

## UTICAJ SEKUNDARNOG OPTEREĆENJA NA TAČNOST STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA

D.Naumović-Vuković, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija  
S.Škundrić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija  
S.Milosavljević, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

### UVOD

Merni strujni transformatori su vrlo važni elementi sistema za merenje, upravljanje i zaštitu elektroenergetskih postrojenja (EEP). Od pravilnog izbora, ugradnje i primene ovih mernih elemenata u mnogome zavisi i tačnost, pouzdanost i energetska efikasnost navedenih sistema.

Standardi vezani za merne transformatore ustanovljeni su u doba analogne merne tehnike, pa su i sve naznačene vrednosti sekundarnih napona, struja i snage prilagođene potrebama analogne merne tehnike. Već osamdamdesetih godina prošlog veka uočena je kod nas praksa da strujni merni transformatori u EEP rade sa snagom manjom od jedne četvrtine nazivne snage. Neupućeni u ovome sigurno ne vide neki poseban problem, ali problem zaista postoji. Tačnost strujnih mernih transformatora definisana je za opseg snage od jedne četvrtine do nazivne snage, što znači da rad transformatora izvan ovog opsega snaga može da bude i rad sa greškama merenja izvan opsega propisanih za naznačenu klasu tačnosti. Stručnjaci iz ove oblasti su ukazivali na ovaj problem, kao i na moguća rešenja istog [1].

Krajem prošlog i početkom ovog veka u EEP Srbije sve više su u primeni elektronski sistemi za merenje, upravljanje i zaštitu koji u principu znatno manje opterećuju sekundarna kola strujnih transformatora. Rukovođeni ovom činjenicom projektanti EEP danas sve više zagovaraju primenu strujnih transformatora znatno manjih nazivnih snaga, što je u principu ispravno. Međutim, sa tom u osnovi ispravnom orijentacijom može se otići u drugu krajnost, pa da se preporučuje, a toga već ima u praksi, i primena strujnih transformatora vrlo male naznačene snage od 2,5 VA do 5 VA. Primena strujnih transformatora tako malih naznačenih snaga može doneti druge vrlo ozbiljne probleme vezane pre svega za tačnost mernih transformatora u realnim eksploatacionim uslovima. Namera je da se ovim radom ukaže na te moguće probleme i da se preporučuje mere koje treba preduzeti da bi se oni izbegli.

### TAČNOST STRUJNOG MERNOG TRANSFORMATORA

Tačnost strujnih mernih transformatora određena je vrednošću amplitudne i fazne greške. Amplitudna greška  $g$  i fazna greška  $\delta$  strujnog mernog transformatora saglasno međunarodnim i nacionalnim standardima [2], [3] definisane su kao amplitudno i fazno odstupanje u transformaciji osnovnog harmonika primarne struje  $I_1$ :

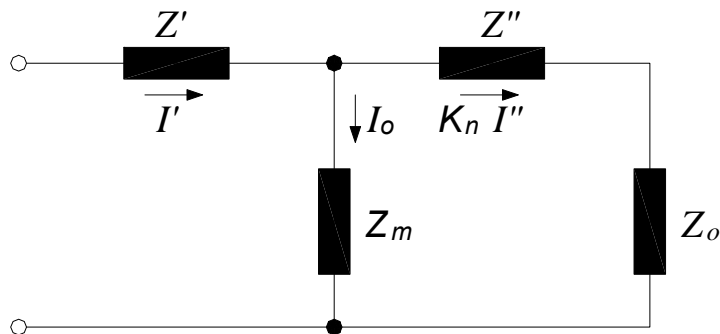
$$g = \frac{k_n \cdot I_1'' - I_1'}{I_1'} \cdot 100 \% \quad (1)$$

$$\delta = \angle \left( \vec{I}_1', \vec{I}_1'' \right) \text{ min} \quad (2)$$

Amplitudna i fazna greška strujnog mernog transformatora zavise od niza parametara koji se mogu klasifikovati kao:

- konstruktivni i tehnološki parametri: materijal, oblik i dimenzije magnetnog kola, broj amper-zavojaka, dužina i presek žice, geometrija primarnog i sekundarnog namotaja;
- eksploatacioni parametri: sekundarno opterećenje, intenzitet, učestanost, izobličenje i oblik merene primarne struje;
- ambijentalni uslovi: temperatura i pritisak.

Pri određivanju amplitudne i fazne greške pošlo se od uprošćene ekvivalentne šeme strujnog transformatora date na slici 1.



Sl.1. Ekvivalentna šema strujnog mernog transformatora

Odnos primarne i sekundarne struje izračunat na bazi ekvivalentne šeme dat je jedanačinama:

$$\frac{I_1'}{I_1''} = k_n \left( 1 + \frac{Z'' + Z_o}{Z_m} \right) \quad (5)$$

Iz odnosa primarne i sekundarne struje u jednačini (5) moguće je odrediti kompleksnu grešku strujnog transformatora  $\underline{G}$ :

$$\frac{I_1'}{k_n I_1''} = (1 + \underline{G}) = \left( 1 + \frac{Z'' + Z_o}{Z_m} \right) \quad (6)$$

Kompleksna greška se sastoji od amplitudne i fazne komponente greške pa iz jednačine (5) sledi:

$$\underline{G} = g + j\delta = R_e \left( \frac{Z'' + Z_o}{Z_m} \right) + j \text{Im} \left( \frac{Z'' + Z_o}{Z_m} \right) \quad (7)$$

Ova teorijska razmatranja sprovedena su sa ciljem da ukažu, da amplitudna i fazna greška strujnog transformatora direktno zavise od opterećenja  $Z_o$  priključenog u sekundarno kolo, što se i vidi u jednačini (7). Impedansa sekundara  $Z''$  i impedansa magnećenja  $Z_m$  zavise od konstruktivnih parametara strujnog transformatora, dok je sekundarno opterećenje eksploatacioni parametar, koji zavisi od impedanse priključenih mernih kola, otpora priključnih vodova, ali i prelaznih otpora na mestima spojeva. Najčešće stvarna vrednost sekundarnog opterećenja strujnog transformatora nije poznata. Na primeru jednog

strujnog mernog transformatora male nazivne snage (3 VA) eksperimentalno je pokazano kako i koliko amplitudna i fazna greška variraju sa sekundarnim opterećenjem.

## REZULTATI ISPITIVANJA

Strujni merni transformator naznačenih karakteristika: primarna struja 100 A, sekundarna struja 5 A, snaga 3 VA, klasa tačnosti 0.5, podvrgnut je ispitivanju tačnosti u skladu sa standardom IEC 66044-1. Ispitivanje je obavljeno u laboratoriji za etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ [4]. Primenjena je diferencijalna metoda sa etalon transformatorom „Hartmann&Braun“, i uređajem za merenje amplitudne i fazne greške „Tettex“, tip 2716.

Amplitudna i fazna greška ispitivanog strujnog transformatora merene su pri: 5 %, 20 %, 100 %, 120 % nazivne sekundarna struje u skladu sa standardom. Stvarno opterećenje sekundarnog kola (uređaj 2716, priključne veze i prelazni otpori) iznosilo je 1.8 VA. Priključenjem dodatnog referentnog opterećenja sa standardnim nizom snaga: 1VA, 1.25 VA, 1.5 VA, 2 VA, 2.5 VA, 3.75 VA i 5 VA, dobijen je niz ispitnih opterećenja: 1.8 VA, 2.25 VA, 2.5 VA, 2.75 VA, 3.25 VA, 3.7 VA, 5 VA, 6.2 VA za koje su izmerene vrednosti amplitudne i fazne greške ispitivanog strujnog transformatora.

Rezultati merenja amplitudne i fazne greške dati su u tabeli I. Na slici 2 grafički je predstavljena zavisnost amplitudne greške od ispitivane struje i opterećenja kao parametra. Na slici 3 prikazana je zavisnost fazne greške od merene struje i opterećenja kao parametra.

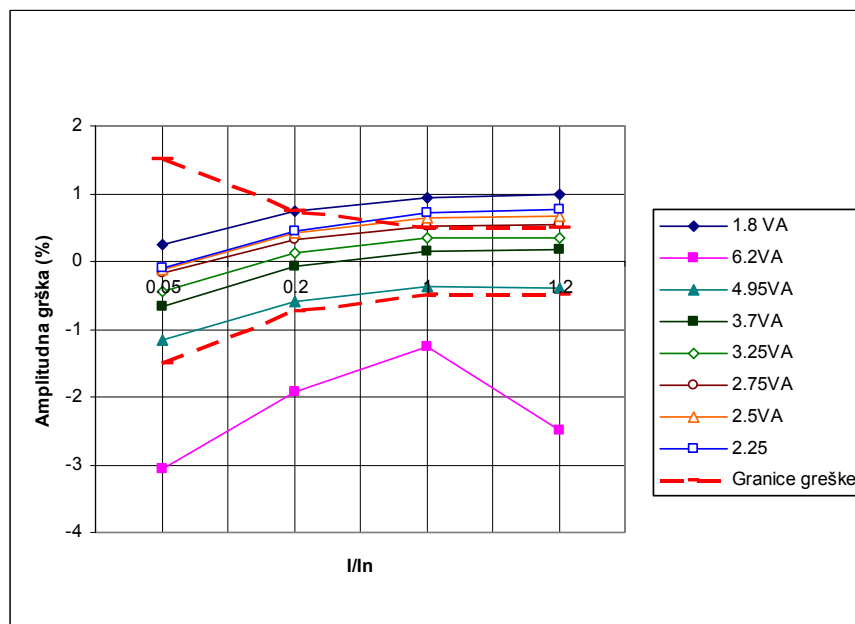
Ako se pregledaju merni rezultati iz tabele I, ili što je još očiglednije prikazani grafici amplitudne i fazne greške na slikama 2 i 3, može se videti da ispitivani transformator ne zadovoljava klasu tačnosti ni za jednu od ispitivanih snaga. Prema standardu transformator bi trebao da zadovolji granice dozvoljene greške za naznačenu snagu 3 VA i za jednu četvrtinu nazivne snage tj. 0.75 VA. Prema rezultatima merenja ispitivani strujni transformator ima amplitudne greške u granicama dozvoljenih za snage: 5 VA, 3.75 VA i 3 VA, ali fazne greške su u granicama dozvoljenih samo za snagu 1.8 VA. Prikazani rezultati merenja amplitudne i fazne greške otvaraju nekoliko pitanja:

1. Kako obezbediti korektno ispitivanje strujnih transformatora pri opterećenju manjem od 1 VA, kada većina ispitnih mernih uređaja (Hole, INST, Tettex) opterećuju ispitivani transformator sa najmanje 1 VA, pri čemu nikakao ne treba zanemariti i dodatno opterećenje usled otpora priključnih veza i prelaznih otpora na mestima priključaka?
2. Koliko su u opšte korektni i uporedivi rezultati merenja amplitudne i fazne greške strujnih transformatora male snage, s obzirom na značajno izražen uticaj opterećenja na njihovu vrednost?
3. Kako praktično obezbediti da u eksploataciji stvarno opterećenje sekundarnog kola ne bude veće od naznačenog?

Tabela I: Rezultati ispitivanja tačnosti strujnog transformatora naznačenog odnosa transformacije 100A/5A

S (VA)	G	0.05 I/In	0.2 I/In	1.0 I/In	1.2 I/In
1.8	$\rho_i$	0.250	0.753	0.934	0.993
	$\delta_i$	68.5	43.7	27.1	23.4
2.25	$\rho_i$	-0.105	0.447	0.720	0.757
	$\delta_i$	81.2	53.2	29.4	26.0
2.5	$\rho_i$	-0.128	0.425	0.631	0.655
	$\delta_i$	82.0	53.5	30.1	26.7
2.75	$\rho_i$	-0.176	0.330	0.530	0.553
	$\delta_i$	82.3	56.3	31.1	27.8
3.25	$\rho_i$	-0.452	0.134	0.337	0.358
	$\delta_i$	94.0	62.5	32.5	29.1

3.75	$p_i$	-0.665	-0.069	0.150	0.166
	$\delta_i$	101.1	68.5	33.8	30.8
5.0	$p_i$	-1.164	-0.600	-0.379	-0.404
	$\delta_i$	116.9	82.3	39.4	47.3
6.2	$p_i$	-3.050	-1.919	-1.271	-2.500
	$\delta_i$	72.2	40.8	9.16	74.8



Sl. 2. Zavisnost amplitudne greške strujnog transformatora od sekundarnog opterećenja

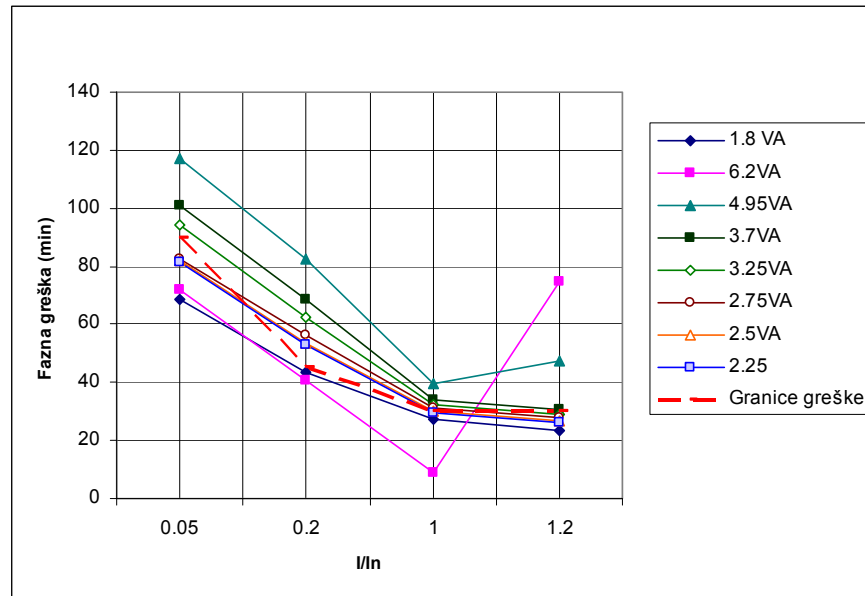
Kratak odgovor na prvo pitanje bilo bi: teško ili nemoguće. Ipak sugestija je, da priključne veze od ispitivanog transformatora do mernog uređaja budu što kraće i što većeg poprečnog preseka, a spojevi što solidniji i dobro pritegnuti. Kod ispitivanja strujnog transformatora pri nazivnoj ispitnoj struji obavezno izmeriti sekundarni napon neposredno na priključnim krajevima transformatora radi provere stvarne ispitne snage i taj podatak uneti u ispitni protokol.

Zaista ima smisla da se sumnja u korektnost rezultata ispitivanja strujnih transformatora male snage, posebno za vrednosti grešaka za četvrtinu opterećenja. Ako merni uređaj opterećuje ispitivani transformator sa snagom od 1 VA, onda je zaista nemoguće obezbediti četvrtinu ispitnog opterećenja kod nazivnih snaga: 3.75 VA, 3 VA, 2,5 VA i manjih. To uostalom i navedeni standardi [2, 3] u određenoj meri uvažavaju kada u čl. 11.2 alineja 4, definišu: Strujni transformatori snage 1VA ispituje se samo na nazivnom opterećenju.

Navedene sugestije u vezi priključnih veza su deo odgovora na treće pitanje. Pri tome treba imati u vidu i sledeće činjenice:

- otpornost bakarnog provodnika preseka 2.5 mm<sup>2</sup> je oko 7mΩ / m, što pri naznačenoj struji od 5 A odgovara 0.175 VA / m
- otpornost bakarnog provodnika preseka 4 mm<sup>2</sup> je oko 4.5 mΩ/m, što pri naznačenoj struji od 5 A odgovara 0.113 VA / m
- vrednost prelaznog opora na jednom spoju može biti oko 10 mΩ, što pri naznačenoj struji od 5 A odgovara 0.25 VA

Na primer, za sekundarno kolo dužine 4 m sa priključnim vezama od 2.5 mm<sup>2</sup>, sa dva priključna instrumenta (brojilo aktivne i reaktivne energije) ima najmanje šest priključnih tačaka, što znači da treba računati sa otpornošću sekundarnog kola od 90 mΩ. Za nazivnu sekundarnu struju od 5 A to odgovara snazi od 2.25 VA. Ako se na ovo doda snaga priključenih instrumenata stiže se do proračunatog sekundarnog opterećenja. Međutim, proračun daje okvirne vrednosti, a merenja daju stvarno opterećenje. Zato je preporuka, da se obavezno izmeri sekundarno opterećenje u realnom pogonu, a kod redovnog ispitivanja tačnosti mernih transformatora u EEP, pored standardom predviđenog protokola ispitivanja (puna i četvrtina nazivne snage) da se izmere greške strujnog transformatora i pri stvarnom opterećenju. Ove greške su realna osnova za obračun ukupne greške merenja električne energije [5].



Sl. 3. Zavisnost fazne greške strujnog transformatora od sekundarnog opterećenja

## ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog teorijskog i eksperimentalnog istraživanja problema malih nazivnih snaga (manje od 5 VA) strujnih transformatora, može se zaključiti da primena takvih transformatora zahteva oprez i da postoji mogućnost da stvarno opterećenje bude veće od naznačenog, a da su zbog toga i amplitudne i fazne greške veće od dozvoljenih za deklarisanu klasu tačnosti. Takođe je moguće, da zbog problema u ispitivanju ovih transformatora, izmerene greške nisu korespondentne sa naznačenim opterećenjem. Sve ove nedoumice u vezi ovakvih problema rešavaju se ispitivanjem tačnosti strujnih mernih transformatora u konkretnim eksploatacionim uslovima. Takođe se preporučuje da se kod izbora nazivnih vrednosti snaga strujnih transformatora ne ide ispod 5 VA.

## LITERATURA

1. Srđan Spiridonović, 1996, „Predlog parametara za izradu dopunskih tereta za merne transformatore“, Zbornik radova, Savetovanje „Transformatori u elektrotehnici“, str. 369-375
2. JUS N.H9.102/1987: Strujni transformatori za merenje – Dopunski tehnički uslovi
3. IEC 66044-1 Instrument transformers – Part 1: Current transformers
4. S. Škundrić, D. Naumović-Vuković, D. Kovačević, 2004., „Uloga i važnost mernih transformatora u merenju električnih veličina“, Zbornik radova Međunarodnog regionalnog savetovanje o distributivnim

mrežama, Herceg Novi

5. D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, R. Dereta, 2007., „Merna nesigurnost etaloniranja strujnih mernih transformatora u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Zbornik radova, Kongres Metrologa

*Kontakt: Dragana Naumović-Vuković, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd*  
[dragananv@ieent.org](mailto:dragananv@ieent.org)