

Prenos udarne napetosti iz visokonapetostnega na terciarno navitje močnostnega transformatorja

Mislav Trbušič¹, Anton Hamler¹, Konrad Lenasi² (upok.)

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: ¹mislav.trbusic@um.si ¹anton.hamler@um.si ²konrad.lenasi@fe.uni-lj.si

Surge voltage transfer from a high-voltage winding to a tertiary winding in a power transformer

Abstract. In the paper the influence of transferred surge wave from a high voltage winding to a tertiary winding of a power transformer is investigated numerically. When testing the high-voltage winding of a power transformer on the lighting impulse, some voltage is transferred to the non-tested windings. While the transformer windings are coupled mutually capacitively and magnetically, the oscillations in the transferred voltage to non-tested windings are to be expected. The aim of the article is to determine the spatial distribution of the oscillations' amplitudes along a tertiary winding with short-circuited and earthed ends. For this purpose, a transient model of transformer windings is represented by an equivalent electric circuit, for which the system of ordinary differential equations of nodal voltages and inductive currents is set and solved using Octave software. The numerical results obtained by calculations show approximately a sinusoidal distribution of the amplitudes in self-oscillations along the tertiary winding, which is in good agreement with the analytical predictions based on the oscillation theory.

1 Uvod

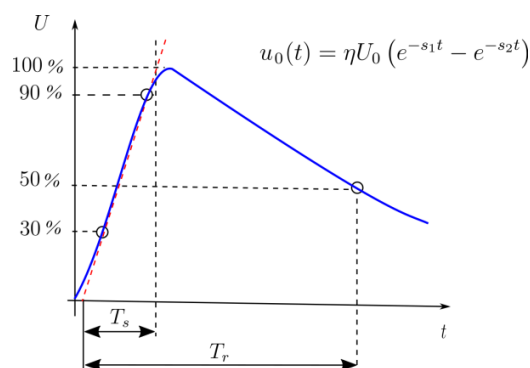
Pri preskušanju visokonapetostnega navitja (VN) močnostnega transformatorja z udarnim napetostnim valom, ki ustreza obliki aperiodičnega napetostnega sunka, ki se pojavi v elektroenergetskem omrežju pri atmosferski razelektritvi, se zaradi kapacitivne in induktivne povezave med navitji del udarnega vala prenese na ostala navitja [1][2][3][4]. Predvsem je kritičen prenos udarnega vala na regulacijsko navitje, kjer se lahko pojavijo napetostna nihanja v navitju katerih amplitude dosežejo tudi do 50% maksimalne vrednosti udarnega vala, kar lahko v določenih primerih povzroči poškodbo izolacije navitja in posledično okvaro transformatorja [1][2]. Manj kritično, vendar prav tako pomembno s stališča koordinacije izolacije v transformatorju je prenos udarne napetosti iz visokonapetostnega na nizkonapetostno (NN) oziroma terciarno navitje (TN), ki se praviloma nahaja tik ob stebru [2]. Problematika prenosa udarne napetosti na NN navitje transformatorja pride do izraza pri posebnih konstrukcijskih izvedbah NN navitja, kjer lahko nastale prenapetosti povzročijo škodo na izolaciji navitja.

Cilj članka je raziskati napetostne razmere znotraj TN navitja med preskušanjem VN navitja z udarnim napetostnim valom in izračunati krajevno razporeditev amplitud vzdolž TN navitja. Z ozirom, da TN navitja praviloma ne preizkušamo z udarno napetostjo, so tovrstni izračuni lahko v pomoč pri načrtovanju izolacije navitja.

2 Matematični model

2.1 Matematični model udarne preizkusne napetosti (udarnega vala)

Kot je bilo omenjeno v uvodu, je namen preizkušanja transformatorskih navitij z udarnim valom preverjanje ustreznosti izolacije navitij, ki so med obratovanjem lahko izpostavljena podobnim napetostnim sunkom zaradi atmosferskih razelektritev. Karakteristično za obliko udarnega vala je strmo čelo, kjer doseže udarni val maksimalno vrednost v rangu mikrosekunde in položen hrbet, kjer vrednost udarnega vala pade na polovico amplitudne vrednosti. Brez superponiranih oscilacij nastopi takšno stanje nekaj deset mikrosekund po sprožitvi vala [1]. S standardom IEC je oblika udarnega vala natančno predpisana z vršno vrednostjo udarnega vala U_0 , ki je enaka nazivni vrednosti preizkusne napetosti, z amplitudnim faktorjem η , časom čela T_s in časom, ko pade vrednost udarne napetosti na polovico maksimalne vrednosti (časom hrbta) T_r , pri tem T_s določa strmino čela, T_r pa položnost hrbta (Slika 1)[5][6].



Slika 1: Oblika in definicija časovnih konstant pri standardnem udarnem valu po IEC 60076-4.

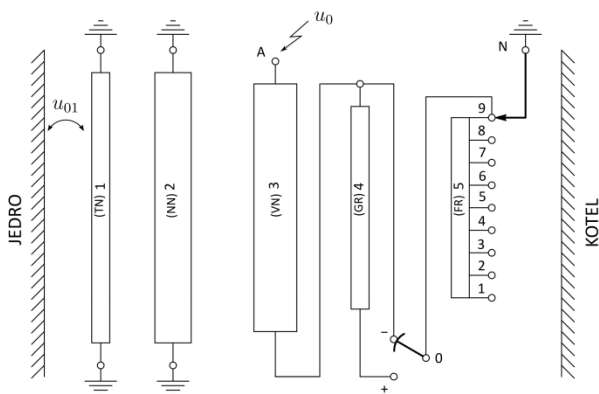
$$u_0(t) = \eta U_0 (e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t}) \quad (1)$$

Vrednosti parametrov standardnega IEC udarnega vala 1,2/50 μ s s tolerancami:

- η ... amplitudni koeficient 1,036
- U_0 ... nazivna vrednost preizkusne napetosti
- s_1 ... časovna konstanta hrpta 15000 s^{-1}
- s_2 ... časovna konstanta čela 2470000 s^{-1}
- T_s ... čas čela $T_s = 1,2 \mu s \pm 30 \%$
- T_r ... čas, ko pade napetost na polovico maksimalne vrednosti
- $T_r = 50 \mu s \pm 20 \%$

2.2 Model transformatorja za tranzientne izračune

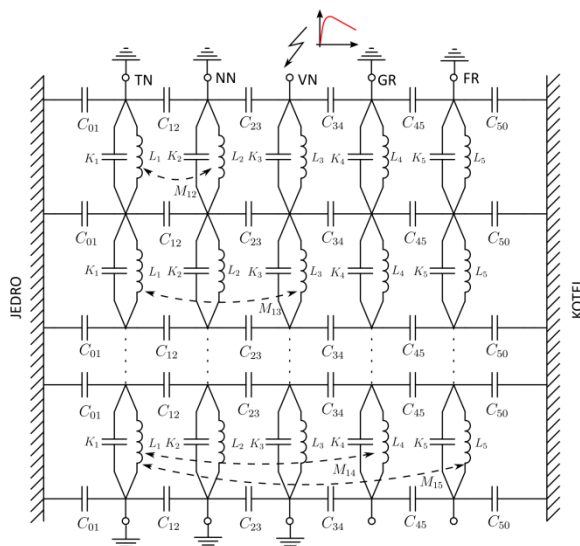
Model transformatorja za namen preučevanja prenosa udarne napetosti med navitji smo naredili za primer transformatorske enote 31,5 MVA - 110/21/(10,5) kV YNyn6+(d5), podobne kot jo uporabljajo elektrodistribucijska podjetja v Sloveniji. Slika 2 kaže razporeditev navitij v oknu transformatorja, pri tem je regulacija napetosti na visokonapetostni strani v obsegu +/- 16 % (8+/-2%) izvedena z grobo (GR) in fino (FR) stopnjo regulacije. Oznaka napetosti u_{01} na sliki pomeni napetost lastnih nihanj TN navitja do zemlje in je krajevno-časovna funkcija $u_{01} = u_{01}(x, t)$ [1].



Slika 2: Razporeditev navitij v transformatorskem oknu 31,5 MVA-110/20 kV transformatorja v YNyn6+d5 vezavi.

Navitja v transformatorju se lahko za potrebe hitrih tranzientnih izračunov obravnavajo kot kapacitivno - induktivno vezje [2][7][8][9]. Za natančno in praktično uporabo takšnega modela je potrebno razdeliti navitja na sekcije, pri tem je treba pravilno upoštevati kapacitivne in induktivne povezave med sekcijami (Slika 3) [7]. Na sliki so zaradi preglednosti oznake ki se nanašajo na medsebojne induktivnosti podane le za prvo (TN) navitje, podobno velja za ostala navitja.

V modelu smo izračun lastnih in medsebojnih kapacitivnosti izvedli na osnovi analitičnih izrazov, ki jih bralec lahko najde v referencah [1][2][9][10]. Računsko bolj zahtevna je določitev lastnih in medsebojnih induktivnosti med posameznimi sekcijami, za kar je bil razvit lasten računalniški program, ki računa lastne in medsebojne induktivnosti med cilindričnimi tuljavami pravokotnega prereza v poljubnem medsebojnem položaju.



Slika 3: Modelno vezje ene faze transformatorja za preučevanje hitrih tranzientnih pojavov v transformatorskih navitjih.

Na podlagi nadomestnega vezja transformatorja kot ga kaže Slika 3, lahko na podlagi 1. in 2. Kirchhoffovega zakona zapišemo sistem diferencialnih enačb, za vozliščne napetosti u in induktivne toke i (2) [7][9][10].

$$\begin{bmatrix} \frac{du}{dt} \\ \frac{di}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C^{-1}D \\ -L^{-1}D^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^{-1}E \frac{du_0}{dt} \\ L^{-1}F u_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

V sistemu (2) so opuščene ohmske upornosti navitij, kjer veliki delež predstavljajo inducirani vrtnični toki, ki zaradi frekvenčne odvisnosti vnašajo v sistem (2) nelinearnost, s tem pa tudi otežijo in podaljšajo izračun [8]. Posledično bodo izračunana nihanja v navitjih nekoliko bolj izražena, saj upornost vnaša dušenje, kar s praktičnega vidika predstavlja nek dodaten varnostni faktor, še posebej, če upoštevamo, da računske vrednosti kapacitivnosti in induktivnosti lahko odstopajo od dejanskih tudi do 30% [8][9][10].

Pri tem je pomen oznak v (2):

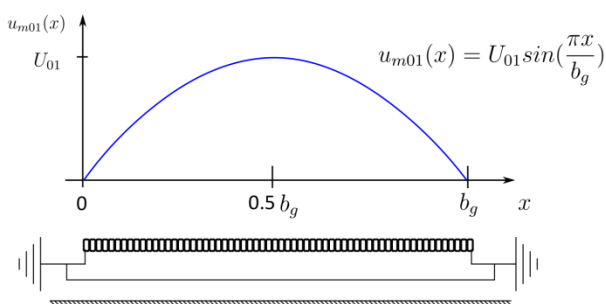
- C ... kapacitivna matrika
- L ... induktivna matrika
- D ... incidenčna matrika

- E ... vektor kapacitivnih povezav med udarnim vozliščem in ostalimi vozlišči
- F ... vektor, ki določa katero vozlišče je udarno (na katero vozlišče deluje udarni val u_0)
- u_0 ... udarni napetostni val
- u ... vektor vozliščnih napetosti
- i ... vektor induktivnih tokov

Rešitev sistema diferencialnih enačb (2) ob upoštevanju začetnih in robnih pogojev da časovni potek induktivnih tokov $i(t)$ in vozliščnih napetosti $u(t)$, kjer so v luči napetostnih dogajanj med navitji zanimive predvsem slednje.

S teoretičnega stališča, predstavlja prenos udarne napetosti med navitji transformatorja problem robnih vrednosti, kjer pri prostorski porazdelitvi prenesene napetosti igra ključno vlogo način ozemljitve priključnih sponk navitij [1][2]. Pri preskušanju VN navitja so priključne sponke ostalih navitij, ki niso galvanjsko povezana s preskušanim navitje kratko sklenjene in ozemljene, prav tako je ozemljeno tudi ničlišče VN navitja [5][6]. Z upoštevanjem ozemljenih koncev navitij po Slika 4 je TN navitju moči predpisati Dirichletov tip robnega pogoja, kjer je vrednost potenciala na robu (priključnih sponkah) znana. Največkrat lahko privzamemo, da je referenčna vrednost potenciala ozemljenih delov transformatorja 0 V. Na podlagi teorije nihanj je zato pričakovati, da bodo maksimalne vrednosti napetostnih nihanj vzdolž TN navitja razporejene približno po sinusnem zakonu (3), kjer U_{01} pomeni maksimalno vrednost napetosti TN navitja do zemlje, b_g pa geometrijsko višino TN navitja (Slika 4) [1][2][11].

$$u_{m01}(x) = U_{01} \sin\left(\frac{\pi x}{b_g}\right) \quad (3)$$



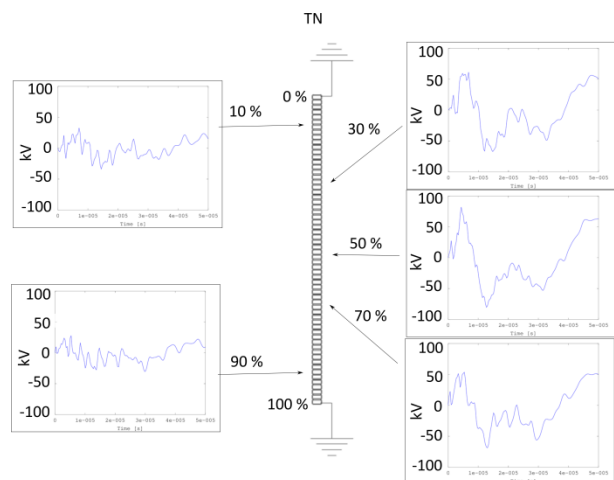
Slika 4: Prikaz krajevne razporeditve amplitudnih vrednosti lastnih nihanj kratko-sklenjenega in ozemljenega enoplastnega plastnega navitja.

Praviloma je TN navitje načrtovano za tretinjsko moč transformatorja za kar velikokrat zadostuje že izvedba navitja s profilno žico v enoplastni izvedbi (Slika 4).

3 Rezultati

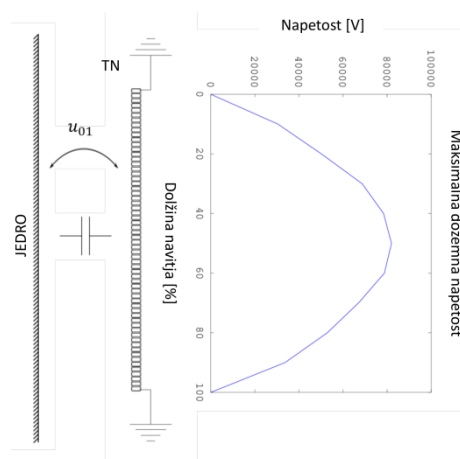
Izračuni prenosa udarne napetosti iz VN na TN navitje so bili opravljeni na tranzientnem enofaznem modelu transformatorske enote 31,5 MVA-110/21/(10,5) kV YNyn6+(d5) v programskem paketu Octave [12]. Pri simulacijah smo upoštevali vezavo po Slika 2, ki ustreza preizkušanju VN navitja brez vključenih regulacijskih ovojev, kjer lahko pričakujemo največje amplitude napetostnih nihanj v TN navitju, saj je razmerje med številom ovojev TN in VN navitja v tem primeru največje [1][2]. V izračunih smo upoštevali standardno obliko udarnega vala (1,2/50) (1) z amplitudo $U_0=550$ kV, ki se uporablja za preizkušanje 110 kV izolacijskega nivoja [5][6].

Slika 5 prikazuje časovni potek prenesene udarne napetosti u_{01} vzdolž TN navitja iz katere je opazno, da se amplitude lastnih nihanj povečujejo s približevanjem sredini navitja. Prav tako je moč opaziti, da so amplitude višjih harmonskih komponente lastnih napetostnih nihanj bolj izražene na začetku in koncu navitja ter se njihova vsebnost proti sredini navitja zmanjšuje. V časovnih potekih napetosti na Slika 5 so nihaja prikazano v časovnem intervalu od 0 – 50 μ s.



Slika 5: Izračuni časovnih potekov lastnih napetostnih nihanj u_{01} vzdolž TN navitja, ki se pojavijo med preskušanjem VN navitja z udarno napetostjo.

Krajevna razporeditev maksimalnih vrednosti dozemnih napetosti vzdolž TN navitja u_{m01} je prikazana na Slika 6, kjer je razvidno, da je krajevna razporeditev amplitud lastnih nihanj vzdolž navitja približno sinusne oblike z amplitudo $U_{01} \approx 80$ kV in predstavlja stojni val, ki zaniha okoli referenčne vrednosti napetosti. Razmerje med amplitudo prenesene in udarne napetosti je $\frac{U_{01}}{U_0} \approx 0,15$, kar je v rangu razmerja ovojev TN in VN navitja. Potrebno je poudariti da na fazo lastnih nihanj vpliva smer navijanja navitij, kjer so lastna nihanja v VN in TN navitju sofazna, kadar se navijalni smeri razlikujeta in protifazna, ko sta navitji naviti v isto smer. Upoštevanje smeri navijanja navitji pri prenosu udarnega vala je še posebej pomembno pri posebnih konstrukcijskih izvedbah navitij, kjer se dve navitji med seboj prepletata.



Slika 6: Računske vrednosti krajevne razporeditve amplitud lastnih napetostnih nihanj vzdolž TN navitja.

4 Sklep

Na podlagi računskih rezultatov razporeditve amplitud lastnih napetostnih nihanj vzdolž kratko-sklenjenega in ozemljenega TN navitja lahko sklepamo, da se pri prenosu udarne napetosti iz VN na TN navitje ta razporeditev spreminja po sinusni funkciji vzdolž navitja, pri tem bodo lastna napetostna nihanja v navitju največja približno na polovici navitja, medtem, ko bo medvojnja izolacija najbolj obremenjena na začetku in koncu navitja. Približno lahko privzamemo, da je razmerje med maksimalno vrednostjo prenesene napetosti $|U_{01}|$ in amplitudo udarne napetosti $|U_0|$ enako razmerju števila ovojev TN in VN navitja, pri tem je treba upoštevati najbolj neugoden primer, ko je položaj regulacijskega stikala na skrajno negativnem odcepu regulacije. Napetostni gradient, ki ima največjo vrednost na začetku in koncu navitja, ne predstavlja nevarnosti za medvojnjo izolacijo enoplastnega TN navitja, ker je le ta zaradi tehnoloških razlogov pri izdelavi navitja praviloma predimenzionirana za napetostni nivo terciarja.

Literatura

- [1] B. Heller, A. Veverka, Surge Phenomena in Electrical Machines, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 1968.
- [2] Karsai K., Kerényi D., Kiss L., Large Power Transformers, Budapest: Académia Kiadó, 1987
- [3] Popov M., Van der Sluis L., Smeets R. P. P., "Evaluation of surge-transferred overvoltages in distribution transformers", Elec. Pow. Syst. Res., 78, (2008), no. 3, 441-449
- [4] Borghetti A., Morched A., Napolitano F., Nucci C. A., Paolone M., "Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers", IEEE Trans. on Pow. Deliv., 24, 2009, 1, 360-372
- [5] IEC 60076-1, Power Transformers, Part 1: General, IEC Standard, 2000.
- [6] Power Transformers. Part 4: Guide to the lightning Impulse and Switching Impulse Testing – Power Transformers and Reactors, 1st edition, IEC 60076-4, 2002
- [7] Lenasi K., Analiza udarnih napetosti v navitjih transformatorja z matematičnim modelom, magistrsko delo, Ljubljana, 1974.
- [8] K. Lenasi, Udarne prenapetosti v navitjih močnostnih transformatorjev z vpeljavo dušenja induktivnih tokov, doktorska disertacija, Ljubljana 1975.
- [9] B. Čučić: Raspodjela udarnog napona po preloženom namotu transformatora, Magistrsko delo, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [10] Trbušić M., Čepin M., "Razporeditev udarne napetosti vzdolž zvrnjene navitja močnostnega transformatorja", Elektrotehniški vestnik, 78, (2011), no. 3, 106-111
- [11] Inman D.J., Engineering vibration, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2009.
- [12] Octave software, www.gnu.org/software/octave/ (zadnjič obiskano 5.7.2018)