

Izračun izgub v kotlu transformatorja

Mislav Trbušić, Marko Jesenik, Viktor Goričan in Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: mislav.trbusic@um.si

Calculation of transformer's tank losses

Abstract. The article presents a quasi-analytical method to calculate power transformer tank losses. The procedure is based on the following approach; a magnetic field at the tank wall is calculated by the 2D Finite Element Method while the analytical formula evaluates the losses.

1 Uvod

Izgube v transformatorju predstavljajo pomemben parameter, ki močno vpliva na konstrukcijo in ceno transformatorske enote. Pravzaprav se konstrukcija določa glede na izgube, in sicer so le-te pri načrtovanju prostostni parameter, kjer se na podlagi evalvirane cene izgub določi konstrukcija, pri kateri je cena izgub in transformatorske enote najnižja oz. pri kateri je transformatorska enota najbolj ekonomična [1].

V grobem se izgube v transformatorju delijo na tiste, ki so odvisne od obremenitve in tiste, ki so neodvisne od obremenitve. V prvo vrsto uvrščamo izgube v navitjih, kotlu, pokrovu, sponah, stebrih in jarmskih letvah ter ostalih konstrukcijskih delih. V drugo vrsto pa spadajo izgube v magnetnem jedru [2]. V tem članku se bomo osredotočili le na določanje izgub v transformatorskem kotlu.

Dandanes se za izračun izgub uporabljajo posebni programi, ki so zmožni izračunati razporeditev razsipanega magnetnega polja v transformatorskem oknu.

Takšne programske rešitve temeljijo na numeričnih postopkih, med katerimi je najbolj razširjena metoda končnih elementov (MKE). Pri izračunu izgub v kotlu je potrebno poznati prostorsko razporeditev magnetnega polja v steni kotla, za kar je v splošnem potreben celosten tridimenzionalen pristop (3D). Programi, ki omogočajo takšne izračune so časovno zahtevni, tako s stališča modeliranja, kot računanja. Seveda se je potrebno zavedati tudi dejstva, da so takšni programi plačljivi in njihovo vzdrževanje predstavlja majhen strošek za uporabnika. Zato je smotno raziskati kak alternativen pristop izračunu izgub v kotlu.

V nadaljevanju je predstavljena kvazi-analitična metoda izračuna izgub v kotlu transformatorja, pri kateri se razporeditev magnetnega polja izračuna numerično v odprtokodnem programu FEMM (Finite Element Method Magnetism), izgube v kotlu, pa se določijo preko analitično izpeljane formule, ki velja za prevodno ploščo v homogenem magnetnem polju. V tem primeru je magnetno polje izračunano v dvodimenzionalnem (2D) prostoru s privzeto osno simetrijo.

2 Izračun izgub v steni kotla transformatorja

Kot že omenjeno, je določanje izgub v kotlu transformatorja dokaj kompleksen problem, saj je potrebno poznati prostorsko razporeditev rasipnega magnetnega polja v steni kotla, pa tudi upoštevati nelinearnost materiala iz katerega je kotel izdelan. Kakorkoli, rešitev problema je prostorska porazporeditev izgub, ki je posledica vrtnčnih tokov v steni kotla. Ker je magnetno polje neenakomerno razporejeno po površini kotla, so tudi izgube lokalnega značaja, kar pomeni, da je največjo gostoto izgub pričakovati v področju najmočnejšega magnetnega polja. Seveda je za tako celostno sliko potrebno uporabiti program, ki omogoča magnetne izračune v 3D prostoru.

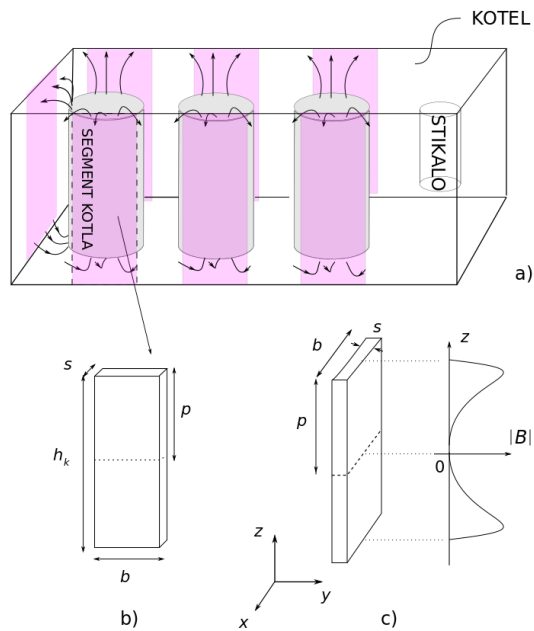
Po navadi je pri načrtovanju transformatorjev potrebno le oceniti izgube v kotlu in prostorska razporeditev le-teh nas v večini primerov ne zanima. V takem primeru se izračun lahko bistveno poenostavi in sicer:

- Izračun magnetnega polja lahko izvedemo v 2D osno simetrični postavitvi
- Za izračun izgub v kotlu lahko uporabimo analitično enačbo, ki velja za prevodno ploščo v magnetnem polju
- Namesto prostorske razporeditve magnetnega polja v steni kotla upoštevamo njegovo povprečno vrednost

V omenjenih okvirjih lahko dokaj hitro in enostavno, pa tudi relativno točno ocenimo izgube v kotlu in ostalih konstrukcijskih delih transformatorja.

2.1 Model stene transformatorskega kotla

V modelnem smislu, lahko steno kotla transformatorja obravnavamo na način, kot je prikazan na sliki 1. Slika 1-a prikazuje postavitev navitij znotraj kotla pri trifaznem regulacijskem transformatorju brez povratnih magnetnih poti oz. v tristebni izvedbi. Prav tako so na isti sliki shematsko nakazane silnice razsipanega magnetnega polja, ki se zaključujejo preko stene kotla. Če predpostavimo, da silnice magnetnega polja zavijejo v kotel le v področju širine navitja, potem lahko navidezno kotel razdelimo na sedem segmentov, ki so na sliki 1-a obarvani z vijolično barvo. Izgube v steni kotla lahko sedaj izračunamo kot seštevek izgub v posameznih segmentih.



Slika 1: Model kotla transformatorja: a) ponazoritev navitij in potek magnetnih silnic razsipanega polja; b) segment stranice kotla; c) prikaz razporeditve razsipanega magnetnega polja vzdolž segmenta stranice (absolutna vrednost)

Segment stranice kotla in principiелno razporeditev magnetnega polja vzdolž stranice kotla kaže slika 1-b,c. Z ozirom, da je razporeditev razsipanega magnetnega polja praktično simetrična glede na center navitja, je zadosti, če izgube ovrednotimo le v eni polovici segmenta in nato rezultat množimo z dva.

Izgube v polovici segmenta lahko izračunamo s pomočjo enačbe (1), ki je izpeljana za primer prevodne plošče v magnetnem polju [2].

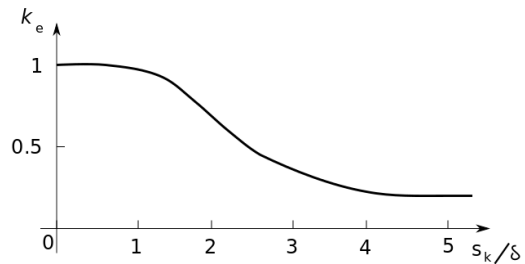
$$P_s = \sigma f^2 \bar{B}^2 p^3 \frac{b}{\left(\frac{p}{b}\right)^2 + 1} s \sqrt{\frac{S_n}{20000}}, [\text{W}] \quad (1)$$

Pri tem je σ – specifična prevodnost kotla [Sm^{-1}], f – omrežna frekvenca [s^{-1}], $\bar{B}$ – povprečna vrednost gostote razsipanega magnetnega polja na površini segmenta [T], p – polovična višina segmenta [m], b – širina segmenta [m], s – ekvivalentna debelina segmenta [m], S_n – nazivna moč transformatorja (moč pri kateri računamo izgube) [kVA].

V enačbi (1) nastopajo faktorji, ki jih je potrebno določiti iz geometrije in snovnih lastnosti kotla. Fizična debelina stene kotla s_k je odvisna od velikosti oz. moči transformatorja in se za enote od 5 MVA do 60 MVA giblje med 8 mm in 15 mm, proporcionalno z nazivno močjo [3]. V enačbi je uporabljen še korekcijski izraz $\sqrt{\frac{S_n}{20000}}$, ki ne nastopa v izvirnem zapisu enačbe (1), se pa izkaže, da so z upoštevanjem tega člena, rezultati nekoliko bližje meritvam. Zaradi harmonične narave

magnetnega polja in fizikalnih lastnosti materiala (specifične prevodnosti - σ in permeabilnosti - μ) iz katerega je izdelan kotel, bo magnetno polje v kotel prodrlo le do neke globine, zato je pri izračunih potrebno upoštevati ekvivalentno debelino stene kotla – s (enačba 3), ki je določljiva na podlagi vdorne globine - δ podane z enačbo (2) in grafa, ki ga kaže slika 2 [2].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, [\text{m}] \quad (2)$$

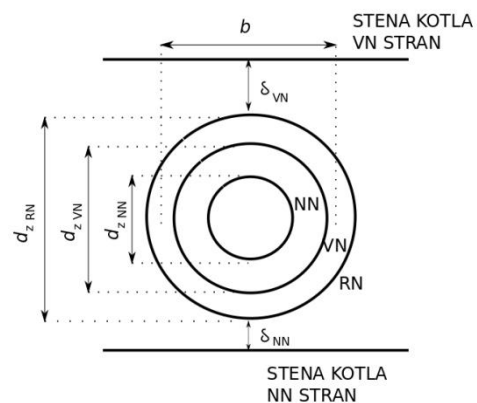


Slika 2: Krivulja za določanje ekvivalentne debeline stene kotla (ekvivalentne debeline segmenta) [2]

$$s = k_e s_k, [\text{m}] \quad (3)$$

Prav tako je potrebno določiti še širino segmenta - b , ki je za ta model izbrana kot srednja vrednost zunanjih premerov navitij, enačba (4). Takšen pristop je upravičen, saj je premer navitij oz. širina segmenta b približno desetkrat večja od razdalje do kotla ($b \gg \delta_{VN}$) in lahko z določeno gotovostjo predpostavimo, da izgube nastopajo le v širini pasu b pri čem je upoštevana povprečna vrednost polja znotraj pasu. Predpostavljeno je še, da se na stebru nahajajo tri navitja; najbližje stebru je nizkonapetostno navitje (NN), sledi mu visokonapetostno navitje (VN) in zunanje navitje, ki je regulacijsko navitje (RN) (slika 3).

$$b = \frac{d_{zNN} + d_{zVN} + d_{zRN}}{3}, [\text{m}] \quad (4)$$



Slika 3: Zunanji premeri navitij na stebru ene faze in določanje širine segmenta kotla b

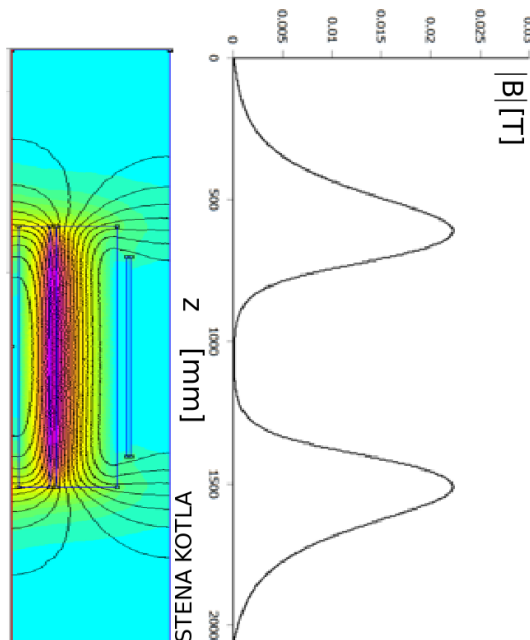
Poslednji parameter, ki se nanaša na geometrijo segmenta, je višina polovice segmenta - p , ki je enaka polovici višine kotla ($p = h_k/2$). Za izračun izgub v segmentu po enačbi (1) je potrebno poznati še povprečno vrednost gostote magnetnega pretoka ob steni kotla - $\bar{B}$, kar je opisano v nadaljevanju.

Z ozirom na sliko 1, lahko kotel trisebnega transformatorja z regulacijskim stikalom razdelimo na 7 segmentov, ker pa enačba velja za polovico segmenta, bodo celotne izgube v kotlu P_{kot} podane z izrazom (5).

$$P_{kot} = 14 P_s, \quad [W] \quad (5)$$

2.2 Izračun magnetnega polja ob steni kotla

Magnetno polje, ki je merodajno za izračun izgub z enačbo (1), je pravzaprav polje, ki ga dobimo iz izračuna razsipanega magnetnega polja. Po navadi nas izgube v kotlu zanimajo pri nazivni obremenitvi transformatorja, zato je v izračunu potrebno upoštevati, da sta NN in VN navitje obremenjeni z nazivnim tokom in da so ampérni ovoji izenačeni. Kakorkoli, pristop k izračunu polja je enak tistemu za določanje kratkostične napetosti, le da se vrednost polja odčita tik ob steni kotla. Izračun razsipanega magnetnega polja v programskem okolju FEMM kaže slika 4 [4]. Model na sliki 4 je 2D, z upoštevanjem osno simetrijo, magnetno polje pa je ovrednoteno vzdolž kotla, 1 mm od stene.



Slika 4: Rezultati izračuna razsipanega magnetnega polja v transformatorju s programom FEMM in prostorska razporeditev polja vzdolž stene kotla

Na sliki 4 lahko opazimo, da je absolutna vrednost krajevne porazdelitve magnetnega polja vzdolž stene kotla simetrična glede na sredino navitja. Ker v izrazu za izgube nastopa povprečna vrednost polja, se le ta določi preko izraza (6). Pri integraciji v izrazu (6) je dovolj, če se integrira le vzdolž zgornje polovice kotla od 0 do p , saj enačba (1) velja za polovico segmenta.

$$\bar{B} = \frac{1}{p} \int_0^p |B(z)| dz, \quad [T] \quad (6)$$

3 Rezultati izračuna

Na podlagi opisanega postopka je bil izveden izračun za transformatorsko enoto RT 25000 kVA – 33/6,3 kV, katerega podatki so povzeti iz reference [3]. V omenjenem viru se je avtor (L. Kralj) v okviru diplomske naloge ukvarjal z izračunom izgub v kotlu in jarmskih letvah na podlagi celovitega 3D pristopa s programom Flux. Poleg izračunov, se v [3] nahajajo še rezultati meritev kratkostičnih izgub, tako da se lahko poda še primerjava z dejanskimi razmerami.

Tabela 1: Podatki transformatorja RT 25000 kVA – 33/6,3 kV uporabljeni v izračunu

parameter	vrednost	Opis
S_n	25000 kVA	Nazivna moč
U_{n1}	6,3 kV	Nazivna napetost NN
U_{n2}	33 kV	Nazivna napetost VN
I_{n1}	2291,7 A	Nazivni tok v NN
I_{n2}	437,82 A	Nazivni tok v VN
m	3	Število faz
f	50 Hz	frekvenca
σ	5 MSm ⁻¹	Specifična prevodnost stene kotla
μ	150 μ_0	Permeabilnost stene kotla
δ	2,6 mm	Vdorna globina mag. polja
s_k	10 mm	Dejanska debelina kotla
k_e	~ 0,4	Faktor ekvivalentne debeline kotla (odčitamo iz slike 2)
s	4 mm	Ekvivalentna debelina kotla (debeline segmenta)
p	1028 mm	Polovična višina segmenta
b	853 mm	Širina segmenta
δ_k	80 mm	Povprečna oddaljenost zunanjega navitja od kotla $\delta_k = \frac{\delta_{VN} + \delta_{NN}}{2}$
$\bar{B}$	6,9 mT	Povprečna vrednost gostote magnetnega pretoka ob steni kotla

Izračunane in izmerjene vrednosti kratkostičnih izgub podaja tabela 2. Iz meritev sta direktno določljivi le dve komponenti izgub in sicer, celotne kratkostične izgube (P_k) in 'enosmerne' izgube v navitjih (I^2R). Na podlagi kratkostičnih meritev je praktično nemogoče opredeliti kolikšen delež izgub se nanaša na tiste v kotlu (P_{kot}) in tiste v ostalih konstrukcijskih delih (P_{kon}), zato so le te po navadi združene (P_v). Dodatne izgube v navitjih (P_{dod}), kot posledica rasipanega magnetnega polja znotraj navitij se prav tako ne morejo direktno izmeriti, lahko pa se pri znani geometriji dokaj točno izračunajo [5].

Izgube v ostalih konstrukcijskih delih označene z P_{kon} , so bile izračunane kot izgube v stebrih letvah, pri tem pa je bila uporabljena podobna metodologija kot je predstavljena v članku.

Čeprav je v tem članku opisan le postopek izračuna izgub v kotlu, so za potrebe primerjave podani še rezultati izračunov ostali izgub (Tabela 2).

Tabela 2: Rezultati izračuna izgub v kotlu in primerjava z meritvami

	2D izračun	3D izračun	meritev
P_k [W]	118730	N.A.	120000
I^2R [W]	92640	N.A.	90700
P_{dod} [W]	9160	N.A.	11500
P_{kon} [W]	2670	5000	N.A.
P_{kot} [W]	13347	9970	N.A.
P_v [W]	16017	14970	17800
$P_v = P_k - I^2R - P_{dod}$ $P_v = P_{kon} + P_{kot}$			

4 Sklep

Članek obravnava računski pristop ovrednotenja izgub v kotlu transformatorja na osnovi 2D izračuna razsipanega magnetnega polja in uporabe analitične formule (1). Primerjava predstavljene metode s celostnim 3D izračunom pokaže, da je ocena izgub v kotlu za 34% večja, kot pa pri 3D izračunu. Takšno odstopanje ne bi smelo presenečati, saj je predstavljeni model v veliki meri poenostavljen, predvsem, ker pri izračunu izgub ne upošteva krajevne razporeditve magnetnega polja vzdolž kotla ampak računa s srednjo vrednostjo. Po drugi strani, pa so celotne izgube v konstrukciji in kotlu P_v dokaj točno določne in se od 3D vrednosti razlikujejo za +7%, medtem, ko primerjava z meritvami kaže odstopanje -10%. Kakorkoli, s stališča načrtovalca transformatorja so v luči obravnavane tematike najbolj relevantne izgube P_v , ki pa se z opisano metodo lahko dokaj točno ocenijo. Če sedaj izrazimo izgube P_v z 'enosmernimi' izgubami I^2R , potem so le te za 2D izračun enake 17,3%, iz meritev pa dobimo vrednost 19,6%.

Na podlagi slednje primerjave, ki se pogosto uporablja v projektantski praksi, lahko podamo sklep, da je predstavljena metoda primerna za oceno izgub, ki nastanejo v kotlu in ostalih konstrukcijskih delih. Omeniti je še potrebno, da tak pristop k izračunu izgub

velja le za transformatorje brez magnetnih zaslonov na kotlu.

Literatura

- [1] »Transformer handbook 3th ed.«, ABB, 2007.
- [2] K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss, *Large Power Transformers*, Budapest: Académia Kiadó, 1987.
- [3] L. Kralj, Izgube v kotlu in konstrukciji transformatorja zaradi stresanega polja, Diplomsko delo, UL-FE, Ljubljana, 2010
- [4] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2
- [5] A. Jurman, Razsipano magnetno polje in lasnosti transformatorja, Magistrsko delo, UL-FE, Ljubljana, 2008.