

Izbor optimalnog broja parnih harmonika pobudne struje senzora za preciznu detekciju jednosmerne komponente napona u niskonaponskoj distributivnoj mreži kao strategija za potiskivanja sistematske greške usled fluktuacije mrežnog napona

Nenad Petrović¹, Nebojša Pjevalica², Žarko Janda³

¹ Elektrotehnička škola "Stari grad", Visokog Stevana 37, 11000 Beograd, Srbija

nploewenstein@gmail.org

² Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija

pjeva@uns.ac.rs

³ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

zarko.janda@gmail.org

Kratak sadržaj: Ovaj rad tretira problem suzbijanja sistematske greške merenja parazitne jednosmerne komponente napona superponirane naizmeničnom naponu usled fluktuacije naizmeničnog napona oko svoje nominalne vrednosti, primenom torusnog transformatora kao senzora. Analizom su obuhvaćena dva istraživanja koja su koristila metodu parnih harmonika pobudne struje torusnog transformatora za preciznu detekciju jednosmerne komponente napona. Prvo istraživanje uspešno tretira problem detekcije parazitne jednosmerne komponente napona u niskonaponskoj distributivnoj mreži, a fokus drugog istraživanja je na detekciji naponskog DC offseta laboratorijskog etalona Fluke 6100A. Analiza uticaja primenjenog broja parnih harmonika pobudne struje senzora na potiskivanje sistematske greške, izvedena na osnovu rezultata oba istraživanja, dala je konzistentne rezultate.

Ključne reči: asimetrična pobuda, harmonijska analiza, merenje napona, torusni transformator

1. Uvod

Jednosmerna komponenta napona u niskonaponskim distributivnim mrežama (NNDM) javlja se kao posledica sve većeg prisustva nelinearnih potrošača električne energije sa poluprovodničkim elementima, kao i usled direktnog priključivanja distribuiranih solarnih elektrana na NNDM bez primene razdvojnih transformatora [1-3]. Osim nepovoljnog uticaja na pojedine vrste potrošača [4], jednosmerna komponenta napona izaziva distorziju pobudne struje u visokonaponskim namotajima distributivnih transformatora (DT), praćenu čitavim nizom negativnih efekata na DT [5,6]. Iz tih razloga su u zemljama sa značajnim kapacitetima solarnih elektrana i iskustvom u njihovoj eksploataciji razvijeni standardi i preporuke kojima su eksplicitno propisani dozvoljeni nivoi jednosmerne komponente struje koju poluprovodnički pretvarači solarnih elektrana ubrizgavaju u NNDM [7-9].

Vrednosti nivoa jednosmerne komponente napona koje zahtevaju preciznu detekciju u NNDM u Republici Srbiji mogu se proceniti na osnovu razmatranja za DT snaga 630kVA i 1000kVA. Na osnovu TP1 JP EPS – dodatak 1 iz 2008. godine, vrednosti pobudne struje (struje praznog hoda) transformatora su ograničene na 0,7% i 0,5% za transformatore snaga 630kVA i 1000kVA respektivno. Takođe, niskonaponski namotaji ovih transformatora su spregnuti u zvezdu, a njihove aktivne otpornosti se mogu proceniti propisanim nivoima gubitaka u bakru od 5400W, odnosno 9500W, na vrednosti od 1,09m Ω i 0,76m Ω respektivno. Budući da detekciju i preventivu jednosmerne komponente struje u niskonaponskim namotajima DT treba sprovesti već za vrednost od 5% efektivne vrednosti pobudne struje transformatora [10-12], to za DT snaga 630kVA i 1000kVA zahtevani pragovi detekcije jednosmerne komponente napona uzimaju vrednosti od 0,35mV i 0,27mV respektivno. Odnos pomenutih pragova detekcije i maksimalne trenutne vrednosti faznog napona NNDM iznosi 10^{-6} . Ova situacija je vrlo nepovoljna u smislu postizanja zadovoljavajuće preciznosti detekcije jednosmerne komponente napona primenom postojećih komercijalno raspoloživih naponskih senzora zasnovanih na Hall effect, Fluxgate, Electronic isolated и Optically isolated tehnologijama [13], odnosno strujnih senzora zasnovanih na Hall effect, Fluxgate и Air-core tehnologijama [13,14].

Početni rezultati na rešenju ovog problema postignuti su primenom metode vršne detekcije (engl. peak detection method), koja kao senzor jednosmerne komponente napona koristi torusni transformator priključen između faznog i nultog provodnika NNDM [15-22]. Inovativna činjenica koju su uočili autori metode je proporcionalna zavisnost razlike apsolutnih vrednosti pozitivnog i negativnog ekstremuma magnetizacione struje transformatora ΔI_{0max} od njene jednosmerne komponente I_{0DC} , nastale pod uticajem jednosmerne komponente mrežnog napona U_{DC} . Eksperimentalna opservacija je izvršena superpozicijom jednosmernog napona u opsegu od 0V do 100mV prostoperiodičnom naponu čije su efektivne vrednosti varirane u opsegu od 160V do 260V (grafik na slici 26 [16]). Rezidualna greška primenjenog

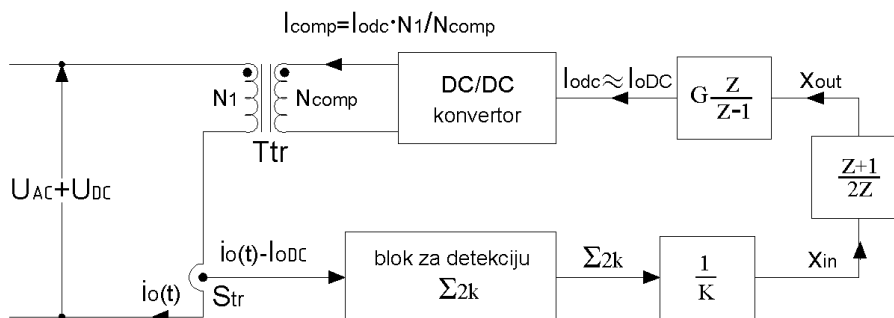
sistema sa diskretnim PI regulatorom iznosila je 3mV za nominalni napon torusnog transformatora od 220V i pokazivala je tendenciju monotonog rasta i u slučaju povećanja i u slučaju smanjenja efektivnih vrednosti prostoperiodičnog napona u odnosu na nominalnu vrednost. Ovaj napredak u detekciji jednosmerne komponente mrežnog napona nije mogao da ostvari potrebne nivoe detekcije za DT snaga 630kVA i većih. Rešenje problema postignuto je primenom metode parnih harmonika [11,12], koja će biti predstavljena u sledećem odeljku, ali je uticaj fluktuacije efektivnih vrednosti mrežnog napona na preciznost detekcije jednosmerne komponente i dalje ostao prisutan.

2. Metoda parnih harmonika za preciznu detekciju jednosmerne komponente napona u niskonaponskoj distributivnoj mreži

Kao fizička osnova ove metode iskorišćeno je svojstvo da fazni stavovi parnih harmonika, u odnosu na osnovni harmonik pobudne struje torusnog transformatora i_0 , zadržavaju gotovo konstante vrednosti prilikom varijacije vrednosti jednosmerne komponente pobudne struje I_{0DC} , sve dok su ove vrednosti nepromenjenog znaka. Promenom znaka jednosmerne komponente pobudne struje I_{0DC} , fazni stavovi parnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik skokovito menjaju svoje vrednosti za π radijana i sa daljim povećanjem apsolutne vrednosti I_{0DC} svoje nove vrednosti održavaju konstantnim. Pomenuto svojstvo je prikazano u [11, 23]. Posledica ovog svojstva je da sinusne i kosinusne komponente parnih harmonika ostaju međusobno proporcionalne pri promeni vrednosti jednosmerne komponente pobudne struje I_{0DC} , a eksperimentalna opservacija ukazuje da je zavisnost vrednosti parnih harmonika od vrednosti I_{0DC} gotovo linearna [11,23]. Eksperimentalna validacija metode parnih harmonika realizovana je prema principskoj šemi prikazanoj na slici 1. Ovom šemom su predstavljeni strujni krugovi pobudnog (primarnog) i kompenzacionog (sekundarnog) namotaja torusnog transformatora T_{tr} koji igra ulogu senzora jednosmerne komponente mrežnog napona U_{DC} posredstvom jednosmerne komponente pobudne struje $I_{0DC}=U_{DC}/R_{tr}$, gde je sa R_{tr} označena električnu otpornost pobudnog namotaja senzora. Jednosmerna komponenta I_{0DC} pobudne struje pomera radnu tačku na **B-H** karakteristici senzora izazivajući distorziju talasnog oblika pobudne struje i_0 , koju kvantitativno karakteriše veličina Σ_{2k} . Veličina Σ_{2k} predstavlja meru distorzije (nivo asimetrije) pobudne struje senzora i kvantitativno se definiše kao zbir odgovarajućeg broja parnih harmonika pobudne struje senzora i_0

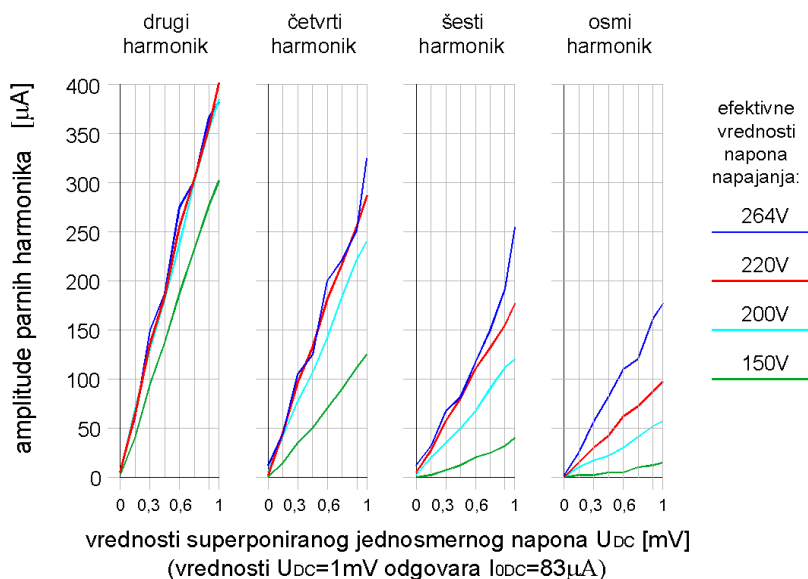
$$\Sigma_{2k} = \sum_{k=1}^n \sqrt{A_{2k}^2 + B_{2k}^2}, \quad (1)$$

gde A_{2k} predstavljaju kosinusne, a B_{2k} sinusne komponente parnih harmonika. Broj n predstavlja obuhvat parnih harmonika i može uzeti vrednosti od 1 do 4.



Slika 1 Principialna šema za detekciju jednosmerne komponente mrežnog napona primenom metode parnih harmonika

Zavisnost jednosmerne komponente pobudne struje I_{0DC} i veličine nivoa asimetrije Σ_{2k} realizuje se koeficijentom proporcionalnosti $K = \Sigma_{2k} / I_{0DC}$ koji predstavlja osetljivost senzora i služi kao parametar regulacionog kola sa diskretnim PI regulatorom prikazanim na slici 1. Opravdanost ovakvog pristupa ilustruje slika 2.



Slika 2 Grafici zavisnosti parnih harmonika pobudne struje torusnog transformatora od jednosmerne komponente napona generisani su na osnovu podataka predstavljenih u tabeli 1

Tabela 1 Vrednosti amplituda drugog, četvrtog, šestog i osmog harmonika pobudne struje ispitivanog torusnog transformatora u zavisnosti od superponiranog jednosmernog napona U_{DC} za četiri efektivne vrednosti naizmennog napona napajanja U_{AC} : 150V, 200V, 220V i 264V (preuzete iz tabele 3 [11])

U_{DC} [mV]	0.0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.0
I_2 [μ A] za $U_{AC}=150V$	3	40	95	137	187	232	277	302
I_2 [μ A] za $U_{AC}=200V$	5	70	130	180	237	300	355	385
I_2 [μ A] za $U_{AC}=220V$	5	65	135	185	255	305	357	402
I_2 [μ A] za $U_{AC}=264V$	8	60	150	187	275	302	367	382
I_4 [μ A] za $U_{AC}=150V$	0	15	35	50	70	90	112	125
I_4 [μ A] za $U_{AC}=200V$	5	42	77	107	142	185	222	240
I_4 [μ A] za $U_{AC}=220V$	2	45	97	132	182	217	257	287
I_4 [μ A] za $U_{AC}=264V$	12	45	105	125	200	222	252	325
I_6 [μ A] za $U_{AC}=150V$	0	2	7	12	20	25	32	40
I_6 [μ A] za $U_{AC}=200V$	2	20	35	50	67	90	112	120
I_6 [μ A] za $U_{AC}=220V$	5	27	57	80	110	132	155	177
I_6 [μ A] za $U_{AC}=264V$	12	32	67	82	117	150	192	255
I_8 [μ A] za $U_{AC}=150V$	0	2	2	5	5	10	12	15
I_8 [μ A] za $U_{AC}=200V$	0	10	17	22	30	41	52	57
I_8 [μ A] za $U_{AC}=220V$	0	15	30	42	62	72	87	97
I_8 [μ A] za $U_{AC}=264V$	2	25	57	82	110	120	162	177

Upoređenjem vrednosti supremuma rezidualne greške od 95 μ V i zahtevanih pragova detekcije jednosmerne komponente napona za DT snaga 630kVA i 1000kVA koje iznose 0,35mV i 0,27mV respektivno, može se konstatovati zadovoljavajuća preciznost detekcije koju postiže metoda parnih harmonika, budući da greška usled fluktuacije napona ne prelazi vrednost od 0,1mV. Međutim, primena DT čije snage prevazilaze vrednost od 1000kVA i dostižu vrednost 2500kVA [24], čine opravdanom analizu uticaja fluktuacije mrežnog napona na propagaciju greške detekcije usled aproksimacije parametra **K** konstantnom vrednošću.

Grafici ponašanja rezidualne greške usled fluktuacije mrežnog napona i kod metode vršne detekcije (slika 26 [16]) i kod metode parnih harmonika sa optimizovanom verzijom torusnog transformatora kao senzora (slika 16 [12]) ukazuju da je parametar **K** funkcija fluktuacije mrežnog napona $K=f(U_{AC})$. U cilju eksperimentalne opservacije uticaja fluktuacije efektivnih vrednosti mrežnog napona U_{AC} na vrednosti parametra **K**, sprovedeno je istraživanje koje će biti predstavljeno u sledećem odeljku.

3. Ponašanje nagiba regresionih pravih nivoa asimetrije torusnog transformatora definisanog metodom parnih harmonika u zavisnosti od fluktuacije napona napajanja

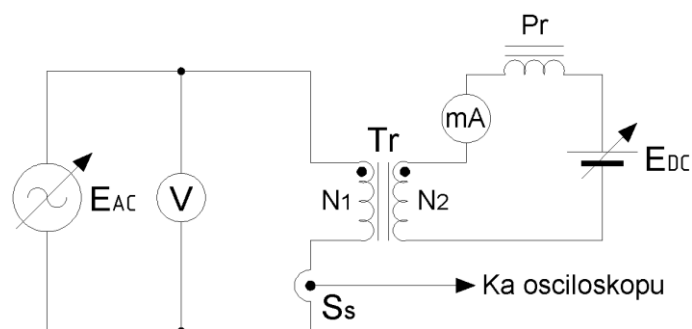
Ispitivanje uticaja fluktuacije efektivne vrednosti napona napajanja na promenu vrednosti parametra K realizovan je na osnovu istraživanja primene metode parnih harmonika za merenje naponskog DC offseta superponiranog prostoperiodičnom naponu laboratorijskog izvora Fluke 6100A Direkcije za mere i dragocene metale Ministarstva privrede Republike Srbije u Beogradu [25]. Merenja su sprovedena za opseg laboratorijskog izvora 11V-168V (tabela Voltage output na stranici 7 [26]) za koji dozvoljen DC offset iznosi 10mV (tabela Voltage output DC offset na stranici 9 [26]). Kao senzor korišćen je torusni transformator na slici 3 čije su karakteristike navedene u tabeli 2, a eksperimentalni postupak je realizovan prema električnoj šemi predstavljenoj na slici 4.



Slika 3 Fotografija torusnih transformatora korišćenih u eksperimentalnom postupku

Tabela 2 Podaci o torusnom transformatoru

	Pobudni namotaj	Kompenzacioni namotaj
Broj navojaka	$N_1=1072$	$N_2=10$
Nazivni napon napajanja (rms) [V]	100	0.93
Presek magnetnog jezgra [mm ²]	280	
Srednja dužina linije magnetnog polja [mm]	144	
Tip magnetnih limova	M4	
Nazivna snaga	30VA	
Pobudna struja (rms)	5.33mA	



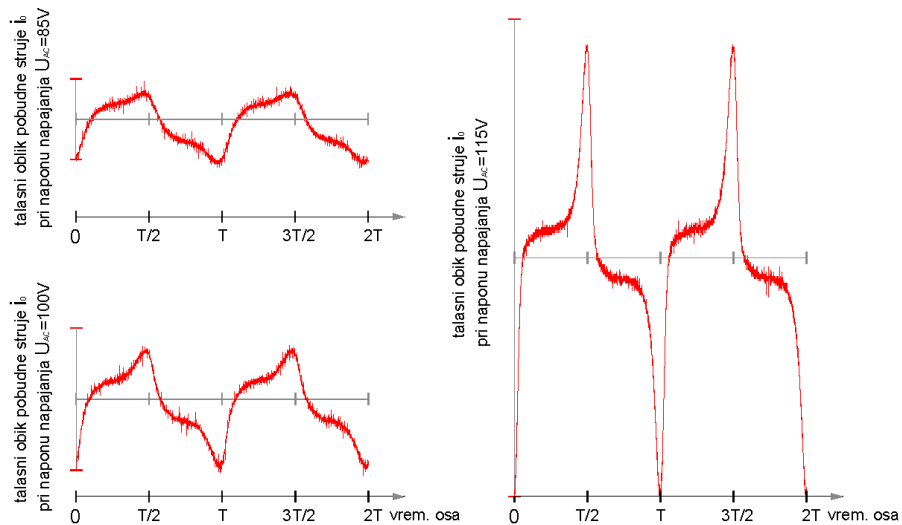
Slika 4 Električna šema za sprovođenje eksperimentalnog postupka (pregled elemenata šeme dat je u tabeli 3)

Tabela 3 Pregled elemenata šeme za sprovođenje eksperimentalnog postupka

Oznaka na šemi	Opis
E_{AC}	Laboratorijski izvor prostoperiodičnog napona za opseg napajanja 0-115V rms
E_{DC}	Laboratorijski DC izvor za opseg napajanja 0-100mA
V	Laboratorijski AC voltmetar
mA	Laboratorijski DC miliampermetar
Tr	Torusni transformator (podaci predstavljeni u tabeli 1)
Pr	Prigušnica $L=1H$, $R=30\Omega$
Ss	Strujna sonda

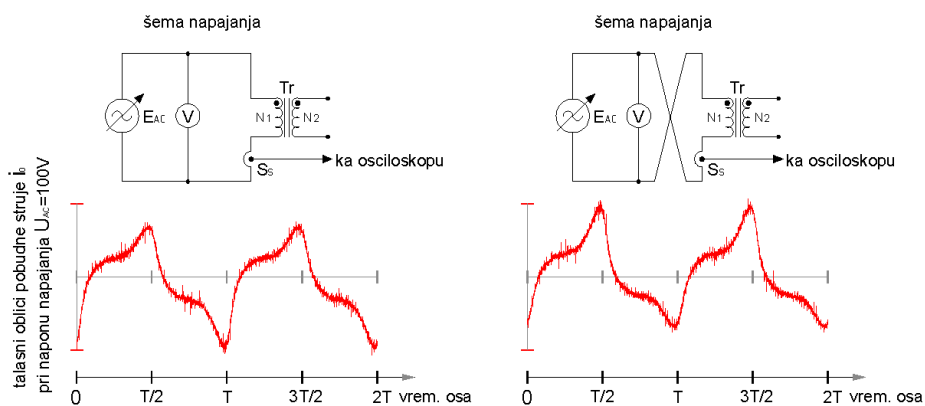
3.1 Postupak merenja

Karakteristike torusnog transformatora su omogućavale da se postupak merenja sprovede u opsegu od 0V do 115V. Ovde će biti predstavljeni rezultati za napone napajanja od 85V, 100V i 115V ($U_n \pm 15\%$). Talasni oblici pobudne struje torusnog transformatora i_0 za sve tri vrednosti napona napajanja pri otvorenom sekundarnom (kompenzacionom) namotaju odlikovali su se uočljivim nivoom asimetrije. Osciloskopski snimci njihovih talasnih oblika realizovani su u „zero crossing“ režimu u odnosu na prostoperiodični napon napajanja U_{AC} i prikazani su na slici 5.



Slika 5 Osciloskopski snimci talasnih oblika pobudne struje torusnog transformatora napajanog iz laboratorijskog izvora Fluke 6100A za efektivne vrednosti napona napajanja U_{AC} od 85V, 100V i 115V

Zamenom priključnih krajeva transformatora u odnosu na napojne stezaljke izvora napajanja, asimetrija pobude je promenila predznak, dok je nivo asimetrije ostao nepromenjen, kako je prikazano na slici 6. Na taj način je potvrđeno konzistentno prisustvo jednosmerne komponente napona U_{DC} superponirane prostoperiodičnom naponu napajanja izvora U_{AC} .



Slika 6 Osciloskopski snimci talasnih oblika pobudne struje torusnog transformatora pre i posle zamene priključnih krajeva laboratorijskog izvora Fluke 6100A za efektivnu vrednost napona napajanja $U_{AC} = 100V$

Merenje DC offseta laboratorijskog izvora realizovano je propuštanjem jednosmerne struje kroz kompenzacioni namotaj transformatora N_2 prema električnoj šemi sa slike 4, u koracima predstavljenim u tabeli 4 i snimanjem talasnih oblika pobudne struje i_0 . Postupak je sproveden za tri efektivne vrednosti napona U_{AC} od 85V, 100V i 115V. Na osnovu DFT analize snimljenih talasnih oblika pobudne struje i_0 i primenom izraza (1), dobijene su vrednosti nivoa asimetrije Σ_{2k} u zavisnosti od primenjenih vrednosti jednosmerne struje I_{DC} kroz kompenzacioni namotaj transformatora N_2 . Rezultati su tabelarno predstavljeni u tabeli 4, a grafički na slici 7.

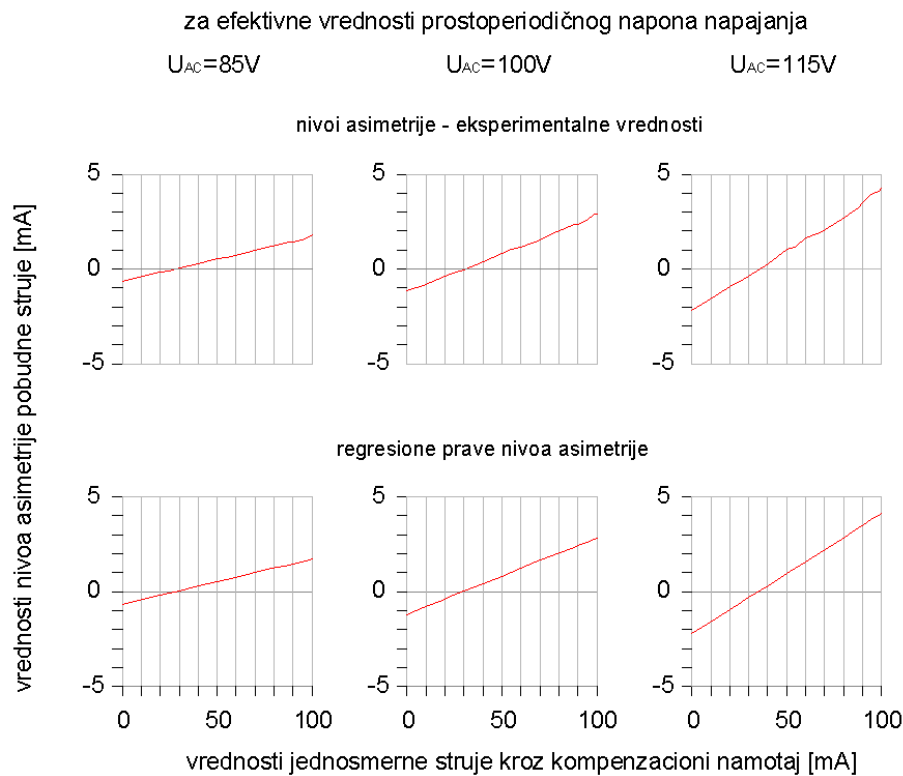
Tabela 4 Vrednosti eksperimentalno određenih nivoa asimetrije pobudne struje torusnog transformatora za zadate vrednosti jednosmerne struje kroz kompenzacioni namotaj (nivo asimetrije dobijen kao zbir drugog, četvrtog, šestog i osmog harmonika)

kroz kompenzacioni	kroz pobudni	$U_{AC} = 85V$	$U_{AC} = 100V$	$U_{AC} = 115V$
I_{DC} [mA]	I_{DC} [mA]	Σ_{2k} [mA]	Σ_{2k} [mA]	Σ_{2k} [mA]
0.00	0.000	-0.627	-1.122	-2.163
8.26	0.077	-0.431	-0.871	-1.679
20.00	0.187	-0.185	-0.376	-0.897
24.55	0.229	-0.082	-0.207	-0.714
30.00	0.280	0.049	-0.003	-0.349
40.17	0.375	0.282	0.391	0.294
50.00	0.466	0.529	0.812	1.024
54.69	0.510	0.601	1.059	1.173
60.00	0.560	0.707	1.141	1.641
67.73	0.632	0.952	1.438	1.918
78.91	0.736	1.191	1.993	2.612
87.95	0.820	1.406	2.356	3.233
90.00	0.840	1.450	2.380	3.472
94.58	0.882	1.557	2.595	3.911
98.64	0.920	1.678	2.883	4.089
100.00	0.933	1.809	2.910	4.270

Presek eksperimentalne krive nivoa asimetrije Σ_{2k} sa apscisnom osom, kako je prikazano na slici 7, određuje vrednost jednosmerne struje I_{DC} kroz kompenzacioni namotaj N_2 kojom se kompenzuje uticaj jednosmerne magnetopobudne sile pobudnog namotaja N_1 . Na taj način se radna tačka na **B-H** karakteristici transformatora (senzora) vraća u koordinatni početak i eliminiše asimetrija pobudne struje i_0 . Za napone napajanja U_{AC} od 85V, 100V i 115V te vrednosti iznose 27,97mA, 30,82mA i 35,52mA respektivno. Na osnovu podataka $N_2=1072$, $N_1=10$, $R_1=13.4\Omega$, određene su vrednosti

jednosmerne komponente U_{DC} superponirane prostoperiodičnom naponu napajanja U_{AC} laboratorijskog izvora Fluke 6100A, koje iznose 3,50mV, 3,85mV и 4,44mV respektivno.

Detaljna analiza sprovedena u [25] pokazala je opravdanost linearizacije eksperimentalne krive nivoa asimetrije Σ_{2k} njenom regresionom pravom, čiji nagib u $\Sigma_{2k} - I_{DC}$ koordinatnom sistemu zapravo predstavlja parametar K za sintezu regulatora sa slike 1, a presek sa apscisnom I_{DC} osom određuje traženu vrednost za kompenzaciju DC offseta, što je ilustrovano na slici 7.



Slika 7 Eksperimentalne zavisnosti nivoa asimetrije i njihovih regresionih pravih od jednosmerne struje kroz kompenzacioni namotaj

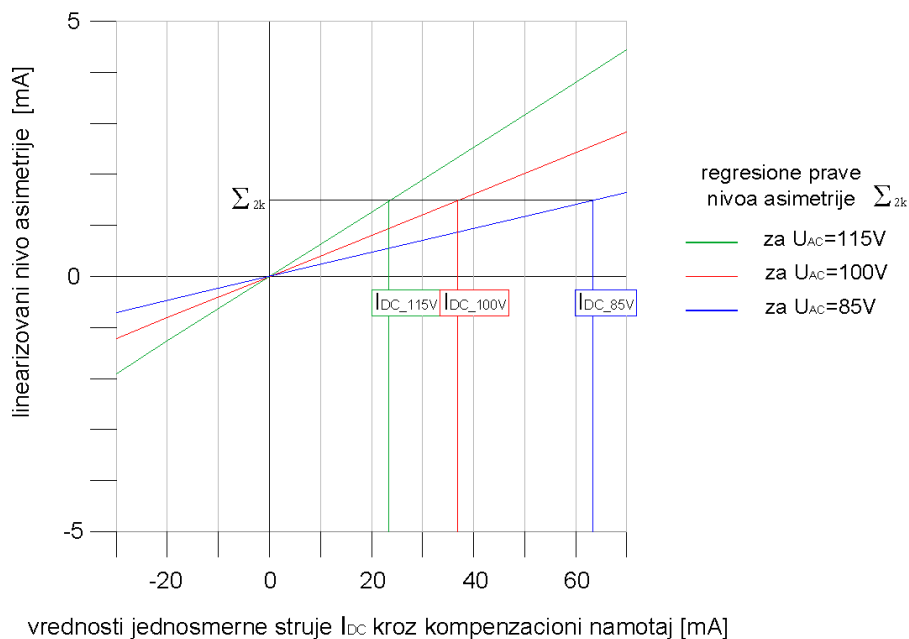
3.2 Sistematska greška kao posledica primene fiksnog nagiba regresionih pravih nivoa asimetrije

Ekperimentalna opservacija predstavljena u pododeljku 3.1 potvrdila je zavisnost nagiba K eksperimentalno dobijenih krivih nivoa asimetrije Σ_{2k} , odnosno njihovih regresionih pravih, od efektivnih vrednosti napona napajanja torusnog transformatora U_{AC} , na šta su već ukazale i metoda vršne detekcije

(slika 26 [16]) i metoda parnih harmonika (slika 16 [12]). Eksperimentalni postupak je obuhvatao 17 mernih tačaka u opsegu napona napajanja laboratorijskog izvora U_{AC} od 0V do 115V. Nedvosmisleno je potvrđeno da sa porastom vrednosti napona U_{AC} , nagib K linearizovanih nivoa asimetrije Σ_{2k} u odnosu na apscisnu I_{DC} osu, monotono raste [25].

Analiza propagacije sistematske greške detekcije jednosmerne komponente napona U_{DC} , koja nastaje korišćenjem fiksne vrednosti nagiba K linearizovanog nivoa asimetrije Σ_{2k} , izvršena je za fluktuaciju napona napajanja torusnog transformatora U_{AC} u opsegu $U_{n\pm 15\%}$. Na slici 8 predstavljene su regresione prave eksperimentalno dobijenih nivoa asimetrije za tri vrednosti napona napajanja od 85V, 100V i 115V

$$\Sigma_{2k} = K \cdot I_{DC} \quad (2)$$



Slika 8 Grafici regresionih pravih nivoa asimetrije definisanog metodom parnih harmonika za tri vrednosti napona U_{AC} od 85V, 100V i 115V

Nivoi asimetrije predstavljeni na slici 8 definisani su zbirom prva četiri parna harmonika pobudne struje torusnog transformatora, a vrednosti njihovih nagiba iznose $K_{85V}=2.54$, $K_{100V}=4.30$ i $K_{115V}=6.78$.

Sistematska greška koja se postiže primenom regresione prave za napon napajanja $U_{AC}=100V$, kada je stvarna vrednost napona napajanja $U_{AC}=85V$, iznosi

$$RG_{85V} = \frac{R_1 I_{DC100V} - R_1 I_{DC85V}}{R_1 I_{DC85V}} \cdot 100 = \frac{\Sigma_{2k}/K_{100V} - \Sigma_{2k}/K_{85V}}{\Sigma_{2k}/K_{85V}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$= \left(\frac{K_{85V}}{K_{100V}} - 1 \right) \cdot 100 = -41\%,$$

dok sistematska greška koja se postiže primenom regresione prave za napon napajanja $U_{AC}=100V$, kada je napon napajanja $U_{AC}=115V$, iznosi

$$RG_{115V} = \left(\frac{K_{115V}}{K_{100V}} - 1 \right) \cdot 100 = 57\%. \quad (4)$$

3.3 Potiskivanje sistematske greške zbog primene fiksnog nagiba regresionih pravih nivoa asimetrije redukcijom broja harmonika u definicionom izrazu nivoa asimetrije

Redukcijom nivoa asimetrije Σ_{2k} na drugi harmonik postiže se smanjenje fiksne sistematske greške. Nagibi regresionih pravih drugog harmonika pobudne struje senzora za napone napajanja 85V, 100V i 115V iznose $K_{85V}=1.52$, $K_{100V}=1.94$ i $K_{115V}=2.34$ respektivno. Usvajanjem reprezentativnog nagiba regresione prave drugog harmonika za napon napajanja od 100V, na osnovu izraza (3) i (4), sistematske greške zbog primene fiksnog nagiba smanjuju se na vrednosti $RG_{85V}=-21.7\%$ i $RG_{115V}=20.5\%$ za napone napajanja od 85V i 115V respektivno. U tabeli 5 predstavljeni su rezultati analize uticaja izbora broja parnih harmonika za definiciju nivoa asimetrije Σ_{2k} , prema definicionom izrazu (1), na nagibe regresionih pravih nivoa asimetrije i granice sistematske greške usled fluktuacije napona napajanja U_{AC} .

Tabela 5 Uglovi, nagibi i granične vrednosti sistematske greške kod primene regresionih pravih nivoa asimetrije za napone napajanja U_{AC} od 85V, 100V i 115V dobijeni na osnovu podataka iz tabele 4

	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4+I_6+I_8$	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4+I_6$	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4$	$\Sigma_{2k}=I_2$
α_{85V} [°]	68.48	67.41	65.00	56.69
α_{100V} [°]	76.90	75.42	72.16	62.77
α_{115V} [°]	81.59	80.11	76.77	66.87
$\alpha_{115V} - \alpha_{85V}$ [°]	13.12	12.69	11.78	10.18
K_{85V}	2.54	2.40	2.14	1.52
K_{100V}	4.30	3.84	3.11	1.94
K_{115V}	6.78	5.73	4.25	2.34
RG_{85V} [%]	-41.02	-37.49	-31.02	-21.69
RG_{115V} [%]	57.43	49.13	36.91	20.51

Na osnovu podataka predstavljenih u tabeli 1, izvedena je uporedna analiza relevantnih parametara na osnovu istraživanja predstavljenog u referenci [11] i rezultati ove analize predstavljeni su u tabeli 6.

Tabela 6 Uglovi, nagibi i granične vrednosti sistematske greške kod primene regresionih pravih nivoa asimetrije za napone napajanja U_{AC} od 150V, 200V, 220V i 264V dobijeni na osnovu podataka iz table 1

	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4+I_6+I_8$	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4+I_6$	$\Sigma_{2k}=I_2+I_4$	$\Sigma_{2k}=I_2$
α_{150V} [°]	80.11	79.84	79.00	74.77
α_{200V} [°]	84.11	83.68	82.50	77.97
α_{220V} [°]	85.06	84.51	83.13	78.33
α_{264V} [°]	85.68	84.86	83.27	78.29
$\alpha_{264V} - \alpha_{200V}$ [°]	1.56	1.18	0.77	0.32
K_{150V}	5.74	5.58	5.14	3.67
K_{200V}	9.70	9.03	7.59	4.69
K_{220V}	11.58	10.41	8.30	4.84
K_{264V}	13.24	11.13	8.47	4.83
RG_{150V} [%]	-50.43	-46.41	-25.68	-24.12
RG_{200V} [%]	-16.23	-13.26	-8.55	-3.03
RG_{264V} [%]	14.35	6.94	2.02	-0.29

4. Zaključak

U radu su predstavljeni rezultati dva nezavisna istraživanja detekcije i merenja milivoltne komponente jednosmernog napona U_{DC} superponiranog naizmeničnom naponu U_{AC} , sa odnosom vršnih vrednosti reda veličine 10^{-6} . Oba postupka su sprovedena po novoj metodi parnih harmonika, pri čemu je merenje čiji su rezultati predstavljeni u tabeli 5 realizovano u otvorenoj petlji, dok je merenje čiji su rezultati predstavljeni u tabeli 6 realizovano u zatvorenoj petlji. Takođe, merenja su realizovana sa različitim torusnim transformatorima, za različite nominalne napone pobudnih namotaja, ali sa približno jednakim vrednostima magnetne indukcije u njihovim jezgrima.

Posebno je analizirana i kvantitativno određena sistematska greška merenja jednosmerne komponente napona koja nastaje usled fluktuacije napona napajanja torusnog transformatora oko nominalne vrednosti, kada se nagib linearizovane detektabilne veličine (nivoa asimetrije) definišane izrazom (1), aproksimira fiksnom vrednošću utvrđenom za nominalnu vrednost napona napajanja.

Uporedna analiza relevantnih parametara, predstavljenih u tabelama 5 i 6, nedvosmisleno je pokazala da se smanjenjem broja parnih harmonika u definicionom izrazu nivoa asimetrije (1) potiskuje sistematska greška merenja

usled fluktuacije napona napajanja oko nominalne vrednosti. U situacijama kada se vrši sinteza zatvorene petlje, greška se minimizuje primenom nagiba linearizovane eksperimentalne krive dobijene za drugi harmonik pobudne struje torusnog transformatora pri nominalnom naponu napajanja.

Literatura

- [1] L. Gertmar, P. Karlsson, and O. Samuelsson, "On DC Injection to AC Grids From Distributed Generation," in *11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE200)*, (Dresden, Germany, Sep. 2005), pp. 1-10.
- [2] S. Araujo, P. Zacharias, and R. Mallwitz, "Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3118-3128, Sep. 2010.
- [3] M. H. Bollen and F. Hassan, "INTEGRATION OF DISTRIBUTED GENERATION IN THE POWER SYSTEM," IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011, ePDF ISBN: 978-1-118-02901-5.
- [4] J. A. Orr and A. E. Emanuel, "On the need for strict second harmonic limits," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 967-971, July 2000.
- [5] P. Marketos, A. J. Mozes, and J. P. Hall, "EFFECT OF DC VOLTAGE ON AC MAGNETISATION OF TRANSFORMER CORE STEEL," *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 61, no. 7/s, pp. 123-125, 2010.
- [6] A. K. Zeimer, "The Effect of DC Current on Power Transformers," A Dissertation, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying – Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2000. Online [Available] <http://eprints.usq.edu.au/75>.
- [7] United Kingdome standard G83/1.
- [8] IEEE Standard 1547-2003.
- [9] Australian Standard AS4777.2.
- [10] J. S.A. Mousavi, G. Engdahl, E. Agheb, "Investigation of GIC effects on core losses in single phase power transformers," *Archives of Elect. Eng.* vol. 60, no. 1, pp. 35-47, 2011.
- [11] S. N. Vukosavic, Lj. S. Peric, "High Precision Sensing of DC Bias in AC Grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1179-1186, Jun 2015.
- [12] S. N. Vukosavic, Lj. S. Peric, "High Precision Active Suppression of DC Bias in AC Grids by Grid Connected Power Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 857-865, Jun 2017.

- [13] Isolated current and voltage transducers, Characteristics – Applications – Calculations, *LEM Components, 3rd ed., 2004, Publication CH 24101 E/US*.
- [14] S. Tumanski, "4.3 Fluxgate Sensor, 4.5 Hall Effect Sensors" in *Handbook of Magnetic Measurements*, Boca Ration: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011, pp. 179-189 and 213-221.
- [15] G. Buticchi, L. Consolini, and E. Lorenzani, "Active Filter for Removal of the DC Current Component for Single-Phase Power Lines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4403-4414, Oct. 2013.
- [16] G. Buticchi, and E. Lorenzani, "Detection Method of the DC Bias in Distribution Power Transformers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3539-3549, Aug. 2013.
- [17] G. Buticchi, and E. Lorenzani, "A Sensor to Detect the DC Bias in Distribution Power Transformers," *IEEE International Symposium in Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, pp. 63-70, Sept. 2011.
- [18] G. Buticchi, G. Franceschini, E. Lorenzani, C. Tassoni, and A. Bellini, "A Novel Current Sensing DC Offset Compensation Strategy in Transformerless Grid Connected Power Converters," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2009)*, pp. 3889-3894, Sept. 2009.
- [19] G. Buticchi, E. Lorenzani, and G. Franceschini, "A DC Offset Compensation Strategy in Transformerless Grid-Connected Power Converters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2743-2751, Oct. 2011.
- [20] G. Franceschini, E. Lorenzani, and G. Buticchi, "Saturation Compensation Strategy for Grid Connected Converters Based on Line Frequency Transformers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 229-237, June 2012.
- [21] G. Buticchi, L. Consolini, and E. Lorenzani, "A nonlinear Reactor for DC Current Compensation in Single Phase Power Lines," in 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, August 28 – September 2, 2011, pp. 12273-12278.
- [22] G. Buticchi, L. Consolini, and E. Lorenzani, "Modeling and Stability Analysis of an Active Filter for DC Current Compensation," in 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), Orlando, FL, USA, December 12 – 15, 2011, pp. 3068-3073.
- [23] N. Pjevalica, N. Petrovic, V. Pjevalica, and N. Teslic, "Experimental Detection of Transformer Excitation Assymetry through the Analysis of the Magnetizing Current Harmonic Content," *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA*, vol. 22, no. 2, pp. 43-48, April 2016.

- [24] HV/LV distribution transformers, TRIHAL cast resin dry type transformers 160kVA to 2500kVA, *France Transfo, Schneider Electric Industries SAS, April 2005.*
- [25] Nenad Petrović "Računarska implementacija sistema za rad u realnom vremenu za detekciju i merenje nivoa asimetrije pobude niskonaponskog transformatora," *doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, autorski reprint, 2018.*
- [26] The Fluke 6100A Electrical Power Standard, Web access: <http://www.fluke.com>.

Abstract. This paper addresses the problem of suppression of a systematic measurement error during the detection of a parasitic DC voltage component, superimposed to an AC voltage. As a sensor the toroidal transformer is employed. The origin of the error under scope is the fluctuation of ac voltage around its rated value. Two groups of experiments, based on the new even harmonics method for precise DC voltage offset detection, are performed, analyzed and results compared. The first one successfully resolves detection of parasitic DC components in low voltage distributive grids. The second one is focused on the DC offset voltage detection of the Fluke 6100A Electrical Power Standard. A comparative analysis of the influence of different sets of the even harmonics of transformer excitation current on error propagation, give the consistent results.

Keywords: excitation asymmetry, harmonic analysis, voltage measurement, toroidal transformer.

Optimal Choice of the Number of Even Harmonics Demodulated from the Excitation Current of a Sensor for Precise DC Voltage Component Detection in Low Voltage Distributive Grid as a Strategy for Suppression of the Systematic Error Due to the Grid Voltage Fluctuation

Nenad Petrović, Nebojša Pjevalica, Žarko Janda

Rad primljen u uredništvo: 02.11.2018. godine.

Rad prihvaćen: 22.11.2018. godine.