

ANALIZA REŽIMA DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRI PROMENI OPTEREĆENJA

Lidija Korunović, Dobrivoje Stojanović, *Elektronski fakultet u Nišu*

Sadržaj - U radu je izvršena analiza režima radijalne distributivne mreže u cilju proračuna gubitaka snage pri perspektivnom porastu opterećenja. Proračuni su vršeni za različite tipove potrošnje i različite faktore snage. Prikazane su promene napona električno najudaljenijeg čvora, ukupnih gubitaka aktivne snage i granice opteretljivosti mreže sa promenom parametara potrošnje. Ukazano je na značaj poznavanja parametara potrošnje prilikom proračuna i planiranja distributivnih mreža.

1. UVOD

Tokom eksploatacije distributivne mreže prolaze kroz različite režime rada. Oni zavise od mnogih faktora počev od topologije mreže, trenutnih prilika u elektroenergetskom sistemu, socijalnih, ekonomskih i klimatskih faktora koji utiču na nivo potrošnje, kao i slučajnih događaja. Zbog toga se mnogi radovi bave pitanjima kao što su estimacija stanja distributivnih mreža, estimacija potrošnje, određivanje parametara modela potrošnje, određivanje i prognoza gubitaka.

Jedna grupa radova analizira rezultate proračuna distributivnih mreža pri različitim parametrima potrošnje. Tako je u [1] prikazana promena karakterističnih veličina distributivne mreže: struje najopterećenije deonice, napona električno najudaljenijeg čvora i ukupnih gubitaka aktivne i reaktivne snage pri različitim napojnim naponima i različitim tipovima potrošnje. U uslovima kada su podaci o potrošnji nedovoljno poznati može se primeniti fuzzy logički pristup proračuna [2, 3]. U [3] su analizirani rezultati proračuna maksimalnog opterećenja i pada napona, godišnjih gubitaka energije i karakterističnih pokazatelja pouzdanosti pri nepouzdanim podacima o potrošnji.

Sa stanovišta planiranja elektroenergetskih distributivnih mreža neophodna je analiza prilika u mreži pri perspektivnom porastu potrošnje [4, 5]. Sa porastom potrošnje se može analizirati i pojava naponskog sloma na osnovu mogućnosti nalaženja rešenja postupkom za proračun tokova snaga kao što je urađeno u [6]. Opterećenje pri kome se ne može naći rešenje proračunom tokova snaga je granica opteretljivosti mreže.

Generalno gledano, sa porastom opterećenja mreže, prilike u mreži se pogoršavaju: struje grana rastu, padovi napona su veći, a gubici aktivne i reaktivne snage se povećavaju sa kvadratom struje. Cilj ovog rada je da ustanovi kako se menjaju naponi i gubici aktivne i reaktivne snage pri povećanju opterećenja mreže.

U ovom radu je primenjena metoda sumiranja snaga [1] u cilju proračuna napona i tokova snaga na primeru radijalne IEEE test-mreže. Mreža je opterećivana potrošačima različitih tipova i faktora snage. Ovakvo opterećenje je linearno povećavano do granice opteretljivosti mreže, a rezultati proračuna su međusobno poređeni. Pored toga, prikazane su promene gubitaka snage i granice opteretljivosti

mreže sa preraspodelom reaktivne snage između čvorova mreže.

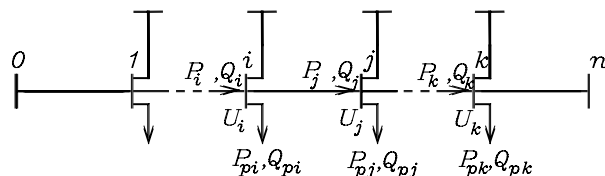
2. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Za analizu režima distributivnih mreža neophodan je proračun napona i tokova snaga. Ovaj proračun se vrši iterativnim postupkom gde se u svakoj iteraciji preračunavaju snage potrošača u skladu sa formulom

$$P_i = P_{ni} \left(\frac{U_i}{U_n} \right)^{k_{pi}} \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{ni} \left(\frac{U_i}{U_n} \right)^{k_{qi}}$$

U ovoj jednačini, P_{ni} i Q_{ni} su aktivna i reaktivna snaga potrošnje u čvoru i pri nazivnom naponu U_n , a k_{pi} i k_{qi} su koeficijenti samoregulacije. Kada su ovi koeficijenti nula, jedan ili dva, dobijaju se modeli konstantne snage, konstantne struje ili konstantne impedanse. Izborom vrednosti ovih koeficijenata moguće je simulirati različite tipove potrošnje.



Sl. 1. Prosta radijalna mreža

Najpre se, za zadati ili izračunati napon odrede snage pojedinih grana, saglasno (1). Neka je J skup grana k koje se neposredno ili posredno napajaju preko grane (čvora) j , Sl. 1. Tada su snage na kraju grane j određene sumom snaga potrošača P_{pk} , odnosno Q_{pk} uvećane za sumu gubitaka snage ΔP_k , odnosno ΔQ_k u pojedinim granama k

$$P_j = \sum_{k \in J} P_{pk} + \sum_{k \in J} \Delta P_k$$

$$Q_j = \sum_{k \in J} Q_{pk} + \sum_{k \in J} \Delta Q_k \quad (2)$$

gde je

$$\Delta P_k = R_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2}$$

$$\Delta Q_k = X_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} \quad (3)$$

Za granu j , između čvorova i i j , aktivne otpornosti R_j i reaktanse X_j , važi naponska jednačina

$$\underline{U}_i = U_j + \frac{P_j R_j + Q_j X_j}{U_j} + j \frac{P_j X_j - Q_j R_j}{U_j} \quad (4)$$

Sređivanjem (4), za modul napona U_j dobija se

$$U_j = \left[\left[(P_j R_j + Q_j X_j - 0,5U_i^2)^2 - (R_j^2 + X_j^2)(P_j^2 + Q_j^2) \right]^{\frac{1}{2}} - (P_j R_j + Q_j X_j - 0,5U_i^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

Jednačine (2) i (5) predstavljaju osnovne jednačine proračuna distributivne mreže.

Kompletan postupak proračuna se izvodi prema sledećem algoritmu:

1. unošenje podataka o mreži - topologija, napon napojnog čvora, parametri grana i opterećenja pri nazivnom naponu;
2. usvajaju se vrednosti napona, koriguju snage potrošača i računaju tokovi snaga za nova opterećenja;
3. prema (2) i (3) se određuju opterećenja na kraju svake grane i ukupni gubici u mreži na osnovu modula napona iz prethodne iteracije. Proces sumiranja ide unazad od poslednjeg ka izvornom čvoru;
4. polazeći od napojnog čvora, računaju se redom, u smeru toka snage, naponi pojedinih čvorova prema (5);
5. sa novim vrednostima napona računaju se gubici snage u pojedinim granama (3) i celoj mreži

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \Delta P_k \quad ; \quad (6)$$

$$\Delta Q = \sum_{k=1}^n \Delta Q_k$$

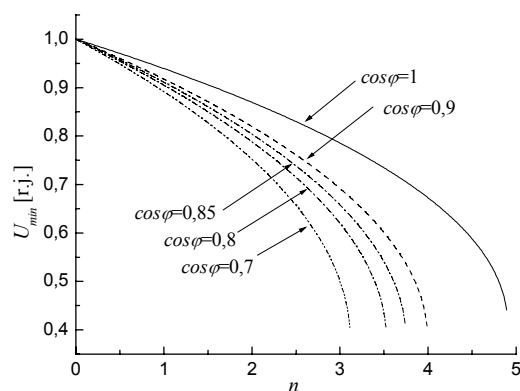
6. ako je promena ukupnih gubitaka manja od specificirane tačnosti ε , iterativni postupak je završen. Ako kriterijum konvergencije nije zadovoljen, iterativni postupak se produžava od drugog koraka.

Pri porastu opterećenja mreže, broj iteracija kod proračuna raste. Ako je broj iteracija veći od unapred zadatog velikog prirodnog broja to je znak da se dosegla granica opteretljivosti mreže sa stanovišta stabilnosti proračuna.

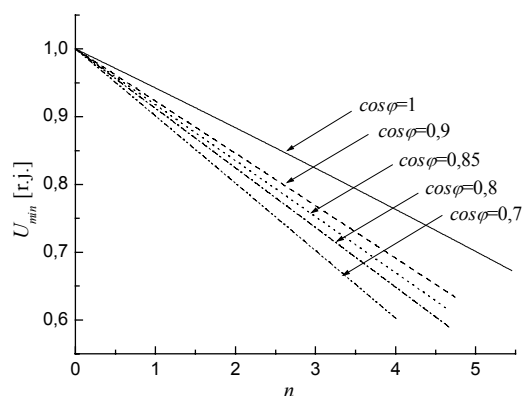
3. REZULTATI

Proračuni su vršeni za različite i međusobno jednake tipove potrošnje u IEEE test-mreži sa 32 čvora kada je napojni napon jednak nazivnom. Koeficijenti samoregulacije imaju vrednosti $k_p = k_q = 0, 1$ ili 2 , a faktor snage ($\cos\varphi$) manjan je u širokom opsegu od $0,7$ do 1 . Pri promeni faktora snage učinjena je pretpostavka da su aktivne snage potrošnje jednake onima datim u [7], dok je reaktivna snaga menjana da bi se dobio željeni $\cos\varphi$. Potrošnja je povećavana proporcionalno do granice opteretljivosti mreže.

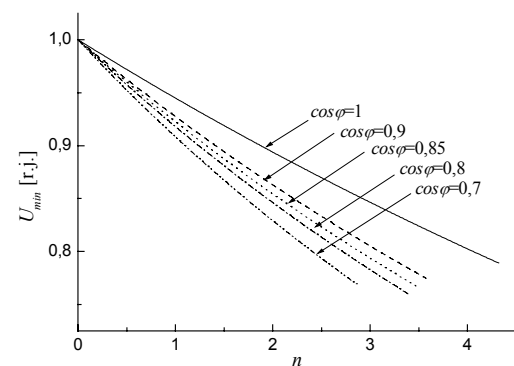
Na Sl. 2, 3 i 4 prikazan je napon čvora 17 koji ima najnižu vrednost napona, U_{min} , za koeficijente samoregulacije $0, 1$ i 2 , respektivno. Najnepovoljniji slučaj sa stanovišta pada napona je kod potrošača tipa konstantne snage. Ovaj tip potrošnje u odnosu na druge tipove karakteriše najstrijmiji pad napona pri porastu opterećenja i to, utoliko veći, ukoliko je faktor snage manji. Posmatrana je samo teoretska mogućnost pada napona i do $0,4$ r.j. sa porastom opterećenja. U realnim uslovima ovakav režim rada nije moguć jer bi reagovala zaštita ili bi se primenila planska isključenja.



Sl. 2. Napon električno najudaljenijeg čvora kao funkcija potrošnje različitih $\cos\varphi$ za potrošače tipa konstantne snage



Sl. 3. Napon električno najudaljenijeg čvora kao funkcija potrošnje različitih $\cos\varphi$ za potrošače tipa konstantne struje



Sl. 4. Napon električno najudaljenijeg čvora kao funkcija potrošnje različitih $\cos\varphi$ za potrošače tipa konstantne impedanse

Za $k_p = k_q = 1$ na Sl. 3 su dobijene linearne krive pada napona sa porastom opterećenja, jer se radi o potrošačima tipa konstantne struje. Sa linearnim porastom n , linearno rastu struje pojedinih grana i, istovremeno, napon pojedinih čvorova opada linearno. Prava sa najstrijmijim nagibom odgovara najgorem ispitivanom faktoru snage od $0,7$. Najpovoljniji slučaj sa stanovišta pada napona je kada su svi potrošači u mreži tipa konstantne impedanse (Sl. 4).

Srednje vrednosti U_{min} pri $\cos\varphi=0,85$, za $n = 1$ i 2 su $0,917$ i $0,831$ r.j, respektivno. U tabeli 1 data su odstupanja napona U_{min} od ovih srednjih vrednosti dobijena kao

$$u = \frac{U_{min} - U_{sr}}{U_{sr}} \cdot 100. \quad (7)$$

Ovi rezultati pokazuju koliko je značajno poznavati statičke karakteristike potrošnje prilikom planiranja elektroenergetskih distributivnih mreža, jer pri $n=2$ se može načiniti greška kod napona električno najudaljenijeg čvora koja je veća od 3%. Tabela 2 pokazuje da je uticaj faktora snage, odnosno reaktivne potrošnje, na variranje rezultata još veći nego što je uticaj tipa potrošnje. Greška koja se može načiniti kod tipa potrošnje konstantne snage ako se ne poznaje faktor snage je čak 6,7%.

U tabeli 2 je data i granica opteretljivosti mreže n_{max} . Ova granica raste sa povećanjem faktora snage kod svakog od tipova potrošnje, a najveća je za potrošače tipa konstantne struje i iznosi 5,46 ako je $\cos\varphi=1$. Skoro dva puta manje n_{max} se ima kod potrošača tipa konstantne impedanse i faktor snage 0,7.

Tabela 1. Vrednosti u pri promeni tipa potrošnje i n za $\cos\varphi = 0,85$

$k_p = k_q$	u [%]	
	$n=1$	$n=2$
0	-0,649	-3,265
1	0,044	0,466
2	0,605	2,8

Tabela 2. Odstupanje u i granica opteretljivosti mreže n_{max} pri promeni faktora snage i n

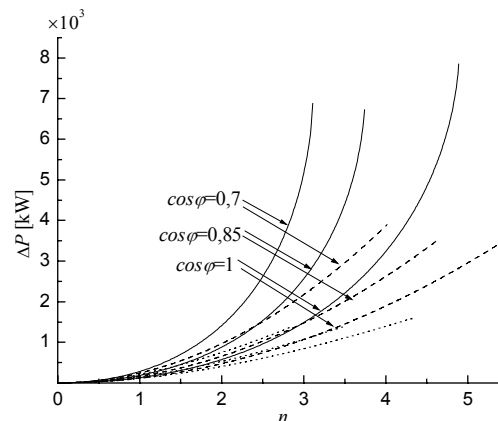
$k_p = k_q$	$\cos\varphi$	u [%]		n_{max}
		$n=1$	$n=2$	
0	0,7	-2,338	-6,745	3,11
	0,85	-0,191	-0,343	3,74
	1,0	2,899	7,8	4,9
1	0,7	-1,979	-4,336	4,03
	0,85	-0,185	-0,375	4,66
	1,0	2,519	5,436	5,46
2	0,7	-1,727	-3,28	2,87
	0,85	-0,177	-0,343	3,53
	1,0	2,239	4,265	4,33

Zbog očiglednijeg prikazivanja razlike ukupnih gubitaka aktivne snage pri različitim tipovima potrošnje i različitim faktorima snage, na Sl. 5 prikazane su krive gubitaka aktivne snage za $k_p = k_q = 0, 1$ i 2 , i faktore snage 0,7, 0,85 i 1. Skup krivih koje su nacrtane punom linijom, odgovara slučaju kada je potrošnja tipa konstantne snage, dok se krive nacrtane isprekidanom linijom i tačkama odnose na slučajeve potrošnje tipa konstantne struje i impedanse, respektivno. Najviše krive iz pojedinih skupova odgovaraju faktoru snage 0,7, a najniže jedinici. Razlika između skupova krivih je utoliko veća ukoliko je veći porast potrošnje, što pokazuje da se bez poznavanja parametara modela potrošnje ne mogu prognozirati gubici snage. Ova činjenica je potkrepljena brojkama u tabelama 3 i 4.

U tabeli 3 prikazana su odstupanja gubitaka aktivne snage od srednje vrednosti gubitaka pri $\cos\varphi=0,85$ za $k_p = k_q = 0, 1$ i 2 . Ove veličine su označene sa Δp i date u procentima

$$\Delta p = \frac{\Delta P - \Delta P_{sr}}{P_{sr}} \cdot 100. \quad (8)$$

Srednje vrednosti gubitaka aktivne snage, ΔP_{sr} , dobijene pri $\cos\varphi=0,85$ a različitim tipovima potrošnje, za $n=1$ i 2 su $165,665$ i $688,644$ kW, respektivno. Iz table 3 se uočava da se prilikom prognoze gubitaka snage za opterećenje duplo veće od nazivnog može napraviti greška veća od 28 % u slučaju da se poznaje faktor snage potrošnje a ne poznaje tip potrošnje.



Sl. 5. Ukupni gubici aktivne snage za tip potrošnje konstantne snage (—), struje (-----) i impedanse (.....) pri različitim $\cos\varphi$

Tabela 3. Vrednosti Δp pri promeni tipa potrošnje i n za $\cos\varphi = 0,85$

$k_p = k_q$	Δp [%]	
	$n=1$	$n=2$
0	12,55	28,11
1	-1,04	-4,78
2	-11,51	-23,33

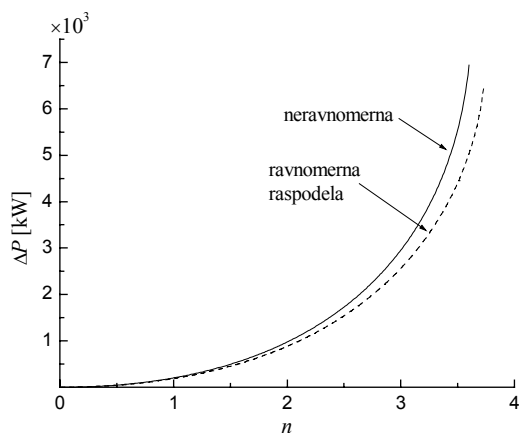
Tabela 4. Odstupanje Δp pri promeni $\cos\varphi$ i n

$k_p = k_q$	$\cos\varphi$	Δp [%]	
		$n=1$	$n=2$
0	0,7	44,93	51,75
	0,85	-4,47	5,39
	1,0	-33,71	-38,22
1	0,7	41,29	41,29
	0,85	-4,17	-4,17
	1,0	-30,77	-30,78
2	0,7	38,63	36,31
	0,85	-4,02	-3,89
	1,0	-28,44	-26,39

U tabeli 4 data su odstupanja aktivne snage pri pojedinim tipovima opterećenja od srednje vrednosti koja je dobijena na osnovu faktora snage 0,7, 0,85 i 1. Ona su nešto veća za potrošače tipa konstantne snage nego za druge tipove potrošnje. Takođe se, poređenjem sa tabelom 3, uočava da su odstupanja pri promeni faktora snage znatno veća nego ona

za konstantni $\cos\varphi$, a promenljivi tip potrošnje i da za $n=2$ ona mogu prevazići 51%. Ovo ukazuje na veliki značaj poznavanja faktora snage potrošnje i pri prognozi gubitaka snage.

Raspodela potrošnje po čvorovima mreže utiče na rezultate proračuna tokova snaga. Zbog toga su upoređeni rezultati kada je reaktivna snaga potrošnje raspodeljena po čvorovima kao u [7] i kada svi potrošači zadržavaju istu aktivnu snagu, ali im se reaktivna snaga računa korišćenjem prosečnog faktora snage konzuma u mreži koji iznosi 0,85. Sa Sl. 6 (isprekidane krive) uočava se da ovakva ravnomerna raspodela reaktivne snage potrošnje doprinosi smanjenju ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži u odnosu na originalnu neravnomernu raspodelu. Takođe, sa ravnomernom raspodelom povećava se granica opteretljivosti mreže sa $n=3,6$ na 3,74.



Sl 6. Promena ukupnih gubitaka aktivne snage sa n u slučaju neravnomerne i ravnomerne raspodele reaktivne snage potrošnje

U tabeli 5 data su odstupanja napona električno najudaljenijeg čvora i ukupnih gubitaka aktivne snage u slučaju originalne raspodele opterećenja u odnosu na raspodelu opterećenja sa prosečnim $\cos\varphi$ mreže. Ovi rezultati pokazuju da neravnomerna raspodela reaktivne snage potrošnje dovodi do nepovoljnijih prilika u mreži, napon električno najudaljenijeg čvora se smanjuje, dok ukupni gubici aktivne snage rastu i to pri $n=1$ za 8,7%, a pri $n=2$ za 10,6%.

Tabela 5. Smanjenje u i povećanje Δp pri neravnomerno, u odnosu na ravnomernu raspodelu reaktivnih snaga potrošnje

veličine	$n=1$	$n=2$
u [%]	0,218	0,455
Δp [%]	8,701	10,597

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirane promene napona električno najudaljenijeg čvora distributivne mreže, ukupnih gubitaka aktivne snage i granice opteretljivosti mreže sa promenom tipa potrošnje, faktora snage i preraspodelom reaktivne snage upotrošnje po čvorovima mreže. Utvrđeno je da pri opterećenju duplo većem od zadatog može doći do greške u proceni napona od 3% i ukupnih gubitaka snage od 28% ako

se ne poznaje tip potrošnje, a zna faktor snage. Ako je faktor snage nepoznat, a tip potrošnje se zna moguće greške su 6% i 51%, respektivno. Sa poboljšanjem faktora snage granica opteretljivosti mreže kod svih tipova potrošnje raste. Neravnomerna raspodela reaktivne snage potrošnje može dovesti do povećanja gubitaka snage od desetak procenata i smanjenja granice opteretljivosti mreže. Sve navedene činjenice pokazuju da je prilikom proračuna i planiranja distributivnih mreža neophodno da se u analizu uvrste podaci o parametrima potrošnje koji su dobijeni merenjima.

LITERATURA

- [1] D. Stojanović i L. Korunović, "Analiza uticaja tipa opterećenja na proračun distributivnih mreža", *Elektroprivreda*, br. 1, str. 76-81, 2000.
- [2] L. Korunović i D. Stojanović, "Procena gubitaka snage distributivnih mreža primenom fuzzy logičkog pristupa", *Zbornik radova XLVIII konferencije za ETRAN 2004*, tom I, str. 243-246.
- [3] J. Nahman and D. Perić, "Distribution System Performance Evaluation Accounting for Data Uncertainty", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, pp. 694-700, July 2003.
- [4] J. Spirić i J. Nahman, "Optimalan razvoj seoske mreže srednjeg napona sa porastom opterećenja," *Elektroprivreda*, br. 2, str. 62-68, 1997.
- [5] E. Diaz-Dorado, J. Cidras and E. Miguez, "Application of Evolutionary Algorithms for the Planning of Urban Distribution Networks of Medium Voltage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 879-884, August 2002.
- [6] G. Jasmon and L. Lee, "Distribution Network Reduction for Voltage Stability Analysis and Loadflow Calculations," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 9-13, February 1991.
- [7] M. Baran and F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.

Abstract – Analysis of radial distribution network operation conditions for power loss calculation at increasing load is performed in the paper. The calculations are done for the load of different types and different power factors. Variations of electrically most distante node voltage, total real power losses and network loadability margin with load parameter variations are presented. The importance of the knowledge of load parameters for distribution network calculation and planning is indicated.

ANALYSIS OF DISTRIBUTION NETWORK OPERACION CONDITIONS WITH LOAD VARIATION

Lidija Korunović, Dobrivoje Stojanović