

Posebnosti izgubne moči v velikih usmerniških transformatorjih

Maks Berlec¹, Konrad Lenasi²,

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: maks.berlec@fe.uni-lj.si

Povzetek. V delu je predstavljenih nekaj bistvenih problemov velikih usmerniških transformatorjev, ki pretežno izhajajo iz dejstva, da tokovi v navitjih nimajo sinusne oblike. Predpostavili smo idealno obliko časovnega poteka toka pri diodnem mostičnem usmerniku. Takšne tokove razstavimo s Fourierovo analizo. Pri izračunu je ključna porazdelitev magnetnega polja v oknu transformatorja. V ta namen smo uporabili metodo zrcaljenja.

Ključne besede: usmerniški transformator, metoda zrcaljenja, vrtnični tokovi, dodatne izgube

Specificity of Power Losses in Large Rectifier Transformers

Extended abstract. Additional power losses in large rectifier transformers are caused by induced eddy currents in their windings' conductors and other conductive parts of these transformers. When designing these transformers, the calculation of additional power losses inside windings shall be paid more attention than the calculation of those of the ordinary transformer. The currents in the windings are not sinusoidal and contain a large amount of harmonics, e.g. odd harmonics (Table 1). The most troublesome are the 180° phase-shifted harmonics (5, 7, 17, 19...) for causing a lot of additional power losses inside region A (Fig. 5).

As seen from Eq. 3, the magnetic field distribution inside the transformer window needs to be calculated. The method (Fig. 3) appropriate for this task is the method of images. It enables a direct, simple and fast calculation of the magnetic flux density.

The basic idea of the method is to remove ferromagnetic objects from the space of calculation in order to apply Eqs. 1 and 2. In that case the magnetic field can be calculated by superposition of magnetic fields of transformer windings and their images.

Key words: rectifier transformer, method of images, eddy currents

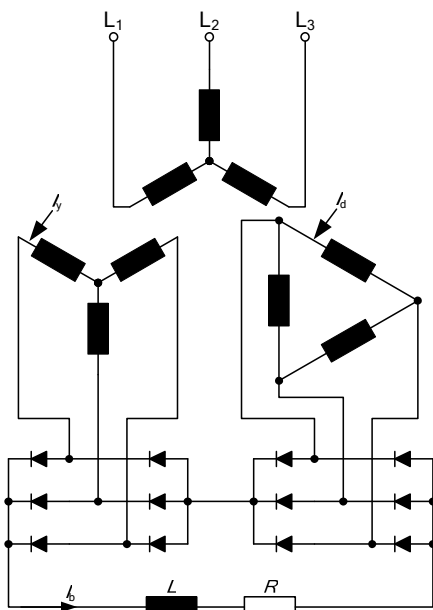
1 Uvod

Postopki za izračun izgubne moči in dodatnih izgubnih moči v velikih transformatorjih so že dokaj izpopolnjeni. Izgubne moči bomo v bodoče imenovali kar na kratko izgube. Enako velja tudi za ukrepe za zmanjšanje izgub. Pri velikih usmerniških transformatorjih obstaja nekaj zelo pomembnih posebnosti, ki se jih pogosto ne zavedajo niti specialisti s področja gradnje transformatorjev. Osnovni namen članka je torej opozoriti bralca na probleme, ki nastajajo

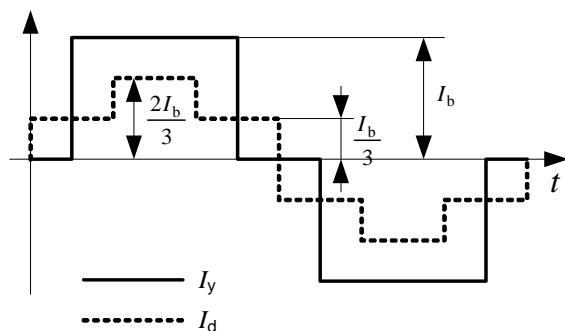
pri konstruiranju in proizvodnji usmerniških transformatorjev.

Veliki usmerniški transformatorji so večinoma vgrajeni v procese elektrolize, kar pa pomeni, da bodo morda v bližnji prihodnosti dobili pomembnejše mesto v elektrotehniko. Če se bo kot pogonsko gorivo uveljavil vodik, bo treba zgraditi številne elektrolize za pridobivanje le-tega. Za napajanje elektroliz potrebujemo zelo velike električne tokove in razmeroma nizke napetosti, kar pa narekuje že eno od posebnosti usmerniških transformatorjev. V procesih elektrolize je zahtevana tudi čim bolj gladka napetost, ki jo dosežemo z vsaj 12 pulznimi usmerniki (slika 1). Izdelava navitij za tokove, ki znašajo od nekaj deset tisoč pa do nekaj sto tisoč amperov, je velik tehnološki problem, saj je treba takšna navitja izdelati iz velikega števila vzporednih vodnikov. Zaradi nizke napetosti pa imamo težave pri doseganju prestave na sekundarnih navitjih transformatorja.

V članku ne obravnavamo navadnih izgub, ki nastajajo v vodnikih, po katerih je tok, pač pa obravnavamo izgube, ki nastanejo zaradi induciranih vrtničnih tokov v vodnikih navitja, ki se nahajajo v izmeničnem magnetnem polju. Te izgube imenujemo dodatne izgube, ki sicer nastajajo v vseh transformatorjih, vendar so pri usmerniških še bistveno izrazitejše. Za izračun dodatnih izgub moramo izračunati razporeditev magnetnega polja v oknu transformatorja. Zaradi optimiziranja transformatorja morajo biti izračuni magnetnega polja hitri, kar nas je vodilo k izbiri metode zrcaljenja. Magnetno polje lahko izračunamo na podlagi znanega toka. Pri navadnih transformatorjih so tokovi sinusni in znani že vnaprej, medtem ko pri usmerniških transformatorjih to ne velja.



Slika 1: Usmerniško vezje
Figure 1. Rectifier circuit.



Slika 2: Toka v navitjih
Figure 2. Winding current.

2 Časovni potek toka v navitjih

Transformator ima dve sekundarni navitji, na kateri sta priključena trifazna diodna mostiča. Eno sekundarno navitje je vezano v zvezdo, drugo pa v trikot. S tem podvojimo število faz na sekundarni strani. Število pulzov se podvoji tudi na usmerniških mostičih in tako dobimo $3 \times 2 \times 2 = 12$ pulzov. Na sliki 1 je prikazana vezava usmernikov in transformatorja, na sliki 2 pa časovni poteki tokov v posameznih vejah vezja oziroma navitjih. Pri določitvi poteka tokov predpostavimo popolnoma gladek bremenski tok ($L \rightarrow \infty$) in idealno komutacijo na usmernikih.

Tokovi v navitjih niso sinusni in imajo veliko vsebnost višjih harmonskih komponent, prisotne pa so samo lihe sinusne komponente. Na tem mestu je pomembno, da razlikujemo med tokovi v navitjih in njihovimi magnetizacijami. Tokovi v navitjih sekundarnega trikotja (slika 2) so sicer manjši od tokov, ki tečejo v navitjih sekundarne zvezde, vendar imajo

Številka harmonske komponente	Magnetizacija navitja ∇	Magnetizacija navitja Δ
1	100,0	100,0
3	0,0	0,0
5	-20,0	20,0
7	-14,3	14,3
9	0,0	0,0
11	9,1	9,1
13	7,7	7,7
15	0,0	0,0
17	-5,9	5,9
19	-5,2	5,2

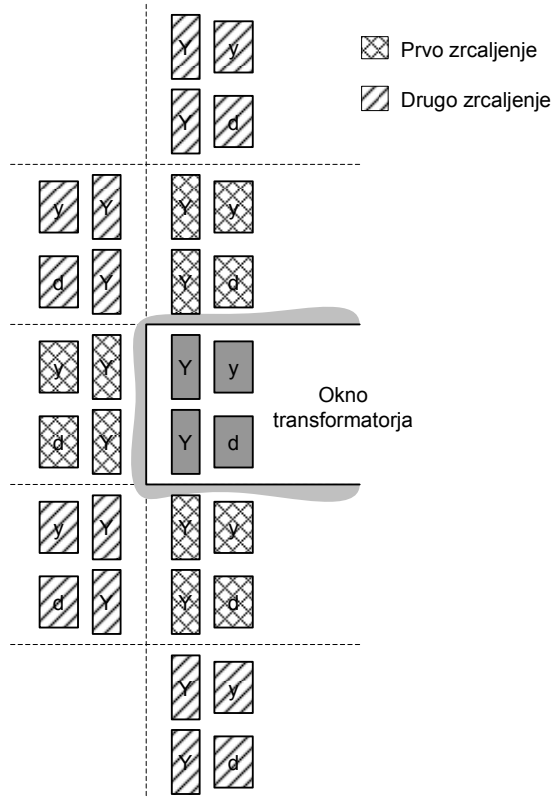
Tabela 1: Fourierova analiza tokov
Table 1. Fourier analysis of currents.

navitja sekundarnega trikotja za $\sqrt{3}$ krat več ovojjev. Končni rezultat je, da imajo višje harmonske komponente magnetizacij obeh navitij enake temenske vrednosti (tabela 1). Pozorni moramo biti na dejstvo, da imajo nekatere harmonske komponente (1, 11, 13, 23, 25...) enak predznak v obeh navitjih, medtem ko imajo preostale harmonske komponente (5, 7, 17, 19...) nasprotno predznake. Harmonske komponente z enakim predznakom so sofazne v obeh sekundarnih navitjih, komponente z nasprotnim predznakom pa so v protifazi. Slednje močno povečujejo dodatne izgube, in to lokalno, kar se izkaže za zelo neugodno. Pri navadnih transformatorjih pa vedno nastopajo le sofazne harmonske komponente, zato so dodatne izgube bistveno manj neugodne.

Za izračun dodatnih izgub moramo v oknu transformatorja izračunati dve magnetni polji, in sicer magnetno polje, ki ga povzročajo sofazne komponente in magnetno polje, ki ga povzročajo protifazne komponente.

3 Izračun magnetnega polja

Za izračun smo uporabili metodo preslikav, s katero lahko hitro, natančno in neposredno izračunavamo gostoto magnetnega pretoka v poljubni točki okna transformatorja. Smisel metode je v tem, da se znebimo feromagnetnih teles v obravnavanem prostoru s prezrcaljenimi tokovi. Feromagnetne površine delujejo za navitja kot zrcala. Tako nastopa v celotnem prostoru le permeabilnost μ_0 in lahko uporabimo Biot-Savartov zakon za izračun magnetnega polja. Konfiguracija problema je takšna, da je načeloma potrebnih neskončno število zrcalnih slik, v resnici pa že po dveh zrcaljenjih (slika 3) dobimo dovolj natančne rezultate. Za izračun magnetnega polja v oknu pa sicer lahko uporabimo tudi katerokoli drugo metodo. Vpliv posameznega navitja izračunamo z enačbama 1 in 2 [3].



Slika 3: Navitja in njihove zrcalne slike
Figure 3. Windings and their mirror images.

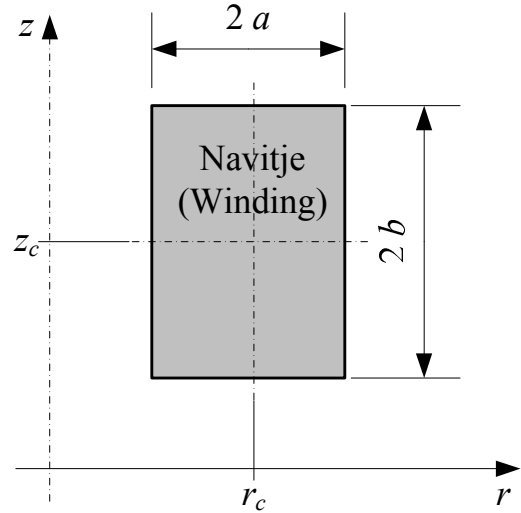
$$B_r = -\frac{\mu_0 I}{8 \pi a b} \left(\frac{x+a}{2} \ln \frac{(y+b)^2 + (x+a)^2}{(y-b)^2 + (x+a)^2} - \frac{x-a}{2} \ln \frac{(y+b)^2 + (x-a)^2}{(y-b)^2 + (x-a)^2} + (y+b) \left(\arctan \frac{x+a}{y+b} - \arctan \frac{x-a}{y+b} \right) - (y-b) \left(\arctan \frac{x+a}{y-b} - \arctan \frac{x-a}{y-b} \right) \right) \quad (1)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{8 \pi a b} \left(\frac{y+b}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2}{(x-a)^2 + (y+b)^2} - \frac{y-b}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + (y-b)^2}{(x-a)^2 + (y-b)^2} + (x+a) \left(\arctan \frac{y+b}{x+a} - \arctan \frac{y-b}{x+a} \right) - (x-a) \left(\arctan \frac{y+b}{x-a} - \arctan \frac{y-b}{x-a} \right) \right) \quad (2)$$

$$x = r - r_c$$

$$y = z - z_c$$

Pomen simbolov v enačbah 1 in 2 je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Pomen simbolov v enačbah (1) in (2).
Figure 4. Explanation of symbols in Eqs (1) and (2).

4 Predstavitev problemov

Opisali bomo tri probleme, ki nastopajo pri velikih usmerniških transformatorjih. Opisani problemi so posledica velikih tokov in njihovih višjih harmonskih komponent, medtem ko se s problemom prestave transformatorja in tehnološkimi problemi ne bomo ukvarjali.

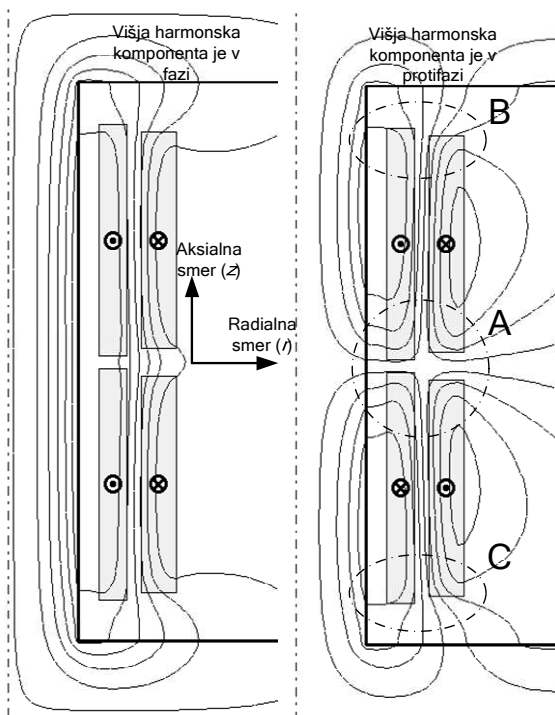
4.1 Lokalna pregrevanja v navitjih

Huda lokalna pregrevanja nastopajo na sredini navitja (slika 5) v območju A, ker na tem mestu protifazne harmonske komponente povzročajo razmeroma močno magnetno polje v radialni smeri, medtem ko je magnetno polje sofaznih harmonskih komponent aksialno. Močno radialno polje nastopa tudi v območjih B in C, vendar tukaj tako sofazne kot tudi protifazne harmonske komponente povzročajo približno enako porazdelitev magnetnega polja. Dodatne izgube v navitjih računamo z enačbo 3.

$$P = \frac{\pi^2 f^2}{6 \rho} \left(d_z \int_V B_r^2 dV + d_r \int_V B_z^2 dV \right) \quad (3)$$

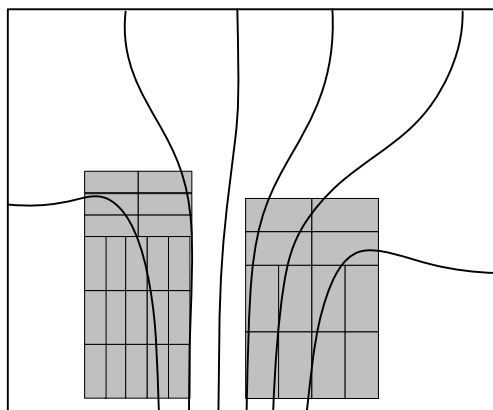
- V – prostornina navitja
- B_r, B_z – radialna in aksialna komponenta gostote magnetnega pretoka
- d_r, d_z – radialna in aksialna dimenzija vodnikov navitja
- f – frekvenca harmonske komponente
- ρ – specifična upornost vodnikov

Enačba 3 nam nakazuje rešitev (omilitev) problema. Izgube lahko zmanjšamo tako, da vodnik navitja obrnemo z manjšo dimenzijo v smeri vektorja gostote magnetnega pretoka. To pomeni, da pri veliki aksialni gostoti magnetnega pretoka postavimo vodnike pokonci (manjša dimenzija je d_r), medtem ko pri veliki radialni



Slika 5: Porazdelitev magnetnega polja
Figure 5. Magnetic field distribution.

gostoti magnetnega pretoka vodnike obrnemo tako, da je manjša dimenzija d_z (slika 6). Ta ukrep je ustrezen v območjih B in C. V območju A pa sofazne višje harmonske komponente toka povzročajo pretežno aksialno gostoto magnetnega pretoka, medtem ko protifazne višje harmonske komponente toka povzročajo pretežno radialno komponento gostote magnetnega pretoka. Ker vodnike lahko obrnemo le v eno smer, jih obrnemo tako, da so dodatne izgube čim manjše (ponavadi $d_r < d_z$), kar je ugodna postavitev za sofazne harmonske komponente toka in neugodna za protifazne. Protifazne komponente toka nam tako v območju A povzročajo dodatne izgube, ki lahko znašajo nekaj 10 kW, kar moramo upoštevati pri dimenzioniranju hlajenja transformatorja. Zmanjšanje



Slika 6: Ugodna postavitev vodnikov
Figure 6. Propitious placement of conductors.

dodatnih izgub v območju A bi lahko dosegli s povečanjem števila vzporednih vodnikov, kar pa pomeni dodatne stroške in tehnološke probleme.

4.2 Dodatne izgube v kotlu

Iz območja A (slika 5) izhaja precej magnetnega pretoka v smeri kotla transformatorja, ki v kotlu inducira vrtilne tokove. Tako v kotlu nastanejo znatne dodatne izgube, stene kotla pa se segrevajo. Težave lahko ublažimo z odmikom stene kotla od navitij transformatorja. Slaba stran tega ukrepa je malenkostno povečanje stroškov za kotel in znatno povečanje količine olja. Obstaja pa tudi možnost vgradnje lameliranega feromagnetnega zaslona.

4.3 Vrtinčni toki v kotlu zaradi vezi in izvodov

Ogromni tokovi, ki jih vodimo iz transformatorja v usmerniška mostiča, povzročajo velike magnetne pretoke v kotlu. Inducirani vrtilni tokovi povzročajo tolikšne izgube, da se stene kotla močno pregrevajo. Zato je treba steno kotla izdelati iz električno neprevodne, mehansko in toplotno odporne snovi, npr. iz vitroplasta.

5 Literatura

- [1] M. J. Heathcote, Transformer Book, 12th edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1998
- [2] A. Kloss, A Basic Guide to Power Electronics, BBC Brown Boveri & Company Ltd, 1984.
- [3] M. Železnjov, Osnove teorije elektromagnetnega polja, FER, Univerza v Ljubljani, 1991, pp 187
- [4] K. Karsai, D. Kerenyi, L. Kiss, Large Power Transformers, Akademiai Kiado, Budapest, 1987

Maks Berlec je diplomiral leta 1985, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1995 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Po diplomi se je zaposlil v razvojnem oddelku tovarne transformatorjev Elma Črnuče, kjer se je ukvarjal s problemi izračuna in tehnološkimi problemi dušilk. Od leta 1988 je zaposlen v Laboratoriju za električne stroje na Fakulteti za elektrotehniko. Ukvarja se s teorijo elektromagnetnih polj, meritvami na električnih strojih, simulacijami in programiranjem.

Konrad Lenasi je diplomiral leta 1966, magistriral leta 1974 in doktoriral leta 1975 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 1967 se je zaposlil v razvojnem centru v tovarni Energoinvest Sarajevo. Leta 1971 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. V letu 1980 je začel sodelovati kot znanstveni svetnik s tovarno transformatorjev Energoinvest Ljubljana. Ukvarja se z razvojem novih izdelkov, novimi konstrukcijskimi rešitvami in izdelavo programske opreme.