

Unapređenje sistema za registrovanje potrošnje električne energije

Dejan Stevanović, Predrag Petković, *Member, IEEE*

Apstrakt—Postojeći sistem za registrovanje potrošnje električne energije zasniva se na primeni komercijalnih brojlara i/ili mernih grupa kod svakog potrošača. Nacionalnim standardom predviđeno je da brojila registruju utrošenu aktivnu, a merne grupe aktivnu i reaktivnu energiju. Ovi zahtevi daju pravilnu sliku o potrošnji u sistemima u kojima dominiraju linearni potrošači. Nažalost potrebe korisnika električne energije značajno su se promenile poslednjih godina, tako da je broj nelinearnih potrošača značajno porastao. Izostavljanje registrovanja distorzionne komponente snage (energije) iz postojeće regulative i pratećeg hardvera prouzrokuje gubitke u elektroenergetskom sistemu koji su proporcionalni snazi i broju nelinearnih potrošača. Ovaj rad ima za cilj da dokaže prethodnu tvrdnju i da ponudi efikasno rešenje tog problema. Efikasnost se zasniva na modifikaciji ugrađenih elektronskih brojlara i mernih grupa, tako da se lako uklapa u postojeći sistem. Posebno su naglašene prednosti unapređenog sistema za registrovanje potrošnje električne energije. Prikazani rezultati dobijeni su uz pomoć merne grupe koju proizvodi EWG iz Niša.

Ključne reči— Gubici; snaga distorzije; harmonici.

I. UVOD

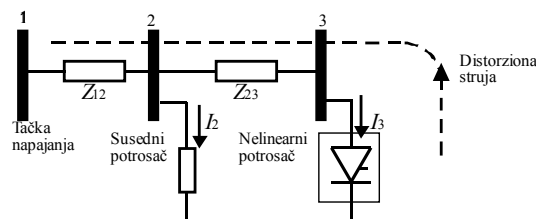
Svi potrošači na elektroenergetskoj mreži mogu se svrstati u dve grupe: u linearne i nelinearne. Kod linearnih potrošača struja je linearno proporcionalna naponu. Zato talasni oblik struje prati talasni oblik napona uz mogući fazni pomak. To znači da se obe veličine karakterišu prostoperiodičnim talasnim oblikom frekvencije 50Hz. Istorijski gledano, do skora su dominirali linearni potrošači kao što su električni motori, sijalice sa užarenim vlaknom, razna grejna tela i većina drugih uređaja široke potrošnje. Danas to više nije slučaj. Šta više, slobodno se može reći da danas po broju dominiraju nelinearni potrošači. Zato i njihov ukupan udeo u potrošnji postaje veoma značajan. Kod nelinearnih potrošača struja je nelinearna funkcija napona. Zato struja ne prati talasni oblik napona mreže već se kaže da je izobličena. Stepenn izobličenja (distorzije) zavisi od sadržaja harmonika. Harmonici se definišu kao neželjene spektralne komponente signala na frekvencijama koje su jednake celobrojnom umnošku osnovne frekvencije. Termin „harmonik“ prvi put spominju u literaturi 1894. godine Houston i Kennelly [1]. Svaki harmonik karakteriše amplituda i frekvencija. Osim

Dejan Stevanović - Inovacioni centar naprednih tehnologija CNT d.o.o, Vojvode Mišića 58/2, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dejan.stevanovic@icnt.rs).

Predrag Petković - Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: predrag.petkovic@elfak.ni.ac.rs).

harmonika čija je frekvencija jednaka celobrojnom umnošku osnovne frekvencije, postoje i interharmonici i subharmonici kod kojih to nije slučaj.

Harmonijske komponente struje protiču kroz energetski sistem i na konačnoj impedansi vodova stvaraju dodatne harmonijske komponente napona [1]. To dovodi do promene u talasnom obliku napona kod svih potrošača koji se nalaze u blizini. Sl. 1 ilustruje uticaj nelinearnog opterećenja na obližnje potrošače. Najmanje izobličenje izazvano nelinearnim potrošačem u tački 3 nastaje u tački 1, koja je najbliža izvoru. Pretpostavimo da je napon V_1 neizobličen. Usled pada napona na konačnoj impedansi voda između tačaka 1 i 2 (Z_{12}), struja I_3 (koja sadrži harmonike) i linearna struja I_2 , umanjice napon u tački 2 za $Z_{12}(I_2+I_3)$. Očigledno je da će i napon V_2 biti nelinearan. Uticaj nelinearnih opterećenja na okolinu biće veći ukoliko je impedansa voda veća (udaljenost od izvora veća) i ukoliko je distorziona struja veća.



Sl. 1. Uticaj nelinearnog opterećenja na susedne potrošače

Sl. 1 ilustruje, zapravo, fenomen međusobne interakcije potrošača povezanih na istu elektroenergetsku mrežu. Sa porastom broja nelinearnih potrošača raste i veličina harmonijskog izobličenja celog sistema. Izobličenje napona utiče na rad pojedinih komponenta distributivne mreže i drugih potrošača. Harmonijska izobličenja na mreži ne mogu da se spreče ali se mogu održavati u prihvatljivim granicama. Postoje institucije za razvoj standard koji definišu granične vrednosti izobličenja. Najznačajnije organizacije koje deluju u SAD su IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ANSI (American National Standards Institute) i EPRI (Electric Power Research Institute). Na teritoriji Evrope najpoznatije su dve organizacije koje se bave standardima u oblasti kvaliteta električne energije i to su: IEC (International Electrotechnical Commission) i European Committee for Electrotechnical Standardization. Dva najpoznatija standarda koji se bave regulisanjem nivoa harmonika u elektroenergetskoj mreži su IEEE 519-1995 i IEC 61000-3-2. Za našu zemlju posebno je važno uklapanje u

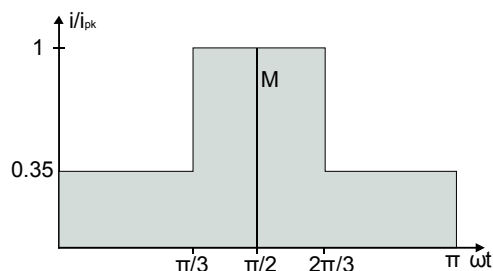
evropske regulatorne norme. Zato će u narednom poglavlju biti reči o IEC standardu kojim se definišu maksimalne vrednosti harmonika struje potrošača. U trećem poglavlju biće reči o uticaju harmonika na merenje parametara elektroenergetskog sistema. Četvrto poglavlje biće posvećeno merenju parametara elektroenergetskog sistema opterećenog realnim nelinearnim potrošačima koji se sreću u domaćinstvima i kancelarijama. Pokazaće se da primena opreme koja registruje samo aktivnu i reaktivnu komponentu energije prikriva stvarnu potrošnju koja može na nelinearnim potrošačima premašiti aktivnu komponentu. U petom poglavlju predlaže se metod za unapređenje merenja, obračuna i naplate potrošene električne energije.

II. DOZVOLJENE VREDNOSTI HARMONIKA STRUJE DEFINISANE STANDARDOM IEC61000-3-2

U Evropskoj Uniji od 2001. godine primenjuje se standard IEC 61000-3-2 koji propisuje granične vrednosti nelinearnih izobličenja struje potrošača do 40-tog harmonika. Standard se odnosi na izobličenja koja unose elektronski i električni uređaji široke potrošnje. On obuhvata potrošače sa nazivnom strujom do 16A po fazi i sa nazivnim naponom do 415V. Ovoj kategoriji pripadaju proizvodi kao što su kućni aparati, prenosni alati, elektronska oprema, i industrijska oprema. Njime nije obuhvaćena oprema čiji je nominalni radni napon manji od 220V efektivno, niti oprema snage veće od 1kW. IEC61000-3-2 klasifikuje sve uređaje u četiri kategorije, (označene sa A, B, C i D) prema tipu, a u nekim slučajevima i prema talasnom obliku struje.

U klasu A spadaju uravnoteženi trofazni potrošači i sva ostala oprema sem one koja je obuhvaćena ostalim klasama. Klasi B pripadaju prenosni alati i uređaji koji se koriste za zavarivanje ali nisu označeni kao profesionalna oprema. U klasu C spada oprema koja se koristi za osvetljenje. Klasi D pripadaju računari, monitori, čija je nominalna snaga u

granicama od 75W do 600W. Osim ovih potrošača, klasi D može pripasti i ostala oprema kod koje se talasni oblik trenutne vrednosti struje uklapa u granice prikazane na Sl.2. Naime potrebno je da 95% vremena pozitivne poluperiode talasni oblik struje bude u granicama prikazanim na Sl. 2 [2]. Centralna linija M na $\pi/2$ odgovara maksimalnoj vrednosti ulazne struje i_{pk} .



Sl. 2 Granične vrednosti struje za opremu klase D

Na klase B i C ne primenjuje se kriterijum talasnog oblika. Za svaku klasu uspostavljen je skup ograničenja u odnosu na izobličenja. Ograničenja za klase A i B definišu se kao apsolutni nivoi i uključuju sve harmonike do četrdesetog. Kod klase C granične vrednosti izobličenja definišu se u procentima vrednosti osnovnog harmonica, a primenjuju se samo na neparne harmonike do 39-tog. Ukoliko je nominalna snaga potrošača koji pripadaju klasi C manja od 25W onda se primenjuju ograničenja koja važe za opremu klase D ili se vrednosti 3. i 5. harmonika ograničavaju na 86%, odnosno 61% osnovne komponente struje, respektivno. Za opremu koja pripada klasi D definiše se maksimalno dozvoljena struja harmonika po vatu (mA/W), pri čemu amplituda harmonika ne sme da premaši vrednost propisanu za taj harmonik kod opreme klase A. Maksimalne dozvoljene vrednosti harmonika za svaku klasu date su u Tabeli 1 [3].

TABELA 1
GRANIČNE VREDNOSTI POJEDINIH HARMONIKASTRUJE PREMA IEC 61000-3-2 STD.

Oprema klase A		Oprema klase B	
Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika (A)	Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja
Neparni harmonici		Neparni harmonici	
3	2.30	3	3.45
5	1.14	5	1.71
7	0.77	7	1.155
9	0.4	9	0.6
11	0.33	11	0.495
13	0.21	13	0.315
15<h<39	0.15 x 15/h	15<h<39	0.225 x 15/h
Parni harmonici		Parni harmonici	
2	1.08	2	1.62
4	0.43	4	0.645
6	0.3	6	0.45

8<h<40		0.23 x8/h		8<h<40		0.345 x8/h	
Oprema klase C				Oprema klase D			
Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika izražena u procentima struje osnovne komponente	Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika po watu (mA/W)	Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika po watu (mA/W)	Red harmonika (h)	Maksimalno dozvoljena struja harmonika (A)
2	2	3	3.4	3	3.4	2	2.30
3	30 x PF	5	1.9	5	1.9	3	1.14
5	10	7	1.0	7	1.0	5	0.77
7	7	9	0.5	9	0.5	7	0.4
9	5	11	0.35	11	0.35	9	0.33
11<h<39	3	13<h<39	3.85/h	13<h<39	3.85/h	11<h<39	0.15 x15/h
Gde je PF: faktor snage							

III. UTICAJ HARMONIKA NA MERENJE PARAMETARA ELEKTRO ENERGETSKG SISTEMA

Osnovna merna oprema koja se koristi u elektrodistributivnoj mreži projektovana je sa ciljem da zadovolji željenu tačnost u sistemu opterećenom linearnim potrošačima. To podrazumeva da su napon i struja prostoperiodične funkcije sa istom frekvencijom. Promena prirode potrošača zahteva instrumente koji su u stanju da obezbede željenu tačnost i u uslovima harmonijskih izobličenja.

Postojeći pristup za merenje efektivne vrednosti napona/struje kod analognih instrumenata bazira se na merenju srednje vrednosti dvostrano usmerenog signala i množenje te vrednosti sa odgovarajućim koeficijentom. Za prostoperiodični talasni oblik taj koeficijent iznosi 1.11. Ovaj postupak koristio se od samog nastanka AC sistema i pokazao se kao veoma efikasan. Nažalost to danas više nije slučaj. Talasni oblik napona/struje nije više prostoperiodična funkcija. Nivo greške koju prave analogni/digitalni instrumenti bazirani na prethodno opisanom principu zavisi od zastupljenosti harmonika, odnosno od izobličenja signala. Zbog toga, ukoliko se žele tačne efektivne vrednosti, moraju se koristiti instrumenti koji na sebi imaju oznaku *true RMS*. Kod ovih instrumenata ukupna efektivna vrednost napona i struje računa se kao:

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

gde V_{RMS_h} i I_{RMS_h} predstavljaju efektivnu vrednost h -tog harmonika napona, odnosno struje.

Uobičajeno je da se informacija o struji konvertuje preko strujnog transformatora. To znači da njegove karakteristike direktno utiču na ukupnu grešku merenja. Prisustvo harmonika zahteva da strujni transformatori imaju linearnu karakteristiku u širem frekventijskom opsegu. Pojedini instrumenti kao što su razni harmonijski analizatori, instrumenti za merenje snage i drugi, konverziju struje baziraju na primeni holovog (Hall) efekta. Ovi instrumenti su precizniji ali zahtevaju često baždarenje.

Precizno izračunavanje/merenje aktivne/reaktivne snage na nelinearnim potrošačima zahteva da se i efekat harmonika uzme u obzir:

$$P = \sum_{h=1}^M V_{RMS_h} I_{RMS_h} \cos(\theta_h) = P_1 + P_H, \quad (2)$$

$$Q = \sum_{h=1}^M V_{RMS_h} I_{RMS_h} \sin(\theta_h) = Q_1 + Q_H, \quad (3)$$

gde P_1 i Q_1 označavaju aktivnu i reaktivnu snagu osnovnog harmonika, respektivno, dok P_H i Q_H označavaju aktivnu i reaktivnu snagu viših harmonika, respektivno. Treba napomenuti da u prethodnim izrazima indeks h označava isti broj kada se radi o naponu i struji. Drugim rečima na P_H i Q_H utiču samo komponente napona i struje istih frekvencija (proizvodi h -tog harmonika napona i h -tog harmonika struje). Pojedini autori [5] osporavaju definiciju (3). Glavna zamerka odnosi se na njenu tačnost. Uprkos tome, navedena definicija ima praktičnu primenu kod gotovo svih instrumenata koji mere reaktivnu snagu u prisustvu harmonika. Detaljnija analiza ostalih definicija koje se koriste za merenje reaktivne snage može se naći u [6], [7].

Postojeći instrumenti za merenje aktivne/reaktivne snage uglavnom su projektovani sa ciljem da registruju samo snagu osnovnog harmonika (P_1 i Q_1). Prisustvo ostalih harmonika (P_H i Q_H) manifestovaće se na njima samo kroz članove koji predstavljaju proizvod h -tog harmonika napona i h -tog harmonika struje što u praksi ne prelazi 3% komponente osnovne frekvencije [4]. Efekat harmonika znatno je više izražen prilikom merenja prividne snage koja se računa kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje (4).

$$S = I_{RMS} \cdot V_{RMS}. \quad (4)$$

Na osnovu (1) može se zaključiti da ovaj izraz uključuje i komponente snage nastale kao proizvod različitih harmonika napona i struje.

Poznato je da se faktor snage, po definiciji, računa kao količnik ukupne aktivne i prividne snage. Zato će prisustvo harmonika imati značajan uticaj na ovu veličinu. Važno je kvantitativno odrediti uticaj harmonika na P i Q jer su to jedine veličine koje se mere na nivou svakog potrošača i prema kojima se obavlja tarifiranje, odnosno naplata isporučene energije. Svako odstupanje od tačnih vrednosti oštetiće ili potrošača ili isporučioća električne energije. Zato

će naredno poglavlje biti posvećeno merenjima na realnim potrošačima koji se sreću u domaćinstvima i kancelarijama.

IV. MERENJE PARAMETARA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA OPTEREĆENOG NELINEARNIM POTROŠAČIMA

Elektronsko brojilo predstavlja osnovni merni instrument u sistemu registrovanja isporučene električne energije. Brojila projektovana za merenje u uslovima prisustva harmonika treba da mere osnovne parametre električne energije u skladu sa definicijama (1), (2), (3) i (4).

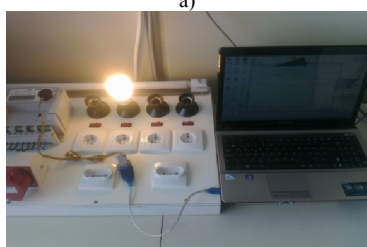
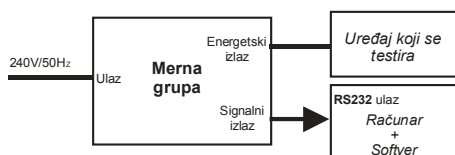
Kada se radi o sistemu bez nelinearnih potrošača, tada navedene definicije potvrđuju da je $S^2 = P^2 + Q^2$. Međutim u prisustvu harmonika dobiće se da je $S^2 > P^2 + Q^2$, odnosno primetno je prisustvo dodatne komponente snage koja se naziva *distorziona snaga* ili *snaga izobličenja*, a označava se sa D . Dobro je poznato [4] da distorziona snaga može da se predstavi u zavisnosti od S , P i Q kao:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (5)$$

Zamenom S , P i Q sa (2), (3) i (4) iz prethodnog izraza može se zaključiti da je:

$$D^2 = \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \cos \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \cos \theta_k)^2 + \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \sin \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \sin \theta_k)^2, \quad (6)$$

Očigledno je da u izrazu (6) figurišu harmonijske komponente napona i struje koje nisu sadržane u izrazima (2) i (3), tako da predstavljaju komponentu snage koja se ispoljava isključivo usled prisustva harmonika. Naravno izraz (6) daleko je komplikovaniji od izraza (5) i nije pogodan za praktičnu primenu. Naravno, pre implementacije neophodno je dokazati da su ulaganja u proširenje opcija elektronskih brojila opravdana. Zato je načinjen laboratorijski prototip mernog mesta koji povezuje standardnu mernu grupu sa personalnim računom. Ideja je bila da se omogući merenje potrošnje (S , P i Q) različitih tipova savremenih uređaja standardnom mernom grupom i da se u personalnom računaru izračuna distorziona snaga. Blok šema i fizički izgled ovog mernog mesta prikazani su na slikama 3.a i 3.b, respektivno.



Sl. 3.a) Blok šemai b) fotografija testnog okruženja

Kao merni instrument korišćena je komercijalno dostupna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-

22 [10] i IEC 62052-11 [11] (proizvod EWG iz Niša). Brojilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (1), (2) i (3). Korišćena merna grupa nema mogućnost računanja snage distorzije, ali registruje veličine I_{RMS} , V_{RMS} , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računaru preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (4) i (5) u računaru se izračunavaju vrednosti prividne i distorzione snage.

Rezultati merenja potrošnje različitih tipova savremenih potrošača potvrdili su naša očekivanja da distorziona snaga nije zanemariva. Rezultati merenja potrošnje na različitim tipovima potrošača dati su u Tabeli 2.

TABELA 2
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
Aparat za grej. vode	216.24	7.906	1709.59	1709.54	0.39	13.51
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
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 Reflektor 10W	223.05	0.093	20.74	10.81	-3.75	17.30
Led Parlamp10W	217.51	0.11	24.80	12.89	-2.74	21.00
Led Sijalica 6W	217.85	0.05	9.80	8.34	-0.16	5.15
Led Sijalica 3W	215.86	0.03	7.34	3.91	-1.00	6.13
LCD-19(SAM943N)	226.11	0.247	55.85	32.75	-1.24	45.22
LCD- 19 (Dell 1909W)	221.79	0.20	43.91	24.69	-7.15	35.61
DELL Optiplex 360	220.57	0.39	85.50	61.09	10.24	59.37
Klima-hladi	217.14	4.729	1026.86	1006.03	107.44	175.48
Klima-ventilator	221.07	0.15	33.16	22.00	18.32	16.73

Za sijalicu sa užarenim vlaknom i aparat za grejanje vode koji predstavljaju linearne otporne potrošače, distorziona snaga trebala bi biti jednaka nuli. Kao što se vidi iz Tabele 2 to nije slučaj. Kod sijalice vrednost distorzione snage je manja od 4% vrednosti prividne snage, dok je kod aparata za grejanje vode ta vrednost manja od 1%. Mala vrednost distorzione snage kod linearnih otpornih potrošača je posledica dozvoljene greške merenja merne grupe [10]. Sa pravom se može postaviti pitanje zašto je vrednost distorzione snage veća kod sijalice u odnosu na vrednost koja se javlja kod aparata za grejanje vode. Odgovor na ovo pitanje nalazi se u standardu za elektronska brojila. Naime ovim standardom je definisan veći nivo dozvoljene greške prilikom merenja struje malih potrošača. Za vrednost struje do 2A dozvoljena greška prilikom očitavanja struje je 1% a za struje veće od 2A dozvoljena vrednost greške je 0,5%. Sa druge strane treba biti svestan činjenice da mrežni napon nije idealan. Naime sva merenja obavljena su u realnim uslovima. To znači da je mrežni napon mogao biti izobličen u granicama do 5%. Naravno, struja kroz linearni reaktivni potrošač koji se napaja izobličenim naponom imaće harmonijske komponente, tako da će postojati određena komponenta distorzione snage. Obe ove činjenice treba uzeti u obzir tokom razmatranja problema tarifiranja, o čemu će biti reči kasnije.

Kod ostalih potrošača iz Tabele 2 radi se o izrazito nelinearnim potrošačima. Struje ovih potrošača sadrže harmonike koji ne postoje u naponu napajanja. Na osnovu (6) jasno je da komponente snage koje nastaju kao proizvod različitih harmonika napona i struje predstavljaju snagu distorzije. Naime samo harmonici istog reda utiču na ukupnu aktivnu i ukupnu reaktivnu snagu saglasno obrascima (2) i

(3), dok ostali harmonici utiču na RMS vrednost napona/struje, a samim tim i na prividnu snagu i distorzionu snagu. Vrednost snage izobličenja je veća ukoliko struja sadrži veći broj harmonika.

Podaci iz Tabele 2 pokazuju da distorziona komponenta snage nije zanemariva! Njena vrednost premašuje vrednost aktivne snage koja se, inače, registruje i naplaćuje. To znači da elektrodistribucija beleži značajne gubitke po ovom osnovu. Naravno ona ih pokriva kroz povećanu cenu koju plaćaju i potrošači koji nemaju nelinearna opterećenja. Za potrošače iz Tabele 2, gubici koji se javljaju usled neregistrovanja distorzionne snage kreću se u granicama od 17% (Klima-hladi) do 160% aktivne snage što je slučaj kod reflektora od 10W na bazi LED dioda.

V. METOD ZA UNAPREĐENJE MERENJA, OBRAČUNA I NAPLATE POTROŠENE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Rezultate iz Tabele 2 potvrđuju rezultati simulacija i merenja za različite tipove potrošača koji su objavljeni u [6], [7] i [12]. Svi oni nedvosmisleno ukazuju da je opravdano obogatiti elektronska brojila i merne grupe opcijom registrovanja distorzionne snage. Šta više, jednostavnost izraza (5) ukazuje da je to moguće uraditi uz minimalne troškove.

Istovremeno, treba imati na umu da su standardna elektronska brojila zasnovana na primeni integrisanih merača potrošnje kao što su Teridian™ 78M6613 [13] i IMPEG [14]. Oni već imaju ugrađene funkcije za računanje S , P i Q . To znači da je implementacija (5) moguća u okviru standardnih elektronskih brojila i mernih grupa i to uz minimalnu modifikaciju.

U specijalnim slučajevima, kada postojeći hardver u elektronskim brojilima raspolaže sa rezervom u registarskoj bazi, modifikacija je moguća čak i na softverskom nivou. Naime, rutina kojom se izračunava (5) lako se programira i jedini problemi svode se na upisivanje dobijenog rezultata u odgovarajući registar i pristup tim podacima.

Ukoliko to nije slučaj, moguća je dogradnja hardvera u postojećim brojilima kako bi im se proširile mogućnosti opcijom registrovanja potrošnje distorzionne snage. Autori ovog rada zajedno sa ostalim članovima LEDA laboratorije koja je projektovala prvi domaći integrisani merač potrošnje IMPEG [14] ugradili su ovo proširenje u najnoviju generaciju IMPEG čipa. Imajući u vidu da je opcija izračunavanja prividne snage već bila ugrađena, implementacija izraza (5) zahtevala je minimalnu izmenu u okviru DSP bloka.

Veoma je verovatno da će i izračunavanje D postati standardna opcija kod ostalih integrisanih merača potrošnje električne energije. Potrebno je samo da svest o potrebi za registrovanjem ove veličine na nivou svakog potrošača sazri i da se uključi u odgovarajuće standarde. Da bi se to postiglo valja ukazati na sve efekte koji odavde proističu.

Imajući u vidu sve veći broj priključenih nelinearnih potrošača na elektroenergetskoj mreže, gubici koji se javljaju kao rezultat neregistrovanja snage distorzije zauzimaju sve značajnije mesto. Može se reći da postoji trend povećanja nelinearnih potrošača. Potrošači su stimulisani da koriste energetski efikasne uređaje koji malo troše, ali unose značajna nelinearna izobličenja. Najbolji primer za to su štedljive i LED sijalice. Kod njih je neregistrovana snaga veća od registrovane aktivne snage. Iz ovoga se može zaključiti da distributerima električne energije ide u prilog da se opcije standardnih brojila prošire mogućnošću merenja distorzionne snage, jer bi time značajno smanjili ekonomske gubitke. Pored toga, modifikovana brojila omogućavaju da se tačno utvrdi koji potrošač i koliko ugrožava

elektroenergetsku mrežu priključivanjem nelinearnih potrošača.

Korisnici takođe imaju interesa da njihovu potrošnju kontrolišu brojila koja registruju i distorzionu snagu. Naime, sadašnja je praksa da distributer gubitke pokriva povećanjem cene energije. Na taj način i gubitke nastale usled povećanja distorzionne energije plaćaju svi korisnici nezavisno od prirode potrošača koje koriste. Korisnici koji ne mogu da plate skupe, a energetski efikasne uređaje imaće uvećane račune jer pokrivaju gubitke nastale u energetski efikasnim uređajima. Takođe, oni svesniji korisnici koji su spremni da kupe efikasne uređaje sa skupim filtrima za uklanjanje nelinearnih izobličenja, plaćaću i troškove nesavesnih potrošača. Dakle, postoji obostrani interes (distributera i potrošača) da se primenjuju elektronska brojila koja registruju i potrošnju distorzionne energije. Ovaj rad, kao i neki raniji radovi istih autora [12] ukazuju da je to izvodljivo.

Da bi se kompletirao sistem za registrovanje potrošnje električne energije opterećen nelinearnim potrošačima, potrebno je unaprediti i tarifni sistem.

Pravedno je destimulisati potrošače da nekontrolisano zagađuju elektroenergetsku mrežu harmonicima. Generalno moguća su dva pristupa:

- isključiti potrošače koji zagađuju mrežu ili
- destimulisati ih kroz povećane račune.

Prvi pristup je oštar i može biti koristan samo u drastičnim slučajevima. Racionalno je iskoristiti praksu koja se primenjuje kod potrošača kada je u pitanju reaktivna snaga [8] i uvesti distorzionu energiju u tarifni sistem.

Prilikom tarifiranja neophodno je voditi računa o dozvoljenom pragu distorzionne snage kod uređaja koji ispunjavaju standard definisan u Tabeli 1. Takođe, treba poštediti korisnike od plaćanja distorzionne snage koja se javlja na linearnim potrošačima pobuđenim nelinearnim naponom. Naime, aktuelni standard obavezuje distributere da obezbede napon sa ukupnim izobličenjem manjim od 5%. Takođe, treba imati u vidu da izračunavanje D primenom (5) zavisi od tačnosti Q . Različiti definicioni izrazi za Q [6], [7] i manja zahtevana klasa tačnosti ne bi smeli značajno da ugroze ni jednu stranu u tarifnom sistemu.

Sve ovo 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. Istovremeno to znači da bi za taj iznos trebalo umanjiti izmerenu vrednost snage distorzije. Predlažemo korekciju koja se može iskazati uz pomoć obrasca:

$$D_p = D - \gamma \cdot S, \quad (7)$$

gde D i S predstavljaju vrednost izmerene snage distorzije i prividne snage respektivno, a γ označava konstantu koju treba definisati. Odluku o veličini konstante γ kojom će se raditi korekcija izmerene vrednosti doneli bi eksperti u dogovoru sa distributerima električne energije. Autori ovog rada predlažu da vrednost ovog koeficijenta bude 0,0709. Do pomenute vrednosti došlo se nakon razmatranja dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu priključka koju propisuje standard IEEE 519-1995. Ovaj standard je posmatran kao referentni, umesto IEC61000-3-2 koji se pretežno primenjuje na teritoriji Evrope, iz veoma pragmatičnog razloga. Naime, kao što se vidi iz Tabele 1, IEC61000-3-2 reguliše karakteristike elektronskih uređaja, dok standard IEEE 519-1995 definiše dozvoljene vrednosti harmonika napona/struje na mestu gde se potrošač priključuje na elektroenergetsku mrežu, odnosno na mestu priključenja elektronskog brojila. Važno je napomenuti da su

ovi standardi kompatibilni tako da ispunjenje standarda IEC61000-3-2 garantuje i ispunjenje uslova propisanih standardom IEEE 519-1995.

VI. ZAKLJUČAK

Rezultati merenja potrošnje na nelinearnim potrošačima u realnim uslovima, prikazani u Tabeli 2, nedvosmisleno pokazuju da vrednost distorzije snage može da premaši aktivnu komponentu snage. Ovaj trend naročito je izražen kod savremenih potrošača, kao što su štedljive sijalice i energetski efikasni uređaji (mašine za pranje, regulaciju temperature, računarska oprema). Praktično, on se ispoljava kod većine elektronskih uređaja. Aktivna snaga značajno je smanjena time što u AC/DC konvertorima aktivni elementi rade u prekidačkom režimu. Kada je struja maksimalna, napon na komponenti je minimalan i obrnuto, tako da su gubici na pretvaračima zanemarivi. Ovim se značajno povećala energetska efikasnost, ali je stvorilo problem pojave nelinearnog izobličenja struje. Preko konačne otpornosti energetskih vodova izobličenja se preslikavaju u napon napajanja. U takvoj mreži dolazi do izražaja nelinearna komponenta snage, koju ne mogu da registruju ni elektromehanička ali ni savremena elektronska brojila. Otuda nastaje problem da se značajna komponenta isporučene energije ne meri, a samim tim i ne tarifira. Time se u elektroenergetskom sistemu generišu gubici. Najčešće distributeri pokrivaju ove gubitke tako što svim potrošačima povećaju cenu energije, nezavisno od pojedinačne odgovornosti. Ovakvo stanje može da se promeni samo ukoliko se pronađe način da se efikasno mere sve komponente energije, računajući i distorzionu. Autori su demonstrirali da je moguće proširiti mogućnosti savremenih elektronskih brojila opcijom merenja distorzije energije i to uz minimalno ažuriranje softvera ili jednostavnu dogradnju hardvera.

Uvođenjem ovakvih brojila do tačke konekcije svakog potrošača, moguće je jasno izdvojiti uzročnike nelinearnih izobličenja. Dodatna modifikacija tarifnog sistema je neophodna kako bi se destimulisala nekontrolisana primena nelinearnih potrošača. S obzirom da je standardima IEC61000-3-2 i IEEE 519-1995 definisana dozvoljena granica izobličenja, autori predlažu da se u tarifnom sistemu predvidi i ne tarifira dozvoljena minimalna distorziona snaga. Time se, istovremeno sprečava tarifiranje distorzije snage koju izobličeni napon mreže može da generiše na linearnim opterećenjima. Iako je u radu preložen i obrazložen način za utvrđivanje donje granice dopuštene snage izobličenja, autori smatraju da bi ovom temom trebali da se pozabave stručnjaci zaduženi za regulisanje tarifnog sistema.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] G.K. Singh, "Power system harmonics research: a survey", *European Transactions on Electrical Power*, Vol.19, pp. 151-172, 2007.
- [2] M. H. Bollen, I. Gu, *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*, John Wiley & Sons, Aug 9, 2004
- [3] M. N. Z. Abidin, IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview, Schaffner EMC Inc., Edison, NJ, USA
- [4] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, IEEE Press, 1999.
- [5] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the physical mechanism of power*, Wiley and IEEE Press, 2010.
- [6] Stevanović, D., Petković, P., "A New Method for Detecting Source of Harmonic Pollution at Grid," Proc. of 16th Intern. Symp. Power Electronics Ee2011, Novi Sad, Serbia, T6-2.9 pp. 1-4, 26.10.-28.10., 2011.
- [7] Dimitrijević, M., Litovski, V., "Quantitative Analysis of Reactive Power Calculations for Small Non-linear Loads," Proc. Small System Simul. Symp. 2012, Niš, Serbia, pp. 150-154, 12.02.-14.02., 2012.
- [8] 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
- [9] EWG - multi metering solutions, www.ewg.rs
- [10] IEC 62053-22, Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S), 2003.
- [11] IEC 62052-11, Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment, 2003.
- [12] Stevanović, D., Petković, P., "Measurement of Utility Losses Caused by Nonlinear Loads at Power Grid," Proc. IX Simp. on Ind. Electronics INDEL 2012, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 01.11-03.11, 2012
- [13] <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/7080>
- [14] LEDA08 Preliminary Data Sheet IMPEG01, <http://leda.elfak.ni.ac.rs/?page=projects>.

ABSTRACT

The existing system for measuring of consumed electrical energy is based on using commercial power meters or power meters for industrial purpose at each customer. The national standard predicts that commercial power meters register only active energy while industrial power meters register active and reactive energy. This request gives real picture of consumed electrical energy just in case when dominant type of loads is linear. Unfortunately, need for electrical energy is drastically changed in the last years. So the number of non-linear loads is significantly increased. Omitting registering distortion component power (energy) of the existing regulations and the accompanying hardware causes losses in the power systems, which are proportional to the strength and number of nonlinear loads. This paper aims to prove the above statement and offer an effective solution to this problem. Efficiency is based on the modification of the already built power meters and measuring groups. So it easily fits into the current system. Moreover, we especially emphasized the benefits of improved systems for registration power consumption. The measurement results are obtained using industrial power meters manufactured by EWG from Niš.

Improvement of the system for the registration of consumed electric energy

Dejan Stevanović, Predrag Petković