

Harmonici u elektroenergetskom sistemu

- praktični problemi i rešenja

Dejan Stevanović

Inovacioni centar naprednih tehnologija ICNT d.o.o
Niš, Srbija
dejan.stevanovic@icnt.rs

Predrag Petković

Leda laboratorija/katedra za elektroniku
Elektronski fakultet
Niš, Srbija
predrag.petkovic@elfak.ni.ac.rs

Sadržaj—U ovom radu biće analizirani efekti koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu kao posledica postojanja harmonika. U osnovi elektroenergetskog sistema je premisa da napon mreže ima prostoperiodični talasni oblik frekvencije 50Hz. Nažalost u stvarnosti ovo nije tačno. Odstupanje talasnog oblika napona od željenog oblika postoji i ispoljava se kroz postojanje viših harmonika. Iako harmonici postoje u elektroenergetskom sistemu od samog početka primene naizmjenične struje, do nedavno, njihov uticaj bio je gotovo zanemarljiv, tako da mu se nije posvećivala značajna pažnja. Negativni uticaji harmonika su višestruki a u ovom radu biće objašnjen još jedan dodatni efekat koji je do sada bio zanemaran u literaturi. Naime, radi se o gubicima snage koji se javljaju kroz elektroenergetski sistem a usko su povezani sa primenom nelinearnih potrošača. Ovaj problem dobija na značaju sa povećanjem primene elektronskih uređaja. Danas većina potrošača u domaćinstvima, kancelarijama ali i u proizvodnim halama zahteva napajanje iz jednosmernih izvora. Da bi se se povećala efikasnost konverzije i smanjile dimenzije pretvarača koriste se regulatori napona u kojima tranzistori rade u prekidačkom režimu. Shodno tome, struja nema prostoperiodični oblik. Usled konačne otpornosti napojnih vodova nelinearna izobličenja preslikavaju se u napon. Rezultati merenja nelinearnih potrošača koji su najviše rasprostranjeni u domaćinstvima i kancelarijama pokazaće značaj ovih gubitaka. Merenje je ostvareno uz pomoć merne grupe koju proizvodi firma EWG iz Niša.

Ključne riječi-harmonici 1; snaga distorzija 2;

I. UVOD

Iako je postojanje harmonika u elektroenergetskom sistemu uočeno na samom početku nastajanja i korišćenja naizmjenične struje, njihov uticaj mogao se zanemariti jer su na elektroenergetskoj mreži dominirali pretežno linearni potrošači. Nažalost, to danas više nije slučaj. Naprotiv, može se reći da danas po broju dominiraju nelinearni potrošači. Zato i njihov ukupan udeo u potrošnji postaje veoma značajan. Talasni oblik struje ovih potrošača ne prati striktno promenu napona mreže već sadrži harmonike. Harmonici se definišu kao neželjene spektralne komponente izobličenog signala čija je frekvencija jednaka celobrojnom umnošku osnovne frekvencije. Termin „harmonik“ prvi put spominju 1894. godine Houston i Kennelly [1]. Harmonicima su se, najpre, bavili matematičari, među njima najpoznatiji je Fourier. Fourier-ova teorema ukazuje da se bilo koji periodični signal može rastaviti na niz

prostoperiodičnih signala. Sumiranjem signala osnovne frekvencije 50Hz (60Hz) i svih ostali signala viših frekvencija (harmonika) dobija se originalni signal. Svaki harmonik karakterišu njegova amplituda i frekvencija. Osim osnovnih harmonika mogu se pojaviti i interharmonici čija frekvencija nije jednaka celobrojnom umnošku osnovne frekvencije, odnosno subharmonici kod kojih je frekvencija manja od osnovne frekvencije. Generalno, odstupanje od prostoperiodičnog oblika struje i napona izaziva mnoge neželjene efekte koji se manifestuju kroz povećanje gubitaka u generatoru, pregrevanje neutralnog provodnika, dodatno grejanje transformatora, probleme sa kondenzatorskim baterijama, probleme sa radom releja, neispravan rad merne opreme i dodatne gubitke prilikom transporta i distribucije el. energije. Svaki od ovih problema biće kasnije obrađen u ovom radu.

Cilj ovog rada jeste da pruži jednu opštu analizu negativnih uticaja harmonika na elektroenergetski sistem. Pri tome, sagledavaju se uticaji na komponente sistema, sa jedne strane, ali i na ekonomske gubitke koji u sistemu nastaju usled neadekvatne opreme za merenje komponente snage izazvane harmonicima.

Rad se sastoji iz pet poglavlja. U narednom poglavlju biće reči o problemima koji se javljaju u elektroenergetskom sistemu, a koji su usko povezani sa postojanjem harmonika u samom sistemu. U trećem poglavlju biće reči o gubicima snage koji se javljaju na strani distributera. Rezultati merenja koji potvrđuju prethodnu teoriju dati su u četvrtom poglavlju pre zaključka kome je posvećeno peto poglavlje.

II. UTICAJ HARMONIKA NA OPREMU ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

A. Generator

Usled postojanje harmonika napona i struje dolazi do povećanja grejanja generatora. Do dodatnog zagrevanja dolazi usled gubitaka u gvožđu i bakru, ovi gubici zavise od frekvencije.

Gubici koji se javljaju u gvožđu mogu se podeliti na gubitke usled histerezisa i na gubitke usled vrtložnih struja. Gubici usled histerezisa nastaju usled nelinearne zavisnosti između gustine magnetnog fluksa i magnetnog polja, svakog

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

puta kada struja kroz namotaje promeni smer (npr. 100 puta u sekundi za frekvenciju od 50Hz). Veći gubici javljaju se na većim frekvencijama usled češće promene smera struje u odnosu na osnovnu komponentu od 50Hz. Gubici usled histerezisa proporcionalni su frekvenciji i kvadratu magnetnog fluksa.

Usled proticanja vrtložnih struja kroz jezgro, namotaje i ostale delove generatora dolazi do pojave gubitaka. Oni su proporcionalni kvadratu frekvencije. Veza između gubitaka usled vrtložnih struja i frekvencije data je sledećom formulom:

$$P_{EC} = P_{EF} \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2, \quad (1)$$

gde P_{EC} , P_{EF} , I_h i h , označavaju ukupne gubitke usled vrtložnih struja, ukupne gubitke usled vrtložnih struja pri maksimalnom opterećenju na osnovnoj frekvenciji, efektivnu vrednost struje h -tog harmonika i red harmonika, respektivno. U slučaju kada su na generator priključeni samo linearni potrošači, gubici usled vrtložnih struja su zanemarljivi, ali sa pojavom harmonika postaju značajni.

Osim gubitaka koji se pojavljuju u gvožđu, postoje i gubici u bakru. Snaga koja se gubi usled proticanja struje kroz namotaje generatora jednaka je:

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 R, \quad (2)$$

gde P_{CU} , I_{RMS} i R označavaju ukupne gubitke u bakru, efektivnu vrednost struje koja protiče kroz namotaje generatora i ukupnu otpornost namotaja generatora, respektivno. Gubici u bakru takođe zavise i od površinskog efekta (*skin effect*), odnosno od osobine naizmenične struje da teče po površini provodnika. Površina provodnika po kojoj teče struja, odnosno otpornost, zavisi od frekvencije struje. Ukoliko kroz namotaje protiču viši harmonici, povećavaju se gubici koji nastaju u bakru, saglasno sa (2).

B. Transformator

Gubici koji se javljaju u transformatoru značajno su uvećani usled izobličenja struje. Kao i kod generatora, gubici kod transformatora mogu se podeliti na gubitke u gvožđu koji nastaju zbog histerezisa i vrtložnih struja kao i gubitke u bakru. Za računanje gubitaka u gvožđu usled vrtložnih struja koristi se izraz (1) dok se za računanje gubitaka u bakru koristi (2). Gubici u bakru izazivaju dodatno zagrevanje transformatora a samim tim dolazi do degradacije karakteristika izolacije koja se koristi kod izolacije namotaja. Do dodatnih gubitaka može doći i usled moguće rezonance između namotaja transformatora i kondenzatora koji se koristi u trafostanicama za poboljšanje faktora snage.

Kod transformatora koji se koriste u elektroenergetskoj mreži a koji su realizovani u konfiguraciji trougao-zvezda, harmonici trećeg reda (3, 9, 15, ...) blokirani su u kolu primara i izazivaju dodatno grejanje namotaja transformatora. Poznato je da struja kroz neutralni provodnik trofaznog sistema treba da

bude jednaka nuli. Ovo pravilo važi samo u slučaju kada su potrošači čisto linearnog karaktera, odnosno kada struja prati prostoperiodični talasni oblik napona u sve tri faze. Ukoliko potrošači nisu linearni, kroz neutralni provodnik protiču harmonici trećeg reda, uglavnom treći harmonik, a struja kroz neutralni provodnik može da dostigne vrednost do 173% vrednosti fazne struje [2]. Ovako visoka vrednost struje kroz neutralni provodnik može da izazove pregrevanje transformatora, a ponekad može doći i do pregrevanja i uništenja neutralnog provodnika.

Imajući u vidu značaj samog transformatora u elektroenergetskom sistemu i rasprostranjenost nelinearnih potrošača kako u domaćinstvu tako i u industriji, preduzimaju se mere zaštite transformatora. Najjednostavniji način zaštite je korišćenje transformatora veće izlazne snage nego što su priključeni potrošači. Ukoliko to nije slučaj, razmatra se rasterećivanje transformatora. Drugi ekonomičniji metod je korišćenje specijalno projektovanih transformatora za napajanje nelinearnih potrošača, takozvani "K-factor" transformatori koji su manje osetljivi na gubitke usled postojanja harmonika odnosu na obične transformatore.

C. Kondenzatorske baterije

Kako bi se povećao faktor snage, tj. smanjili gubici usled postojanja reaktivne komponente snage u sistemu, ugrađuju se kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne energije. Kondenzatorske baterije su dimenzionisane tako da rade u opsegu od 110% nominalnog napona, odnosno do 135% nominalne snage [3]. Usled prisustva velikog nivoa izobličenja napona/struje dolazi do prekoračenja ovih ograničenja a samim tim dolazi do otkaza kondenzatorskih baterija. S obzirom da se impedansa kondenzatora smanjuje sa porastom frekvencije, VF komponente struje prolaze kroz kondenzator i dolazi do preopterećenja kondenzatorskih baterija.

Drugi uticaj harmonika na kondenzatorske baterije ogleda se kroz pojavu harmonijske rezonance. Do pojave rezonantnih uslova dolazi usled izjednačavanja induktivne i kapacitivne impedanse. Postoje dva tipa harmonijske rezonanse: redna i paralelna. Redna rezonansa prouzrokuje povećanje napona dok paralelna utiče na povećanje vrednosti struje u sistemu. U sistemima bogatim harmonicima postoje oba tipa rezonanse. Usled harmonijskih rezonansi može doći do uništenja kondenzatora a ponekad i do štete na ostaloj opremi u sistemu.

Prisustvo harmonika, posebno postojanje harmonijskih izobličenja napona, utiče na povećanje nivoa gubitaka kod dielektrika a samim tim i na povećanje temperature. Usled povećanja temperature smanjuje se pouzdanost kondenzatora i njegov životni vek.

D. Releji

Svi releji mogu se klasifikovati u tri grupe: elektromehanički, poluprovodnički i releji kontrolisani mikrokontrolerom.

Standardni elektromehanički kontrolisani releji nisu osetljivi na postojanje harmonika. Ovo s toga što se namotaji releja napajaju niskim naponom (npr. 24V) ili preko transformatora koji utiče na slabljenje amplitude harmonika

ukoliko postoje u mreži. Ukoliko je sadržaj harmonika napona/struje značajan, može doći do sporijeg reagovanja ili smanjenja životnog veka usled dodatnog zagrevanja namotaja releja. Visok nivo harmonika, višestruko prolaženje kroz nulu (notching) utiče na povećanje naprezanja kod poluprovodničkih releja, a samim tim se i smanjuje njihova pouzdanost. Elektromehanički releji isključuju se pod dejstvom obrtnog momenta koji je srazmeran kvadratu fluksa definisanog ulaznom strujom. Ovaj tip releja reaguje na efektivnu vrednost struje.

S druge strane, poluprovodnički releji reaguju u zavisnosti od amplitude signala. Ukoliko je ukupno harmonijsko izobličenje napona (Total Harmonic Distortion, THD_V) manje od 10%-20%, ne očekuju se problemi u radu releja [2]. Uticaj harmonijskih izobličenja na rad releja čiji rad se bazira na upotrebi mikrokontrolera značajno se umanjuje upotrebom filtara. Naime, filtriranjem se potiskuju viši harmonici i izdvaja se samo osnovna komponenta signala na koju je relej osetljiv.

E. Provodnici

Konačna otpornost provodnika izaziva povećanu disipaciju u prisustvu harmoniskih komponenta struje. Ovi gubici se računaju saglasno definiciji (2) i direktno su proporcionalni kvadratu efektivne vrednosti struje (I_{RMS}) i otpornosti kabla (R). Poznato je da otpornost kabla zavisi, takođe, od površinskog efekta i od efekta blizine (*proximity effect*). Koliko će ovi efekti uticati na konačnu otpornost provodnika zavisi od otpornosti materijala koji je iskorišćen za provodnik, frekvencije i same dimenzija provodnika. Na osnovnoj frekvenciji njihov efekat je zanemarljiv.

Harmonici takođe utiču na povećanje naprezanja izolacije, a samim tim se smanjuje pouzdanost kabla i njegov životni vek. Usled transporta struje koja sadrži harmonike kroz elektroenergetske kablove dolazi do pojave elektromagnetnih smetnji (EMI- electromagnetic interference) u signalnim i kontrolnim kablovima. Ove elektromagnetne smetnje utiču na rad telefonske, radio, televizijske i ostale telekomunikacione opreme.

F. Merna oprema

Većina analognih instrumenata i veliki broj digitalnih instrumenata koji se koriste za merenje efektivne vrednosti AC napona/struje projektovani su da mere srednju vrednost dvostrano usmerenog napona/struje (srednja vrednost apsolutne vrednosti signala). Zatim se izmerena vrednost množi odgovarajućim koeficijentom. (Za prostoperiodični talasni oblik koeficijent iznosi 1.11). Predloženi princip daje tačne rezultate jedino u slučaju kada se meri prostoperiodični oblik napona/struja. U prisustvu harmonika dolazi do značajnih odstupanja od tačnih vrednosti. Nivo greške zavisi od zastupljenosti harmonika odnosno od izobličenja signala. Zbog toga, ukoliko se žele tačne efektivne vrednosti, moraju se koristiti instrumenti za merenje pravih efektivnih vrednosti (*true RMS*). Kod ovih instrumenata ukupna efektivna vrednost napona/struje računa se kao:

$$X_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^M X_{RMS_h}^2}, \quad (3)$$

gde X_{RMS_h} predstavlja efektivne vrednosti h -tog harmonika napona/struje.

Strujni transformatori torusnog tipa koji se koriste prilikom merenja izobličene struje moraju biti veoma kvalitetni, sa linearnom karakteristikom u širokom propusnom opsegu, kako bi se omogućilo tačno merenje do 50-og harmonika. Kod nekih instrumenata (razni harmonijski analizatori, instrumenti za merenje snage i dr.) često se koristi strujni transformator baziran na holovom (Hall) efektu. Ovi instrumenti su precizniji ali zahtevaju često baždarenje.

Instrumenti koji se koriste za merenje snage (aktivne i reaktivne) u prisustvu harmonika, a projektovani su za merenje samo za prostoperiodične napone/struje, prave grešku do 3% [5]. Precizno izračunavanje/merenje aktivne/reaktivne snage uzima u obzir i efekat harmonika:

$$P = \sum_{h=1}^M V_{RMS_h} I_{RMS_h} \cos(\theta_h) = P_1 + P_H, \quad (4)$$

$$Q = \sum_{h=1}^M V_{RMS_h} I_{RMS_h} \sin(\theta_h) = Q_1 + Q_H, \quad (5)$$

gde P_1 i Q_1 označavaju aktivnu i reaktivnu snagu osnovnog harmonika dok P_H i Q_H označavaju aktivnu i reaktivnu snagu viših harmonika, respektivno. Pojedini autori osporavaju definiciju (5) za računanje reaktivne snage tvrdeći da ona daje neprecizne rezultate [6]. Uprkos tome, navedena definicija ima praktičnu primenu kod gotovo svih instrumenata koji mere reaktivnu snagu u prisustvu harmonika. Detaljnija analiza definicija koje se javljaju u literaturi za merenje reaktivne snage može se naći u [7], [8].

Nasuprot instrumenata koji i u slučaju merenja aktivne i reaktivne snage u prisustvu harmonika prave relativno malu grešku, greška nije zanemarljiva kada se radi o instrumentima za merenje faktora snage i prividne snage. Faktor snage računa se kao količnik ukupne aktivne (P) i prividne snage (S), dok se prividna snaga računa kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje. Prava efektivna vrednost napona/struje varira u zavisnosti o zastupljenosti harmonika, a samim tim i nivo greške koji se pravi prilikom merenja. Ukoliko su harmonici značajno zastupljeni greške su veće i obrnuto.

III. GUBICI SNAGE U PRISUSTVU NELINEARNIH POTROŠAČA

Ovo poglavlje ukazuje na još jedan negativan efekat harmonika u elektroenergetskoj mreži. Za razliku od prethodno opisanih, on nije vezan za uticaj na komponente sistema, već na probleme koji nastaju u nedostatku praktičnog metoda za registrovanje nivoa i za otkrivanje uzročnika izobličenja. Usled toga, mogu se stvoriti značajni ekonomski gubici u elektrenergetskom sistemu.

Poznato je da za prostoperiodične sisteme važi da je $S^2 = P^2 + Q^2$. Međutim to nije slučaj ukoliko su harmonici prisutni u mreži, tada važi sledeća nejednakost:

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

Jasno je da razlika potiče od prisustva viših harmonika, odnosno da je ona posledica izobličenja napona i struje u sistemu. Naime, samo harmonici istog reda utiču na vrednost aktivne/reaktivne snage saglasno (4) i (5), dok na efektivnu vrednost napona/struje utiču svi harmonici (3). Prateći generalnu logiku Budeanu je još 1927. izvršio korekciju izraza za prividnu snagu tj. uvođenjem pojma *snage izobličenja*, odnosno *distorzione snage*, koja je direktna posledica prisustva harmonika u mreži:

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

gde je sa D označio *distorzionu snagu*. Suština ove korekcije sadržana je u činjenici da u odsustvu harmonika ne postoji *distorziona snaga*, odnosno, $D=0$. Očigledno, tada važi $S^2 = P^2 + Q^2$. Odavde sledi da snaga *distorzije* može da se izračuna kao:

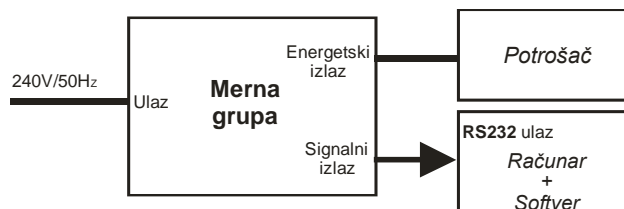
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (8)$$

Osim *distorzione snage* koja se računa na osnovu (8), mogu se izdvojiti i druge neaktivne komponente snage kao što su snaga *izobličenja napona* D_V , struje D_I , harmonijska snaga *izobličenja* D_H i ukupna neaktivna snaga N , koje su definisane standardom IEEE 1459-2010 [9]. Nažalost praktična primena tih definicija za merenje potrošnje na nivou korisnika nije moguća. Čak se i u okviru tog standarda tvrdi da ne postoji opšta definicija koja bi mogla da se primeni na tarifiranje, procenu kvaliteta energije, otkrivanje uzročnika izobličenja i za proračun filtera i kompenzatora neaktivne snage. Primera radi za izračunavanje prividne snage u trofaznom sistemu potrebno je, pored ostalog, poznavati i otpornosti svih vodova, što predstavlja nemoguću misiju na terenu. U želji da nađemo privremeno rešenje za akutni problem u elektroenergetskim sistemima koncentrišemo se na primenu postojeće instalirane infrastrukture uz minimalnu izmenu. Naime postoji regulativa kojom se zahteva da postojeća brojila mere samo aktivnu energiju dok se reaktivna energija meri samo za industrijske potrošače. Nezavisno od toga savremena elektronska brojila mere i registruju potrošnju aktivne i reaktivne snage saglasno sa (4) i (5). Zato je logično da to bude polazna tačka za izračunavanje i preostale, neregistrovane komponente snage. Dosadašnja praksa komercijalnog merenja potrošnje energije, pokazuje da distributeri beleže sve veće gubitke. Porast nivoa gubitaka poklapa se sa porastom broja nelinearnih potrošača. Očigledno je da su oni još jedna posledica prisustva harmonika u elektroenergetskom sistemu. Zato autori ovog rada zagovaraju tezu da je potrebno omogućiti brojilima da registruju i *distorzionu snagu*. U tom cilju predlažemo i metod koji je praktično primenljiv adaptacijom postojećih brojila. U

sledećem poglavlju biće prikazani rezultati merenja *distorzione snage* na različitim potrošačima primenom (8) i uz pomoć standardnog elektronskog brojila koje je proizvela firma EWG iz Niša [10].

IV. MERENI REZULTATI DOBIJENI UZ POMOĆ STANDARDNE MERNE GRUPE

Da bi se potvrdila ideja o opravdanosti uvođenja snage *distorzije* u tarifni sistem realizovano je merno okruženje prikazano na Sl.1.



Slika 1. Blok šema mernog okruženja

Kao merni instrument korišćena je komercijalna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62052-11 [11] (proizvod EWG iz Niša). Brojilo 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 S , 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 *distorzione snage*.

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

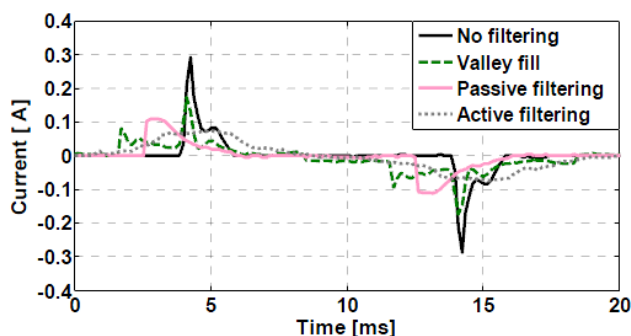
TABELA I. REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA POTROŠAČA

Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$S[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D[VAR]$
Sijalica Philips 75W	222.82	0.33	73.53	73.48	0.69	2.64
Sijalica Osram 75W	223.31	0.33	73.47	73.39	0.63	3.35
CFL20Wtube	219.46	0.14	31.60	18.73	-9.58	23.58
CFL11W helix	221.73	0.08	17.74	10.42	-5.38	13.31
CFL11W tube	215.51	0.08	17.24	10.79	-5.26	12.38
CFL9W bulb	216.06	0.06	12.75	7.58	-3.64	9.58
CFL7W bulb	219.83	0.04	9.67	6.03	-2.57	7.11
Led Sijalica 3W	217.9	0.03	7.41	3.96	-0.89	6.2
Led Sijalica 6W	222.65	0.042	9.35	5.10	0.96	7.78
Led Sijalica 8W	218.02	0.08	18.10	9.7	-2.84	15.01
Led Reflektor 10W	223.05	0.093	20.74	10.81	-3.75	17.30
Led Reflektor 30W	222.72	0.272	60.58	32.23	-8.96	50.51
LCD- 23 (Dell E2310H)	221.42	0.17	37.64	23.44	-6.78	28.66
DELL Optiplex980	221.25	0.30	66.15	55.83	-33.05	12.92

Za sijalice sa užarenim vlaknom koje predstavljaju grupu linearnih potrošača, *distorziona snaga* trebalo bi biti jednaka nuli. Kao što se vidi iz Table 1 to nije slučaj. Naime, dobija se mala vrednost *distorzione snage* koja je manja od 5% od vrednosti *prividne snage*. Male vrednosti *distorzione snage* kod

sijalica sa užarenim vlaknom rezultat je nepreciznosti mernih grupa, što je definisano standardom [11]. 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 značajna vrednost snage distorzije. Njena vrednost je veća ukoliko struja sadrži veći broj harmonika. Gubici koji se javljaju usled neregistrovanja distorzionne snage kreću se u granicama od 20% (DELL Optiplex980) do 84% prividne snage što je slučaj kod rasvetnih tela na bazi LED dioda. Rezultati simulacija i merenja za različite tipove potrošača koji su saglasni sa rezultatima datim u Tabeli 1 mogu se naći u [8], [12] i [13].

Da bi se ekonomski gubici distributera, nastali priključivanjem nelinearnih potrošača, smanjili potrebno je uvesti i podatak o vrednosti snage distorzije kao parametar prilikom kreiranja konačnog računa. Naime, pravedno je destimulisati potrošače da nekontrolisano zagađuju elektroenergetsku mrežu harmonicima. Generalno moguće je (1) isključiti potrošače koji zagađuju mrežu ili (2) dodatno ih kazniti. Za drugi pristup postoji praksa na primenu reaktivne snage i faktora snage [14]. Prilikom destimulacije potrošača koji zagađuju mrežu neophodno je voditi računa i o pojavi male vrednosti distorzionne snage kod linearnih potrošača. Do pojave ove vrednosti može doći i na linearnim potrošačima kada je napon izobličen do standardom dopuštene granice od 5%. Pored toga postoje i odstupanja u merenju Q shodno različitim definicionim izrazima [7], [8] i manjom klasom tačnosti. To ukazuje na potrebu da se uvede neka dozvoljena granična vrednost snage distorzije koja se ne bi obračunavala prilikom kreiranja konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Odluku o veličini granične vrednosti doneli bi eksperti u dogovoru sa distributerima električne energije. Da bi sve ovo bilo moguće, neophodno je, blagovremeno, zameniti brojila novim, koja omogućavaju registrovanje distorzionne snage. Alternativno rešenje predstavlja obavezu da se značajno poveća kvalitet filtara na nelinearnim potrošačima, ali se time značajno povećava cena većine elektronskih uređaja. Takođe je potrebno napomenuti da se korišćenjem različitih filtara za eliminaciju harmonika problem ublažava ali se ne rešava u potpunosti. Naime struje potrošača ostaje izobličena i nakon filtriranja što je pokazano na Sl. 2 za različite tipove filtra.



Slika 2. Talasni oblici struja različitih tipova LED sijalica [15]

V. ZAKLJUČAK

Analiza negativnih efekata koji se javljaju u opremi koja čini elektroenergetski sistem i rezultati merenja koji su prikazani u Tabeli 1 nedvosmisleno pokazuju opravdanost uvođenja vrednosti snage distorzije u kreiranju konačnog računa o utrošenoj električnoj energiji. Među prvima koji su uvideli da su gubici u elektroenergetskom sistemu usko povezani sa promenom prirode potrošača bili su stručnjaci Enel korporacije. Enel korporacija je najveći distributer električne energije u Italiji a drugi po veličini u Evropi. Oni problem rešavaju uvođenjem reaktivne snage u tarifni sistem i zamenom elektro-mehaničkih brojila elektronskim. Ovaj rad pokazuje da to nije dovoljno. Gubici koji se ogledaju kroz snagu distorzije mnogo su veći nego gubici koji se javljaju usled neregistrovanja reaktivne snage. Takođe je pokazano da problem gubitaka ne može da se reši na efikasan način uvođenjem različitih filtara. Naime, ukoliko bismo želeli da izfiltriramo sve harmonike potrebno je realizovati veoma komplikovane filtre koji pak značajno poskupljuju cenu uređaja.

Zbog svega gore navedenog 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] Singh G.K., "Power system harmonics research: a survey," European Transactions on Electrical Power, vol.19, pp. 151–172, August 2007.
- [2] "Control of harmonics in electrical Power System," American Bureau of Shipping, May 2006
- [3] Y. Alhazmi, Allocating power quality monitors in electrical distribution systems to measure and detect harmonics pollution, Electronic Theses and Dissertations, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010
- [4] Integral Energy Power Quality Centre: Technical note No. 3, "Harmonic distortion in the electric supply system," March 2000.
- [5] J. G. Webster, The measurement, instrumentation, and sensors handbook, IEEE Press, 1999.
- [6] A. E. Emanuel, Power definitions and the physical mechanism of power, Wiley and IEEE Press, 2010.
- [7] Stevanović, D., Petković, P., "A new method for detecting source of harmonic pollution at grid," Proc. of 16th Inter. Symposium Power Electronics Ee2011, Novi Sad, Serbia, 26.10.-28.10., 2011, T6-2.9 pp. 1-4.
- [8] Dimitrijević, M., Litovski, V., "Quantitative analysis of reactive power calculations for small non-linear loads,"

- Proc. of Small System Simulation Symposium 2012, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012, pp. 150-154.
- [9] IEEE Std 1459-2010, "IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions".
- [10] EWG - multi metering solutions, www.ewg.rs
- [11] IEC 62052-11 Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment.
- [12] Stevanović D., Jovanović B., Petković P., "Simulation of utility losses caused by nonlinear loads at power grid," Proc. of Small System Simulation Symposium 2012, Niš, Serbia, 12.02.-14.02., 2012, pp. 155-160.
- [13] Stevanović, D., Petković, P., "Measurement of utility losses caused by nonlinear loads at power grid," IX Symposium on Industrial Electronics INDEL 2012, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 01.11-03.11, 2012
- [14] Xu W., Liu Y., "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, n.2, pp. 804 - 810, January 2000.
- [15] Uddin S, Shareef H., Mohamed A., Ahannan. M., "Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps," PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, r. 88 nr 11a/2012

ABSTRACT

This paper presented an analysis of effects that occur in power system related to harmonics. Harmonics in power systems have been known since the adoption of AC (alternating current) as a means for electric energy transmission. They have, however, been magnified nowadays with the increased use of non-linear loads. Harmonics cause many unwonted problems on power system, some of them are explained. Moreover this paper analyzed one additional effect of harmonics. It is related to power losses in a power system. These losses are closely associated with the application of non-linear loads. Measured result of widespread used nonlinear loads in household or office confirms the significance of including distortion energy into the billing policy. These results are obtained using industrial power meters manufactured by EWG from Niš.

Harmonics in Power System – Problems and Solutions
Dejan Stevanovic, Predrag Petkovic