

KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVDRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE

Dejan Stevanović, *Inovacioni centar naprednih tehnologija u Nišu*, dejan.stevanovic@icnt.rs
Milutin Petronijević, Predrag Petković, *Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet*

Sadržaj – Cilj ovog rada je da ukaže na potrebu prilagođavanja postojećih metoda merenja snaga potrošnje industrijskih potrošača saglasno promenjenom profilu priključenih uređaja. Masovna primene elektroenergetskih pretvarača snage kao tipičnih nelinearnih potrošača dovela je u pitanje opravdanost postojećih metoda registrovanja potrošnje. Talasni oblik struje nelinearnih potrošača odstupa od sinusnog talasnog oblika usled čega deo isporučene energije ostaje nevidljiv, što, između ostalog, dovodi do značajnih gubitaka. Da bi se rešio ovaj problem, neophodno je detektovanje i kvantifikovanje snage izobličenja nelinearnih potrošača. U ovom radu prvi put se prikazuju rezultati merenja snage izobličenja na priključcima četvorokvadrantnog tiristorskog pretvarača koji napaja motor jednosmerne struje. Verifikacija predloženog algoritma merenja snage izobličenja obavljena je u motornom i generatorskom režimu rada pogona. Za tu svrhu koristi se standardna merna grupa modifikovana prema originalnoj ideji autora. Rezultati merenja upoređeni su sa onima iz preciznog analizatora snage.

1. UVOD

Jedan od glavnih zahteva s kojima se suočava moderno ljudsko društvo je smanjenje potrošnje energije, odnosno korišćenje energije na efikasniji način. Elektronika je odgovorila na ovaj zahtev, omogućivši proizvodnju uređaja visoke energetske efikasnosti. Međutim, borba za svaki vat na strani potrošača je beskorisna ako nije podržana od strane elektroenergetskog (EE) sistema. Nedavna istraživanja objavljena u [1] i [2] pokazuju da godišnja vrednost gubitaka na nivou distributivne mreže dostiže do 6% ukupne proizvedene energije. Od toga 2% predstavljaju gubici na vodovima, dok oko 4% predstavlja gubitke na distributivnoj opremi (najviše transformatori). Pomenute brojke obuhvataju gubitke koji se javljaju u savremenim evropskim sredjenaponskim (SN) i niskonaponskim (NN) mrežama. Mnoge zemlje donele su regulative kojima se zahteva smanjenje gubitaka za 1,5% svake godine [3].

Ovi gubici mogu da se klasifikuju kao tehnički i ne-tehničkih gubici. Tehnički gubici se javljaju usled disipacije snage na samoj opremi EE sistema (transformatori, vodovi i dr.). Ne-tehnički gubici se odnose na isporučenu energiju koja je utrošena, ali iz nekog razloga nije registrovana - najčešće su posledica ilegalno priključenih potrošača. Schneider Electric [3], ukazuje da se 90% ne-tehničkih gubitaka javlja u SN i NN mrežama. Pretpostavlja se da ekvivalentan novčani iznos ima vrednost između 1.000 € i 10.000 € po SN/NN transformatorskoj stanici na godišnjem nivou u evropskim zemljama [3]. To je dovelo SN i NN mreže u sam vrh prioriteta sa aspekta smanjenje gubitaka. Prvi korak u smanjenju gubitaka je praćenje i lokalizacija izvora gubitaka. Ovaj zahtev je bio teško izvodljiv i veoma skup u prošlosti, dok je danas novim tehničkim rešenjima ovaj posao značajno pojednostavljen. Pametna brojila (*smart*

meters) omogućavaju precizniji uvid u trenutno stanje pojedinih parametara mreže.

Nažalost, zbog inertnosti prihvatanja činjenica u vezi karaktera savremenih elektroenergetskih potrošača, neke odluke koje utiču na povećanje efikasnosti EE sistema nisu blagovremeno donete. Osnovna pretpostavka na kojoj se dugo godina zasniva merenje snage potrošača je da su opterećenja u potpunosti linearna (otporna ili reaktivna). To znači da struja prati promenu talasnog oblika napona uz moguću faznu razliku koja se javlja kod reaktivnih opterećenja. Do početka poslednjeg kvartala 20. veka većina potrošača uklapala se u ovaj koncept. U domaćinstvima su dominirali potrošači otpornog karaktera (grejači, sijalice i sl.), dok su u industriji potrošači obično imali induktivni i linearni karakter (asihroni motori). Shodno tome, bilo je dovoljno da brojila registruju samo aktivnu energiju u domaćinstvima i, dodatno, reaktivnu energiju kod industrijskih potrošača.

Povećana primena raznih vrsta pretvarača na bazi energetske elektronike, kako u domaćinstvu, tako i u industriji dovela je do novih, ranije nepoznatih problema. Porast angažovane reaktivne snage od strane kućnih potrošača, uz istovremenu pojavu harmonika doveli su do pojave dodatnih gubitaka snage. Pojedini distributeri postali su svesni značaja merenja aktivnih i reaktivnih snaga kod rezidencijalnih korisnika, pa su pokrenuli široku kampanju zamene starih elektro-mehaničkih brojila novim elektronskim. Tako je na primer Enel S.p.A. (Ente Nazionale per l'Energia eLettrica), najznačajniji distributer u Italiji i drugi prema instalisanosti snazi u Evropi, zamenio oko 99% brojila. Ovom kampanjom i tarifiranjem reaktivne energije kod rezidencijalnih potrošača gubici su delimično smanjeni, ali su problemi sa izobličenjima koji su posledica nelinearnih potrošača i dalje ostali prisutni.

Nedavno je pokazano [4, 5, 6] da pravi uvid u isporučenu snagu ne može da se dobije merenjem samo aktivne i reaktivne snage. Nelinearni karakter potrošača i prateća harmonijska izobličenja struja i napona u EE mreži, između ostalih problema, generisali su dodatne gubitke u distributivnoj mreži zbog čega je potrebno osmisliti pouzdan, a uz to i ekonomski opravdan metod za registraciju izvora harmonijskih izobličenja.

Nelinearna harmonijska izobličenja izazivaju pojavu nove komponente snage koju postojeća brojila ne registruju. Ova komponenta snage naziva se *snaga izobličenja*. U ovom radu pokazaćemo na primeru jednog reverzibilnog, tiristorski regulisanog jednosmernog pogona značaj verodostojne registracije snage izobličenja. Pokazaćemo da ova komponenta snage ima isti red veličine kao i aktivna snaga, pa je stoga važno da se uvede pouzdan način za njeno kvantifikovanje. U ovom radu primenićemo ranije predloženi metod [7] za modifikaciju standardnih elektronskih brojila koji omogućava registrovanje i snage izobličenja. Po prvi put biće publikovani rezultati merenja snage izobličenja za

višekvadrantni - motorni i generatorski režim rada pogona sa motorom jednosmerne struje sa tiristorskim ispravljačem na ulazu koji je dobro poznat kao značajan izvor viših harmonika struja.

Rad je organizovan u pet poglavlja. Naredno poglavlje daje kratak pregled principa rada savremenih elektronskih brojila. U trećem poglavlju predložen je metod za merenje snage izobličenja koje je posledica prisustva nelinearnih potrošača u EE mreži. Metod je verifikovan merenjima na industrijskom, tiristorskom ispravljaču koji napaja jednosmerni motor u motornom i generatorskom režimu rada. Rezultati verifikacije prikazani su u četvrtom delu ovog rada. Zaključak je dat u petom poglavlju.

2. OSNOVNI PRINCIP RADA ELEKTRONSKIH BROJILA

Osnovni princip rada elektronskih brojila zasniva se na digitalnoj obradi trenutnih vrednosti napona i struje. Vrednost merenog napona se preko naponskog razdelnika dovodi na analogni ulaz (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 digitalnom procesoru signala (DSP).

Trenutna vrednost složenoperiodičnog signala (napona ili struje), koji osim osnovnog harmonika na 50Hz, sadrži i harmonike višeg reda, može se predstaviti sa:

$$x(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M X_{RMS h} \cdot \cos(2\pi f_h t + \varphi_h), \quad (1)$$

gde f_h predstavlja frekvenciju h -tog harmonika.

Posle diskretizacije po vremenu dobija se

$$x(nT) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^M X_{RMS h} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_h}{f_{semp}} n + \varphi_h\right), \quad (2)$$

gde f_{semp} označava frekvencija uzorkovanja signala. Efektivna, odnosno srednjekvadratna vrednost signala računa se usrednjavanjem:

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

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 $\pi/2$.

$$Q = \frac{\sum_{n=1}^N v_{\pi/2}(nT)i(nT)}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N q(nT)}{N} \quad (4a)$$

Prividna snaga računa se kao proizvod efektivnih vrednosti napona i struje (5).

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}. \quad (5)$$

Detaljnije objašnjenje o principu rada elektronskog brojila može se naći u [8].

3. KOMPONENTE PRIVIDNE SNAGE U SLUČAJU NELINEARNIH POTROŠAČA

Prema dosadašnjoj regulativi industrijski potrošači plaćaju samo utrošenu aktivnu/reaktivnu energiju što je bilo sasvim razumno u periodu kada su dominirali linearni potrošači. Pojava regulisanih pogona zahteva ugradnju raznovrsnih pretvarača snage na bazi poluprovodnika (dioda, tiristora, tranzistora). Vrlo često se zamena postojećih, nereguliranih pogona, novim sa regulacijom brzine motora opravdava zahtevima za energetsom efikasnošću. Međutim, zamena starih linearnih potrošača novim nelinearnim, stvorila je dodatne probleme distributerima električne energije. Deo snage koja se javlja usled prisustva viših harmonika praktično je isporučen potrošaču, ali je nevidljiv sa stanovišta distributera ako se za registraciju potrošnje primene standardna elektro-mehanička ili elektronska brojila.

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

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

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

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

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

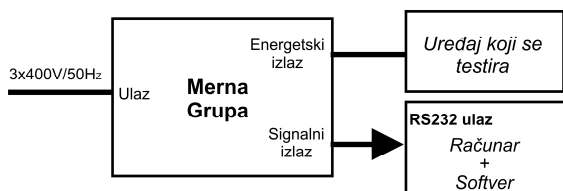
$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (8)$$

Može se pokazati da snaga izobličenja postoji samo kod nelinearnih potrošača, odnosno u situaciji kada se viši harmonici napona i struje javljaju na različitim učestanostima.

Računanjem snage izobličenja na osnovu (8) i uzimanjem u razmatranje prilikom kreiranja računa (penalizacija značajnih nelinearnih potrošača), distributeri bi bili u prilici da znatno smanje nivo gubitaka u EE sistemu i da redukuju druge probleme koje može izazvati propagacija harmonika u mreži. U sledećem poglavlju biće prikazani rezultati merenja koji su obavljani uz pomoć standardnog elektronskog brojila koje je proizvela firma EWG iz Niša [7].

4. KARAKTERIZACIJA ČETVOROKVADRANTNOG JEDNOSMERNOG POGONA UZ POMOĆ MODIFIKOVANE STANDARDNE MERNE GRUPE

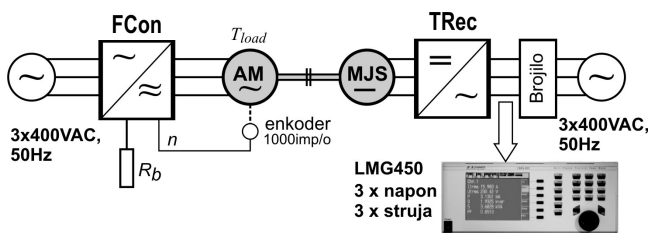
Da bi se potvrdila ideja o opravdanosti uvođenja snage izobličenja u tarifni sistem realizovano je testno okruženje koje će omogućiti merenje osnovnih parametra električne energije. Realizovano testno okruženje prikazano je na Sl.1.



Sl. 1. Blok šema testnog okruženja.

Kao merni instrument korišćena je komercijalna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-22 [9] i IEC 62052-23 [10]. Brojilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (3), (4), (4a) i (5). U trenutno raspoloživoj varijanti merna grupa nema mogućnost računanja snage izobličenja, ali registruje efektivnu vrednost napona i struje, aktivnu i reaktivnu snagu. Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (5) i (8) u računaru se izračunava vrednost snage izobličenja.

U ovom radu prikazani su rezultati dobijeni merenjem potrošnje elektromotornog pogona čija je blok šema prikazana na Sl. 2. Elektromotorni pogon realizovan je kao mehanička veza jednosmernog (MJS) i naizmeničnog, asinhronog motora (AM), koji ima ulogu simulatora opterećenja. AM se napaja iz pretvarača frekvencije (FCon). Zadatak pretvarača Fcon je da obezbedi konstantnu željenu vrednost momenta na osovini motora. To se postiže izborom odgovarajućeg režima vektorske regulacije po momentu uz korišćenje povratne veze po brzini u cilju bolje estimacije stvarnog elektromagnetnog momenta.



Sl. 2. Šema merenja za ispitivani elektromotorni pogon.

Jednosmerni motor sa nezavisnom pobudom (MJS) napaja se iz četvorokvadrantnog tiristorskog ispravljača (TRec) sa digitalnim upravljanjem koji je podešen da radi u režimu regulacije brzine. Četvorokvadrantni rad ispravljača omogućen je antiparalelnom vezom dva punoupravljava, trofazna tiristorska mosta. U Prilogu su dati podaci o korišćenom MJS i tiristorskom pretvaraču. Merenja su obavljena na priključnim krajevima ispravljača i to uporedo preko elektronskog brojila i upotrebom vrlo preciznog analizatora snage LMG450, proizvođača Zes Zimmer [10]. Ispitivani su motorni i generatorski režimi rada pri različitim brzinama obrtanja MJS. U motornom režimu rada energija kočenja AM trošila se na kočionom otporniku R_b , dok je u genertorskog režimu rada energija rekuperacije vraćena u napojnu mrežu regulacijom ugla paljenja tiristorskog mosta. Za opterećenje je odabrana potencijalna karakteristika sa konstantnim momentom, tako da je četvorokvadrantni rad pogona u oba smera obrtanja dao identične rezultate u motornim, odnosno generatorskim režimima rada.

Očekivani rezultati merenja u motornom režimu rada daju pozitivne vrednosti aktivne i reaktivne snage, dok je u generatorskom režimu rada aktivna snaga na ulazu ispravljača

postala negativna. U sledećoj tabeli dati su uporedo rezultati merenja koji su dobijeni uz pomoć merne grupe i analizatora snage LMG450 za motorni i generatorski režim pri opterećenju od 3.8 Nm. Pri ovom opterećenju, u motornom režimu MJS je bio nominalno opterećen, dok je u generatorskom režimu rada (rekuperativno kočenje) struja motora bila manja od nominalne, a što je i očekivano imajući u vidu tokove snaga u pogonu.

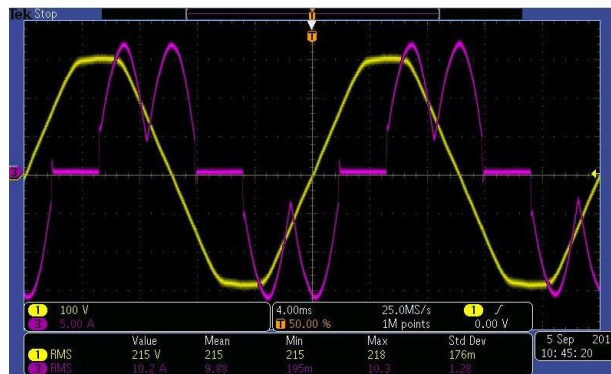
Tabela 1. Rezultati poređenja merenja merne grupe (brojila) i preciznog analizatora snage.

	Motorni režim		Generatorski režim	
	Merna grupa	LMG450	Merna grupa	LMG450
$V_{RMS}[V]$	215.05	215.86	217.05	217.35
$I_{RMS}[A]$	9.77	9.766	6.111	6.08
$P[W]$	954.96	985.2	-370.61	-412.3
$Q[VAR]$	1680.83	1701.611	1097.04	1077.98
$S[VA]$	2101.04	2108.1	1326.39	1323.5
$D_B[VAR]$	822.94	793.9	646.89	647.7

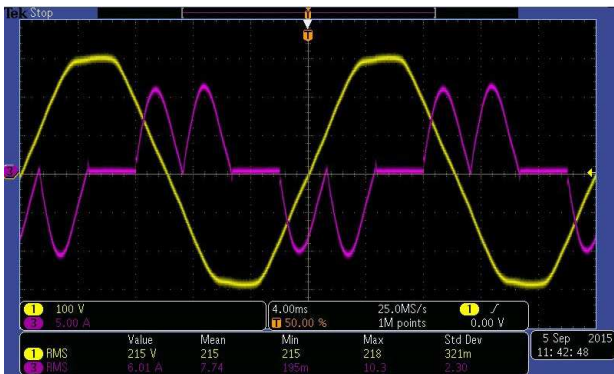
Do razlike u izmerenim vrednostima od stane merne grupe i analizatora snaga dolazi usled postojanja merne greške. Naime, dobro je poznato da se merne grupe projektuju sa klasom tačnošću 0.2S odnosno 0.5S za aktivnu snagu [10] dok se reaktivna snaga meri sa tačnošću 2 odnosno 3 [10]. Analizator snage LMG450 je znatno precizniji instrument - klase 0.07 za aktivnu snagu i 0.1 za reaktivnu snagu za signale u opsegu od 45 – 65Hz [11].

Ilustracija izobličenja struje koju unosi ovakav nelinearni potrošač vidljiva je iz rezultata za snagu izobličenja D_B , (Tabela 1) koja je po vrednosti istog reda veličine kao i aktivna snaga i oko 50% od reaktivne snage. Još jasniji prikaz dat je na slikama 3. i 4. gde su prikazani talasni oblici struje i napona jedne faze na priključcima pretvarača.

Talasni oblik struje označen je ljubičastom bojom. Interensantno je primetiti da napon napajanja ima talasni oblik koji odstupa od sinusnog, a što je poledica da su merenja obavljena u laboratoriji Fakulteta gde su prisutni brojni nelinearni potrošači (računari, fluo svetiljke) što je i dovelo do izobličenja napona. Rezultati iz Tabele 1 potvrđuju da se predložena metoda modifikacije standardnih elektronskih brojila može uspešno primeniti za registraciju snage izobličenja izrazito nelinearnih potrošača, kakvi su na primer tiristorski napajani elektromotorni pogoni, podjednako precizno u motornim i generatorskim režimima rada.

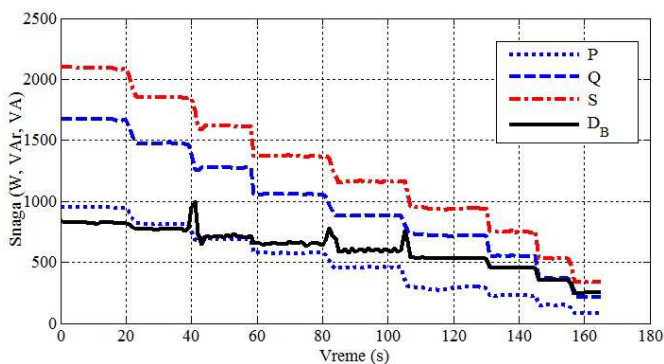


Sl. 3. Talasni oblik struje i napona elektromotornog pogona u motornom režimu.



Sl. 4. Talasni oblik struje i napona elektromotornog pogona u generatorskom režimu.

Uobičajeno, elektromotorni pogoni rade sa promenljivim opterećenjem, bilo da je to usled promene momenta na osovini ili usled promene brzine obrtanja. Kao ilustraciju upotrebljivosti predloženog koncepta merenja izvršeni su eksperimenti pri promenljivom momentu opterećenja. Dijagram potrošnje u vremenskom intervalu kada je elektromotorni pogon u motornom režimu, pri promeni opterećenja u koracima od 0,5Nm počevši od 3.8Nm prikazan je na Sl. 5.

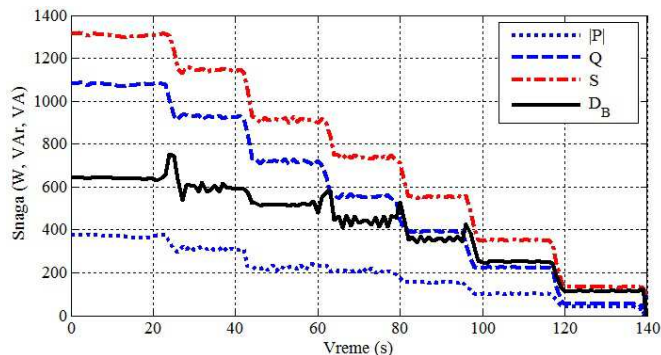


Sl. 5. Dijagram potrošnje elektromotnog pogona – motorni režim.

Kao što se može uočiti sa Sl. 5, snaga izobličenja je po vrednosti veća od aktivne snage u svim slučajevima sem na početku kada je opterećenje bilo maksimalno 3.8Nm. Takođe je interesantno primetiti da se razlika između vrednosti reaktivne snage i snage izobličenja smanjuje sa smanjenjem opterećenja, a što ukazuje na činjenicu da pri opterećenjima koja su manja od nominalnog do izražaja dolaze nelinearni efekti kao posledica prekidnih struja pretvarača.

Na Sl.6 prikazan je dijagram potrošnje u vremenskom intervalu kada elektromotorni pogon radi kao generator. Registrovana aktivna snaga je po znaku bila negativna (generatorski režim), ali je na ovom dijagramu prikazana njena apsolutna vrednost. I u ovom slučaju opterećenja pogona se menjalo u koracima od 0,5Nm počevši od 3.8Nm. Očigledno je da se vrednost snage izobličenja menja po približno istom trendu kao u slučaju kada elektromotorni pogon radi u motornom režimu. Na ovaj način potvrđena je mogućnost korišćenja standardne merne grupe za registraciju snage izobličenja u svim režimima rada elektromotornog pogona, a pri promenljivom opterećenju. Jednostavna i ekonomski opravdana modifikacija merenja koja je moguća i na postojećim elektronskim brojlama dozvoljava operaterima distributivne mreže registraciju značajnih nelinearnih

potrošača kao što su to elektromotorni pogoni sa tiristorskim pretvaračima.



Sl. 6. Dijagram potrošnje elektromotnog pogona – generatorski režim.

5. ZAKLJUČAK

Prisustvo viših harmonika struje u EE mreži ima izuzetno nepovoljan uticaj na elemente EE sistema. Budući da su standardno oni projektovani da optimalno rade na osnovnoj frekvenciji od 50Hz, viši harmonici izazivaju dodatnu disipaciju, značajno smanjuju životni vek opremi i dovode do brojnih drugih problema [12, 13, 14].

Savremeni elektromotorni pogoni projektuju se u skladu sa zahtevima povećanja energetske efikasnosti, pa stoga vrlo često imamo situaciju da se deo energije može vratiti napojnoj EE mreži. Osim ekonomskog aspekta smanjenja potrošnje, ovi potrošači unose nelinearne efekte koji su povezani sa utiskivanjem struja koje su izrazito bogate višim harmonicima. Korišćenja obnovljivih izvora energije u industriji i domaćinstvu dovešće do toga da sve veći broj postrojenja imaju reverzibilnu prirodu, odnosno da ne budu samo pasivni potrošači, nego da proizvode energiju i da višak vraćaju u EE mrežu. Zato je važno da se kvantifikuje nelinearna komponenta koja se unosi u EE mrežu. Najjednostavnije rešenje predstavlja modifikovanje standardnih elektronskih brojila na način opisan u [7]. Ovaj uređaj primenili smo za merenje utrošene i generisane snage na jednom reverzibilnom industrijskom elektromotornom pogonu.

Rezultati merenja prikazani u ovom radu potvrđuju da komponenta snage koja nastaje kao posledica nelinearne prirode savremenih tiristorskih ispravljača, odnosno invertora napona nije zanemariva. Zbog toga je potrebna registracija ove vrste potrošnje, ne samo iz razloga penalizacije potrošača, nego imajući u vidu potrebu da kompenzacijom viših harmonika u cilju suzbijanja njihovog šireg uticaja. Prostiranje harmonika kroz EE sistem može da se smanji primenom raznovrsnih aktivnih i pasivnih uređaja na mestu priključenja potrošača [15] (*PCC- Point of Common Coupling*). Ova intervencija nije jeftina, a njena optimalna implementacija zahteva ozbiljnu tehno-ekonomsku analizu.

Sa druge strane, distributeri električne energije mogu da redukuju gubitke nastale usled korišćenja nelinearnih potrošača ukoliko promene tarifni sistem i stimulišu potrošače da implementiraju sistem za aktivnu kompenzaciju harmonika [15]. Upravo je cilj ovog rada da ukaže na postojanje problema i potrebu promene politiku naplate, pri čemu je ponuđeno jeftino rešenje koje se može primeniti na

postojećim mernim grupama (brojilima), a bez značajnih investicionih ulaganja.

PRILOG

Podaci o motoru jednosmerne struje: 220VDC, 12A, 1,95kW, 2860o/min, pobuda: 200VDC, 0,61A.

Tiristorski ispravljač: Siemens 6RA7013-6DV62-0 (3x400VAC, 13A), ulazne prigušnice 3x1,4mH.

6. LITERATURA

- [1] International Energy Agency, "Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries and Energy Statistics of OECD Countries, and United Nations, Energy Statistics Yearbook"
- [2] Eurelectric, Power Statistics 2010, Full report, page 16
- [3] M. Clemence, R. Coccioni, A. Glatigny, "How utility electrical distribution networks can save energy in the smart grid era", Schneider Electric, April 2013
- [4] P. Petković, D. Stevanović, "Detection of power grid harmonic pollution sources based on upgraded power meters", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, No. 3, 2014, pp. 163-168
- [5] M. Dimitrijević, V. Litovski, "Power Factor and Distortion Measuring for Small Loads Using USB Acquisition Module", *Journal of Circuits Systems and Computers*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, August, 2011, Vol. 20, No. 5, pp. 867-880
- [6] D. Stevanović, P. Petković, "The Efficient Technique for Harmonic Sources Detection at Power Grid", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, pp. 196-199, ISSN 0033-2097
- [7] D. Stevanović, P. Petković, "A Single-Point Method for Identification Sources of Harmonic Pollution Applicable to Standard Power Meters", *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 165-174, June 2015.
- [8] http://www.maxim-ic.com/solutions/smart-electricity-meters/index.mvp/pl_pk/62
- [9] IEC 62053-22 Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S).
- [10] IEC62053-23, "Electricity metering equipment (a.c.) - Particular requirements - Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3)," 2003.
- [11] LMG450 Multi Channel Power Analyzer, Dostupno na: <http://www.zes.com/en/Products/Precision-Power-Analyzer/LMG450>, [Pristupljeno jul 2015]
- [12] G.K. Singh, "Power system harmonics research a survey", *European Transactions on Electrical Power*, vol.19, pp. 151-172, 2007
- [13] Integral Energy Power Quality Centre: "Technical note No. 3 - Harmonic Distortion in the Electric Supply System," University of Wollongong, <http://goo.gl/8QpwdO>, March 2000. [April 8. 2015].
- [14] D. Stevanović, P. Petković, "Harmonics in Power System Problems and Solutions (in Serbian*)", Proc. of XII International Scientific Symposium INFOTEH@-JAHORINA 2013, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 20. mart - 22. mart, 2013, pp. 203-208.
- [15] ABB, "ABB's ACTIVE HARMONIC COMPENSATION systems," <https://goo.gl/XdtWYZ>, March 2012., [Pristupljeno avgust 2015]

ZAHVALNOST

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekata TR32004 i III44004 čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Abstract – The aim of this paper is to highlight the need to adapt measuring equipment to the changed profile of the power system industrial loads. Wide use of power converters as typical nonlinear loads questioned the justification of the existing registration method of power consumption. Nonlinear loads current waveform deviates from ideal sine wave causing part of the supplied energy remains invisible, which, among other the things, leads to significant power losses. To solve this problem, it is necessary to detect and quantify the amount of distortion caused by nonlinear loads. In this paper we show, for the first time, the experimental measurement of distortion power measured at the terminals of a four-quadrant DC motor drive. Verification of the proposed algorithm for distortion power measurements performed in both operating modes: when working as a motor (consumer) and generator (motor braking and generating active power at terminals). For this purpose it is used, a standard measurement group modified according to an original idea by the authors. The measurement results are compared with those obtained from precise power analyzer.

CHARACTERIZATION OF A FOUR-QUADRANT DC MOTOR DRIVE USING MODIFIED STANDARD MEASUREMENT GROUP

Dejan Stevanović, Milutin Petronijević, Predrag Petković