

doi:10.15199/48.2024.01.51

Uproszczony model transformatora trójzwojeniowego dla potrzeb wyznaczania nastaw zabezpieczeń w dołowych sieciach górniczych

Streszczenie. W artykule przedstawiono uproszczony, obwodowy, liniowy model jednofazowy trójfazowego transformatora trójzwojeniowego, który jest dedykowany do symulacyjnego wyznaczania rozpyłu prądów w stanie ustalonym przy wyznaczaniu nastaw zabezpieczeń przeciążeniowych i zwarciovych w dołowych sieciach górniczych. Model skonstruowano w oparciu o stosowany wcześniej model transformatora dwuzwojeniowego z zachowaniem ich maksymalnej kompatybilności. Model może być stosowany przy wyznaczaniu prądów znamionowych, obciążeniowych oraz zwarciovych. Model uwzględnia zarówno parametry wzdluzne (rezystancje i indukcyjności uzwojeń) jak i możliwe zaczepty transformatora.

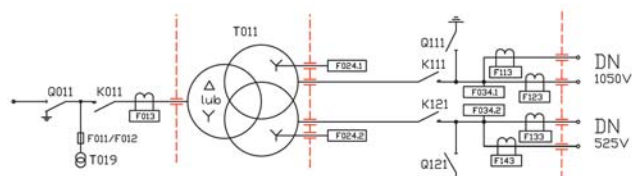
Abstract. The paper presents a simplified, linear single-phase circuit model of a three-phase three-winding transformer, which is dedicated to steady-state current flow analyses, which are used to find the overload and short-circuit protection equipment settings in the underground mining power networks. The model was constructed on the basis of the previously used model of a two-winding transformer, maintaining their maximum compatibility. The model can be used to determine rated, load and short-circuit currents. The model takes into account both: the windings parameters (resistances and inductances) as well as possible transformer taps. (**Simplified model of a three-winding transformer for the purpose of determining protection settings in underground mining networks.**)

Słowa kluczowe: transformator trójzwojeniowy, model obwodowy SLS, analiza w stanie ustalonym, dobór nastaw zabezpieczeń.

Keywords: three-winding transformer, LTI circuit model, steady-state analysis, protection equipment settings.

Wstęp

Transformatory trójzwojeniowe używane są dosyć często w energetyce, zarówno w sieciach przesyłowych jak i rozdzielczych. Urządzenia te posiadają uzwojenie pierwotne oraz dwa uzwojenia wtórne, przeważenie o dwóch różnych poziomach napięć znamionowych. Symbol transformatora trójzwojeniowego pokazano na rys.1 na schemacie przykładowej stacji transformatorowej w wykonaniu przeciwwybuchowym dedykowanej do przemysłu górniczego. Do zasilania urządzeń górniczych niskiego napięcia stosuje się dwa poziomy napięć tj. 1050 V oraz 525 V. W takim przypadku często używa się transformatorów trójzwojeniowych co jest zasadne ekonomicznie i funkcjonalnie.



Rys.1 Schemat stacji transformatorowej trójzwojeniowej EH-d32

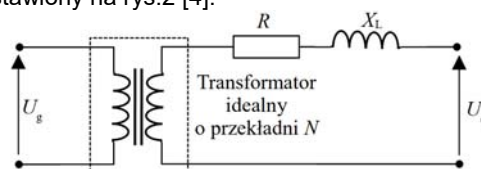
Użycie konkretnego zastępczego modelu matematycznego transformatora [1-3] zależy jest od poziomu złożoności problemu jaki należy rozwiązać, a w przypadku obliczeń związanych z przepływem prądów w stanie ustalonym często wykorzystywane są najprostsze zastępcze modele liniowe [4, 5].

Ze względu na specyfikę dołowych sieci górniczych, a w szczególności ich często tymczasowy charakter na poszczególnych odcinkach, znacznym ułatwieniem dla projektantów jest specjalistyczne oprogramowanie pozwalające na obliczenia związane z doborem urządzeń uwzględniające odpowiednie standardy i normy branżowe. Jednym z takich programów był stosowany przez kilkanaście lat w wielu polskich kopalniach program SNN, którego cechy szczególne oraz pewne ograniczenia opisano m.in. w pracy [6]. Do jednego z tych ograniczeń należał brak obsługi trójfazowych transformatorów

trójzwojeniowych. W roku 2021 powstała nowa wersja programu o nazwie NextSnN [7]. Program został oparty o wszystkie wcześniejsze doświadczenia związane z programem SNN, jednakże jego silnik obliczeniowy został napisany od nowa i oparty na innej technologii, co pozwoliło obejść wiele ograniczeń starszej wersji programu. Jednym z nich jest wspomniana obsługa transformatorów trójzwojeniowych.

Bazowy model transformatora dwuzwojeniowego

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest uproszczony liniowy jednofazowy model zastępczy trójfazowego transformatora dwuzwojeniowego przedstawiony na rys.2 [4].



Rys.2 Uproszczony zastępczy jednofazowy model transformatora dwuzwojeniowego zastosowany w programie SNN

Model z rys.2 składa się z idealnego transformatora o przekładni równej N oraz sumarycznej rezystancji R i reaktancji X_L obu uzwojeń (górnego i dolnego) przeliczonych na napięcie dolne transformatora. Parametry modelu są wyznaczane z następujących zależności [4] (w nawiasach kwadratowych podano jednostki zastosowane w katalogach programu SNN):

$$(1) e_r[\%] = \frac{\Delta P[W]}{10S_n[kVA]}$$

gdzie: e_r oznacza procentowe napięcie zwarcia na sumarycznej rezystancji zastępczej R , ΔP moc strat w uzwojeniach (tzw. straty w miedzi) a S_n znamionową moc pozorną transformatora.

$$(2) e_t[\%] = \sqrt{(e_z[\%])^2 - (e_r[\%])^2}$$

gdzie: e_1 oznacza procentowe napięcie zwarcia na sumarycznej reaktancji zastępczej X_L , a e_2 procentowe napięcie zwarcia transformatora.

$$(3) R = \frac{e_r[\%]U_{dn}^2[V]}{(100000 * S_n[kVA])}$$

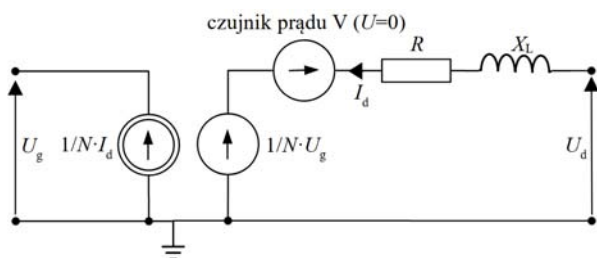
gdzie: U_{dn} oznacza napięcie znamionowe uzwojenia dolnego.

$$(4) X_L[\Omega] = R[\Omega] \frac{e_l[\%]}{e_r[\%]}$$

$$(5) N = \frac{U_{gn}[V] \left(1 + \frac{z[\%]}{100[\%]}\right)}{U_{dn}[V]}$$

gdzie: z oznacza ustawienie zaczeptu transformatora (przykładowe wartości to: -5%, 0%, 5%).

Do wyznaczenia parametrów rozpatrywanego modelu wystarczy więc znać pozorną moc znamionową transformatora S_n , napięcia znamionowe uzwojeń transformatora U_{gn} i U_{dn} , moc strat w uzwojeniach ΔP oraz procentowe napięcie zwarcia e_z . Model okazał się być wystarczający do prawidłowego określania wielkości prądów i spadków napięć przy analizach wykonywanych przez program SNN [4] (prądy znamionowe, prądy obciążeniowe i towarzyszące im spadki napięć oraz - po pewnych modyfikacjach parametrów - również prądy zwarcia). Z tego też względu dla programu NextSnN postanowiono wykorzystać ten sam model rozbudowując go o elementy niezbędne do jego poprawnej pracy przy zastosowanym silniku obliczeniowym opartym o zmodyfikowaną metodę potencjałów węzłowych (Modified Nodal Analysis) zwanej dalej metodą MNA [8].



Rys.3 Uproszczony zastępczy jednofazowy model transformatora dwuuzwojeniowego dostosowany do metody MNA

Model przedstawiony na rys.3 jest zmodyfikowaną wersją modelu pokazanego na rys.2 dostosowaną do wymagań metody MNA. Dostosowanie modelu wymagało wprowadzenia dwóch źródeł sterowanych zastępujących transformator idealny oraz dodatkowego niezależnego źródła napięcia V pełniącego rolę czujnika prądu mierzącego prąd I_d . Parametry R , X_L oraz N są wyznaczone w identyczny sposób jak dla modelu z rys.2.

Przedstawiony sposób modelowania transformatora jest chętnie stosowany w literaturze [9, 10] i w razie potrzeby może być rozbudowany o takie elementy jak gałąź poprzeczna modelująca zachowanie rdzenia transformatora czy gałąź uwzględniająca straty od prądów wirowych (tak jak np. w pracy [10]).

Największą zaletą modelu przedstawionego na rys.3 jest jego pełna wsteczna kompatybilność z modelem z rys.2 (łącznie z uwzględnieniem zaczeptów) przy jednoczesnym spełnieniu wymogów metody MNA. W niektórych aplikacjach problem może stanowić fakt galwanicznego połączenia (wspólnej masy) uzwojenia górnego i dolnego transformatora, jednakże z punktu widzenia analiz, jakie są przeprowadzane w programie NextSnN, nie stanowi to problemu.

Proponowany model transformatora trójuzwojeniowego

Na rys.4 przedstawiono proponowany model transformatora trójuzwojeniowego. Koncepcja modelu opiera się na użyciu 3 transformatorów elementarnych, z których każdy pełni inną funkcję:

- Uzwojenie górne oraz zaczepty są modelowane przez transformator elementarny T0. Przekładnia tego transformatora będzie modelowała jedynie ustawienia zaczeptów zgodnie z zależnością:

$$(6) N_z = 1 + \frac{z[\%]}{100[\%]}$$

natomiast parametry R_g i X_{Lg} będą odpowiadały zastępczej jednofazowej rezystancji i reaktancji uzwojenia górnego.

- Uzwojenia dolne wraz z odpowiadającą im przekładnią są modelowane przez transformatory T1 i T2. Dla tych transformatorów przekładnie są równe stosunkowi odpowiednich napięć znamionowych uzwojeń:

$$(7) N_1 = \frac{U_{gn}[V]}{U_{d1n}[V]}, \quad N_2 = \frac{U_{gn}[V]}{U_{d2n}[V]}$$

Rezystancje i reaktancje uzwojeń dolnych będą przeliczone na odpowiednie napięcie dolne każdego uzwojenia. Taka konstrukcja modelu z jednej strony gwarantuje poprawne uwzględnienie wpływu zaczeptów na pracę transformatora, a z drugiej strony pozwala zachować maksymalną kompatybilność z modelem transformatora dwuuzwojeniowego przedstawionym na rys.3.

Podobnie jak dla transformatora dwuuzwojeniowego, do wyznaczenia parametrów proponowanego modelu potrzebne są następujące wielkości:

- moce znamionowe poszczególnych uzwojeń S_{gn} , S_{d1n} , S_{d2n} ,
- napięcia znamionowe poszczególnych uzwojeń U_{gn} , U_{d1n} , U_{d2n} ,
- napięcia zwarcia wyznaczone dla poszczególnych par uzwojeń e_{z01} , e_{z02} , e_{z12} ,
- straty obciążeniowe poszczególnych par uzwojeń ΔP_{01} , ΔP_{02} , ΔP_{12} .

Przedstawione parametry wyznacza się z reguły na podstawie pomiarów wykonywanych dla poszczególnych par uzwojeń transformatora w sposób analogiczny jak dla transformatorów dwuuzwojeniowych (trzecie uzwojenie pozostaje rozwarte). Na tej podstawie można wyznaczyć łączne zastępcze rezystancje i reaktancje dla poszczególnych par uzwojeń:

$$(7) e_{r01}[\%] = \frac{\Delta P_{01}[W]}{S_{ref}[VA]} 100[\%]$$

$$(8) R'_{01}[\Omega] = R_g + R'_{d1} = \frac{e_{r01}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

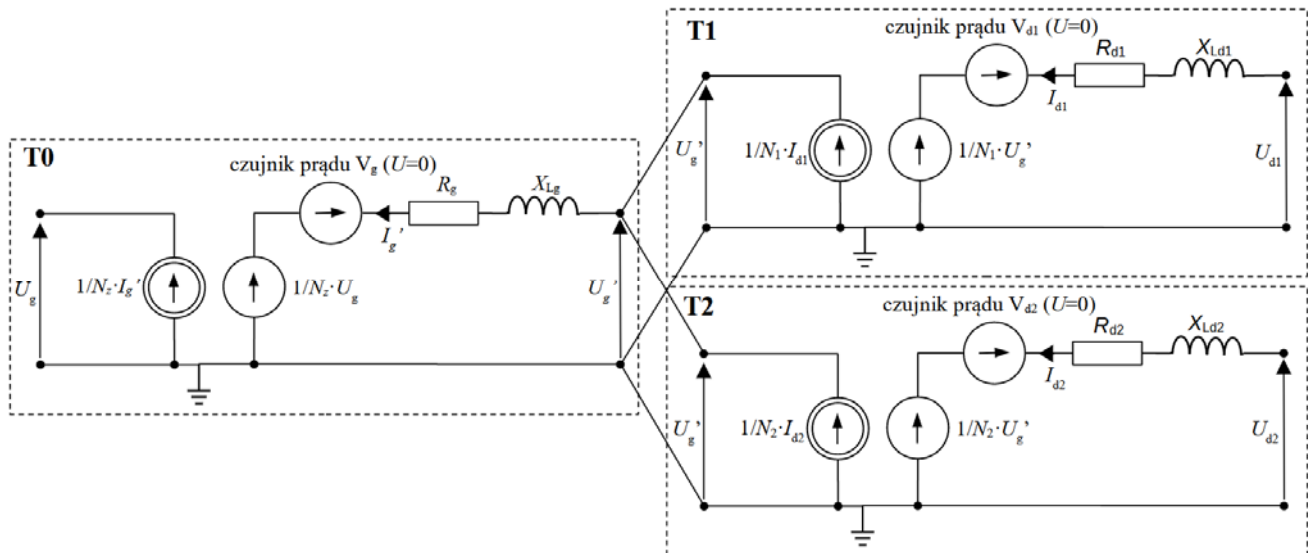
$$(9) e_{t01}[\%] = \sqrt{e_{z01}^2[\%] - e_{r01}^2[\%]}$$

$$(10) X'_{L01}[\Omega] = X_{Lg} + X'_{Ld1} = \frac{e_{t01}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

$$(11) e_{r02}[\%] = \frac{\Delta P_{02}[W]}{S_{ref}[VA]} 100[\%]$$

$$(12) R'_{02}[\Omega] = R_g + R'_{d2} = \frac{e_{r02}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

$$(13) e_{t02}[\%] = \sqrt{e_{z02}^2[\%] - e_{r02}^2[\%]}$$



Rys.4 Proponowany zastępczy jednofazowy model transformatora trójuzwojeniowego

$$(14) \quad X'_{L02}[\Omega] = X_{Lg} + X'_{Ld2} = \frac{e_{102}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

$$(15) \quad e_{r12}[\%] = \frac{\Delta P_{12}[W]}{S_{ref}[VA]} 100[\%]$$

$$(16) \quad R'_{12}[\Omega] = R'_{d1} + R'_{d2} = \frac{e_{r12}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

$$(17) \quad e_{112}[\%] = \sqrt{e_{212}^2[\%] - e_{r12}^2[\%]}$$

$$(18) \quad X'_{L12}[\Omega] = X'_{Ld1} + X'_{Ld2} = \frac{e_{112}[\%] U_{ref}^2[V]}{100[\%] S_{ref}[VA]}$$

gdzie S_{ref} jest mocą odniesienia, dla jakiej były wyznaczone procentowe napięcia zwarcia oraz moce strat dla poszczególnych uzwojeń, a U_{ref} jest napięciem znamionowym uzwojenia względem którego wyznaczamy parametry.

Znając wartości sumarycznych rezystancji i reaktancji zastępczych odpowiadające poszczególnym próbom zwarciovym, można wyznaczyć szukane parametry transformatorów elementarnych zgodnie z zależnościami:

$$(19) \quad R_g = \frac{1}{2}(R_{01} + R_{02} - R_{12})$$

$$(20) \quad X_{Lg} = \frac{1}{2}(X_{L01} + X_{L02} - X_{L12})$$

$$(21) \quad R_{d1} = \frac{1}{2}(R_{01} + R_{12} - R_{02})$$

$$(22) \quad X_{Ld1} = \frac{1}{2}(X_{L01} + X_{L12} - X_{L02})$$

$$(23) \quad R_{d2} = \frac{1}{2}(R_{02} + R_{12} - R_{01})$$

$$(24) \quad X_{Ld2} = \frac{1}{2}(X_{L02} + X_{L12} - X_{L01})$$

W zależności od przyjętej wartości U_{ref} wyznaczone parametry modelu należy jeszcze przeliczyć na napięcia odpowiednich uzwojeń (np. w przypadku zastosowaniu $U_{ref}=U_{gn}$, parametry dolnych uzwojeń należy przeliczyć odpowiednio na napięcia U_{d1n} i U_{d2n}). Jedną z największych zalet zaproponowanego modelu jest fakt, że zmiana zaczeptu transformatora nie wymaga przeliczania parametrów modelu a jedynie zmianę przekładni transformatora T0.

Należy tutaj również wyraźnie zaznaczyć, że parametry opisane równaniami (19)-(24) są parametrami przyjętego modelu (parametrami zastępczymi), nie są więc tożsame z rzeczywistymi rezystancjami i reaktancjami poszczególnych uzwojeń uzyskanymi podczas wykonywania pomiarów

transformatora. Wynikają one wprost z rozwiązania układu trzech równań: (8), (12) i (16) wiążących rezystancje uzwojeń względem zmiennych R_g , R_{d1} i R_{d2} oraz układu trzech równań: (10), (14) i (18) wiążących reaktancje uzwojeń względem zmiennych X_{Lg} , X_{Ld1} i X_{Ld2} . W szczególności wartości niektórych parametrów zastępczych mogą mieć nawet wartości ujemne, co jest opisywane w ogólnodostępnej literaturze przedmiotowej np. w pracy [11]. Przedstawiony model jest zgodny co do parametrów impedancyjnych z popularnym modelem przedstawionym m.in. w pracach [5, 11], który jednak nie jest przystosowany do metody MNA oraz nie uwzględnia możliwych zaczeptów transformatora.

W razie potrzeby zaproponowany model można stosunkowo łatwo rozbudować o gałąź poprzeczną i inne dodatkowe parametry podobnie jak to jest przedstawione w pracy [10] lub też wprowadzić modyfikacje uwzględniające np. zaczepty od strony uzwojeń dolnych transformatora.

Przykład obliczeniowy

W celu zilustrowania sposobu przeliczania parametrów zaproponowanego modelu wykonano obliczenia dla przykładowego transformatora trójuzwojeniowego typu ETR-1400/6 produkcji firmy Elhand o następujących parametrach:

$$S_{gn}=1400 \text{ kVA}, S_{d1n}=950 \text{ kVA}, S_{d2n}=450 \text{ kVA}$$

$$U_{gn}=6 \text{ kV}, U_{d1n}=1050 \text{ V}, U_{d2n}=525 \text{ V}$$

$$e_{z01}=2,3 \%, \Delta P_{01}= 3911 \text{ W przy } S_{ref} = 950 \text{ kVA}$$

$$e_{z02}=1,6 \%, \Delta P_{02}= 1355 \text{ W przy } S_{ref} = 450 \text{ kVA}$$

$$e_{z12}=0,55 \%, \Delta P_{12}= 1374 \text{ W przy } S_{ref} = 450 \text{ kVA}$$

W pierwszej kolejności są wyznaczone przekładnie wszystkich transformatorów elementarnych przy założonym ustawieniu zaczeptów (w tym przypadku przyjęto $z=0 \%$):

$$(25) \quad N_z = 1 + \frac{z}{100} = 1 + \frac{0}{100} = 1$$

$$(26) \quad N_1 = \frac{U_{gn}}{U_{d1n}} = \frac{6000}{1050} = 5,71$$

$$(27) \quad N_2 = \frac{U_{gn}}{U_{d2n}} = \frac{6000}{525} = 11,4$$

W drugim kroku są obliczane rezystancje i reaktancje dla poszczególnych par uzwojeń (wszystkie względem napięcia górnego, co dla parametrów związanych z uzwojeniami dolnymi oznaczono apostrofem):

$$(28) \quad e_{r01} = \frac{\Delta P_{01}}{S_{ref}} 100 = \frac{3911}{950000} = 0,412\%$$

$$(29) \quad R'_{01} = \frac{e_{r01} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{0,412 (6000)^2}{100 950000} = 0,156\Omega$$

$$(30) \quad e_{i01} = \sqrt{e_{z01}^2 - e_{r01}^2} = \sqrt{2,3^2 - 0,412^2} = 2,26\%$$

$$(31) \quad X'_{L01} = \frac{e_{i01} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{2,26 (6000)^2}{100 950000} = 0,858\Omega$$

$$(32) \quad e_{r02} = \frac{\Delta P_{02}}{S_{ref}} 100 = \frac{1355}{450000} 100 = 0,301\%$$

$$(33) \quad R'_{02} = \frac{e_{r02} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{0,301 6000^2}{100 450000} = 0,241\Omega$$

$$(34) \quad e_{i02} = \sqrt{e_{z02}^2 - e_{r02}^2} = \sqrt{1,6^2 - 0,301^2} = 1,57\%$$

$$(35) \quad X'_{L02} = \frac{e_{i02} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{1,57 6000^2}{100 450000} = 1,26\Omega$$

$$(37) \quad e_{r12} = \frac{\Delta P_{12}}{S_{ref}} 100 = \frac{1374}{450000} 100 = 0,305\%$$

$$(38) \quad R'_{12} = \frac{e_{r12} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{0,305 6000^2}{100 450000} = 0,244\Omega$$

$$(39) \quad e_{i12} = \sqrt{e_{z12}^2 - e_{r12}^2} = \sqrt{0,55^2 - 0,305^2} = 0,457\%$$

$$(40) \quad X'_{L12} = \frac{e_{i12} U_{ref}^2}{100 S_{ref}} = \frac{0,457 6000^2}{100 450000} = 0,366\Omega$$

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można zauważyć, że dla każdej z prób zwarciovych wyznaczone reaktancje zastępcze (wzory (31), (35) i (40)) są wyraźnie większe niż odpowiadające im rezystancje (wzory (29), (33) i (38)).

W kolejnym kroku są wyznaczane rezystancje i reaktancje proponowanego modelu (wszystkie względem napięcia górnego):

$$(41) \quad R_g = \frac{1}{2}(R'_{01} + R'_{02} - R'_{12}) = 0,0763\Omega$$

$$(42) \quad X_{Lg} = \frac{1}{2}(X'_{L01} + X'_{L02} - X'_{L12}) = 0,874\Omega$$

$$(43) \quad R'_{d1} = \frac{1}{2}(R'_{01} + R'_{12} - R'_{02}) = 0,080\Omega$$

$$(44) \quad X'_{Ld1} = \frac{1}{2}(X'_{L01} + X'_{L12} - X'_{L02}) = -0,017\Omega$$

$$(45) \quad R'_{d2} = \frac{1}{2}(R'_{02} + R'_{12} - R'_{01}) = 0,165\Omega$$

$$(46) \quad X'_{Ld2} = \frac{1}{2}(X'_{L02} + X'_{L12} - X'_{L01}) = 0,383\Omega$$

Można tutaj zauważyć, iż dla wspomnianego transformatora faktycznie wartość reaktancji X_{Ld1} ma wartość ujemną, co – jak już wspomniano – może mieć miejsce w proponowanym modelu.

Następnie parametry uzwojeń dolnych wymagają jeszcze przeliczenia na odpowiednie napięcia dolne:

$$(47) \quad R_{d1} = \frac{R'_{d1}}{N_1^2} = \frac{0,080}{5,71^2} = 2,45m\Omega$$

$$(48) \quad X_{Ld1} = \frac{X'_{Ld1}}{N_1^2} = \frac{-0,017}{5,71^2} = -0,521m\Omega$$

$$(49) \quad R_{d2} = \frac{R'_{d2}}{N_2^2} = \frac{0,165}{11,4^2} = 1,27m\Omega$$

$$(50) \quad X_{Ld2} = \frac{X'_{Ld2}}{N_2^2} = \frac{0,383}{11,4^2} = 2,95m\Omega$$

Tak zdefiniowany model może zostać wykorzystany w dowolnym oprogramowaniu symulacyjnym bazującym na metodzie MNA (np. pSpice).

Podsumowanie

Zaproponowany model transformatora trójzwojeniowego pozwala na wyznaczanie wartości prądów oraz spadków napięć na potrzeby wyznaczania nastaw zabezpieczeń przeciążeniowych i zwarciovych w dolowych sieciach górniczych. Model jest w pełni zgodny z powszechnie stosowanym w literaturze modelem transformatora trójzwojeniowego jednocześnie zapewniając kompatybilność z metodą MNA oraz uwzględnienie zaczepów od strony napięcia górnego. Do dodatkowych zalet modelu należy zgodność struktury każdego z zastosowanych transformatorów elementarnych modelujących poszczególne uzwojenia z analogicznym modelem transformatora dwuuzwojeniowego oraz konieczności przeliczenia tylko jednego parametru modelu (przekładni N_z) przy zmianie położenia zaczepów.

Autorzy: dr inż. Michał Lewandowski, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: michal.lewandowski@pols.pl;

dr inż. Dawid Buła, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: dawid.bula@pols.pl.

LITERATURA

- [1] Gustavsen, B., Wide band modeling of power transformers, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 19 (2004), No. 1, 414-422
- [2] Martinez J. A., Mork, B. A., Transformer modeling for low- and mid-frequency transients - a review, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 20 (2005), No. 2, 1625-1632
- [3] Chiesa N., Mork B. A., Høidalen H. K., Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 25 (2010), No. 4, 2599-2608
- [4] Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górniczo-Geologicznej, Wydział Górniczo-Geologiczny Politechniki Śląskiej, SNN program wspomagający projektowanie niskonapięciowych sieci elektroenergetycznych w kopalniach. Opis algorytmów, Gliwice, (2011)
- [5] Gawor P., Sieci elektroenergetyczne zakładów górniczych, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, (2013)
- [6] Miśkiewicz K., Boron S., Cholewa A., Uwagi o programie komputerowym SNN wspomagającym projektowanie kopalnianych sieci elektroenergetycznych, *Mechanizacja i Automatykacja Górniczo-Geologiczna*, R. 48, (2010), 31-36
- [7] OPA S.A., NextSnN – program do obliczeń sieci niskiego napięcia, <https://opa.pl/aktualnosci/nextsnn-program-do-obliczen-sieci-niskiego-napiecia/> (dostęp: 15.06.2023).
- [8] DeCarlo, R.A.; Lin, P.M.; Linear Circuit Analysis: Time Domain, Phasor and Laplace Transform Approaches, *Oxford University Press*, (2001)
- [9] Preetha P. K., Jacob S., Nair P. S. C., An equivalent circuit model for star-star-delta utilized distribution transformer, *TENCON 2014 - IEEE Region 10 Conference*, Bangkok, Thailand, (2014), 1-6
- [10] Buła D., Grabowski D., Lewandowski M.Ł., Maciążek M., Piwowar A., Software solution for modeling, sizing, and allocation of active power filters in distribution networks, *Energies*, t.14, (2021), 1-25
- [11] Gawor P., Zbiór zadań z kopalnianych sieci elektroenergetycznych, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, (2006)