

Primerjava simuliranja transformatorjev v PowerFactoryu in Simulinku ter uporaba nesimetričnega modela transformatorja

Urh Kolarič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
E-pošta: urh.kolaric@student.um.si

Comparison of Simulation of Transformers in PowerFactory and Simulink and Usage of the Asymmetrical Model of a Transformer

In the paper, the field of transformer simulation and modelling is presented with the use of programming environments Simulink and PowerFactory. The paper displays a comparison of models of transformers and their meaning of utility at certain types of simulations. We have demonstrated results of various types of simulations of numerous transformers and have verified them with measurements. In the last part of the paper, we have, with the intention of improving results of simulations in the no load operation, introduced a model of a transformer (labeled as the asymmetrical model in the paper) in which we have considered asymmetries between individual phases. We have displayed an analytical derivation of the asymmetrical model, its implementation in Simulink and verification of its simulations with the measurements.

1 Uvod

Simulink je robustno grafično programsko okolje ameriške korporacije MathWorks in je namenjeno vsestranskemu znanstvenemu delu. Programsko orodje PowerFactory je razvilo nemško podjetje DIGSILENT. Uporabljajo ga predvsem podjetja, ki se ukvarjajo s prenosom, distribucijo in proizvodnjo električne energije. Ker sta obe programske orodji razširjeni in kompetentni za simulacijo elektroenergetskih omrežij, je smiselno preveriti ustreznosti modelov, ki jih uporabljata za simulacijo raznih obratovalnih stanj glavne naprave elektroenergetskega omrežja – transformatorja [1].

2 Opis trifaznega transformatorja in določitev njegovih parametrov

Pri izdelavi modelov trifaznih transformatorjev v splošnem poznamo še več variant kot pri enofaznih. Na grobo jih razdelimo v naslednji dve skupini:

- modele, sestavljene iz treh enofaznih modelov, ter
- modele, ki obravnavajo transformator kot celoto.

Pri prvem tipu modelov gre za poenostavitev in idejo, da trifazni transformator razdelimo na tri enofazne [1]. Ti so v splošnem lahko poljubni ter sestavljeni iz različnih

Veličina	Vrednost
Primarna nazivna napetost U_{1N}	Y300V
Sekundarna nazivna napetost U_{2N}	Y400V
Primaren nazivni tok I_{1N}	1, 49A
Sekundaren nazivni tok I_{2N}	1, 20A
Navidezna nazivna moč S_N	750VA
Nazivna frekvenca f	50Hz

Tabela 1: Nazivni podatki trifaznega transformatorja moči 750VA.

parametrov. Ta skupina modelov zajema veliko poenostavitev, zato so rezultati manj natančni. Ugotovili smo, da lahko dajejo zadovoljive rezultate pri učinkovitih stacionarnih simulacijah ter pri simuliranju kratkih stikov. Pri simuliranju časovnih potekov tokov prostega teka, simulacijah vklopov in harmonski analizi se na ta tip ne moremo zanašati.

Druga skupina modelov je popolnejša in upošteva več fizikalnih vplivov. Del modela se razrešuje v magnetni domeni. Tako dobimo pregled nad poteki vseh magnetnih pretokov v vsakem trenutku simulacije. Ta model se od prvega razlikuje po tem, da upošteva vpliv neke faze na drugo tudi v magnetni domeni. V tem delu smo ugotovili, da je z njim mogoče dobro simulirati časovne poteke tokov prostega teka, vklope in izvajati kvalitetno harmonsko analizo.

Primerjavo simulacij in meritev bomo prikazali za manjši trifazni transformator moči $S = 750VA$. Njegove nazivne podatke prikazuje tabela 1. Rezultate preizkusov in meritev prikazuje tabela 2. Z nazivnimi podatki transformatorja iz tabele 1 in rezultati preizkusov iz tabele 2 določimo parametre modela, ki so prikazani v tabeli 3. Za implementacijo nelinearnih modelov opravimo še meritve magnetilne karakteristike [2].

3 Uporaba Simulinka za simuliranje trifaznih transformatorjev

Z rezultati meritev in izračuni prikazanimi v prejšnjem poglavju smo prišli do parametrov manjšega trifaznega transformatorja. Katere izmed njih smo uporabili v simulacijah, je odvisno od izbire modela transformatorja

Veličina	Vrednost
Napetostno prestavno razmerje K_U	0,77
Tok v prostem teku I_{10}	0,20A
Delovna moč v prostem teku P_{10}	32,58W
Kratkostična napetost U_{1k}	13,28V
Kratkostične izgube P_{1k}	34,26W
Upornost primarnega navitja R_1	2,7 Ω
Upornost sekundarnega navitja R_2	3,9 Ω

Tabela 2: Izmerjeni rezultati trifaznega transformatorja moči 750VA.

Veličina	Vrednost
Primarna razsipana induktivnost $L_{\sigma 1}$	0,22mH
Sekundarna razsipana induktivnost $L_{\sigma 2}$	0,37mH
Ekvivalentna upornost jedra R_{Fe}	2762 Ω
Magnetilna reaktanca X_m	912 Ω
Magnetilna induktivnost L_m	2,90H

Tabela 3: Izračunani parametri trifaznega transformatorja moči 750VA.

Veličina	I_1 (A)	P_1 (W)	U_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
Meritev	1,53	786,50	372,40	1,13	727,80
Simulink	1,58	755,96	382,25	1,16	707,06
PowerFactory	1,56	799,70	375,20	1,14	735,20

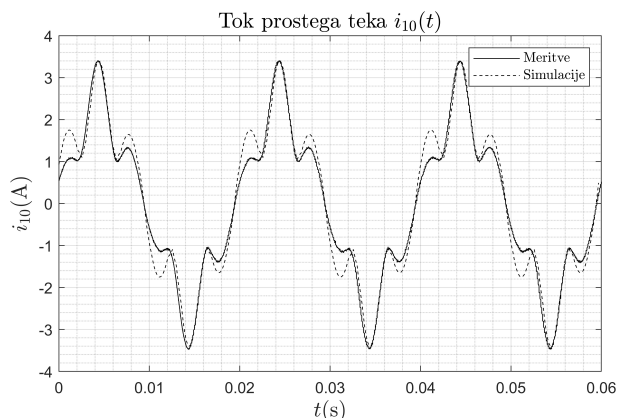
Tabela 4: Primerjava izmerjenih in simuliranih veličin pri napetosti $U_1 = 300V$ in bremenu $R_b = 190\Omega$.

Veličina	I_1 (A)	P_1 (W)	U_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
Meritev	1,03	354,70	249,70	0,75	325,60
Simulink	1,06	335,98	254,83	0,77	314,25
PowerFactory	1,04	355,40	249,16	0,76	326,80

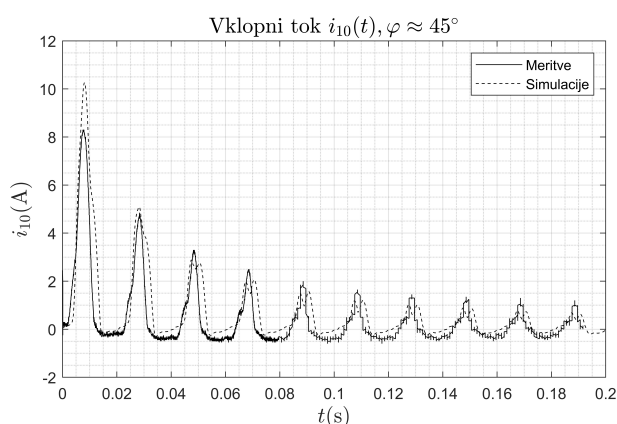
Tabela 5: Primerjava izmerjenih in simuliranih veličin pri nižani napetosti $U_1 = 200V$ in bremenu $R_b = 190\Omega$.

in programskega orodja, v katerem model simuliramo.

Z linearnim modelom, ki upošteva transformator kot celoto, smo prišli do rezultatov učinkovitih stacionarnih simulacij, ki jih prikazujeta tabeli 4 in 5. S primerjavo rezultatov simulacij in referenčnih meritev ugotovimo, da se rezultati zadovoljivo skladajo z meritvami, vendar so manj natančni kot rezultati simulacij enofaznega transformatorja opravljene z linearnim modelom. Delna razlaga za takšno obnašanje je simetričnost trifaznega modela, ki smo ga uporabili. Slika 1 prikazuje primerjavo referenčne meritve testnega transformatorja $S = 750VA$ s simulacijo modela, ki upošteva nelinearnost magnetnega jedra (saturacijski model) v Simulinku. Slika 2 prikazuje primerjavo simulacij in meritve vklopa transformatorja v prostem teku v določenem trenutku (programsko orodje Simulink).



Slika 1: Primerjava meritve in simulacije toka prostega teka trifaznega transformatorja moči 750VA izvedene v Simulinku – saturacijski model.



Slika 2: Primerjava meritve in simulacije vklopa trifaznega transformatorja moči 750VA izvedene v Simulinku – saturacijski model.

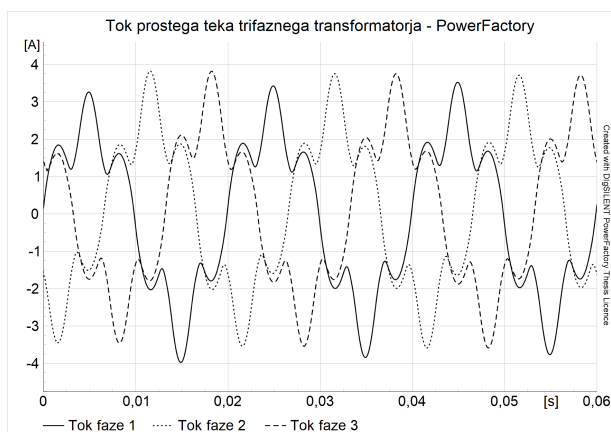
4 Uporaba PowerFactory za simuliranje trifaznih transformatorjev

PowerFactory v splošnem za izvedbo simulacij uporablja enake modele kot Simulink, le da pri njem nimamo možnosti neposredne izbire modela. V okno vpišemo parametre, ki jih imamo na razpolago pri obravnavanem stroju. Program bo uporabil model, ki upošteva največ fizikalnih vplivov in je v tem smislu najpopolnejši.

K primerjavi rezultatov referenčnih meritev in simulacij narejenih s Simulinkom smo dodali še simulacije opravljene s programskim orodjem PowerFactory. Rezultati učinkovitih stacionarnih simulacij testnega referenčnega transformatorja $S = 750VA$ so že prikazani v tabelah 4 in 5. Dobljeni potek simulacije toka prostega teka prikazuje slika 3. Kot lahko razberemo iz slike 3 so tokovi vseh treh faz simetrični in vsebujejo enake višje harmonske komponente.

5 Izpeljava nesimetričnega modela transformatorja

Kljub temu, da smo v prejšnjih poglavjih s programoma Simulink in PowerFactory dobili dobre rezultate, so v



Slika 3: Simulacija toka prostega teka trifaznega transformatorja moči 750VA izvedene v PowerFactory – saturacijski model.

primerjavi z referenčnimi meritvami vsi rezultati simulacij simetrični glede na ostale faze. To je posledica simetričnosti modelov, ki jih orodja ponujajo. Simetrični rezultati simulacij nas začnejo motiti v delovnih točkah, kjer pričakujemo izrazite nesimetrije. To je v prostem teku tri- in petstebnega transformatorja. Takšno obnašanje je posledica snovno geometrijskih nesimetrij med posameznimi fazami in stebri transformatorja.

Z namenom razrešite izziva simulacije tokov prostega teka trifaznih transformatorjev uporabimo model, ki ga prikazuje slika 4. V njem lahko upoštevamo nesimetrije posameznega stebra oz. faze. V modelu razsipane induktivnosti L_{σ} pretvorimo v razsipane reluktance R_{σ} . Prav tako pretvorimo karakteristiko $\psi(i)$ v $\phi(\Theta)$. Upoštevamo lahko tudi nično reluktanco. Prikazali bomo izpeljavo modela. Primarne zančne enačbe [3] ob upoštevanju indukcijskega zakona:

$$u_{g1} = R_{11}i_{11} + N_1 \frac{d\phi_{11}}{dt}, \quad (1)$$

$$u_{g2} = R_{21}i_{21} + N_1 \frac{d\phi_{21}}{dt}, \quad (2)$$

$$u_{g3} = R_{31}i_{31} + N_1 \frac{d\phi_{31}}{dt}. \quad (3)$$

Sekundarne zančne enačbe:

$$N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = R_{12}i_{12}, \quad (4)$$

$$N_2 \frac{d\phi_{22}}{dt} = R_{22}i_{22}, \quad (5)$$

$$N_2 \frac{d\phi_{32}}{dt} = R_{32}i_{32}. \quad (6)$$

Za zapis enačb, ki opisujejo magnetni del sistema, imamo več možnosti. Tukaj bodo zapisane ena vozliščna in tri zančne enačbe. Vozliščna enačba:

$$\phi_{g1} + \phi_{g2} + \phi_{g3} + \phi_0 = 0. \quad (7)$$

Zančne enačbe:

$$R_{m1}\phi_{g1} - R_{m2}\phi_{g2} = \Theta_{11} - \Theta_{12} - \Theta_{v1} - \Theta_{21} + \Theta_{22} + \Theta_{v2}, \quad (8)$$

$$R_{m2}\phi_{g2} - R_{m3}\phi_{g3} = \Theta_{21} - \Theta_{22} - \Theta_{v2} - \Theta_{31} + \Theta_{32} + \Theta_{v3}, \quad (9)$$

$$R_{m3}\phi_{g3} - R_{m0}\phi_0 = \Theta_{31} - \Theta_{32} - \Theta_{v3}. \quad (10)$$

6 Primerjava rezultatov in simulacij dobljenih z nesimetričnim modelom

Direktno izpeljan model transformatorja smo vpeljali z namenom simulacije tokov prostega teka trifaznega transformatorja, zato bomo prikazali primerjavo rezultatov simulacij in meritev za to delovno točko.

Enačbe modela, ki so bile izpeljane v poglavju 5, je bilo potrebno rešiti numerično. To smo naredili v programskem orodju Simulink tako, da smo sestavili sistem. V modelu smo upoštevali rezultate meritev nesimetričnih magnetilnih krivulj posamezne faze. Meritve smo izvedli v prostem teku transformatorja tako, da smo merili temensko vrednost toka, ki teče v transformator, in temensko vrednost napetosti, ki je priključena na stroj. Ker za priključeno napetost predpostavimo, da je sestavljena samo iz osnovnega harmonika, lahko indukcijski zakon:

$$u = \frac{d\psi}{dt}, \quad (11)$$

s kompleksnim računom preoblikujemo v:

$$u = \omega\psi. \quad (12)$$

Iz enačbe 12 nato določimo napetosti pripadajoče magnetne sklepe. Pri izračunih je potrebno uporabiti dinamično induktivnost. To izračunamo na podlagi meritev karakteristik $\psi(i)$:

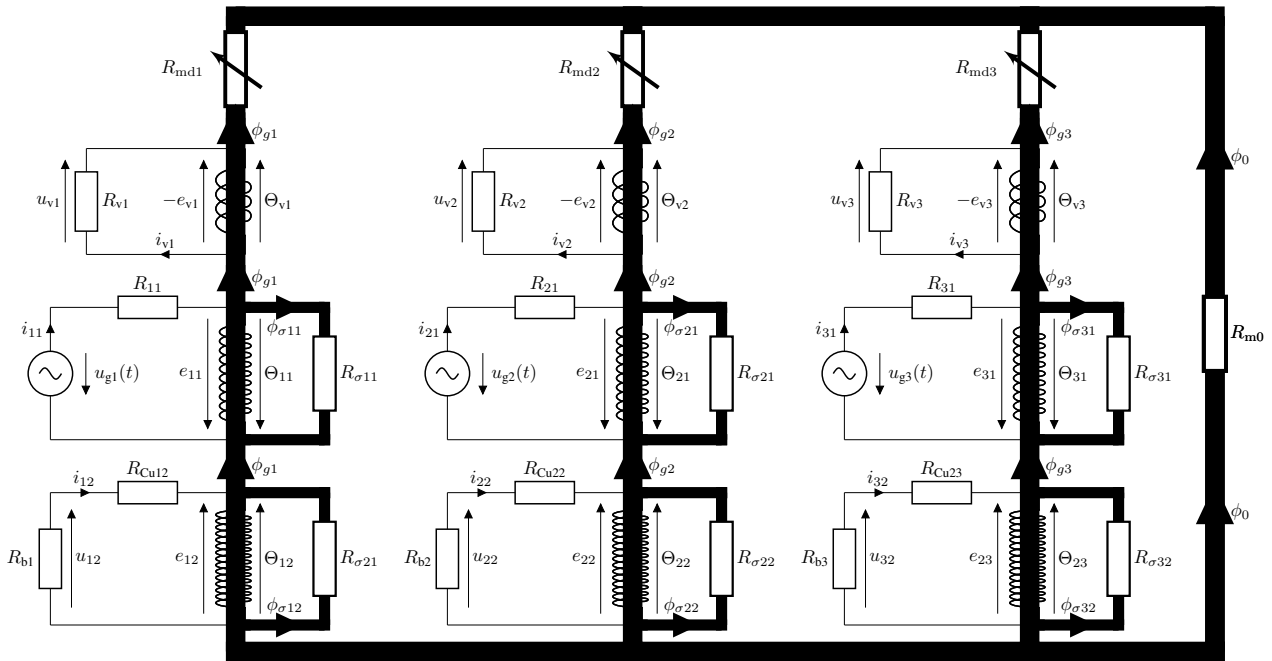
$$L_d(i) = \frac{d\psi(i)}{di} \approx \frac{\Delta\psi(i)}{\Delta i}. \quad (13)$$

Ker pa model na sliki 4 potrebuje reluktanco iz enačbe 13, izračunamo:

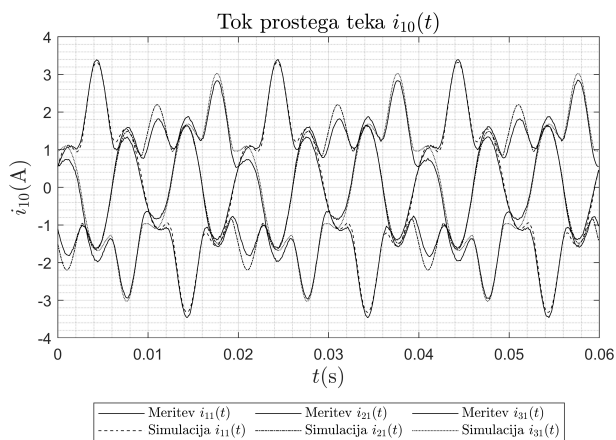
$$R_{md} = \frac{N_1^2}{L_d} = \frac{d\Theta}{d\phi} \approx \frac{\Delta\Theta}{\Delta\phi} \quad (14)$$

, kjer R_{md} predstavlja dinamično reluktanco transformatorja. Tako iz izmerjenih karakteristik $\psi(i)$ določimo poteke dinamičnih reluktanc transformatorja za vsako fazo posebej. S tem smo v model vnesli izrazite nesimetrije, ki bodo odločilno vplivale na natančnost rezultatov simulacij tokov prostega teka. Model nam omogoča upoštevati tudi nesimetrije ostalih parametrov, ki na kvaliteto simulacije v delovni točki prostega teka ne vplivajo odločilno.

V modelu lahko upoštevamo tudi nično reluktanco (označeno z R_{m0}), ki pomembno vpliva na velikost in obliko simuliranih potekov tokov prostega teka transformatorja. To določimo s preoblikovanjem nične induktivnosti, ki jo izmerimo z meritvijo sofaznih tokov. Primerjavo med simulacijo izvedeno v Simulinku z modelom na sliki 4 in meritvami prikazuje slika 5. Rezultati simulacij se presenetljivo dobro ujemajo z rezultati meritev.



Slika 4: Shema nesimetričnega modela transformatorja.



Slika 5: Primerjava meritve in simulacije toka prostega teka trifaznega transformatorja moči 750VA izvedene v Simulinku - nesimetrični model.

7 Sklep

V študiji smo prikazali rezultate simulacij trifaznega transformatorja v programskih orodjih PowerFactory in Simulink. V omenjenih orodjih je bil izmed možnih modelov izbran tisti, ki upošteva največ fizikalnih vplivov in je v tem pogledu najpopolnejši. Rezultate smo verificirali z meritvami. Ugotovili smo, da se ti dobro skladajo z meritvami v večini delovnih točk oz. obratovalnih stanj stroja.

To pa ne velja za prosti tek trifaznega transformatorja, kjer se popačitve tokov spreminjajo glede na fazo. Zato

smo pomanjkljivosti modelov, ki so uporabljena v testiranih simulacijskih orodjih, odpravili z vpeljavo t. i. nesimetričnega modela trifaznega transformatorja. Ta pravilno napove obnašanja tudi v prostem teku, ko so višji harmoniki najizrazitejši.

V kompleksnejše simulacije harmonske analize omrežij bi bilo smiselno v prihodnje vključevati nesimetrične modele transformatorjev ter jih integrirati v simulacijska orodja. Ti bi dali celovitejšo sliko obratovanja omrežja. Za ugotovitev, kako signifikanen vpliv bi to lahko imelo na rezultate simulacij globalnih elektroenergetskih sistemov, kjer je vključenih mnogo ostalih naprav, bo potrebno izvesti novo študijo. Dodatno bo potrebno raziskovati možnosti izboljšave nesimetričnega modela transformatorja.

Literatura

- [1] Ritonja, J., Zagradišnik, I. *Transformatorji: Učbenik*, prva izdaja. Maribor: Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2020.
- [2] Casoria, S., Brunelle, P., Sybille, G. *Hysteresis Modeling in the Matlab/Power System Blockset*. ResearchGate, 2003. Dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/222301975_Hysteresis_modeling_in_the_MATLABPower_System_Blockset [28. 8. 2021].
- [3] Jereb, P., Miljavec, D. *Vezna teorija električnih strojev*, prva izdaja. Ljubljana : Fakulteta za elektrotehniko, 2009.