

SMANJENJE PRENOSNE (NOMINALNE) SNAGE TRANSFORMATORA U ELEKTRIČNIM MREŽAMA SA VIŠIM HARMONICIM

M. KOSTIĆ, Elektrotehnički Institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Srbija

1. UVOD

Gubici opterećenja u transformatoru se sastoje od osnovnih gubitaka na omskoj otpornosti transformatora (I^2R) i dodatnih gubitaka opterećenja koji se javljaju u namotajima transformatora i drugim provodnim delovima konstrukcije (sud, oklop i ostalo). Dodatni gubici se značajno povećavaju sa povećanjem frekvencije struje. Tako su za istu efektivnu vrednost struje ovi gubici veći što je učešće harmonika struje veće i što su harmonici višeg reda. To znači da će i ukupni gubici opterećenja biti veći pa dozvoljena vrednost opterećenja transformatora po struji i snazi mora biti manja od navedenih nominalnih vrednosti za taj transformator. Očigledno je da dodatni gubici opterećenja zavise od nivoa ukupne harmonijske distorzije po struji (THDI), ali i od učešća pojedinih harmonika u navedenoj harmonijskoj distorziji. Što su udeli harmonika struje višeg reda veći to su dodatni gubici veći a time i zagrevanje transformatora, pa su veća i pomenuta smanjenja dozvoljenih opterećenja po snazi. Iz navedenih razloga, prvo je definisan parametar koji karakteriše povećanja gubitaka opterećenja u zavisnosti od vrednosti struja prisutnih harmonika i reda tih harmonika, tzv. K-faktor [1, 2], koji je definisao i Evropski komitet za standardizaciju, GENELEC, u dokumentu HD428.4S1 [3], kao i u [4]. Potom je definisan i faktor harmonijskih gubitaka (F_{HL}), [5], koji se koristi za proračune smanjenja prenosne (nominalne) snage transformatora za opterećenja sa datim vrednostima harmonika struje. Prve potrebe za definisanjem uticaja harmonika struje, u struji opterećenja transformatora, na smanjenja prenosne (nominalne) snage su uočene kod transformatora preko kojih se napajaju konvertori i ispravljajući snage [6, 7, 8].

2. GUBICI SNAGE U TRANSFORMATORU

Gubici snage u transformatoru se sastoje od gubitaka u gvožđu i gubitaka opterećenja:

$$P_{\gamma T} = P_C + P_{LL} \quad (1)$$

gde su

P_C gubici u gvožđu transformatora ili gubici praznog hoda,

P_{LL} gubici opterećenja (indeks „LL” je skraćena engleske reči „Load loss”),

$P_{\gamma T}$ ukupni gubici snage u transformatoru.

Gubici u gvožđu zavise samo od vrednosti napona na priključcima transformatora i određuju se iz oglada praznog hoda.

Gubici opterećenja (P_{LL}) se sastoje od omskih gubitaka (I^2R), gubitaka zbog vrtložnih struja i gubitaka zbog rasutog fluksa, tj:

$$P_{LL} = I^2 R_0 + P_{EC} + P_{SL}$$

(2)

gde su

$I^2 R_0$ gubici u namotaju transformatora, date vrednosti omskog otpora za jednosmernu struju (R_0), za izmerenu vrednost struje (I).

P_{EC} gubici zbog vrtložnih struja koji postoje kada protiče naizmenična struja (indeks „EC” je skraćenica engleske reči „Eddy current loss”),

P_{SL} gubici u konstrukciji transformatora zbog rasutog fluksa (indeks „SL” je skraćenica engleske reči „Stray losses”).

Omski gubici ($I^2 R_0$) po definiciji zavise samo od izmerene efektivne vrednosti struje ali ne i od frekvencije te struje.

Povećanje gubitaka u namotaju transformatora zbog proticanja naizmenične struje prorokuje dodatne gubitke zbog vrtložnih struja. Ne postoji metoda za određivanje komponente dodatnih gubitaka zbog vrtložnih struja (P_{EC}) ili za razdvajanje od komponente gubici u konstrukciji transformatora zbog rasutog fluksa (P_{SL}). Naime, ukupni dodatni gubici snage ($P_{EC}+P_{SL}$) se određuju na osnovu izmerene vrednosti ukupnih gubitaka u ogledu kratkog spoja transformatora ($P_{LL}=P_{SC}$), i određuju pomoću jednačine, [2, 7],:

$$P_{EC} + P_{SL} = P_{LL} - I^2 R_0 \quad (3)$$

3. DODATNI GUBICI OPTEREĆENJA

Gubici opterećenja pri proticanju naizmenične struje osnovnog harmonika (f_1) su veći, nego pri proticanju jednosmerne struje iste efektivne vrednosti, za iznos odgovarajućih dodatnih gubitaka (P_{LLd1}). Isto tako dodatni gubici opterećenja se povećavaju sa povećanjem frekvencije struje. Tako je vrednost dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLdh}), pri proticanju struje harmonika reda $h=f_h/f_1$, veća u odnosu na iste pri proticanju struje osnovnog harmonika iste efektivne vrednosti ($I_h=I_1$), tj. $P_{LLdh} > P_{LLd1}$. Logično je da će i vrednost dodatnih gubitaka opterećenja biti veća u transformatoru koji napaja nelinearne potrošače nego pri opterećenju sa čisto sinusnom strujom iste efektivne vrednosti. Kako će biti pokazano, uticaj frekvencije struje je različit na navedene komponente dodatnih gubitaka, pa bi bilo korisno odrediti vrednosti svake od navedenih komponenti gubitaka opterećenja, tj. vrednosti P_{EC} i P_{SL} , a ne samo ukupnu vrednost dodatnih gubitaka kako je to uobičajeno kada je u pitanju samo struja osnovnog harmonika, kako je bilo i dovoljno dok su harmonijske distorzije struje imale niže vrednosti, npr $THDI \leq 5\%$.

3.1 Određivanje dodatnih gubitaka iz ogleda kratkog spoja transformatora

Uobičajeno je da se računa sa dodatnim gubicima snage pri konstruisanju transformatora i da se njihova tačna vrednost određuje iz ogleda kratkog spoja pri ispitivanju novog transformatora, ali i za remontovane transformatore. Pri tome se podrazumeva, ako nije drugačije naglašeno, da se radi o gubicima koji se javljaju pri proticanju struje osnovnog harmonika mreže na koju se transformator priključuje. Ukupni dodatni gubici opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru $P_{LLd} = P_{EC} + P_{SL}$ se određuju na osnovu izmerenih vrednosti ukupnih gubitaka opterećenja (P_{LLd-R}) iz ogleda kratkog spoja, koji se sprovodi sa nominalnom strujom (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$) mreže u kojoj će transformator raditi, tj:

$$P_{LLd-R} = P_{LL-R} - I_R^2 R_0 \quad (4)$$

gde su $I_R^2 R_0 = I_{1R}^2 R_0$ - gubici opterećenja u transformatoru pri proticanju jednosmerne struje date nominalne vrednosti (I_{1R}), a R_0 je otpornost namotaja transformatora za jednosmernu struju.

3.2 Dodatni gubici opterećenja za struje viših harmonika

Dodatni gubici opterećenja se menjaju i sa promenom frekvencije struje koja protiče kroz namotaje transformatora. Tako su gubici u namotajima zbog vrtložnih struja (P_{EC}) srazmerni kvadratu struje i kvadratu frekvencije. Pri proticanju struje koja, pored osnovnog ($h=1$), sadrži i više harmonike reda $h=2, 3, \dots, h_{max}$, gubici P_{EC} su dati izrazom:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h / I_R)^2 \cdot h^2 \quad (5)$$

gde su $P_{EC1,n}$ - gubici vrtložnih struja pri nominalnoj struji (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

Gubici u sudu i konstruktivnim delovima zbog polja rasipanja (P_{SL}) su srazmerni frekvencije i kvadratu struje [1], tj. njihova zavisnost se prikazuje pomoću izraza:

$$P_{SL} = P_{SL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h / I_R)^2 \cdot h \quad (6)$$

gde su $P_{SL1,n}$ - gubici u sudu i konstruktivnim delovima zbog polja rasipanja pri nominalnoj vrednosti struje (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

Za tačniji proračun dodatnih gubitaka opterećenja, pored vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd-R}), za nominalnu vrednost struje osnovnog harmonika $I_1=I_R$, treba poznavati i vrednosti komponenti tih gubitaka, P_{EC-R} i P_{SL-R} . Ukupni dodatni gubici opterećenja se određuju kao zbir navedenih komponenti gubitaka $P_{LLd}=P_{EC}+P_{SL}$, odnosno pomoću sledećih izraza za struju opterećenja koja sadrži više harmonike:

$$P_{LLd} = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (P_{EC-R} \cdot (I_h / I_R)^2 \cdot h^2 + P_{SL-R} \cdot (I_h / I_R)^2 \cdot h) \quad (7)$$

ili

$$P_{LLd} = P_{LLd-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (a \cdot (I_h / I_R)^2 \cdot h^2 + b \cdot (I_h / I_R)^2 \cdot h) \quad (8)$$

gde su koeficijenti "a" i "b" dati preko sledećih izraza:

$a=P_{EC-R}/P_{LLd-R}$ - udeo gubitaka usled vrtložnih struja u ukupnim dodatnim gubicima, i

$b=P_{SL-R}/P_{LLd-R}$ - udeo gubitaka u konstruktivnim delovima u ukupnim dodatnim gubicima, za struju harmonika osnovne, odnosno mrežne frekvencije za energetske transformatore.

Očigledno je da se ukupni dodatni gubici opterećenja ($P_{LLd}=P_{EC}+P_{SL}$) menjaju sa frekvencijom na stepen $1 < q < 2$, pri čemu su vrednosti tog eksponenta veće što je red harmonika viši, i što je veći udeo gubitaka zbog vrtložnih struja P_{EC-R} u ukupnim dodatnim gubicima. Pošto, kako se navodi u [4], ne postoji metoda po kojoj je moguće posebno utvrditi gubitke usled vrtložnih struja (P_{EC-R}) i gubitke u sudu i konstruktivnim delovima transformatora zbog polja rasipanja (P_{SL-R}), približna vrednost ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd}) se određuje pomoću izraza [1,2]:

$$P_{LLd} = P_{LLd-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} ((I_h / I_R)^2 \cdot h^q) \quad (9)$$

gde se, za eksponent (q) reda harmonika, h^q , uzimaju vrednosti $q=1.7-1.8$ [1].

4 NAJVIŠE DOZVOLJENE VREDNOSTI VIŠIH HARMONIKA NAPONA I STRUJE U EES

Sa pojavom viših harmonika u napojnoj mreži se javljaju odgovarajući problemi u radu većine potrošača: smetnje u radu motora, telefonskih linija kao i pogoršanje rada većine uređaja koji su priključeni na tu mrežu, kao i veći gubici snage u motorima i transformatorima. Iz pobrojanih razloga, većina industrijski razvijenih zemalja propisima ograničava sadržaj viših harmonika napona i struja u mreži. Tako američki Standard IEEE 519 – 1992 [8] propisuje maksimalne dozvoljene vrednosti za pojedine više harmonike napona (HD_U) i ukupnu distorziju harmonika napona (THD_U) – Tabela 1.

Tab. 1: Maksimalne vrednosti harmonika napona (HD_U) i ukupne distorzije napona (THD_U), po IEEE Std. 519–1992 [8].

Naponski nivo priključka potrošača [kV]	HD_U [%]	THD_U [%]
≤ 69	3.00	5.00
69 - 161	1.50	2.50
≥ 161	1.00	1.50

Navedeni standard propisuje i maksimalni nivo dozvoljenih vrednosti harmonika struje (HD_I), i vrednosti ukupne distorzije struje (THD_I), za distributivne mreže napona ≤ 69 kV Tabeli 2.

Tab. 2: Maksimalne distorzije struje (HD_I) u distributivnim mrežama ($U \leq 69$ kV) za neparne harmonike, po IEEE Std. 519 – 1992 [8]

I_{sc}/I_L	HD_I [%]					THD_I [%]
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20	4.0	2.0	1.5	1.6	0.3	5.0
20 - 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 - 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 - 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
I_{sc} - amplituda struje kratkog spoja I_L - maksimalna struja opterećenja	Kako je u mrežama srednjeg napona, po pravilu, $I_{sc}/I_L < 20$, to su, odgovarajuće maksimalne distorzije struje, boldovane .					

Podaci o dozvoljenim nivoima za pojedine harmonike napona i ukupnu harmonijsku distorziju napona po međunarodnom Standardu IEEC 1000-2-2 su dati u tabeli 3.

Tab. 3: Maksimalne dozvoljene vrednosti pojedinih harmonika napona po IEC 1000-2-2 [13]

Neparni harmonici			Neparni (harmonici) deljivi sa 3			Parni harmonici		
Red (h)	Procenat struje [%]		Red (h)	Procenat napona [%]		Red (h)	Procenat napona [%]	
	NN i SN	VN		NN i SN	VN		NN i SN	VN
5	6	2	3	5	2	2	2	2
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.3	0.2	8	0.5	0.5
17	2	1				10	0.2	0.2
19	1.5	1	>21	0.2	0.2	12	0.2	0.2
23	1.5	0.7						
25	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
>25	$0.2+32.5/h$	$0.2+12.5/h$						
Ukupna dozvoljena distorzija napona, za mreže NN i SN, $THD_U = 8\%$, i Ukupna dozvoljena distorzija napona, za mreže VN, $THD_U = 3\%$								

Navedeni standard [13] takođe propisuje i maksimalni nivo dozvoljenih vrednosti struje, za pojedine harmonike (HD_i) i vrednosti ukupne distorzije struje (THD_i).

Tab. 4: Maksimalne dozvoljene vrednosti datih harmonika struje (THD_i) po IEC 1000-2-2 [13]

Neparni harmonici			Neparni (harmonici) deljivi sa 3			Parni harmonici		
Red	Procenat struje [%]		Red	Procenat napona [%]		Red	Procenat napona [%]	
(h)	NN i SN	VN	(h)	NN i SN	VN	(h)	NN i SN	VN
5	12	6	3	16.6	7.5	2	10	10
7	8.5	5.1	9	2.2	2.2	4	2.5	3.8
11	4.3	2.9	15	0.6	0.8	6	1	1.5
13	3	2.2	21	0.4	0.4	8	0.8	0.5
17	2.7	1.8				10	0.8	0.5
19	1.9	1.7	>21	0.3	0.4	12	0.4	0.5
23	1.6	1.1						
25	1.6	1.1				>12	0.3	0.5
>25	0.2+0.8(25/h)		0.4					

Ukupna dozvoljena distorzija struje, za mreže NN i SN, THD_i = 20.0%, i
 Ukupna dozvoljena distorzija struje, za mreže VN, THD_i = 12.0%

5 SMANJENJE (REDUKCIJA) PRENOSNE SNAGE TRANSFORMATORIMA U MREŽI SA HARMONICIMA STRUJE

Ukupni gubici opterećenja sa harmonicima u struji transformatora su veći nego da se računaju za struju osnovne frekvencije iste efektivne vrednosti. Gubici opterećenja u transformatoru se sastoje od osnovnih gubitaka na omskoj otpornosti transformatora (I^2R) i dodatnih gubitaka opterećenja koji se javljaju u namotajima transformatora i drugim provodnim delovima konstrukcije (sud, oklop i ostalo). Dodatni gubici se značajno povećavaju sa povećanjem frekvencije struje. Kako je pokazano (poglavlje 3), uticaj frekvencije struje je različit na navedene komponente dodatnih gubitaka: obe komponente dodatnih gubitaka su srazmerne kvadratu struje, dok su dodatni gubici u namotajima zbog vrtložnih struja (P_{EC}) srazmerni i kvadratu frekvencije, pa je za tačnije proračune korisno znati vrednosti obe komponente gubitaka opterećenja, tj. vrednosti P_{EC} i P_{SL} , a ne samo ukupnu vrednost dodatnih gubitaka kako je to uobičajeno kada je u pitanju samo struja osnovnog harmonika.

5.1 Faktori povećanja dodatnih gubitaka opterećenja za struje viših harmonika

Zavisno od tipa transformatora, njegove nominalne snage i nominalnog napona, vrednosti navedenih komponenti dodatnih gubitaka se kreću u dosta širokim rasponima, i to [7]:

- od 1-20%, za dodatne gubitke u namotajima zbog vrtložnih struja (P_{EC}), i
- od 5-15%, za dodatne gubitke u sudu i konstruktivnim delovima od polja rasipanja (P_{SL}).

Donje vrednosti se odnose na male transformatore ($S_n \leq 400 \text{kVA}$ i $u_k \leq 5\%$), a najviše vrednosti odgovaraju transformatorima velikih snaga ($\geq 63 \text{MVA}$) i visokim vrednostima napona kratkog spoja ($u_k \geq 15\%$). Tako navedene vrednosti dodatnih gubitaka mogu biti uvećane, čak, i za nekoliko puta ukoliko su u struji opterećenja zastupljeni i viši harmonici struje.

Poznati K-faktor se definiše [7] kao:

$$K = \sum_{h=1}^{h \rightarrow \infty} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (10)$$

gde su I_h i I_R –efektivne vrednosti struje harmonika reda (h) i nominalne struje transformatora. Na osnovu (5) se izvodi izraz (11):

$$K = P_{EC} / P_{EC-R} \quad (11)$$

Izraz (11) pokazuje da je K-faktor jednak vrednosti povećanja gubitaka zbog vrtložnih struja u namotajima transformatora, u odnosu na vrednost tih dodatnih gubitaka pri nominalnoj struji (čisto) osnovnog harmonika ($I_1 = I_R$), pa se u ovom radu definiše kao faktor povećanja gubitaka usled vrtložnih struja (K_{EC}), tj:

$$K_{EC} = P_{EC} / P_{EC-R} = \sum_{h=1}^{h \rightarrow \infty} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (12)$$

Na sličan način, pomoću izraza (6), se definiše i faktor povećanja dodatnih gubitaka u sudu i konstruktivnim delovima zbog polja rasipanja (K_{SL}), tj. njihova zavisnost je data pomoću izraza:

$$K_{SL} = P_{SL} / P_{SL-R} = \sum_{h=1}^{h \rightarrow \infty} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h \quad (13)$$

gde su P_{SL-R} - gubici u sudu i konstruktivnim delovima zbog polja rasipanja pri nominalnoj struji (čisto) osnovnog harmonika ($I_1 = I_R$).

Ponekad se uzima da je K-faktor jednak vrednosti povećanja ukupnih dodatnih što je konzervativna pretpostavka i ide u stranu sigurnosti, tj. pretpostavlja se da su svi dodatni gubici srazmerni kvadratu frekvencije. Tim postupkom mogu biti precenjene vrednosti povećanja dodatnih gubitaka, posebno kod manjih transformatora – kada gubici usled vrtložnih struja mogu biti samo 20-30% (ukupnih) dodatnih gubitaka opterećenja.

5.2 Smanjenje (redukcija) nominalne snage transformatora za struje viših harmonika

Korisno je utvrditi nužna smanjenja (redukciju) nominalne snage transformatora pri najvećim dozvoljenim vrednostima pojedinih harmonika struje po važećim propisima, npr. [8, 10, 13]. To se radi na osnovu proračuna vrednosti (faktora) povećanja dodatnih gubitaka usled vrtložnih struja (K_{EC}) i faktor povećanja dodatnih gubitaka u sudu i konstruktivnim delovima (K_{SL}), su sračunate za pri efektivnoj vrednosti struje opterećenja koja je jednaka nominalnoj struji transformatora, $I_{RMS} = I_R$.

Vrednosti faktora povećanja dodatnih gubitaka, K_{EC} i K_{SL} , su sračunate za najveće dozvoljene vrednosti pojedinih harmonika struje, po St. IEC 1000-2-2 [13], (a) za mreže niskog (NN) i srednjeg (SN), i (b) mreže visokog napona (VN). Dobijene vrednosti su date u tabeli 5.

Tabela 5: Vrednosti faktora povećanja dodatnih gubitaka, K_{EC} i K_{SL} , za mreže datih napona po navedenim propisima

IEC 1000-2-2 Mreže NN i SN				IEC 1000-2-2 Mreže VN				EEE 519 U≤69kV, I _{sc} /I _L =20-50			
h	I _h	h ² I ²	hI _h ²	h	I _h	h ² I ²	hI _h ²	h	I _h	h ² I ²	hI _h ²
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.06	0.09	0.018	5	0.02	0.01	0.002	5	0.07	0.1225	0.0245
7	0.05	0.1225	0.0175	7	0.02	0.0196	0.0028	7	0.07	0.2401	0.0343
11	0.035	0.1482	0.0135	11	0.015	0.0272	0.0024	11	0.035	0.1482	0.0134
13	0.03	0.1521	0.0117	13	0.015	0.0380	0.0029	13	0.035	0.207	0.0159
17	0.02	0.1156	0.0068	17	0.01	0.0289	0.0017	17	0.025	0.1806	0.0106
19	0.015	0.0812	0.0043	19	0.01	0.0361	0.0019	19	0.025	0.2256	0.0118
23	0.015	0.1190	0.0052	23	0.007	0.0259	0.0011	23	0.01	0.0529	0.0023
25	0.015	0.1406	0.0056	25	0.007	0.0306	0.0012	25	0.01	0.0625	0.0025
29	0.0132	0.1466	0.0051	29	0.0063	0.0334	0.0011	29	0.01	0.0841	0.0029
31	0.0125	0.1497	0.0048	31	0.0060	0.0349	0.0011	31	0.01	0.0961	0.0031

35	0.0113	0.1560	0.0045	35	0.0055	0.0380	0.0010	35	0.005	0.0306	0.0009
37	0.0108	0.1592	0.0043	37	0.0054	0.0396	0.0010	37	0.005	0.0342	0.0009
41	0.0099	0.1656	0.004	41	0.0050	0.0428	0.0010	41	0.005	0.042	0.0010
43	0.0096	0.1689	0.0039	43	0.0049	0.0445	0.0010	43	0.005	0.0462	0.0011
47	0.0089	0.1755	0.0037	47	0.0047	0.0479	0.0010	47	0.005	0.0552	0.0012
49	0.0086	0.1789	0.0037	49	0.0045	0.0497	0.0010	49	0.005	0.06	0.0012
Σ		3.2700	1.1166			0.5475	1.0247			1.6881	1.1278

Za date - izmerene vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd-R}) pri nominalnoj struji osnovne frekvence, odnosno njihovih komponenti, P_{EC-R} i P_{SL-R} [14], za izračunate vrednosti K_{EC} i K_{SL} (tabela 5), odgovarajuće vrednosti komponenti dodatnih gubitaka opterećenja, P_{EC-R} i P_{SL-R} , su sračunate po sledećim formulama

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot K_{EC} \quad (14)$$

$$P_{SL} = P_{SL-R} \cdot K_{SL} \quad (15)$$

Potom su određene ukupne vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd}):

$$P_{LLd} = P_{EC} + P_{SL} \quad (16)$$

Za tako sračunate vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd}), određene su odgovarajuće smanjene (redukovane) prenosne snage transformatora, S_{T-R} u procentima nominalne snage transformatora ($\%S_{T-R}$), pri navedenim najvećim dozvoljenim vrednostima pojedinih harmonika struje za mreže SN i NN (tabela 4), [13], po formuli:

$$(S_T / S_{T-R})\% = 100 \sqrt{\frac{100 + P_{EC-R} + P_{SL-R}}{100 + P_{EC} + P_{SL}}} \quad (17)$$

Sve proračunate vrednosti po izrazima (12)-(17), uključujući i dobijene vrednosti za S_{T-R} u procentima nominalne snage transformatora ($\%S_{T-R}$), date su u tabeli 6.

Tabela 6: Vrednosti smanjenih (redukovanih) prenosnih snaga, S_{T-R} , za transformatore navedenih nominalnih snaga za najviše dozvoljene vrednosti harmonika struje po IEC 1000-2-2

ST-R	USC	PEC-R	PSL-R	PLLd-R	KEC	KSL	PEC	PSL	PLLd	S _T /S _{T-R}
kVA	%	%(R _L) ²	%(R _L) ²	%(R _L) ²	(h _l) ²	h _l ²	%(R _L) ²	%(R _L) ²	%(R _L) ²	
630	4.1	1.2	4	5.2	3.27	1.116	3.924	4.464	8.388	98.518
4000	6.1	2.8	6.5	9.3	3.27	1.116	9.156	7.254	16.41	96.898
31500	10.9	8.2	10	18.2	3.27	1.116	26.814	11.16	37.974	92.557
31500	16.7	16.2	10.5	26.7	3.27	1.116	52.974	11.718	64.692	87.711

Dobijeni rezultati pokazuju da su smanjenja (redukcije) prenosnih snaga transformatora, S_{T-R} , primetna i značajna kada su u pitanju transformatori velikih snaga i visokih vrednosti napona kratkog spoja, dok su ta smanjenja manja od 2%, za transformatore SN/NN snaga ≤ 630 kVA.

Vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd}), se mogu odrediti i po (uprošćenom) izrazu (9), za vrednosti eksponenta $q=1.60-1.70$ koje se preporučuju u literaturi [1-7]. Tako dobijeni rezultati proračuna, za vrednosti $q=1.60$ i $q=1.70$, su dati u tabeli 7. Interesantno je uporediti rezultate tih proračuna i uporediti sa (tačnim) vrednostima iz tabele 7. Dobijeni rezultati pokazuju da su greške proračuna po navedenom izrazu (8), za vrednosti eksponenta $q_1=1.60$ i $q_2=1.70$, praćene velikim i različitim vrednostima odgovarajućih greški, redom, $E_{LLd}(1)$ i $E_{LLd}(2)$, tabela 7.

Tabela 7: Vrednosti smanjenih (redukovanih) prenosnih snaga, S_{T-R} , za transformatore navedenih nominalnih snaga za najviše dozvoljene vrednosti harmonika struje po IEC 1000-2-2

ST-R	USC	PLld	PLld-R	KLLd(1)	PLld(1)	ELLd(1)	KLLd(1)	PLld(2)	ELLd(2)
kVA	%	$\%(R _R^2)$	$\%(R _R^2)$	$h^{1.6}I_h^2$	$\%(R _R^2)$	%	$h^{1.7}I_h^2$	$\%(R _R^2)$	%
630	4.1	8.388	5.2	1.6515	8.5878	2.3819	1.884	9.7968	16.795
4000	6.1	16.41	9.3	1.6515	15.359	-6.4049	1.884	17.521	6.7714
31500	10.9	37.974	18.2	1.6515	30.057	-20.847	1.884	34.288	-9.7045
31500	16.7	64.692	26.7	1.6515	44.095	-31.838	1.884	50.302	-22.242

6 ZAKL
JUČ
AK

U radu je razmatran

uticaj povećanja dodatnih gubitaka opterećenja na smanjene (redukciju) prenosnih snaga transformatora, u mreži sa višim harmonicima struje. Utvrđeno je da navedena smanjenja mogu biti velika (10-15%), kada su u pitanju transformatori velikih snaga i visokih vrednosti napona kratkog spoja. Takođe je pokazano da se dovoljno tačne vrednosti navedenih smanjenja mogu dobiti samo ako se posebno računaju povećanja dodatnih gubitaka usled vrtložnih struja (P_{EC}) i povećanja dodatnih gubitaka u sudu i konstruktivnim delovima (P_{SL}), odnosno ako se prethodno odrede vrednosti faktor povećanja navedenih komponenti dodatnih gubitaka, K_{EC} i K_{SL} : za navedeno je potrebno prethodno utvrditi (merenjem) vrednosti dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd-R}) pri nominalnoj struji osnovne frekvence, odnosno njihovih komponenti, P_{EC-R} i P_{SL-R} .

LITERATURA

1. Pierce L. W., "Transformer Design and Application Consideration for No sinusoidal Load Currents", IEEE Transac. on Ind. Application., Vol.32 (1996), No3, pp.633-645, 1996.
2. Balcells J, "Quality and rational use of electrical energy", Editor and Publisher CIRCUTO S.A, Barcelona 2001, pp.192.
3. Standard UL 1561, Apr.22, 1994, "Dry-Type General Purpose and Power Transformer".
4. CENELEC, document HD428.4S1.
5. Yildirim D, Fuch F. E, "Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (F_{HL}) Approach", IEEE Tr. on Power Delivery, Vol.15 (2000), No1, pp.186-191.
6. B.S. Ram, J.A.C. Forrest, and G.W. Swift, "Effect of harmonics on converter transformer load losses", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, No3, pp.1059-1066, July1996.
7. "Power Transformers, Vol. 2: Expertise", pp. 472, AREA: First edition, Copyright 2008.
8. ANSI/IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
9. R.P.Stratford, "Analysis and Control of Harmonic Current in System with Static Power Converter", IEEE Transc. on Industry Applic, Vol. IA-17, No 1, 1981, pp. 71-80.
10. CIGRE Working Group 36-05 (Disturbing Loads) (1981), "Harmonics, Characteristic Parametars, Methods of Study, Estimating of Existing Values in the Network", Electra (77), 35-54.
11. V. Katić, "Istraživanje viših harmonika u mreži Elektrovojvodine", Zbornik radova sa 1. Savetovanja Juko CIRED – a, Referat R – 2. D3, Zlatibor, oktobar 1998.godine.
12. J. Schlabbach, V. Katic, "Estimation of Harmonic Level in MV Systems Using Simulation and Measurement", '10th Symposium on Power Electronic, Novi Sad 1999.
13. Standard IEC 1000-2-2, Electromagnetic compabiliti EMC) - Part 2, 1990.
14. Miloje.M. Kostić, "Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja u transformatoru na dve komponente", Zbornik radova za 2011.godinu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Vol.21, str. 129-138.