

OSETLJIVOSTI GUBITAKA SNAGE I ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA NA PARAMETRE POTROŠNJE

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

Sadržaj – U radu su razmatrane osetljivosti gubitaka snage i energije u distributivnim mrežama na parametre potrošnje. Ovi parametri su dobijeni terenskim merenjima za određene tipove potrošnje. Osetljivosti gubitaka su normalizovane i međusobno upoređene pri različitim rasporedima tipova potrošnje po čvorovima jedne srednjenaponske distributivne mreže. Izvršeno je rangiranje potrošača na osnovu osetljivosti i ukazano je na mogućnosti koje pruža ovakva analiza.

1. UVOD

Distributivna preduzeća prodaju potrošačima električnu energiju koju kupuju od firme koja se bavi prenosom ove energije ili direktno od proizvođača. Prilikom distribucije električne energije neizbežno dolazi do gubitaka snage i energije koji nepovoljno utiču na poslovanje elektrodistributivnih preduzeća. Troškovi ovih gubitaka se nadoknađuju od potrošača preko odgovarajućeg tarifnog sistema. Mnoge zemlje u svetu imaju tarifne sisteme koji uvažavaju aktivnu i reaktivnu energiju i vršnu (maksimalnu) snagu kroz tarifne stavove vezane za period dana i sezonu. Takav je i naš tarifni stav u ovom trenutku. Međutim, u uslovima deregulisanog tržišta električne energije pitanje u kojoj meri pojedini potrošači učestvuju u ukupnim gubicima snage i energije postaje aktuelno. Cilj ove preraspodele gubitaka je pravedna naplata istih od potrošača. Do sada je napisano mnogo radova u vezi sa obračunom preuzete snage i energije od strane potrošača, na primer [1, 2].

U ovom radu je predložena metodologija za određivanje učešća pojedinih potrošača u gubicima snage i energije na osnovu teorije osetljivosti. Ova metodologija se može iskoristiti i za efikasno praćenje nivoa gubitaka u distributivnim mrežama. Naime, problem uvećanih gubitaka u elektroenergetskim distributivnim mrežama je bio, i trenutno je aktuelan, kako u svetu, tako i kod nas [3]. Za mnoge distributivne mreže je karakteristično da imaju skroman broj mernih uređaja u transformatorskim stanicama i da su podaci nadležnih distributivnih preduzeća o topologiji i parametrima niskonaponske mreže i njenim potrošačima veoma često nesređeni i nepouzdana. Zbog toga je određivanje nivoa gubitaka i njegovo praćenje prilično težak posao koji podrazumeva, pored ostalog i ulaganje značajnih sredstava u mernu opremu.

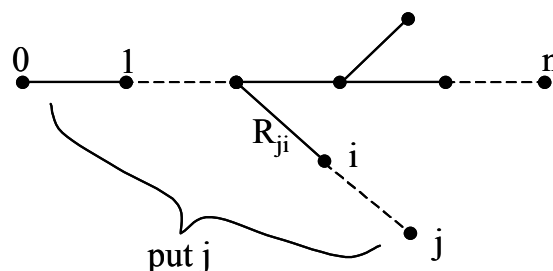
Elektrodistributivne mreže pokrivaju velika područja, a broj čvorova srednjenaponskih mreža često iznosi nekoliko stotina, pa i nekoliko hiljada. Tako je ugradnja mernih uređaja u svakom čvoru praktično nemoguća. Zbog toga je od suštinskog značaja da se za ugradnju ovih uređaja izaberu one lokacije gde će njihov efekat biti najveći, a to su oni čvorovi distributivne mreže koji najviše utiču na iznos gubitaka snage i energije. Ovi čvorovi se mogu odrediti na osnovu teorije osetljivosti. Pored toga, osetljivosti gubitaka na reaktivnu snagu potrošnje mogu biti jedan od kriterijuma za izbor

lokacija kondenzatorskih baterija u distributivnim mrežama [4].

2. METODOLOGIJA

Osnovna pretpostavka za primenu izložene metodologije je da su topologija i parametri vodova distributivne mreže poznati. Za razliku od ovih podataka, parametri potrošnje distributivne mreže tokom dana, nedelje, meseca i godine značajno variraju. Tome doprinose trenutne prilike u elektroenergetskom sistemu što se manifestuje preko vrednosti napojnog napona, kao i socijalni, ekonomski, klimatski i drugi faktori od kojih zavisi nivo potrošnje pojedinih čvorova mreže. Dijagrame potrošnje zbog toga treba izmeriti kod karakterističnih predstavnika potrošnje određenih tipova u različitim godišnjim dobima i danima u nedelji, a onda se oni primenjuju u čvorovima mreže sa sličnim sastavom potrošnje. Potom se primenjuje program za proračun distributivnih mreža [5] za svaki sat u toku mesec dana ili čitave godine. Osetljivosti gubitaka snage na aktivnu, reaktivnu snagu i faktor snage potrošnje se računaju za svaki sat. Na osnovu ovih osetljivosti se određuje udeo pojedinih potrošača u vršnom opterećenju, kao i u ukupnim gubicima energije.

Na Sl. 1 je prikazana jednodopolna šema jedne radijalne distributivne mreže. Ukupni gubici aktivne snage u ovoj mreži jednaki su sumi gubitaka u pojedinim deonicama. Međutim, struja potrošnje nekog j -tog čvora utiče na gubitke aktivne snage samo onih deonica koje povezuju konkretni čvor sa napojnim, i te deonice čine put j . Tako se put j definiše uz grane stabla do napojnog čvora, a broj puteva je jednak broju čvorova.



Sl. 1. Formiranje puteva radijalne mreže

Gubici aktivne snage na putu j se računaju kao

$$\Delta P_j = \sum_{i \in j} R_{ji} J_{ji}^2 \quad (1)$$

gde su:

R_{ji} - aktivna otpornost i -te deonice puta j ,

J_{ji} - struja i -te deonice puta j .

Parcijalni izvod ukupnih gubitaka aktivne snage po struji potrošnje j -tog čvora, iznosi

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial I_j} = 2 \sum_{i \in j} R_{ji} J_{ji} \quad (2)$$

Struja j -tog čvora zavisi od aktivne (P_j) i reaktivne (Q_j) snage potrošnje ovog čvora, pa se može pisati jednačina za osetljivost ukupnih gubitaka aktivne snage na aktivnu snagu potrošnje j -tog čvora

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_j} \cong \frac{\partial \Delta P}{\partial I_j} \cdot \frac{\partial I_j}{\partial P_j}, \quad (3)$$

jednačina za osetljivost ukupnih gubitaka aktivne snage na reaktivnu snagu potrošnje j -tog čvora

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_j} \cong \frac{\partial \Delta P}{\partial I_j} \cdot \frac{\partial I_j}{\partial Q_j} \quad (4)$$

i jednačina za osetljivost ukupnih gubitaka snage na faktor snage potrošnje j -tog čvora ($\cos \varphi_j$)

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \cos \varphi_j} \cong \frac{\partial \Delta P}{\partial I_j} \cdot \frac{\partial I_j}{\partial \cos \varphi_j} \quad (5)$$

U jednačinama (3), (4) i (5), približne vrednosti parcijalnih izvoda struje j -tog čvora po aktivnoj, reaktivnoj snazi i faktoru snage potrošnje ovog čvora su

$$\frac{\partial I_j}{\partial P_j} \cong \frac{P_j}{\sqrt{P_j^2 + Q_j^2} \cdot U_j}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_j}{\partial Q_j} \cong \frac{Q_j}{\sqrt{P_j^2 + Q_j^2} \cdot U_j} \quad (7)$$

i

$$\frac{\partial I_j}{\partial \cos \varphi_j} \cong - \frac{P_j}{\cos^2 \varphi_j \cdot U_j} \quad (8)$$

Jednačine (6), (7) i (8) postaju tačne ako se radi o potrošnji konstantne struje kada struja potrošnje ne zavisi od napona. U slučajevima kada potrošnja nije konstantne struje u ovim jednačinama treba uzeti u obzir zavisnost napona j -tog čvora od aktivne, reaktivne snage i faktora snage potrošnje tog čvora, respektivno.

Kako nivo potrošnje varira tokom dana, a i tokom meseca, može se uvesti koeficijent po kome se potrošači rangiraju na osnovu njihovog udela u ukupnim gubicima energije za onaj mesec kada je potrošnja najveća ili čitavu godinu. Ovaj koeficijent (K_{wj}) uvažava osetljivosti ukupnih gubitaka aktivne snage u svakom satu h na aktivnu i reaktivnu snagu potrošnje j -tog čvora u tom satu

$$K_{wj} = \sum_h \left(\frac{\partial \Delta P_h}{\partial P_{j,h}} + \frac{\partial \Delta P_h}{\partial Q_{j,h}} \right) \quad (9)$$

Zbog toga je vrednost koeficijenta K_{wj} pokazatelj udela potrošnje čvora j u ukupnim gubicima aktivne energije. Procentualni udeo čvora j u ukupnim gubicima se dobija normalizovanjem ovog pokazatelja u odnosu na sumu vrednosti K_{wj} za svih n čvorova mreže

$$k_{wj} = \frac{K_{wj}}{\sum_n K_{wj}} \cdot 100 \quad (10)$$

Tada se k_{wj} može iskoristiti za "pravično" naplaćivanje gubitaka aktivne energije. Na analogan način se može izvesti i koeficijent koji određuje udeo j -tog potrošača u ukupnim gubicima reaktivne energije. Rangiranjem potrošačkih čvorova na osnovu vrednosti odgovarajućih koeficijenta k_{wj} po opadajućem redosledu postiže se da se za ugradnju mernih uređaja, izaberu oni čvorovi čija potrošnja najviše utiče na iznos mesečnih ili godišnjih gubitaka energije. S obzirom na neophodne investicije i činjenicu da je broj čvorova u srednjenaponskim distributivnim mrežama veliki, odluka da li će se i koliko mernih uređaja ugraditi zavisi od prethodne tehničko-ekonomske analize opravdanosti.

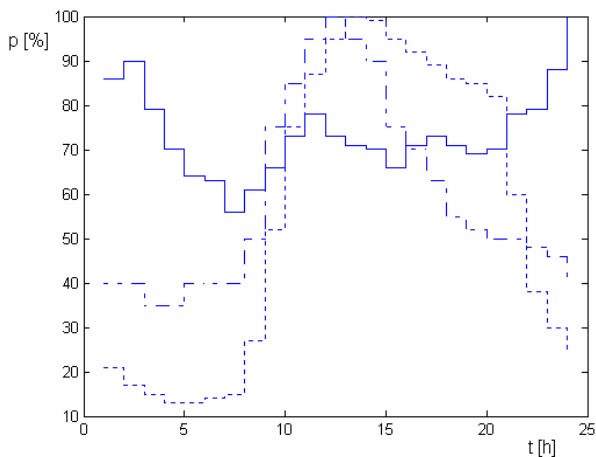
Pored k_{wj} može se uvesti i koeficijent koji normalizuje osetljivost gubitaka snage na snagu potrošnje čvora u režimu maksimalnog opterećenja mreže. On određuje učešće potrošača u snazi gubitaka pri ovom opterećenju mreže, a pri istom faktoru snage svih potrošača se svodi na

$$k_{pj} = \frac{\partial \Delta P / \partial P_j}{\sum_n \partial \Delta P / \partial P_j} \cdot 100 \quad (11)$$

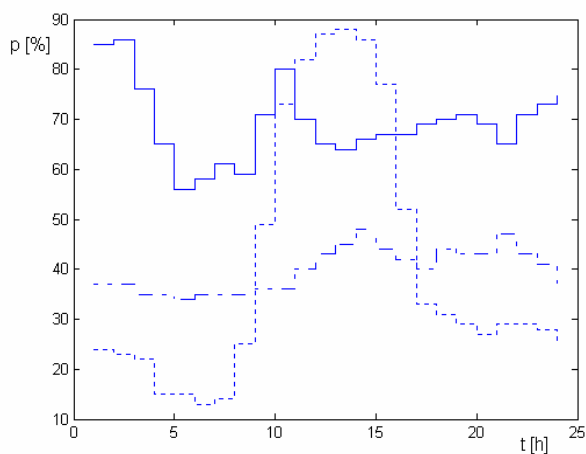
3. ANALIZA REZULTATA

Metodologija koja je izložena u ovom radu se zasniva na pretpostavci da su dnevni dijagrami potrošnje u distributivnoj mreži poznati. Kao ulazni podaci su korišćeni dijagrami potrošnje dobijeni terenskim merenjima u transformatorskim stanicama 10/0,4kV na području JP "Elektrodistribucija" Niš. Merenja su izvršena tokom zime u transformatorskim stanicama koje napajaju stambenu potrošnju bez daljinskog grejanja, tržni centar (trgovačka potrošnja) i fakultet čiji je sastav potrošnje sličan kao u administrativnim zgradama. Na Sl. 2, 3 i 4 su prikazani dnevni dijagrami potrošnje ovih transformatorskih stanica u obliku histograma jednog radnog dana, subote i nedelje, respektivno. Nivo potrošnje je dat u procentima maksimalne izmerene aktivne snage potrošnje (P_m) u toku merenja za svaki od tipova potrošnje. S obzirom na to da se faktor snage ($\cos \varphi$) potrošnje svakog od tipova tokom merenja kretao u uskim granicama, za proračun su uzete prosečne vrednosti i to za stambenu $\cos \varphi = 0,99$, trgovačku $\cos \varphi = 0,87$ i administrativnu $\cos \varphi = 0,985$.

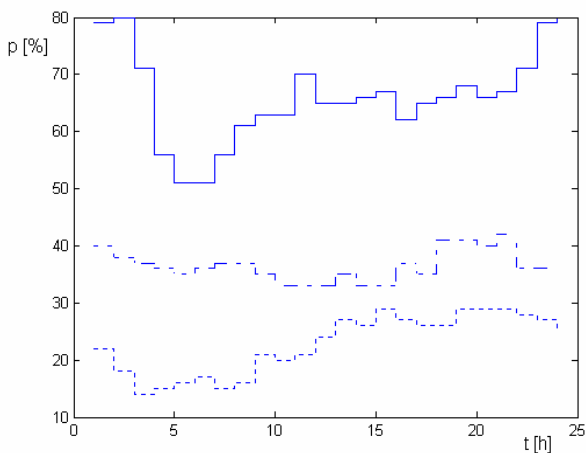
Proračuni su izvršeni na velikom broju distributivnih mreža pri različitom rasporedu tipova potrošnje po čvorovima mreže. Ovde su prikazani rezultati proračuna za radijalnu IEEE test-mrežu sa 32 čvora sa Sl. 5. Podaci o parametrima vodova i snazi potrošnje svakog čvora ove mreže su dati u [6]. Uzeto je da je maksimalna aktivna snaga potrošnje jednaka zadatoj aktivnoj snazi, a reaktivna snaga je izračunata na osnovu faktora snage za određeni tip potrošnje. Pretpostavljeno je da je napojni napon konstantan, $U_0 = 1,1 U_n$, i da je u svim čvorovima potrošnja čija je struja nezavisna od napona.



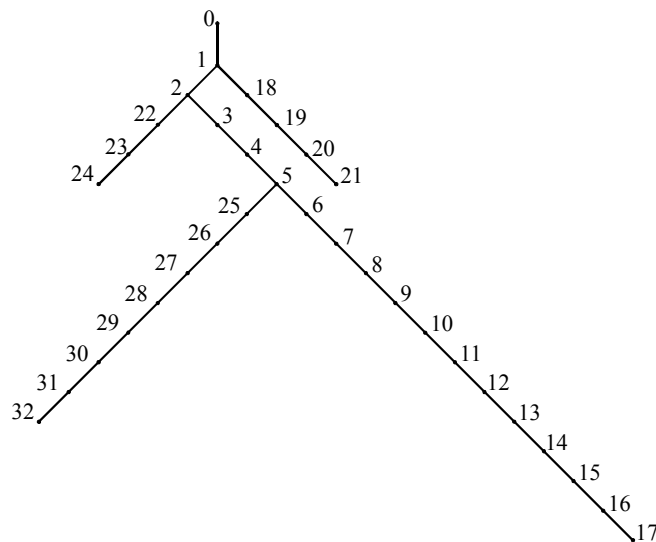
Sl. 2. Dnevni dijagrami radnog dana: stambene (————), trgovačke (-----), administrativne (— · — · —) potrošnje



Sl. 3. Dnevni dijagrami za subotu: stambene (————), trgovačke (-----), administrativne (— · — · —) potrošnje



Sl. 4. Dnevni dijagrami za nedelju: stambene (————), trgovačke (-----), administrativne (— · — · —) potrošnje



Sl. 5. Test-mreža

U tabeli 1 su najpre dati rezultati u slučaju kada su svi potrošači u mreži stambenog tipa (S), potom kada je u krajnjim čvorovima 14, 15, 16, 17, 23, 24, 30, 31 i 32 administrativna potrošnja, u čvorovima 10, 11, 12, 13, 21, 22, 27, 28 i 29 trgovačka, a u ostalim čvorovima stambena potrošnja što predstavlja raspodelu M (mešovita), i na kraju varijanta raspodele M u kojoj je popravljen faktor snage kod trgovačke potrošnje sa 0,87 na 0,95 (M_1). Proračuni su izvršeni na osnovu zadatih podataka o potrošnji i broja radnih dana, subota i nedelja u januaru 2005.

U slučaju raspodele S maksimalno opterećenje nastaje u 24h radnog dana zbog aktuelnog tarifnog sistema i korišćenja TA peći. Čvor koji tada najviše učestvuje u gubicima snage, na osnovu koeficijenta k_{pi} , je električno najudaljeniji čvor, čvor 17, a potom slede 24, 16, 15, 14, 32 itd. S obzirom na to da su u svim čvorovima vezani potrošači istog tipa, redosled potrošača koji najviše učestvuju u gubicima aktivne energije ostaje isti. Na osnovu osetljivosti gubitaka aktivne snage u satu maksimalnog opterećenja na faktor potrošnje pojedinih čvorova, uočava se da će se najbolji efekti popravke ovog faktora postići kod čvorova koji su udaljeni od napojnog, a imaju veliku maksimalnu snagu opterećenja (čvorovi 24, 23, 31, 29, 30 itd.).

Kada je u mreži raspodela potrošnje M, tada se maksimalno opterećenje mreže ima u 12h radnog dana usled administrativne i trgovačke potrošnje. Tada je udeo aktivne snage potrošnje čvorova 24, 17, 16, 32, 31 itd. u gubicima snage najveći, dok je odgovarajući redosled kod učešća u gubicima energije 17, 16, 13, 15, 12, 14, 24... Čvorovi sa trgovačkom potrošnjom sada značajnije učestvuju u gubicima kako zbog subote koja je radni dan kod ovog tipa potrošnje tako i zbog relativno niskog faktora snage od 0,87. Za ovaj faktor snage iznos reaktivne snaga potrošnje je skoro 57% vrednosti aktivne snage, što uzrokuje uvećane gubitke.

Sa popravkom faktora snage trgovačke potrošnje ukupni gubici energije u odnosu na raspodelu M se smanjuju za *%. Pored toga udeo potrošača sa ovim tipom potrošnje u ukupnim gubicima se smanjuje, recimo kod čvora 13 od 6,012 na 5,678%. Za razliku od raspodele M čvor 13 sada manje učestvuje u gubicima od čvora 15. Sa druge strane procentualno učešće u gubicima električno udaljenih

potrošača koji nisu trgovačkog tipa raste, pa bi efekat popravka faktora snage sa, 0,87 na 0,95, na cenu gubitaka energije bio još veći. Pored upotrebe opisane metodologije za jedan novi tarifni sistem, ona može biti iskorišćena i za ugradnju mernih uređaja na lokacijama koje se njome favorizuju. Tada se podaci sa ovih uređaja mogu primeniti kod praćenja mera za smanjenje gubitaka u područjima koja u najvećoj meri učestvuju u gubicima energije.

Tabela 1. Koeficijenti k_{pj} i k_{wj} i osetljivosti gubitaka snage na faktor snage pri različitim raspodelama tipova potrošnje

Čvor j	P_j [kW]	S			M		M_1
		k_{pj} [%]	$\frac{\partial \Delta P}{\partial \cos \varphi}$ [kW]	k_{wj} [%]	k_{pj} [%]	k_{wj} [%]	k_{wj} [%]
1	100	0,069	-0,02	0,070	0,062	0,072	0,075
2	90	0,407	-0,12	0,411	0,364	0,422	0,440
3	120	0,744	-0,30	0,750	0,665	0,770	0,802
4	60	0,924	-0,19	0,929	0,825	0,954	0,993
5	60	1,315	-0,26	1,319	1,174	1,353	1,408
6	200	1,609	-1,06	1,612	1,436	1,654	1,722
7	200	2,725	-1,79	2,729	2,433	2,797	2,912
8	60	3,222	-0,63	3,223	2,877	3,301	3,436
9	60	3,728	-0,73	3,725	3,330	3,814	3,969
10	45	3,801	-0,56	3,797	3,010	4,665	4,489
11	60	3,982	-0,78	3,977	3,219	4,837	4,641
12	60	4,698	-0,92	4,686	4,047	5,515	5,240
13	120	5,220	-2,03	5,205	4,653	6,012	5,678
14	60	5,507	-1,07	5,489	5,619	5,328	5,438
15	60	5,869	-1,14	5,848	6,061	5,607	5,728
16	60	6,493	-1,26	6,467	6,824	6,089	6,230
17	90	7,020	-2,04	6,992	7,469	6,498	6,654
18	90	0,180	-0,056	0,183	0,161	0,188	0,196
19	90	1,202	-0,37	1,215	1,074	1,250	1,302
20	90	1,481	-0,45	1,497	1,323	1,540	1,604
21	90	1,963	-0,60	1,984	1,724	2,322	2,202
22	90	0,717	-0,22	0,723	0,680	0,807	0,755
23	420	3,607	-5,09	3,633	4,307	2,954	3,055
24	420	6,503	-9,16	6,544	7,852	5,224	5,418
25	60	1,411	-0,28	1,415	1,260	1,451	1,511
26	60	1,546	-0,31	1,550	1,381	1,589	1,654
27	60	2,052	-0,40	2,054	1,799	2,397	2,271
28	120	2,818	-1,11	2,818	2,689	3,128	2,916
29	200	3,623	-2,37	3,620	3,625	3,896	3,593
30	150	4,787	-2,34	4,779	5,529	4,211	4,234
31	210	5,305	-3,63	5,295	6,163	4,613	4,652
32	60	5,467	-1,07	5,457	6,362	4,739	4,783

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metodologija za procenu učešća potrošača distributivnih mreža u gubicima snage i energije koja se bazira na teoriji osetljivosti. Rezultati pokazuju uticaj aktivne snage, faktora snage, dijagrama potrošnje, kao i lokacije potrošačkih čvorova na gubitke snage i energije. Prikazana metodologija se može iskoristiti kao osnova za jedan novi tarifni sistem po snazi i energiji. Pored toga rezultati se mogu koristiti za izbor lokacija mernih uređaja u cilju efikasnog praćenja gubitaka energije u srednjenaponskim distributivnim mrežama i za izbor lokacija kondenzatorskih baterija.

LITERATURA

- [1] C. N. Macqueen and M. R. Irving, "An algorithm for the Allocation of Distribution System Demand and Energy Losses", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, pp. 338-343, February 1996.
- [2] D. Stojanović, V. Kostić i L. Korunović, "Učešće potrošača u gubicima snage i energije u distributivnoj mreži", *Zbornik radova XLV konferencije za ETRAN 2001*, sveska 1, pp. 303-306.
- [3] M. Poveda, "A New Method to Calculate Power Distribution Losses in an Environment of High Unregistered Loads", in *Proc. Transmission and Distribution Conference 1999*, vol. 2, pp. 609 - 614.
- [4] L. Korunović i D. Stojanović, "A New Fuzzy Logic Approach for Selection of Capacitor Installation Locations", in *Proc. Icest 2002*, pp. 543 - 546.
- [5] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo, "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, pp. 753-762, May 1988.
- [6] 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 – In the paper power and energy losses sensitivities on load parameters in distribution networks are considered. These parameters are obtained by field measurements for particular load types. The sensitivities are normalized and mutually compared for different distributions of load types among the nodes of one middle voltage distribution network. Load ranking is performed on the bases of the sensitivities and the possibilities of such kind of analyses are indicated.

POWER AND ENERGY LOSSES SENSITIVITIES IN DISTRIBUTION NETWORKS ON LOAD PARAMETERS

Dobrivoje Stojanović, Lidija Korunović