

GUBICI U ELEKTRO ENERGETSKOM SISTEMU IZAZVANI MALIM NELINEARNIM POTROŠAČIMA

Dejan Stevanović, *Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, dejan.stevanovic@venus.elfak.ni.ac.rs,*
Predrag Petković, *Elektronski fakultet u Nišu, predrag.petkovic@elfak.ni.ac.rs*

Nagrađeni rad mladog istraživača

Sadržaj – U ovom radu biće analizirani gubici koji se javljaju u elektro energetskom sistemu usled promene karaktera priključenih potrošača. Radi se o gubicima nastalim usled prisustva nelinearnih potrošača. Jedan od glavnih razloga pojave ovih gubitaka je neadekvatna merna oprema. Postojeća elektronska brojila, registruju samo aktivnu snagu (energiju) dok se na mernim mestima meri i reaktivna snaga (energija). Takav pristup nije usklađen sa promenom profila savremenih potrošača. Naime, svedoci smo rapidne promene karaktera potrošača, kako u industriji, tako i u domaćinstvima. Težnja za povećanjem energijske efikasnosti dovela je u elektroenergetici do masovne primene prekidačkih regulatora napona i zamene klasičnih sa „štedljivim“ sijalicama. Time je broj nelinearnih potrošača na elektroenergetskoj mreži značajno porastao. Registrovanje samo aktivne snage na strani potrošača ne daje tačnu sliku o potrošnji. Zato se u ovom radu, najpre, analizira i kvantifikuje uticaj nelinearnih potrošača na ukupne gubitke u elektroenergetskom sistemu. Zatim se predlaže efikasan metod za registrovanje snage distorzije. Rezultati merenja malih nelinearnih potrošača dobijeni su pomoću merne grupe koju proizvodi firma EWG iz Niša. Prikazani rezultati pokazaće značaj merenja svih komponentata prividne snage i opravdanost njihove primene u tarifnom sistemu za utrošenu električnu energiju.

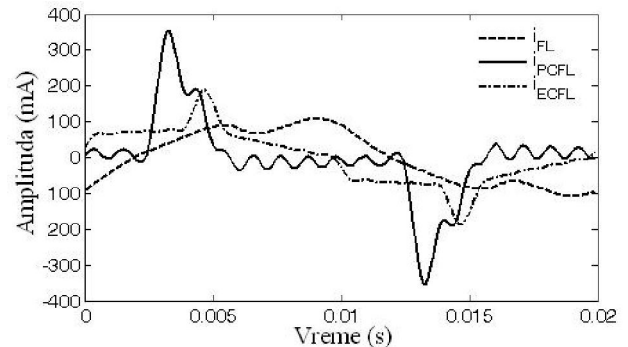
1. UVOD

Razvoj svesti o značaju uštede energije predstavlja vodeću savremenu svetsku temu. Njen nerazdvojni deo predstavljaju inventivni metodi za štednju na svim nivoima. Mala potrošnja energije, odnosno energijska efikasnost, postaje jedan od najvažnijih projektanskih zahteva u svim sferama inženjerstva. Izuzetak ne predstavljaju ni savremeni elektronski uređaji. Šta više, oni pomažu da se bolje meri potrošnja i racionalnije koriste resursi. Zato se osnovna razlika između električnih uređaja različitih generacija ne ogleda u funkciji koju obavljaju, već u potrošnji električne energije. Da bi se označio stepen energijske efikasnosti uređaja uvedene su oznake slovima od A (energijski efikasni) do G (neefikasni). Pojedini uređaji kao što su veš mašine i mašine za pranje sudova imaju još tri dodatne kategorije a to su: A+++, A++, A+. Prema istraživanju EST (*Energy Saving Trust*) [1] na godišnjem nivou novi uređaji mogu doneti uštedu između £20 i £40.

Zamena starih uređaja novim najbrže se odvija u oblasti gde se ostvaruju velike uštede uz relativno mala ulaganja. Klasičan primer predstavljaju sijalice sa užarenim vlaknom. Naime oko 20% svetske potrošnje električne energije usko je povezano sa osvetljenjem [2]. Zato ova oblast predstavlja pogodno mesto za uvođenje novih tehnologija uštede električne energije. Mnoge vlade u svetu već su zabranile upotrebu i proizvodnju pojedinih sijalica sa užarenim vlaknom. Među prvima bile su vlade Brazila i Venecuele 2005. godine, a posle toga počele su da se pridružuju i ostale zemlje. U EU već su zabranjene sijalice snage 100W a u planu je da se i ostale sijalice postepeno povuku do 2013 godine. Kao alternativa ovim sijalicama koriste se CFL (Compact Fluorescent Lamp) i LED sijalice. Njihova cena

veća je od cene sijalica sa užarenim vlaknom, ali imaju znatno duži vek eksploatacije. U literaturi se mogu naći različiti podaci o isplativosti LED i CFL sijalica u odnosu na klasične sa užarenim vlaknom. Tako se za radni vek LED sijalica specificira od 50.000 [3] do 100.000 [2] sati, dok se za CFL mogu naći podaci u opsegu od 8.000 do 15.000 sati, dok je kod običnih sijalica on oko 1000 sati [3]. CFL sijalice troše oko pet puta manje električne energije za isti intenzitet osvetljenja od klasičnih dok je za LED potrebno još dva puta manje energije (za 800 lumena, klasična troši 60W, CFL troši 13-15W, dok LED zahteva samo 6-8W [3]). Zbog cene eksploatacije, manjeg zagrevanja i manjeg ugrožavanja životne sredine, veće početno ulaganje u LED i CFL sijalice kasnije se mnogostruko isplate.

Pored ovih očiglednih prednosti koje doprinose sve većoj upotrebi CFL i LED sijalica, njih karakteriše i jedan ozbiljan nedostatak. Naime sve one predstavljaju izrazito nelinearne potrošače. Zato struja kroz njih ne prati striktno promenu napona mreže, već sadrži više harmonike. Talasni oblici struje za Philips i EcoBubl CFL i FL (fluorescentna lampa) prikazani su na Slici 1.



Slika 1. Talasni oblici struje FL, Philips CFL, EcoBubl CFL

Osnovna teorija koja objašnjava fenomene u elektroenergetskim sistemima polazi od premise da su potrošači linearni i da mogu biti otpornog ili reaktivnog karaktera (induktivnog ili kapacitivnog). Shodno tome, struja prati talasni oblik napona koji je prostoperiodičnog oblika. Kao jedini uzročnik gubitka pominje se reaktivna komponenta snage. U skladu sa tim, merni uređaji tradicionalno registruju samo aktivnu i reaktivnu snagu. Prema ovom konceptu, u domaćinstvima se ne očekuju veliki reaktivni potrošači, tako da se u njima registruje samo aktivna snaga, dok su merne grupe, koje registruju i reaktivnu snagu, pretežno instalirane u industriji.

Usled promene karaktera potrošača koji su priključeni na elektroenergetsku mrežu, talasni oblik struje predstavlja složenoperiodičnu funkciju, kao što se vidi sa Sl. 1. Viši harmonici uvode novu komponentu snage koju ne registruju klasična, pa čak ni nova generacija elektronskih brojila. Usled toga, sa strane distributera električne energije javljaju se gubici.

Harmonijske komponente struje kroz elektroenergetski sistem izazivaju pad napona na višim frekvencijama [4], [5], što dovodi do izobličenja talasnog oblika napona kod svih

potrošača koji se nalaze u blizini. Harmonijske komponente napona i struje zahtevaju korigovanje jednačina koje se koriste za računanje aktivne, reaktivne i prividne snage. Mora se uzeti u obzir uticaj harmonika na ukupnu vrednost ovih snaga. Doprinos harmonijskih komponenti napona i struja na ukupnu aktivnu i reaktivnu snagu je mali, obično je manji od 3% celokupne aktivne ili reaktivne snage. To znači da harmonijske komponente utiču na pojavu nove komponente snage, koju ćemo, za sada, zvati snaga izobličenja.

Ovaj rad ima za cilj da ukaže na veličinu gubitaka nastalih usled nelinearnih potrošača i da ponudi efikasno rešenje za njihovo otklanjanje kroz promenu tarifnog sistema.

Rad je organizovan u četiri poglavlja. Naredno poglavlje daje kratak pregled principa rada starih elektro-mehaničkih brojila i novih savremenih elektronskih brojila. U trećem poglavlju predložen je metod za merenje snage gubitaka nastalih kao posledica prisustva nelinearnih potrošača na mreži. Metod je verifikovan merenjima a rezultati verifikacije prikazani su u četvrtom delu rada. Zaključak je dat u petom poglavlju.

2. OSNOVNI PRINCIP RADA ELEKTRONSKIH I ELEKTROMEHANIČKIH BROJILA

Osnovni princip rada elektro-mehaničkih brojila bazira se na interakciji između dva magnetna fluksa čiji intenzitet je proporcionalan vrednostima napona i struje. Oba magnetna fluksa generišu se na istoj frekvenciji. Da bi se postigla maksimalna brzina rotacije diska kada su napon i struja u fazi, ugrađen je mehanički sklop koji stvara faznu razliku od 90° između ova dva fluksa. Upravo zato, uređaj ne registruje aktivnu snagu na potrošačima koji su potpuno reaktivane prirode.

Kalibracija elektro-mehaničkih brojila radi se na osnovnoj frekvenciji. Zato ova brojila ne registruju precizno utrošenu aktivnu energiju viših harmonika. Vrednost greške zavisi, pre svega, od frekvencije harmonika. Na primer za treći harmonik (150Hz) pravi se greška do 40%, dok za sedmi harmonik ide i do 80% u odnosu na pravu snagu tog harmonika [6]. Može se zaključiti da se veća greška pravi prilikom očitavanja aktivne snage viših harmonika. Ovaj fenomen može se objasniti činjenicom da se amplituda magnetnog fluksa, koja utiče na brzinu rotacije diska, smanjuje sa redom harmonika. Ukoliko su naponi i struje svakog harmonika fazno pomereni za 90°, tada disk na brojilu ne bi trebao da rotira, a samim tim ni da registruje utrošenu električnu energiju. Međutim, to nije slučaj. Na ovaj način pravi se greška od nekoliko procenta u odnosu na tačnu vrednost snage tog harmonika. Očigledno, greška može biti pozitivna ili negativna u zavisnosti da li je potrošač induktivnog ili kapacitivnog karaktera. Zbog nepreciznosti u očitavanju utrošene električne energije, kako aktivne tako i reaktivne, pristupilo se zameni starih elektro-mehaničkih brojila novim elektronskim brojilima.

Osnovni princip rada elektronskih brojila zasniva se na digitalnoj obradi trenutnih vrednosti napona i struje. Vrednost napona vodi se preko naponskog razdelnika na ADC gde se uzorkuje (sempluje) u diskretnim vremenskim trenucima (najmanje dva po periodu, prema Nyquist-Shannonovoj teoremi) i digitalizuje. Istovremeno se naponski ekvivalent struje, dobijen uz pomoć strujnog transformatora, konvertuje u digitalnu vrednost preko odgovarajućeg ADC. Dobijene diskretizovane i digitalizovane vrednosti obrađuju se u DSP-u. Trenutna vrednost signala (napona ili struje) može se predstaviti sa:

$$x(t) = \sqrt{2} X_{RMS} \cdot \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

Posle diskretizacije po vremenu dobija se

$$x(nT) = \sqrt{2} X_{RMS} \cdot \cos(2\pi \frac{f}{f_{semp}} n + \varphi) \quad (2)$$

gde je f predstavlja frekvenciju signala mreže od 50Hz (60Hz) dok f_{semp} označava frekvencija uzorkovanja signala struje i napona. Efektivna vrednost signala računa se po formuli

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N x(nT)^2}{N}} \quad (3)$$

gde N označava ukupan broj uzoraka u sekundi. Trenutna vrednost aktivne snage dobija se množenjem trenutnih vrednosti struje i napona, a njena srednja vrednost računa se kao:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N v(nT)i(nT)}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N p(nT)}{N} \quad (4)$$

Za izračunavanje reaktivne snage koristi se prethodna jednačina, s tim što su uzorci napona pomereni za $\pi/2$. Prividna snaga računa se kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje (5).

$$U = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (5)$$

Detaljnije objašnjenje o principu rada elektronskog brojila može se naći u [7].

3. KOMPONENTE PRIVIDNE SNAGE NA NELINEARNIM POTROŠAČIMA

Povećanje energijske efikasnosti u savremenim elektronskim uređajima omogućeno je smanjenjem gubitaka na aktivnim elementima. Naime, tranzistori rade u prekidačkom umesto u linearnom režimu. Najveća struja kroz tranzistor teče kada je napon na njemu minimalan (zatvoren prekidač), i obrnuto (otvoren prekidač). Nažalost, tada do izražaja dolazi njihova nelinearna priroda. Zamena starih linearnih potrošača novim nelinearnim, stvorila je dodatne probleme distributerima električne energije. Prema dosadašnjoj regulativi domaćinstva plaćaju samo utrošenu aktivnu energiju što je bilo sasvim razumno u periodu kada su dominirali linearni otporni potrošači. Sada to više nije slučaj. Deo snage koja se javlja usled prisustva viših harmonika praktično je isporučena potrošaču, ali je nevidljiva sa stanovišta distributera.

Među prvima koji su uočili problem i koji su krenuli sa konkretnim rešavanjem bili su stručnjaci Enel S.p.A. (Ente Nazionale per l'Energia eLettrica) grupacije (www.enel.com) koja predstavlja najznačajnijeg distributera u Italiji i drugog prema instalisanosti snazi u Evropi. Oni su došli do zaključka da usled promene karaktera potrošača dolazi do pojave gubitaka u elektroenergetskom sistemu. Zato su odlučili da zamene stara elektro-mehanička brojila novim elektronskim koja imaju mogućnost da, osim aktivne, mere i reaktivnu snagu. Instalacija ovih brojila krenula je 2001 i do sada je 99% brojila na teritoriji Italije zamenjeno. Na ovaj način gubici su delimično smanjeni ali nisu eliminisani. U ovom radu dokazaćemo da je osim merenja reaktivne snage, neophodno meriti (tarifirati) i distorzionu snagu koja je sastavni deo prividne snage.

Naime kada se primene jednačine za izračunavanje aktivne i reaktivne snage (4), a prividna snaga se izračuna na osnovu (5), dobija se, da u prisustvu harmonika:

$$U^2 > P^2 + Q^2. \quad (6)$$

S obzirom da za prostoperiodične sisteme važi da je $U^2 = P^2 + Q^2$, jasno je da razlika potiče od prisustva viših harmonika, odnosno da je ona posledica izobličenja napona i struje u sistemu. Prateći ukupnu logiku u definisanju aktivne i reaktivne snage Budeanu je još 1927. godine uveo *pojam snage izobličenja*, odnosno *distorzione snage*, koja je posledica prisustva harmonika u mreži. Korigovao je izraz za prividnu snagu:

$$U^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (7)$$

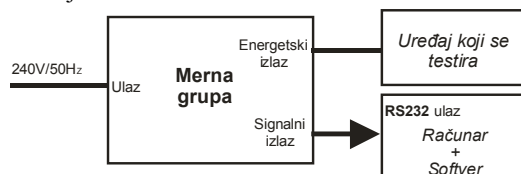
gde je sa D označio *distorzionu snagu*. Suština ove korekcije sadržana kroz činjenicu da je u odsustvu harmonika, $D=0$, tako da važi $U^2 = P^2 + Q^2$. Očigledno da ova poznata definicija postaje specijalni slučaj primene (7). Odavde sledi da snaga distorzije može da se izračuna kao:

$$D = \sqrt{U^2 - P^2 - Q^2}. \quad (8)$$

Računanjem distorzionne snage na osnovu (8) i uzimanjem u razmatranje prilikom kreiranja računa o utrošenoj električnoj energiji, distributeri bi znatno smanjili nivo gubitaka koji postoje u samom sistemu. U sledećem poglavlju biće prikazani rezultati merenja koji su obavljeni uz pomoć standardnog elektronskog brojlara koje je proizvela firma EWG iz Niša [8].

4. MERENI REZULTATI DOBIJENI UZ POMOĆ STANDARDNE MERNE GRUPE

Da bi se potvrdila ideja o opravdanosti uvođenja snage distorzije u tarifni sistem, najpre su rađene simulacije u *Matlab*-u. U tu svrhu napisan je originalni Matlab script koji, u suštini, predstavlja virtuelno elektronsko brojlilo. Rezultati dobijeni simulacijom potvrdili su prethodnu teoriju a objavljeni su u [9]. Sledeći logičan korak bio je realizacija testnog okruženja koje će omogućiti merenje osnovnih parametra električne energije. Realizovano testno okruženje prikazano je na Sl.2.



Slika 2. Blok šema testnog okruženja

Kao merni instrument korišćena je komercijalna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-22 [10] i IEC 62052-11 [11] (proizvod EWG iz Niša). Brojlilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (3), (4) i (5). U trenutno raspoloživoj varijanti merna grupa nema mogućnost računanja snage distorzije, ali registruje U , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (8) u računaru se izračunava vrednost distorzionne snage.

U ovom radu biće prikazani rezultati dobijeni merenjem različitih tipova sijalica. Rezultati merenja dati su u Tabeli 1.

Tabela 1. Rezultati merenja različitih tipova sijalica

Potrošač	U_{RMS}	I_{RMS}	U	P	Q	D	$P/U[\%]$	$D/U[\%]$
Sijalica sa užarenim vlaknom 100W	218.96	0.42	91.96	92.32	0.74	0.00	100.39	0.00
FL18W	218.62	0.08	17.49	11.33	-5.80	11.99	64.78	68.58
CFL20Wbulb	218.55	0.13	29.07	18.30	-8.81	20.79	62.96	71.54
CFL 20Whelix	219.01	0.14	30.66	18.61	-9.38	22.49	60.70	73.35
CFL 20Wtube	219.46	0.14	31.60	18.73	-9.58	23.58	59.27	74.62
CFL 15Wbulb	219.74	0.09	19.56	12.10	-5.51	14.34	61.87	73.34
CFL 11Whelix	221.73	0.08	17.74	10.42	-5.38	13.31	58.74	75.03
CFL 11Wtube	221.27	0.08	17.92	10.76	5.74	13.13	60.04	73.28
CFL 11WE14	215.51	0.08	17.24	10.79	-5.26	12.38	62.58	71.78
CFL 9Wbulb	216.06	0.06	12.75	7.58	-3.64	9.58	59.46	75.16
CFL 7Wspot	217.75	0.04	9.58	5.83	-2.87	7.04	60.85	73.48
CFL 7W	219.83	0.04	9.67	6.03	-2.57	7.11	62.34	73.54
CFL 15Whelix	218.55	0.15	32.13	18.95	-10.26	23.83	58.98	74.17
CFL 20Wtube	216.91	0.11	24.08	13.86	-7.15	18.34	57.57	76.19
LED Parlamp 15W(9x1.5W)	217.27	0.157	34.11	16.9	-3.87	29.38	49.54	86.12
LED Parlamp 10W(6x1.5W)	217.51	0.114	24.80	12.89	-2.74	21.00	51.98	84.71
LED Bulb 8 W(7x1W)Warm White	218.02	0.083	18.10	9.7	-2.84	15.01	53.60	82.95
LED Bulb 6W(6x1W)Warm White	217.93	0.042	9.15	7.76	-0.14	4.85	84.78	53.00
LED Bulb 6W(6x1W)White	217.85	0.045	9.80	8.34	-0.16	5.15	85.07	52.53
LED Bulb 3x1W	217.9	0.034	7.4086	3.96	-0.89	6.20	53.45	83.66
LED MiniBulb 3x1W	215.86	0.034	7.33924	3.91	-1	6.13	53.28	83.52

Kao što se vidi iz Tabele 1, za sijalicu sa užarenim vlaknom, koja predstavlja linearni potrošač, distorziona snaga jednaka je nuli. U ostalim slučajevima radi se o izrazito nelinearnim potrošačima, tako da njihove struje sadrže harmonike koji ne postoje u naponu napajanja. Kao rezultat toga registruje se snaga distorzije. Njena vrednost je veća ukoliko struja sadrži veći broj harmonika. Da distorziona snaga izaziva značajne gubitke u elektroenergetskom sektoru najbolje ilustruje poslednja kolona u Tabeli 1. Gubici koji se javljaju usled neregistrovanje distorzione snage dostižu i do 86% prividne snage. Iako je nominalna snaga analiziranih potrošača mala, mora se imati u vidu njihov ukupan broj u elektroenergetskom sistemu koji nije zanemarljiv. Šta više, opšta tendencija u svetu ide ka tome da raste primena CFL i LED sijalica. Zato ukupni gubici koji se registruju sa stanovišta distributera postaju sve izraženiji.

Dok se ne pronađe racionalno rešenje za kompenzovanje uticaja viših harmonika u elektroenergetskoj mreži, jedini način da se gubici distributera nastali priključivanjem nelinearnih potrošača smanje, jeste promena sistema naplate potrošnje. Da bi ovo bilo moguće, neophodno je, blagovremeno, zameniti brojila novim, koja omogućavaju registrovanje distorzione snage.

5. ZAKLJUČAK

Rezultati merenja koji su prikazani u Tabeli 1 nedvosmisleno pokazuju opravdanost uvođenja vrednosti snage distorzije u kreiranju konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Stručnjaci Enel korporacije, prvi su uvideli da su gubici u elektroenergetskom sistemu usko povezani sa promenom prirode potrošača. Oni problem rešavaju uvođenjem reaktivne snage u tarifni sistem. Ovo zahteva zamenu elektro-mehaničkih brojila elektronskim. Ovaj rad pokazuje da to nije dovoljno. Gubici koji se ogledaju kroz snagu distorzije su mnogo veći nego gubici koji se javljaju usled neregistrovanja reaktivne snage. Zbog toga autori ovog rada predlažu da se sve tri komponente prividne snage uzmu u razmatranje prilikom kreiranja konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Trenutno važeći standardi ne obavezuju proizvođače brojila da registruju distorzionu snagu. Imajući u vidu da se trenutno u Republici Srbiji i u celom regionu zamenjuju stara elektro-mehanička brojila novim, apelujemo da se ne načini propust time što će se koristiti brojila koja ne registruju sve tri komponente snage.

LITERATURA

- [1] Anderson R. and Kahya D. (2011, Nov.). "Saving money through energy efficiency", <http://www.bbc.co.uk/news/business-15431389>. [Nov. 16, 2011].
- [2] Hammerschmidt C., "Research project illuminates OLEDs' industrial future", *EETimes*, Dec. 2011.
- [3] Design Recycle Inc. Home. Comparison Chart, LED Lights vs. Incandescent Light Bulbs vs. CFLs,

<http://www.designrecycleinc.com/led%20comp%20chart.html> [02. april 2012].

- [4] Singh G.K., "Power system harmonics research: a survey", *European Transactions on Electrical Power*, vol.19, pp. 151–172, August 2007.
- [5] Integral Energy Power Quality Centre: Technical note No. 3, "Harmonic Distortion in the Electric Supply System", March 2000.
- [6] Driesen J., Craenenbroeck Va., Dommelen D. V. "The Registration of Harmonic Power by Analog and Digital Power Meters", *IEEE Trans.on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 1, February 1998.
- [7] http://www.maxim-ic.com/solutions/smart-electricity-meters/index.mvp/pl_pk/62
- [8] EWG - multi metering solutions, www.ewg.rs
- [9] Stevanović D., Jovanović B., Petković P. "Simulation of Utility Losses Caused by Nonlinear Loads at Power Grid", *Proceedings of Small System Simulation Symposium 2012*, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012, pp. 155-160.
- [10] IEC 62053-22 Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S).
- [11] IEC 62052-11 Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment.

ZAHVALNOST

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekta TR 32004. čiju je realizaciju finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

Abstract – In this paper we analyzed losses that occur in the electric power system related to changes of the character of loads connected to the utility. These losses are caused by nonlinear loads which are connected to the grid. The major problem reflects in the form of losses that utility register due to inadequate measurement equipment. Existing power meters which already have been installed, registered only active power (energy). So far the reactive power (energy) have been registered only by industrial power meters. This approach is not quite correct because it neglects inactive component of power caused by nonlinear loads. Therefore, we suggest using value of distortion power for all consumers as a quantity that reflects the best effects of the losses. Measured result of small nonlinear loads confirms our theory. These results are obtained using industrial power meters manufactured by EWG from Niš. The results show that the utility will have considerable losses if it does not take into the billing policy all components of apparent power.

THE LOSSES AT POWER GRID CAUSED BY SMALL NONLINEAR LOADS

Dejan Stevanović, Predrag Petković