

# Vpliv geomagnetno induciranih tokov na izgube v navitjih energetskega transformatorja

Jure Pavlin<sup>1</sup>, Damijan Miljavec<sup>2</sup>, Peter Kosmatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kolektor-Etra d.o.o., Šlandrova ulica 10, 1231 Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: peter.kosmatin@fe.uni-lj.si

## Effects of geomagnetically induced currents on power transformer winding losses

*Geomagnetically induced currents (GIC) in an electrical power system as an effect of a solar storm may cause a disruption in a power transformer operation. The paper analyses the effect of GIC on a transformer winding losses. Based on a real transformer design data, both three-legged and five-legged transformer model was built and analyzed using finite-element method. The presented research comprises a calculation procedure for an evaluation of winding eddy current losses and circulation current losses. The results suggest that a special attention to the transformer design has to be taken in order to increase its robustness to the GIC effects.*

## 1 Uvod

S pojmom geomagnetno inducirani tokovi (v nadaljevanju GI tokovi) označujemo električne tokove, ki se inducirajo zaradi motenj v sicer stacionarnem geomagnetnem polju. Problematiko teh tokov, katerih glavni vzrok je Sonce, so se začeli zavedati s prvimi telegrafskimi napravami, ko je bilo na trenutke z njimi nemogoče operirati [1].

Današnja civilizacija sloni na globalno povezanih omrežjih, pa naj bo to omrežje telekomunikacijsko, elektroenergetsko, železniško ali le sistem prevodnih plinovodnih ali naftovodnih cevi. Vsem tem omrežjem je skupno, da prevajajo električni tok in se razprostirajo na dolgih razdaljah širom sveta ter so na določenih mestih na različne načine povezani z Zemljo (električno ozemljeni).

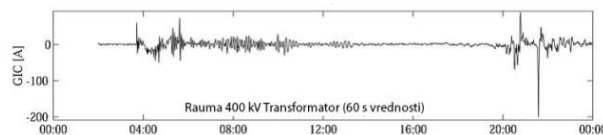
GI tokovi povzročajo največje težave v elektroenergetskem sistemu, kjer se njihov negativni vpliv iz leta v leto povečuje zaradi vse večje povezanosti omrežij in vse daljših povezav. Najbolj znan primer negativnega vpliva GI tokov se je zgodil 13.3.1989 v Kanadi, ko je zaradi okvare na transformatorjih za devet ur brez elektrike ostala cela provinca Quebec [1].

Povečana intenzivnost in pogostost GI tokov na Zemlji sovпада z 11-letnim Sončevim ciklom prepolarizacije magnetnega polja. Pri tem prihaja do zmanjšanja magnetnega polja, kar pomembno vpliva na

izbruh v koroni, zunanji Sončevi atmosferi, in širitev oblaka plazme v medplanetarni prostor.

Po Faradey-evem zakonu o elektromagnetni indukciji se ob časovno spremenljivem magnetnem polju na Zemlji inducira električno polje z velikostjo potencialne razlike med 3 in 6 V/km. Pri zelo dolgih tokovnih poteh z nizko impedanco in ozemljenih le na skrajnih točkah se tako pojavi občutna potencialna razlika, ki lahko požene relativno velike GI tokove.

Na sliki 1 je prikazan potek GI tokov v odvisnosti od lokalnega časa (abscisna os prikazuje čas dneva z razponom skale od 00:00 do 24:00) posnet 24.3.1991 na jugu Finske (Rauma). Tokovna meritev je bila izvedena v ozemljitvenem vodniku 400 kV transformatorja. Najvišja izmerjena vrednost je bila 201 A oziroma 67 A na fazo, in sicer kot srednja vrednost v enominutnem intervalu [2].

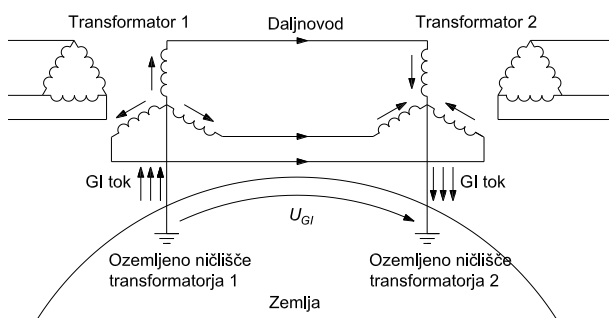


Slika 1: Izmerjeni potek GI toka v odvisnosti od časa

## 2 Vpliv GI tokov na transformator

Ob pojavu GI tokov v elektroenergetskih omrežjih lahko transformator postane šibki člen omrežja. Zaradi nizke frekvence GI tokov, območje mHz, jih v primerjavi z omrežno frekvenco 50 Hz obravnavamo kot kvazi enosmerne tokove. Ti tokovi stečejo preko ozemljitvene točke transformatorja skozi navitja v elektroenergetsko omrežje [3], [4]. Shematski prikaz poteka GI tokov lahko vidimo na sliki 2.

Inducirani enosmerni tok se prišteje magnetilnemu in jedro transformatorja magneti z dodatnim enosmernim magnetnim pretokom. Njegova vrednost je odvisna od amplitude enosmernega toka  $I_{DC}$ , števila ovojev navitja  $N$ , ki vodijo enosmerni tok, in magnetne upornosti  $R_m$  na njegovi poti. Enosmerni magnetni pretok se v eni polperiodi prišteje k izmeničnemu magnetnemu pretoku, kar jedro spravi v stanje nasičenja, v drugi polperiodi pa prihaja do nasprotnega pojava. Gostota magnetnega pretoka v jedru je takrat daleč pod kolenom magnetilnice. V polvalu magnetnega



Slika 2: Shema poti GI tokov skozi transformator in elektroenergetsko omrežje

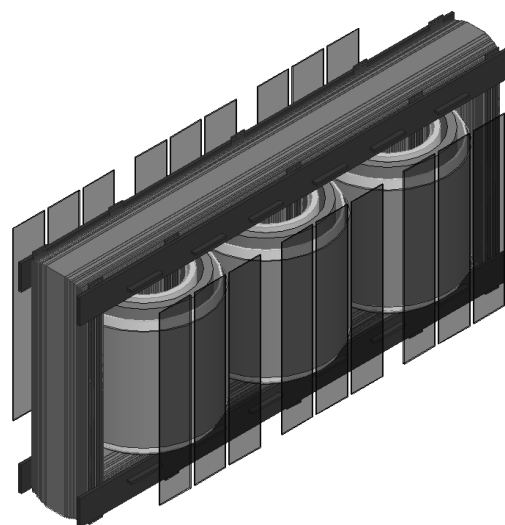
pretoka, kjer magnetno jedro transformatorja prehaja v nasičenje, se povečuje stresanje magnetnega pretoka v okolici navitij. S tem pa se povečujejo predvsem vrtilne in krožne izgube v navitjih, ki hkrati lahko spreminjajo tako mesto kot temperaturo najtoplejšega dela navitja [5]. Ob neupoštevanju opisanega pojava v času konstruiranja energetskega transformatorja se njegova življenjska doba z obratovanjem v takšnih pogojih lahko občutno skrajša.

### 3 Simulacijski model

Za ocenitev dodatnih izgub v navitjih transformatorjev ob prisotnosti GI tokov sta bila zgrajena dvodimenzionalni in tridimenzionalni simulacijski model (slika 3) tri- in petstebrnega transformatorja z nazivnimi podatki zbranimi v tabelah 1 in 2. Uporabljen je bil programski paket Ansys Maxwell, ki elektromagnetne veličine glede na podano geometrijo, vzbujanje in robne pogoje določa z metodo končnih elementov. Primerjava simulacijskih rezultatov izgub je bila izvedena brez in z vsiljenimi GI tokovi v vrednosti faznega linijskega toka 30 A in 60 A. Maksimalna vrednost je bila izbrana glede na predstavljene meritve GI tokov na Finskem [2].

Tabela 1: Podatki tristebnega transformatorja

Tip transformatorja:	YNyn0+d
Nazivna moč:	$S = 25$ MVA
Število faz:	$m = 3$
Frekvenca:	$f = 50$ Hz
Medfazna napetost na NN strani:	$U_{NN} = 22$ kV
Medfazna napetost na VN strani:	$U_{VN} = 138$ kV
Fazni tok na NN strani:	$I_{NN} = 656,1$ A
Fazni tok na VN strani:	$I_{VN} = 120,7$ A



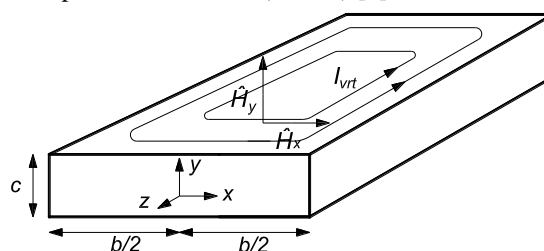
Slika 3: Zgrajeni model petstebrnega transformatorja

Tabela 2: Podatki petstebrnega transformatorja

Tip transformatorja:	YNyn0+d
Nazivna moč:	$S = 300$ MVA
Število faz:	$m = 3$
frekvenca:	$f = 50$ Hz
Medfazna napetost na NN strani:	$U_{NN} = 115$ kV
Medfazna napetost na VN strani:	$U_{VN} = 400$ kV
Fazni tok na NN strani:	$I_{NN} = 1506$ A
Fazni tok na VN strani:	$I_{VN} = 509,4$ A

### 4 Vrtilne izgube v navitjih

Vrtilne izgube kot posledica induciranih vrtilnih tokov v prevodnih elementih transformatorja (navitje, vezi, kotel,...) nastanejo, ko se prevodnik nahaja v izmeničnem magnetnem polju. V vsakem prevodnem materialu si lahko zamislimo mnogo zaključenih prevodnih zank. Ko takšna zaključena zanka zaobjame del izmeničnega magnetnega pretoka, le-ta povzroči po Faraday-evem zakonu o elektromagnetni indukciji inducirano napetost, ki v zanki posledično požene tok. Za izpeljavo enačbe za izračun vrtilnih izgub vzemimo vodnik pravokotne oblike (slika 4) [6].



Slika 4: Pravokotni vodnik v magnetnem polju

Magnetna poljska jakost  $H$  na lokaciji izbranega vodnika v transformatorju ima smer, ki jo lahko razdelimo na dve komponenti vektorja  $H_x$  in  $H_y$  (slika 4), paralelni z geometrijskima stranicama izbranega pravokotnega vodnika. Komponenta magnetne poljske jakosti  $H_z$ , ki je usmerjena vzdolž vodnika v transformatorju, je pri tem zanemarljivo majhna. Prispevek k vrtilnim izgubam posamezne komponente  $H_x$  in  $H_y$  lahko izračunamo ločeno in jih nato preprosto seštejemo. Slednje je dopustno zaradi zanemarljivega medsebojnega vpliva induciranih vrtilnih tokov.

Končna oblika enačbe za izračun vrtilnih izgub na enoto volumna  $V$  je tako [6]

$$\frac{P_{vrt,x}}{V} = \frac{\hat{H}_x^2 q}{\sigma c} \left[ \frac{\sinh(qc) - \sin(qc)}{\cosh(qc) + \cos(qc)} \right], \quad (1)$$

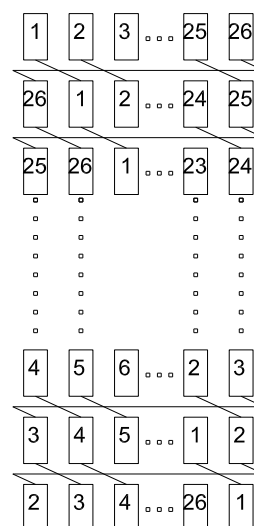
kjer je  $\sigma$  specifična prevodnost snovi vodnika,  $c$  dolžina stranice vodnika pravokotne na komponento vektorja  $H_x$  in  $q$  inverzna vrednost vdorne globine

$$q = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}. \quad (2)$$

Pri tem je  $\omega$  krožna frekvenca in  $\mu$  ter  $\sigma$  permeabilnost in prevodnost vodnika. Enačba (1) velja tudi za višje frekvence, kjer je vpliv kožnega pojava izrazitejši. V energetskih transformatorjih, kjer so praviloma dimenzije vodnikov manjše ali enake vdorni globini, lahko dodatno poenostavimo zgornjo enačbo [6], [7].

Pri izračunu vrtilnih izgub je bil v visokonapetostna in nizkonapetostna navitja vsiljen nazivni tok. V tem primeru se magnetna pretoka v jedru kot posledica tokov v obeh navitjih kompenzirata in ostane samo stresano magnetno polje, ki se zaključuje izven transformatorskega jedra. Temenske vrednosti magnetne poljske jakosti  $H$ , ki so potrebne za izračun vrtilnih izgub (1), je treba pridobiti na lokaciji vsakega posameznega vodnika, in sicer njegovo  $x$  in  $y$  komponento. Nato sledi izračun vsote delnih vrtilnih izgub po vseh vodnikih. V primeru enakomerne porazdelitve enostavnega navitja je mogoče vrtilne izgube pridobiti z volumskim integralom (1) po celotnem navitju. Pri tem je treba upoštevati faktor polnjenja.

Izvedene so bile tri simulacijske različice vzbujanja simulacijskega modela, in sicer brez prisotnosti GI tokov ter s prisotnostjo GI toka 30 A in 60 A. Rezultati so prikazani v tabeli 3 in 4, kjer je  $I_{GI}$  velikost GI toka,  $P_{vrt}$  velikost izgub zaradi vrtilnih tokov, v zadnjem stolpcu pa je izračunan delež vrtilnih izgub glede na velikost ohmskih izgub v navitjih.



Slika 5: Transpozicija 26 paralelnih vodnikov nizkonapetostnega navitja

Tabela 3: Vrednost vrtilnih izgub v tritebnem transformatorju

$I_{GI}$ (A)	$P_{vrt}$ (kW)	Delež $I^2R$ (%)
0	2,8	5,1
30	4,1	7,1
60	10,6	19,2

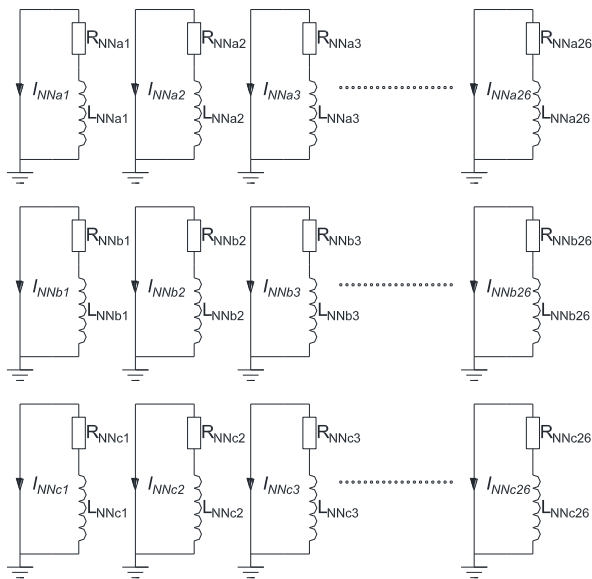
Tabela 4: Vrednost vrtilnih izgub v petstebnem transformatorju

$I_{GI}$ (A)	$P_{vrt}$ (kW)	Delež $I^2R$ (%)
0	30,2	6,1
30	32,2	6,5
60	37,0	7,4

## 5 Krožni tokovi

Velikost vrtilnih izgub v navitjih transformatorja lahko zmanjšamo z razdelitvijo vodnikov navitja na med seboj izolirane paralelne vodnike manjših dimenzij. S tem pa se lahko pojavijo krožni tokovi, ki povzročajo dodatne izgube. Krožni tok se v paralelnih vodnikih pojavi, če posamezni paralelni vodniki zaobjemajo različno količino magnetnega pretoka. Posledično pri tem prihaja do spremembe induciranih napetosti med paralelnimi vodniki. Preprečitev takšnega pojava lahko dosežemo s primerno transpozicijo paralelnih vodnikov po celotni višini navitja s čimer zagotovimo njihovo enakomerno izpostavljenost stresanemu magnetnemu polju.

S pomočjo uporabe modernih programskih orodij lahko za določitev porazdelitve tokov skozi paralelne vodnike uporabimo dva pristopa. Lahko uporabimo metodo več navitji (ang. *multi-winding transformer theory*), ki na osnovi pridobljene matrike stresanih induktivnosti med paralelnimi ovoji, analitično določi



Slika 6: Vezava vodnikov nizkonapetostnega navitja

porazdelitev tokov [8]. Drugi način pa zahteva uporabo tranzientnega reševalnika skupaj z detajlnim modelom geometrije in električnih povezav obravnavanega navitja. V predstavljenih simulacijskih rezultatih je bil uporabljen slednji način.

Simulacija krožnih tokov je bila izvedena le na tristranskem transformatorju, ki ima nizkonapetostno navitje sestavljeno iz 26 paralelnih vodnikov. V modelu je bila uporabljena transpozicija vodnikov kot je prikazana na sliki 5. Pri opisani transpoziciji je izvedenih 25 zamenjav položaja paralelnega vodnika po celotni višini navitja. Vzbujanje simulacijskega modela je bilo izvedeno z vsiljevanjem nazivnega toka v visokonapetostno navitje, medtem ko so bili zaradi preizkusa kratkega stika vsi paralelni vodniki nizkonapetostnega navitja kratko sklenjeni (slika 6).

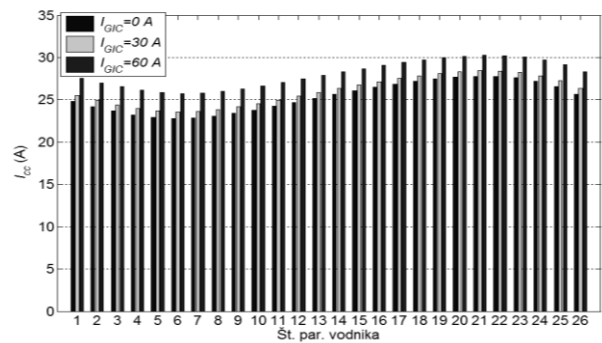
Rezultati simulacije, razvidni v tabeli 5, so vrednosti krožnih izgub brez in z upoštevanjem pojava GI tokov (30 in 60 A). Na sliki 7 pa so prikazani tokovi po posameznih paralelnih vodnikih faze A za različne vrednosti GI tokov.

Tabela 5: Izgube zaradi krožnih tokov

$I_{GI}$ (A)	$P_{cc}$ (W)	Delež $I^2R$ (%)
0	131,50	0,49
30	1626,66	6,05
60	6112,20	22,72

## 6 Zaključek

Po opravljenih simulacijah lahko zaključimo, da prisotnost GI tokov v elektroenergetskem sistemu močno vpliva na obratovalno stanje transformatorjev,



Slika 7: Grafični prikaz efektivnih vrednosti tokov v posameznih paralelnih vodnikih nizkonapetostnega navitja

kjer je zaradi povečanih izgub v vseh prevodnih elementih povečana toplotna obremenitev izolacije. Za trge s povečano izpostavljenostjo sončevim aktivnostim (npr.: Skandinavija) je treba zaradi povečanja obravnavanih izgub primerno prilagoditi geometrijo in hlajenje transformatorja in s tem preprečiti pretirano zmanjševanje njegove življenjske dobe. Slednje je pomembnejše pri transformatorjih z majhno ničelno magnetno upornost (trifazni petstebrni transformator ali enofazni transformator), kjer je izrazitejša nasičenost jedra in posledično povečanje stresanja magnetnega polja.

## Literatura

- [1] D. R. Pirjola, "Space weather effects on power grids," in *Space Weather- Physics and Effects*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 269–288.
- [2] R. J. Pirjola, A. T. Viljanen, and A. A. Pulkkinen, "Research of Geomagnetically Induced Currents (GIC) in Finland," in *2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, 2007, pp. 269–272.
- [3] P. R. Price, "Geomagnetically induced current effects on transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 4, pp. 1002–1008, Oktober 2002.
- [4] K. Zheng, D. Boteler, R. J. Pirjola, L. Liu, R. Becker, L. Marti, S. Boutilier, and S. Guillon, "Effects of System Characteristics on Geomagnetically Induced Currents," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 2, pp. 890–898, Apr. 2014.
- [5] L. Marti, A. Rezaei-Zare, and A. Narang, "Simulation of Transformer Hotspot Heating due to Geomagnetically Induced Currents," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 1, pp. 320–327, Jan. 2013.
- [6] S. V. Kulkarni, *Transformer engineering: design, technology, and diagnostics*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [7] R. M. Del Vecchio, Ed., *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [8] F. S. Rothe, *An introduction to power system analysis*, vol. 1953. New York: John Wiley.