6
$k = 10$	0,05610	0,06912	8	9

Tabela 5: Rezultati izračuna za različne stopnje obremenitve sistema, za CI model bremena

$k(P_{brm} + jQ_{brm})$	Čas izračuna (s)		Število iteracij	
	BFS	Direktna	BFS	Direktna
$k = 0,5$	0,05396	0,06808	5	6
$k = 2$	0,05435	0,07110	6	6
$k = 3$	0,05518	0,07541	7	7

## 7. SKLEP

Algoritmi, ki se bodo uporabljali v bodočih, modernih distribucijskih omrežjih, morajo biti sposobni čim bolj učinkovito in natančno izračunati pretoke energije trifaznih, zazankanih, nesimetričnih sistemov, z velikim številom priključenih razpršenih proizvodnih enot. Osnovna prednost primerjanih metod je ta, da ne računata **LU** oz. Jakobijeve matrike in zato potrebujeta manj časa za izračun. Po drugi strani se metodi izkažeta občutljivi na povečanje obremenitve ter povečanje razmerja  $X/R$ . Slabost BFS metode je tudi to, da je neuporabna v primeru zazankanih omrežij. Zato je vpeljana kompenzacijska metoda, ki odpravi to slabost. Zanke se razklenejo, na mestu razklopitve pa se ustrezno upoštevajo ekvivalentni vsiljeni toki [1]. Direktna metoda je prilagojena reševanju zazankanih problemov.

Iz dobljenih rezultatov simulacij vidimo, da se za testno radialno omrežje metodi podobno obnašata. BFS algoritem potrebuje eno iteracijo manj in ima krajše čase izračuna, vendar vidimo, da je bolj občutljiv na spremembe obremenitve sistema, kot pa direktna metoda. Ustrezno metodo je zato potrebno izbrati glede na lastnosti sistema, ki ga obravnavamo (radialno/zazankano omrežje, več/manj priključenih RV itn.) in zahtevah po hitrosti izračuna.

## 8. VIRI

- [1] J. A. Martinez, J. Mahseredjian, "Load flow calculations in distribution systems with distributed resources. A review", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, str. 1 – 8
- [2] J. Fan, S. Borlase, "The evolution of distribution" IEEE Power and Energy Magazine, 2009, zv. 7, št. 2, str. 63 – 68
- [3] D. Thukaram, H. M. Wijekoon Banda, J. Jerome, "A robust three phase power flow algorithm for radial distribution systems", Electric Power System Research, 1999, str. 227 – 239
- [4] J. H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, zv. 18, št. 3, str. 882 – 887
- [5] J. H. Teng, "Modelling distributed generations in three-phase distribution load flow", IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, zv. .2, št. 3, str. 330 – 340
- [6] U. Eminoglu, M. H. Hocaoglu, "Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study", Electric Power Components and Systems, 2009, str. 91 – 110
- [7] W. H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", CRC press, 2002
- [8] G. F. Moore, "Electric Cables Handbook", Wiley-Blackwell, 1997
- [9] Nexans, Power Cables 1 – 30 kV, Hannover: Nexans, 2012

## **NASLOV AVTORJEV**

Nevena Srečković, dipl. inž. el. (UN)

Ernest Belič, mag. inž. el.

red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ.dipl.inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 40 154 743

Elektronska pošta: [nevena.sreckovic@student.um.si](mailto:nevena.sreckovic@student.um.si)