

Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja u transformatoru na dve komponente

Miloje M. Kostić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
mkostic@ieent.org

Kratak sadržaj: Ovaj postupak se zasniva na ideji da se ukupni dodatni gubici opterećenja ($P_{LLd,n}$) u transformatoru, koji se određuju iz oglada kratkog spoja, mogu razdvojiti na dve komponente: dodatne gubitke u namotajima zbog vrtložnih struja ($P_{EC1,n}$) i gubitke u sudu i drugim konstruktivnim delovima zbog polja rasipanja ($P_{SL1,n}$). Ukupni dodatni gubici opterećenja, P_{LLd1} i P_{LLdh} , se određuju na osnovu podataka iz oglada kratkog spoja sa strujom nominalne frekvencije (f_1) za koju je transformator predviđen i oglada kratkog spoja pri povišenoj frekvenciji ($f_n=h \cdot f_1$). Na osnovu tako dobijenih vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja P_{LLd1} i P_{LLdh} , iz dve jednačine oblika $P_{LLdh}=P_{EC1,n} \cdot h^2 + P_{SL1,n} \cdot h$, određuju se odgovarajuće nominalne vrednosti navedenih komponenti gubitaka $P_{EC1,n}$ i $P_{SL1,n}$. Na kraju se, za dato opterećenje sa datim učešćem (I_n/I_{1n}) pojedinih harmonika, $h=1,2,3,\dots,h_{max}$, utvrđuje vrednost ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja: $\Sigma P_{LLdh} > P_{LLd1}$.

Ključne reči: Gubici snage u transformator, Gubici opterećenja, Dodatni gubici opterećenja, Gubici u namotaju zbog vrtložnih struja, Gubici u konstrukciji transformatora zbog rasutog fluksa, Gubici zbog viših harmonika struje.

1. Uvod –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 skraćenica engleske reči „Load loss”),
- P_{VT} 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:

$$P_{LL} = I^2 R_0 + P_{EC} + P_{SL} \quad (1)$$

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 prouzrokuje 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:

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

2. Dodatni gubici opterećenja transformatora

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. To je bilo i dovoljno dok su harmonijske distorzije struje imale niže vrednosti, npr $THDI \leq 5\%$.

2.1. Određivanje dodatnih gubitaka iz oglada kratkog spoja transformatora

Uobičajeno je da se računa sa dodatnim gubicima snage pri konstruisanju transformatora i da se njihova tačna vrednost određuje iz oglada 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 ($P_{LL1,n}$) iz oglada kratkog spoja, koji se sprovodi sa nominalnom strujom (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$) mreže u kojoj će transformator raditi, tj:

$$P_{LLd1,n} = P_{LL1,n} - I_{1n}^2 R_0 \quad (3)$$

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

2.2. 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:

$$P_{EC} = P_{EC1,n} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h / I_{1n})^2 \cdot h^2 \quad (4)$$

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:

$$P_{SL} = P_{SL1,n} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h / I_{1n})^2 \cdot h \quad (5)$$

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 ($P_{LLd1,n}$), za nominalnu vrednost struje osnovnog harmonika $I_{1n}=I_n$, treba poznavati i vrednosti komponenti tih gubitaka, $P_{EC1,n}$ i $P_{SL1,n}$. 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:

$$P_{LLd} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (P_{EC1,n} \cdot (I_h / I_{1n})^2 \cdot h^2 + P_{SL1,n} \cdot (I_h / I_{1n})^2 \cdot h) \quad (6)$$

ili

$$P_{LLd} = P_{LLd,1} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (a \cdot (I_h / I_{1n})^2 \cdot h^2 + b \cdot (I_h / I_{1n})^2 \cdot h) \quad (7)$$

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

$a=P_{EC1,n}/P_{LLd1,n}$ - udeo gubitaka usled vrtložnih struja u ukupnim dodatnim gubicima, i

$b=P_{SL1,n}/P_{LLd1,n}$ - 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 $P_{EC,n}$ u ukupnim dodatnim gubicima. Pošto, kako se navodi u [4], ne postoji metoda po kojoj je moguće posebno utvrditi gubitke usled vrtložnih struja ($P_{EC1,n}$) i gubitke u sudu i konstruktivnim delovima transformatora zbog polja rasipanja ($P_{SL1,n}$), približna vrednost ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja (P_{LLd}) se određuje pomoću izraza [1,2]:

$$P_{LLd} = P_{LLd,1} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} ((I_h / I_{1n})^2 \cdot h^q) \quad (8)$$

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

3. Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja transformatora na dve komponente

Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru na dve komponente, koji se predlaže, se realizuje u dva dela. Prvo se iz oglada kratkog spoja sprovedenog na uobičajen način, sa nominalnom strujom (I_{1n}) osnovne frekvencije mreže ($h=1$) za koju je transformator predviđen, određuju ukupni dodatni gubici kratkog spoja (opterećenja) u transformatoru $P_{LLd1,n} = P_{LL1,n} - I_{1n}^2 R_0$. Zatim se u drugom ogledu kratkog spoja, koji se sprovodi sa izvorom više frekvencije ($f_h = h \cdot f_1$), izmere ukupni gubici opterećenja ($P_{LLh,n}$), na osnovu kojih se određuju odgovarajući ukupni dodatni gubici opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru $P_{LLdh,n}$:

$$P_{LLdh,n} = P_{LLh,n} - I_{h,n}^2 R_0 \quad (9)$$

Na osnovu jednačina (4), (5) i (6), za dve dobijene vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja, $P_{LLd1,n}$ i $P_{LLdh,n}$, se dobijaju odgovarajuće jednačine:

$$P_{LLd1,n} = P_{EC1,n} + P_{SL1,n} \quad (10a)$$

$$P_{LLdh,n} = P_{EC1,n} \cdot h^2 + P_{SL1,n} \cdot h \quad (10b)$$

Rešenja sistema jednačina (10a) i (10b) daju nominalne vrednosti gubitaka usled vrtložnih struja ($P_{EC1,n}$) i gubitaka u sudu i konstruktivnim delovima transformatora ($P_{SL1,n}$) zbog polja rasipanja, pri nominalnoj struji (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$):

$$P_{EC1,n} = \frac{P_{LLdh,n} - P_{LLd1,n} \cdot h}{h^2 - h} \quad (11)$$

$$P_{SL1,n} = \frac{P_{LLd1,n} \cdot h^2 - P_{LLdh,n}}{h^2 - h} \quad (12)$$

Ukoliko se jednačine (10a) i (10b) napišu u relativnim jedinicama nominalne snage ukupnih dodatnih gubitaka ($P_{LLd1,n}=1$), dobijaju se sledeće jednačine

$$a + b = 1 \quad (13a)$$

$$a \cdot h^2 + b \cdot h = P_{LLdh,n} / P_{LLd1,n} \quad (13b)$$

Rešenja sistema jednačina (13a) i (13b) daju vrednosti koeficijenta "a" i "b", odnosno vrednosti učešća gubitaka usled vrtložnih struja ($a=P_{EC1,n}/P_{LLd1,n}$) i dodatnih gubitaka u konstruktivnim delovima transformatora ($b=P_{SL1,n}/P_{LLd1,n}=1-a$) u ukupnim dodatnim gubicima snage, pri nominalnoj struji (I_{1n}) mrežne učestanosti ($h=1$).

$$a = \frac{P_{LLdh,n} / P_{LLd1,n} - h}{h^2 - h} \quad (14)$$

$$b = \frac{h^2 - P_{LLdh,n} / P_{LLd1,n}}{h^2 - h} = 1 - a \quad (15)$$

Uobičajeno je da se ogled kratkog spoja za struju osnovne frekvencije (f_1) sprovodi sa strujom nominalne vrednosti $I_1=I_n$. Takođe je, za primenu predloženog postupka, najpogodnije da se i ogled kratkog spoja pri povišenoj frekvenciji ($f_h=h \cdot f_1$) sprovodi sa sniženim naponom koji odgovara nominalnoj struji transformatora $I_h=I_1=I_n$, kako bi se direktno koristili izrazi od (10)-(15). Često to nije moguće ostvariti, posebno kada je u pitanju povišena frekvencija, pa se ogled kratkog spoja mora sprovesti sa strujom vrednosti različitom od nominalne ($I_h \neq I_n$). U tim slučajevima su, po pravilu, struje kratkog spoja $I_h < I_n$.

Ukoliko ogledi kratkog spoja nisu izvedeni sa nominalnim strujama transformatora (I_n), već pri nekim drugim vrednostima I_1 i I_h , onda jednačine (10a) i (10b) prelaze u jednačine

$$P_{LLd1} = P_{EC1,n} \cdot (I_1 / I_n)^2 + P_{SL1,n} \cdot (I_1 / I_n)^2 \quad (16a)$$

$$P_{LLdh} = P_{EC1,n} \cdot (I_1 / I_n)^2 \cdot h^2 + P_{SL1,n} \cdot (I_1 / I_n)^2 \cdot h \quad (16b)$$

za koje su rešenja, odnosno izrazi za proračun vrednosti $P_{EC1,n}$ i $P_{SL1,n}$, data u obliku

$$P_{EC1,n} = \frac{P_{LLdh} - P_{LLd1} \cdot h \cdot (I_h / I_1)^2}{h^2 \cdot (I_h / I_n)^2 - h \cdot (I_h / I_n)^2} \quad (17)$$

$$P_{SL1,n} = \frac{P_{LLd1} \cdot h^2 \cdot (I_h / I_1)^2 - P_{LLdh}}{h^2 \cdot (I_h / I_n)^2 - h \cdot (I_h / I_n)^2} \quad (18)$$

gde su

$P_{LLd1} = P_{LL1} - I_1^2 R_0$ - ukupni dodatni gubici opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru, koji su određeni iz oglada kratkog spoja sa strujom osnovne frekvencije (f_1), vrednosti (I_1); a

$P_{LLdh} = P_{LLh} - I_h^2 R_0$ - ukupni dodatni gubici opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru, koji su određeni iz oglada kratkog spoja sa strujom povišene frekvenciji ($f_h = h \cdot f_1$), vrednosti (I_h).

4. Primer primene kompletnog postupka

Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja (kratkog spoja) u transformatoru na dve komponente", se može primenjivati u istraživačkim laboratorijama i ispitnim stanicama proizvođača i korisnika transformatora. Na konkretnom primeru ilustrovan je način primene kompletnog postupka.

Za kompletnu primenu postupaka, koji je opisan, korišćeni su rezultati-podaci iz oglada kratkog spoja za struje harmonika reda $h = 1, 5, 7, 11, 13, 17$ i 19 , koji su dati u literaturi [5]. Preuzeti podaci su dati u tabeli 1. Ukupni gubici kratkog spoja $p_{LLh} = P_{LLh}/P_{LL1,n}$ navedenih eksperimentalnih ispitivanja [5], su dati u jedinicama ukupnih gubitaka opterećenja ($P_{LL1,n}=1$) za nominalnu struju osnovne frekvencije. U tim jedinicama su sračunati i ukupni dodatni gubici opterećenja, za struje svih navedenih harmonika, $p_{LLdh,n} = p_{LLh,n}^{(1)} - 0.7147 = P_{LLh,n}/P_{LL1,n}$, koji su ujedno svedeni i na nominalne vrednosti struje ispitivanog transformatora.

Za primenu predloženog postupka, dovoljno je imati (koristiti) vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja za dve frekvencije-npr. za (nominalne) struje 1. i 7. harmonika, Na osnovu vrednosti, navedenih ukupnih dodatnih gubitaka $p_{LLd1,n}=0.2853$ i $p_{LLd7,n}=4.5053$, pomoću izraza (14) i (15) određene vrednosti komponenti dodatnih gubitaka snage u tim jedinicama:

$$p_{EC1,n} = P_{EC1,n}/P_{LL1,n} = 0.05973 \text{ i}$$

$$p_{SL1,n} = P_{SL1,n}/P_{LL1,n} = 0.22551.$$

Zatim su, pomoću izraza (10b), računski utvrđene vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka za nominalne struje 5, 11, 13, 17 i 19. harmonika i date u odgovarajućoj vrsti $p_{LLh,n}^{(2)}$, tabele 1. Na kraju je izvršeno poređenje tako sračunatih gubitaka sa izmerenim (tačnim) vrednostima dodatnih gubitaka opterećenja za odgovarajuće harmonike (vrsta $p_{LLdh,n} = p_{LLh,n}^{(1)} - 0.7147$, u tabeli 1). Utvrđena odstupanja (vrednosti greški u vrsti e %) su mala, i idu od 1-4%. Ona su posledica i merenjem utvrđene činjenice [5] da dodatni gubici u konstrukcionim delovima ($P_{SL1,n}$), konkretnog transformatora velike snage (213 MVA), nisu direktno proporcionalni frekvenciji, kako je uobičajeno i kako je pretpostavljeno u izrazu (8b), već na eksponent 0.8. Kako to nije slučaj sa većinom transformatora manjih, srednjih, pa i većih, snaga, primena predloženog postupka daje rezultate sa još manjom greškom nego u datom primeru.

Tabela 1: 1. Ogledi kratkog spoja sa strujama raznih frekvencija f_h , tj.harmonika reda $h=f_h/f_1=1,3,5,7,13,17$ i 19								
Frekvencija izvora f_h (harmonika $h=f_h/f_1$):	0	1	5	7	11	13	17	19
Struja kratkog spoja [5] $i_h = I_h / I_n$		0.9796	0.1673	0.1017	0.0370	0.0198	0.0064	0.0082
Gubici kratkog spoja $p_{LLh} = P_{LLh}/P_{LL1,n}$ [5]	0.7147	0.95962	0.09243	0.05397	0.01455	0.00553	0.00094	0.00187
Odnos gubitaka [5] $p_{LLh,n}^{(1)} = P_{LLh,n}/P_{LL1,n}$		1.0000	3.30	5.22	10.61	14.09	22.61	27.67
$p_{LLdh,n}=p_{LLh,n}^{(1)}-0.7147$		0.2853	2.5853	4.5053	9.895	13.375	21.895	26.955
2. Razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja $P_{LLd1,n}/P_{LL1,n}=1.00-0.7147=0.2853$ na dve komponente, $p_{EC1,n}=P_{EC1,n}/P_{LL1,n}=0.05973$ i $p_{SL1,n}=P_{SL1,n}/P_{LL1,n}=0.22551$, i određivanje dodatnih gubitaka opterećenja za pojedine harmonike $p_{LLh,n}^{(2)}=P_{LLh,n}/P_{LL1,n}$ po predloženom postupku								
$p_{LLh,n}^{(2)}=P_{LLh,n}/P_{LL1,n}$	0.2853	2.6153	4.5053	9.7053	13.025	21.095	25.845	25.845
$e=100 \cdot (p_{LLh,n}^{(2)}-p_{LLh,n}^{(1)})$	0 %	1.16 %	0 %	-1.92 %	-2.61 %	-3.65 %	-4.11 %	-4.11 %
3. Vrednosti eksponenta "q" za pojedine harmonike, $q=\log(p_{LLdh,n}/p_{LLd1,n})/\log h$:								
$p_{LLdh,n}/p_{LLd1,n}$		1.000	9.0617	15.7914	34.6828	46.880	76.744	94.4795
$q=\log(p_{LLdh,n}/p_{LLd1,n})/\log h$		1.000	1.3695	1.4181	1.4789	1.500	1.5320	1.5447

Na osnovu toga se zaključuje da je primena predloženog postupka relativno jednostavna i dovoljno tačna. Posebno je pogodna za primenu u svim konkretnim slučajevima sa proizvoljnim nivom ukupne harmonijske distorzije i različitim učešćem pojedinih harmonika.

Interesantni su i rezultati proračuna vrednosti eksponenta "q" za pojedine harmonike, na osnovu izmerenih (stvarnih) vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka snage, po formuli: $q = \log(\rho_{LLdh,r} / \rho_{LLd1,n}) / \log h$. Tako dobijene vrednosti eksponenta "q", date pod 3. u odgovarajućoj vrsti tabele 1, se kreću od 1.36945÷1.5447, za harmonike reda 5-19. One su znatno manje od najčešće korišćenih iznosa $q=1.7\div 1.8$ u izrazu (6), a pogotovu od često korišćenog iznosa $q=2$. Time se pokazuje na mogućnost javljanja veće greške pri određivanju dodatnih gubitaka snage po formuli:

$$P_{LLd} = P_{LLd,1} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h / I_{1n})^2 \cdot h^2 \quad (19)$$

kao i vrednosti K-faktora transformatora, po odgovarajućem izrazu [1,4]:

$$K - faktor = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} ((I_h / I_{1n})^2 \cdot h^2) \quad (20)$$

5. Zaključak

Postupak za razdvajanje dodatnih gubitaka opterećenja u transformatoru na dve komponente", se zasniva na ogledu kratkog spoja transformatora, tako što se iz ogleda kratkog spoja sa strujom osnovne-nominalne frekvencije (f_1) za koju je transformator predviđen i ogleda kratkog spoja pri povišenoj frekvenciji ($f_h = h \cdot f_1$), utvrde odgovarajuće vrednosti ukupnih dodatnih gubitaka opterećenja P_{LLd1} i P_{LLdh} . Zatim se nominalne vrednosti komponente gubitaka usled vrtložnih struja ($P_{EC1,n}$) i komponente dodatnih gubitaka u sudu i konstruktivnim delovima transformatora zbog polja rasipanja ($P_{SL1,n}$), određuju po postupku koji je prikazan u ovom radu.

Literatura

- [1] J.Balcells, "Quality and rational use of electrical energy", Editor and Publisher CIRCUTO S.A, Barcelona 2001, pp.192.
- [2] CENELEC, document HD428.4S1.
- [3] Standard UL 1561, Apr.22, 1994, "Dry-Type General Purpose and Power Transformer".

- [4] Linden W. Pierce, "Transformer Design and Application Consideration for No sinusoidal Load Currents", IEEE Tr. on Ind. Applic., Vol.32, No3, pp.633-645, 1996.
- [5] 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, July 1996.

Abstract. The proposed procedure is based on the fact that total transformer losses ($P_{LL1,n}$), determined by short circuit test, can be separated into two components: the eddy current losses in the windings ($P_{EC1,n}$) and stray flux losses ($P_{SL1,n}$) in iron parts of construction as well as in the transformer tank walls. The total additional load losses, P_{LLd1} and P_{LLdh} , are determined by short circuit test results, conducted at rated frequency (f_1) and at increased harmonic frequency ($f_h=h \cdot f_1$). Using so obtained total additional load losses, P_{LLd1} and P_{LLdh} , which can be expressed in the form $P_{LLdh}=P_{EC1,n} \cdot h^2 + P_{SL1,n} \cdot h$, the corresponding rate additional load losses values $P_{EC1,n}$ and $P_{SL1,n}$ are derived. At the end, for given load with predefined high harmonics content, (I_h/I_{1n}), relative to rated current, the total additional load losses value $\Sigma P_{LLdh} > P_{LLd1}$, is found. In such a way all harmonics up to h_{max} are taken into account

Keywords: Transformer total losses, load losses, additional load losses, winding eddy-current losses, stray losses in tank and other parts, high harmonics losses.

Power Transformer Additional Load Losses Separation Procedure

Rad primljen u uredništvo 30.9.2011. godine
Rad prihvaćen 21.10.2011. godine