

doi: 10.15199/48.2025.01.18

Modelowanie przekładników Ferrantiego dla potrzeb analizy i syntezy zabezpieczeń ziemnozwarciowych sieci średnich napięć

Streszczenie. Artykuł ten poświęcony jest problematyce źródeł błędów pomiarowych wpływających na czułość układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych, kwestiom poprawnego modelowania charakterystyki magnesowania przekładników ziemnozwarciowych oraz implementacji takich modeli w programach symulacyjnych Simulink i ATPDraw. Przedstawiono metodykę projektowania nieliniowej reaktancji magnesowania przekładnika oraz wyniki porównawcze otrzymanych charakterystyk błędów prądowych z charakterystykami podawanymi przez producentów przekładników.

Abstract. The paper is concerned with developing of adequate models of Ferranti current transformers in the range of currents below the rated value. Transformation errors in this range affect the sensitivity of earth-fault protection systems thus the issue of correct modeling of the magnetization characteristics of earth-fault transformers and the implementation of such models in Simulink and ATPDraw simulation programs are vital. The methodology for designing the nonlinear transformer magnetization reactance is presented and the results of the obtained current error characteristics are compared with those provided by a current transformer manufacturer. (**Modeling of Ferranti transformers for the analysis and synthesis of earth-fault protection of medium voltage networks**).

Słowa kluczowe: przekładniki ziemnozwarciowe; sieć średniego napięcia; zwarcia doziemne; doziemne zwarcia wysokooporowe.

Keywords: Ferranti current transformer; medium voltage network; ground faults; high impedance faults.

Wstęp

Czułość zabezpieczeń ziemnozwarciowych sieci średniego napięcia znajduje się w polu większego zainteresowania w porównaniu z odpowiednimi zabezpieczeniami sieci WN i NN. Wynika to z zasadniczej różnicy w wartościach prądów ziemnozwarciowych w tych dwóch rodzajach sieci elektroenergetycznych. Poziomy prądów doziemienia są zdeterminowane przez sposoby połączenia punktów neutralnych tych sieci, a co za tym idzie różnych ścieżek przepływu prądów zwarciovych wywoływanych podczas bezpośredniego lub pośredniego kontaktu przewodu fazowego z gruntem w obu rodzajach sieci. Ponieważ sieci SN pracują z punktem neutralnym uziemionym nieskutecznie, czynnikiem decydującym o poziomie prądów ziemnozwarciowych jest łączna pojemność ziemnozwarciowa sieci SN, która jest pochodną rozmiarów sieci w terenie i udziału w nich linii kablowych. Z kolei sieci przesyłowe pracują z punktem neutralnym skutecznie uziemionym, a ta cecha tych sieci decyduje o tym, że poziomy prądów zwarciovych są pochodną sumarycznej wartości impedancji między wypadkowym źródłem zasilania a miejscem doziemienia, która może być teoretycznie bardzo mała. Ze względu na ograniczoną wartość prądów ziemnozwarciowych przez względnie niewielkie pojemności doziemne sieci SN, wykrywanie ich wystąpienia jest trudne, szczególnie w przypadku zwarcć pośrednich, gdy rezystancja ścieżki zwarcioviej przewod – ziemia jest znaczna, co dodatkowo wpływa na redukcję wartości prądu doziemienia. Z kolei w sieciach przesyłowych zwarcia przez względnie dużą rezystancję zdarzają się jedynie w szczególnych okolicznościach tj. w terenie, gdzie słupy energetyczne posadowione są w terenie ekstremalnie suchym lub na skale.

Dodatkowym czynnikiem komplikującym wykrywanie doziemień w sieciach SN jest stosowane w nich co najmniej trzech różnych sposoby uziemienia punktu neutralnego. Punkt neutralny może pozostać izolowany, uziemiony przez rezystor lub cewkę kompensacyjną [1], przy czym stan ten może ulegać tymczasowym zmianom podczas eksploatacji takiej sieci.

Konwencjonalne admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe w swym działaniu analizują relacje między składowymi zerowymi prądu i napięcia w punktach zabezpieczeniowych, przy czym analizowane są składowe

podstawowe tych sygnałów. Na czułość działania tych zabezpieczeń, wpływ ma przede wszystkim kryterium nadnapięciowe zasilane składową zerową napięcia mierzonego na szynach stacji SN oraz dokładność pomiaru składowych zerowych prądu w zabezpieczanych liniach SN wyprowadzonych ze stacji elektroenergetycznej.

Pierwszy z wymienionych czynników związany jest asymetrią napięciową panującą w sieciach SN, a wynikającą z asymetrii rozmieszczenia przewodów fazowych linii względem ziemi [2]. Należy nadmienić, że zjawisko to szczególnie występuje w sieciach izolowanych napowietrznych oraz w sieciach kompensowanych, natomiast zwiększanie się udziału odcinków kablowych prowadzi do symetryzacji napięciowej sieci. Asymetria napięciowa musi być uwzględniana w syntezie i analizie zabezpieczeń ziemnozwarciowych sieci SN w celu minimalizacji zadziałań nadmiarowych w przypadku braku doziemienia w sieci.

Drugim źródłem trudności są błędy prądowe i kątowe wprowadzane przez przekładniki prądowe Ferrantiego, powszechnie stosowane do pomiarów prądów ziemnozwarciowych na wyprowadzeniach linii ze stacji SN. W opinii autorów poprawne modelowanie tego typu przekładników jest równie istotne, gdy syntezywane i analizowane są algorytmy wykorzystujące inne kryteria działania niż parametry składowych podstawowych sygnałów zabezpieczeniowych. Należy szczególnie zwracać uwagę na adekwatność modeli przekładników przy syntezie metod zabezpieczeniowych bazujących na analizie falkowej [3], metodach szeroko pojętej sztucznej inteligencji [4-7] lub metod ogólnie klasyfikowanych jako wysokoczęstotliwościowe [8, 9]. Oczywiście klasyczne rozwiązania, takie jak np. zabezpieczenia admitancyjne, przy doborze charakterystyk działania (dobór nastawień tych zabezpieczeń) wymagają znajomości błędów prądowych PP, ale ze względu na trudności w analizie zależności błędu (wyrażonego w %) od prądu pierwotnego w linii, przyjmuje się stałą jego wartość wyrażoną w jednostkach mianowanych. Np. w [1] proponuje się przyjmować stałą wartość błędów po stronie wtórnej równą 50 mA wnoszonych przez przekładniki Ferrantiego starszego typu oraz 20 mA w przypadku zastosowania przekładników wyprodukowanych po roku 2000. W doborze

nastawień zabezpieczeń błędy kątowe przekładników Ferrantiego uznaje się za nieznaną.

Należy w tym miejscu nadmienić, że mowa jest tutaj o błędach pojawiających się podczas doziemień, gdy pierwotny prąd 3I0 przyjmuje wartości znamionowe prądu pierwotnego przekładnika. Zdecydowanie błędów tych nie należy kojarzyć ze zjawiskiem nasycenia rdzenia przekładnika prądowego, które występują podczas zwarcia charakteryzujących się dużymi wartościami prądów ziemnozwarciowych, często z udziałem składowej nieokresowej.

Ponieważ w zabezpieczeniowych metodach wysokoczęstotliwościowych wykorzystywane są informacje z pasma znacznie powyżej 50 Hz, model przekładnika prądowego powinien uwzględniać wszystkie zjawiska elektromagnetyczne transformacji prądu mogące mieć wpływ na generowanie tego typu zakłóceń w prądach wtórnych przekładników zasilających zabezpieczenia.

Należy podkreślić, że istnieją dwa rodzaje zwarcia doziemnych w sieciach SN, które mogą stanowić wyzwanie dla algorytmów klasycznych np. admitancyjnych. W pierwszym przypadku wzrost impedancji zwarcia doziemnego zwiększa błędy pomiaru admitancji zarówno dla uszkodzonych, jak i zdrowych linii, co może skutkować działaniami nadmiarowymi w przypadku celowej redukcji progów rozruchowych. Środkiem zaradczym w tym przypadku jest jednak podwyższenie nastawy układu rozruchowego zerowo napięciowego oraz podwyższenie nastawy susceptancji (admitancji) dla poszczególnych zabezpieczeń admitancyjnych linii. Skutkuje to jednak niską czułością zabezpieczenia na zwarcia wysoko impedancyjne (High Impedance Faults - HIF), powszechnie określane jako zwarcia doziemne, niewykrywane przez konwencjonalne zabezpieczenia ziemnozwarciowe.

Drugi problem związany jest z cechami charakterystycznymi zjawisk ziemnozwarciowych. Podczas zwarcia doziemnych ścieżka zwarcia obejmuje łuk zwarcia i rezystancję gruntu. Prąd ziemnozwarciowy i napięcie składowej zerowej podczas takich doziemień charakteryzują się wysokim stopniem niestacjonarności i udziałem wyższych harmonicznych. Konwencjonalne zabezpieczenia ziemnozwarciowe (w tym admitancyjne) wykorzystują wielkości wyznaczone dla częstotliwości podstawowej. Jednak w przypadku trwałego niestacjonarnego zwarcia łukowego parametry sygnałów zasilających przekładnik, takie jak ich amplitudy czy relacje fazowe sygnałów zabezpieczeniowych, ulegają zmianom w czasie, co sprawia, że ich przetwarzanie klasycznymi metodami analizy Fourierskiej jest nieefektywne. W związku z tym sygnały kryterialne charakteryzują się dużą zmiennością podczas doziemienia, a to prowadzi do naprzemiennych pobudzeń i odpadów przekładników, co z kolei skutkuje brakiem zadziałania. Szacuje się, że w polskich sieciach SN około 5-15% zwarcia doziemnych o charakterze przejściowym nie jest wykrywanych, a problem dotyczy głównie sieci kompensowanych.

Ze względu na niepodważalny problem wzrostu prawdopodobieństwa niewykrucia zwarcia doziemnych dla wyższych rezystancji ścieżki zwarcia, a także wydłużanie się okresów między ponownymi zapłonami łuku podczas zwarcia przerywanych, poszukuje się sposobów na poprawę czułości zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Badania nad zarysowanymi problemami dotyczą głównie nowych metod przetwarzania sygnałów zapewniających opracowanie bezpiecznych i niezawodnych algorytmów podejmowania decyzji. Dlatego też prace badawcze koncentrują się obecnie nad kryteriami wykorzystującymi szersze pasma częstotliwościowe sygnałów zabezpieczeniowych.

Kierunki rozwoju nowych kryteriów wykrywania doziemień w sieciach rozdzielczych obejmują zawansowane metody przetwarzania sygnałów, często opracowywane na drodze uczenia maszynowego, uczenia sztucznych sieci neuronowych, czy też zawansowanych metod wysokoczęstotliwościowych takich jak transformata falkowa. Wszystkie wymienione kierunki badań wymagają wiarygodnych źródeł sygnałów zabezpieczeniowych uwzględniających również nieliniowości ziemnozwarciowych przekładników prądowych.

Zastosowanie wspomnianych technik do zadania wykrywania doziemień wymaga często uprzedniego przygotowania, na drodze modelowania cyfrowego, odpowiednio licznych zbiorów danych zwarcia w linii zdrowych i doziemionych, na podstawie których, są opracowywane i weryfikowane systemy zabezpieczeniowe sieci SN. Specyfika takiego podejścia do opracowywania nowych metod podejmowania decyzji wymusza szczególnie dokładne odwzorowanie właściwości rzeczywistych torów pomiarowych w programach symulacyjnych, w których modelowane są sieci rozdzielcze dla potrzeb generacji danych treningowo-testowych.

Przekładniki Ferrantiego

Działanie przekładnika Ferrantiego polega na sumowaniu strumieni magnetycznych wytworzonych przez obwód pierwotny, który może stanowić teoretycznie jeden przewodnik przeprowadzony przez okno przekładnika, a w praktycznych zastosowaniach np. trzy kable jednożyłowe, jeden kabel trójżyłowy lub trzy szynoprzewody, ew. większa liczba tego typu przewodników.

Obwód wtórny stanowi równomiernie nawinięty na rdzeniu z materiału magnetycznie miękkiego przewodnik o odpowiedniej liczbie zwojów. W wyniku zmian wypadkowego strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem wtórnym indukuje się w tym uzwojeniu siła elektromotoryczna wywołująca przepływ przez obciążenie przekładnika prądu wtórnego.

Jeżeli założy się sprzężenie obwodu wtórnego z trzema przewodnikami stanowiącymi obwód pierwotny, wówczas można mówić o trzech indukcyjnościach wzajemnych M_1 , M_2 , M_3 , które podczas pracy przekładnika skutkują indukowaniem się w obwodzie wtórnym napięcia zwanego siłą elektromotoryczną wyrażonego następującą zależnością od prądów pierwotnych

$$(1) \quad e_w = M_1 \frac{di_1}{dt} + M_2 \frac{di_2}{dt} + M_3 \frac{di_3}{dt}$$

Teoretycznie, przy założeniu równości sprzężeń magnetycznych $M_1 = M_2 = M_3$ i pominięciu prądu magnesowania, prąd wtórny przekładnika powinien być równy

$$(2) \quad i_w = 3i_0 = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$$

Wspomniane warunki spełnia tylko przekładnik, którego rdzeń jest wykonany z materiału o liniowej charakterystyce magnesowania, a dodatkowo, dla zapewnienia zerowego prądu magnesowania, charakterystyka magnesowania materiału rdzenia przekładnika jest maksymalnie stroma.

W rzeczywistości charakterystyka magnesowania jest nieliniowa, a nieliniowość ta jest funkcją wypadkowego natężenia pola magnetycznego wytworzonego przez prądy obwodu pierwotnego. Zakładając teraz jakąkolwiek nieliniowość charakterystyki, należy zdać sobie sprawę z tego, że na wartości sprzężeń magnetycznych mają wpływ dwa czynniki, a mianowicie rozmieszczenie geometryczne przewodów pierwotnych faz L1, L2, L3 w oknie przekładnika oraz wartości prądów płynących w tych fazach. Rozważając

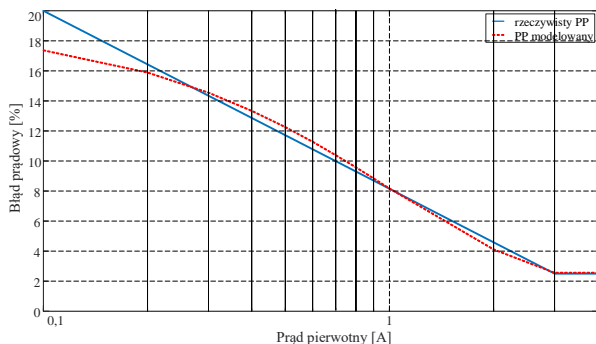
teraz możliwość zapewnienia pełnej symetrii w takim układzie, należy zaznaczyć, że o ile teoretycznie można rozważać pełną symetrię geometrii rozmieszczenia przewodników w oknie przekładnika, która przy równości prądów fazowych zapewniałaby symetrię magnetyczną układu, o tyle założenie w praktycznych zastosowaniach symetrii przepływu prądów w oknie przekładnika jest bezpodstawne. W związku z tym asymetria, o której często się wspomina, jest spowodowana nie tylko niesymetrycznym ułożeniem przewodów w oknie przekładnika, ale również asymetrią transformowanych prądów fazowych. Asymetria ta może prowadzić do lokalnych nasyceń materiału rdzenia PP [10]. Symetrię można osiągnąć przez centralnie montowanie jednego przewodnika w oknie przekładnika, taki wariant stosowany jest np. przy badaniu błędów przekładnika, lub przez nawinięcie dodatkowego uzwojenia na rdzeniu złożonego z czterech sekcji połączonych równolegle. W tym drugim przypadku, jeśli w jakimś odcinku rdzenia występuje większy strumień niż w pozostałych jego częściach, to indukują on w odpowiedniej sekcji większe napięcie, które wymusza wzrost prądu w pozostałych równolegle połączonych sekcjach, przez co wyrównuje strumień w całym rdzeniu. Dzięki temu rozwiązaniu przekładniki z uzwojeniami wyrównującymi można w przybliżeniu traktować tak, jak gdyby ich przewody uzwojenia pierwotnego były zawsze umieszczone symetrycznie i płynęły przez nie prądy z symetrycznie rozłożoną składową zerową.

Błędy prądowe przekładnika Ferrantiego i modelowanie ich źródeł

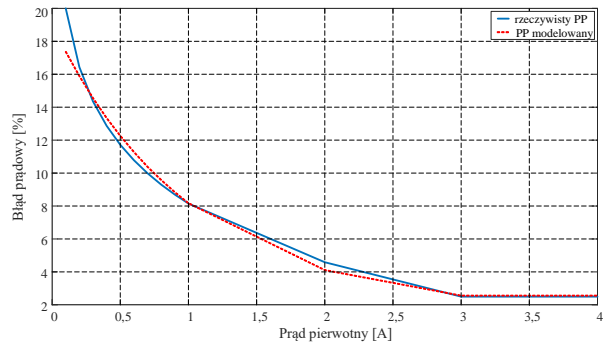
Celem badań było opracowanie modelu przekładnika Ferrantiego możliwie dokładnie odwzorowującego prąd magnesowania rzeczywistego przekładnika IO-85-N lub IO-100-N. Są to przekładniki o standardowej przekładni 1:100, znamionowym prądzie wtórnym 1 A i obciążeniu znamionowym $R_{obc} = 2 \Omega$. Charakterystykę błędu prądowego rzeczywistego przekładnika tego typu dla prądów pierwotnych poniżej 4 A przedstawiono na rysunku 1 linią ciągłą. Dla wartości prądu pierwotnego powyżej 3 A producent gwarantuje błąd równy 2,5%.

Wartości prądu pierwotnego zostały na osi odciętych odłożone na wykresie z rysunku 1 logarytmicznie, natomiast rysunek 2 przedstawia charakterystyki dla wartości prądu pierwotnego odłożonych liniowo.

Postać charakterystyki z rysunku 2 jest o tyle istotna, że pozwala wyznaczyć w funkcji prądu pierwotnego wartości prądu magnesującego (starty w miedzi i w żelazie



Rys.1. Charakterystyka błędu pomiaru prądu I_p rzeczywistego (IO-85N) i modelowanego w SIMULINK-u przekładnika Ferrantiego. (prąd pierwotny odłożony logarytmicznie)



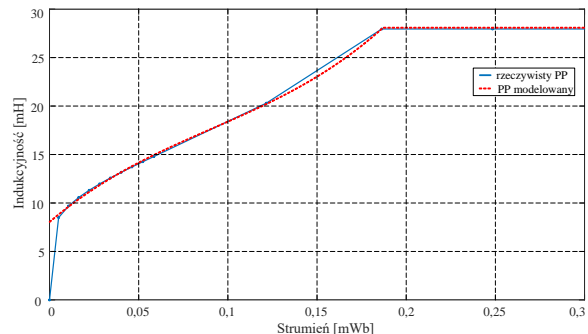
Rys.2. Charakterystyka błędu pomiaru prądu I_p rzeczywistego (IO-85N) i modelowanego w SIMULINK-u przekładnika Ferrantiego (prąd pierwotny odłożony liniowo)

pominięto), który powinien być modelowany jako prąd chwilowy poprzecznej gałęzi magnetyzacji rdzenia przekładnika.

Prace nad modelem skupiały się na tej części charakterystyki magnesowania, ponieważ planuje się zastosować go do modelowania zwarć wysokooporowych w sieciach rozdzielczych SN. Wiadomo natomiast, że nastawy prądowe jak i admitancyjne zabezpieczeń w sieciach o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym są determinowane błędami prądowymi przekładników ziemnozwarciowych zastosowanych w układach zabezpieczeniowych sieci dystrybucyjnych SN. Zgodnie z charakterystyką udostępnianą przez producenta tych przekładników założono, że powyżej prądu pierwotnego 3 A błąd prądowy wyrażony procentowo będzie stały, czyli wartość skuteczna modelowanego prądu magnesowania będzie zależeć liniowo od napięcia strony wtórnej z uwzględnieniem innych wartości Z_{obc} niż znamionowe.

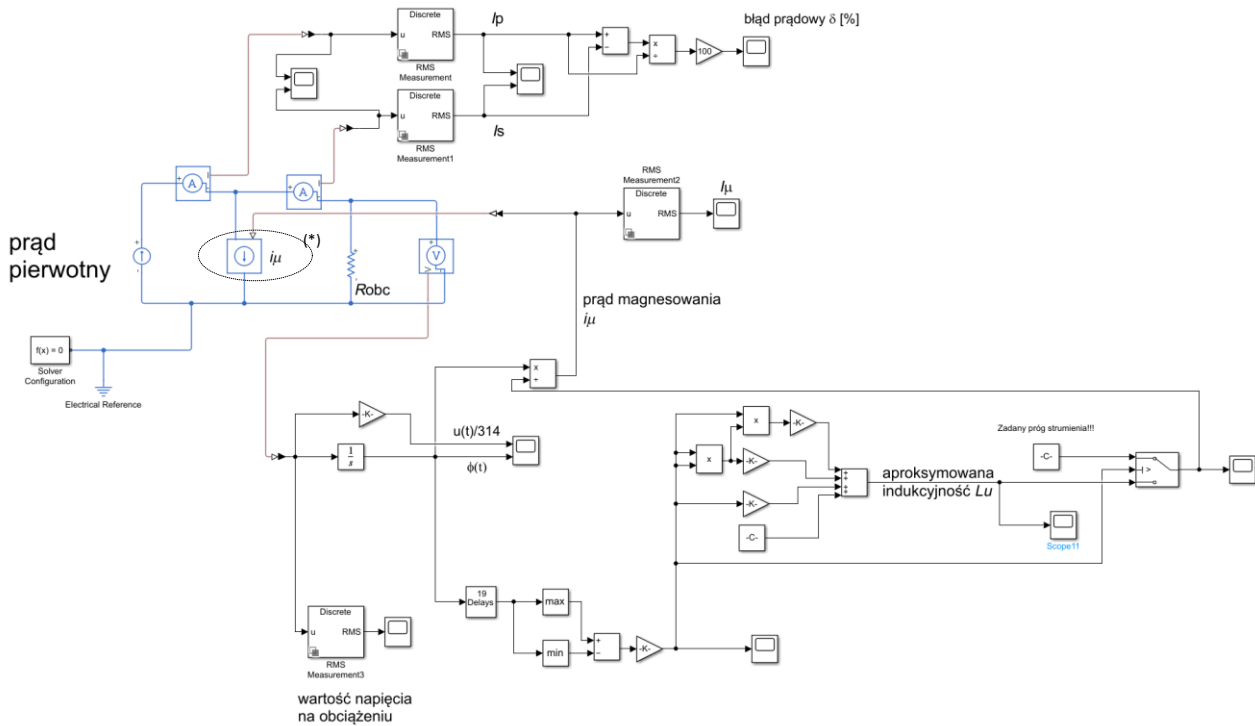
Podstawowym mechanizmem modelowania błędów całkowitych jest wymuszanie prądu magnesowania gałęzi poprzecznej modelu przekładnika za pomocą źródła prądowego sterowanego w funkcji napięcia na obciążeniu PP i zaprogramowanej na drodze aproksymacji zależności indukcyjności tej gałęzi od strumienia magnetycznego wyznaczonego w drodze całkowania napięcia na obciążeniu.

Umieszczenie wspomnianych źródeł prądowych zaznaczano symbolem (*) na rysunku 4 (model w Simscape Electrical) i rysunku 5 (ATP-EMTP). Wartość prądu magnesowania wylicza się w modelu jako iloraz chwilowej wartości strumienia i aproksymowanej indukcyjności gałęzi magnesowania zgodnie z zależnością:



Rys.3. Zależność indukcyjności gałęzi poprzecznej rzeczywistego (IO-85N) i modelowanego w SIMULINK-u przekładnika Ferrantiego od strumienia magnetycznego w rdzeniu

Model przekładnika Ferrantiego IO-85-N lub IO-100-N ; Robc=20hm



Rys.4. Model przekładnika ziemnozwarciowego (IO-85N) zaimplementowany w SIMULINK-u (moduł Simscape Electrical Version 23.2)

$$(3) \quad i_{\mu}(t) = \frac{\Psi(t)}{L(t)}$$

$$(4) \quad \Psi(t) = \int_0^t u_{obc}(\tau) d\tau$$

natomiast indukcyjność jest modelowana wielomianem trzeciego stopnia zgodnie z:

$$(5) \quad \begin{cases} L(t) = a_3 \Psi^3 + a_2 \Psi^2 + a_1 \Psi + a_0 & \text{dla } \Psi < 0.1863 \text{ mVs} \\ L(t) = 27.6 \text{ mH} & \text{dla } \Psi \geq 0.1863 \text{ mVs} \end{cases}$$

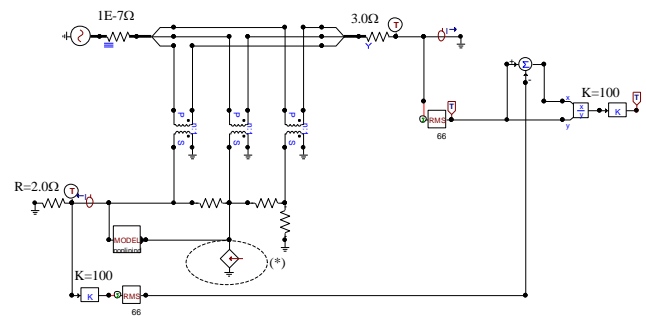
Współczynniki wielomianu aproksymującego zależność indukcyjności gałęzi poprzecznej modelu od strumienia magnetycznego wyznaczono korzystając z funkcji **fit** MATLAB-a zasilanej współzrędnymi dwunastu punktów odczytanych z rysunku 3 dla wartości strumienia poniżej 0.18663 mWb. Finalnie współczynniki (5) miały następujące wartości:

$$a_0 = 8.03936E-3 \quad a_1 = 1.5654E+2 \\ a_2 = -8.3626E+5 \quad a_3 = 3.0601E+9$$

Dla poprawnego modelowania chwilowej indukcyjności istotne jest określenie kierunku zmian aktualnej krzywej magnesowania (wzrost lub malenie) na podstawie przebiegu wartości strumienia magnesowania w funkcji czasu. Założono, że opóźnienie wyznaczenia aktualnej krzywej magnesowania nie jest krytyczne, a wartość szczytową strumienia określano na podstawie analizy 20-tu próbek strumienia w oknie o długości okresu składowej podstawowej. Procedura taka wprowadzała opóźnienie aproksymacji jedynie przy maleniu wartości (quasi skutecznej) strumienia, którą wyznaczano jako:

$$(6) \quad \Psi_{q_sk} = 0.5(\Psi_{\max_{20ms}} - \Psi_{\min_{20ms}}) / \sqrt{2}$$

gdzie $\Psi_{\max_{20ms}}$ to maksymalna wartość chwilowa strumienia zarejestrowana w ostatnim okresie składowej podstawowej obliczanego strumienia magnetycznego.



Rys.5. Układ badania charakterystyki błędu prądowego modelowanego przekładnika IO-85-N opracowany w ATPDraw; (*) - sterowane źródło prądowe modelujące prąd magnesowania przekładnika

Weryfikacja dokładności przetwarzania składowej zerowej prądu

W celu zbadania dokładności odwzorowania charakterystyki transformacji rzeczywistego przekładnika Ferrantiego przez zaproponowany model przygotowano dwa układy testowe do wyznaczania jego błędu prądowego. Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu testowego oraz modelu przekładnika opracowanych w środowisku Simscape Electrical Matlaba, natomiast na rysunku 5 analogiczne układy przygotowane w środowisku ATPdraw i uruchamiane w EMTP/ATP. Jak widać, układ w ATPdraw wydaje się prostszy dzięki wykorzystaniu procedur programistycznych oferowanych przez język MODELS w EMTP. Przygotowany skrypt w MODELS układu sterowania

źródłem prądowym magnesowania zamieszczono w Dodatku. Model przygotowany w Simscap Toolbox opracowano jedynie z wykorzystaniem dostępnych bloków operacyjnych standardowej biblioteki tego środowiska.

W układzie testowym modelu PP w EMTP do wymuszania składowej zerowej prądu (rysunek 5) wykorzystano prosty układ trójfazowego źródła napięciowego o zerowych przesunięciach fazowych między poszczególnymi fazami obciążonego rezystancjami $3\ \Omega$ połączonymi w uziemioną gwiazdę. Przy wykorzystaniu bloków TACS wyznaczano amplitudę prądu pierwotnego i wtórnego, a ich względną różnicę interpretowano jako procentowy błąd prądowy. Porównania charakterystyk błędów prądowych w układzie współrzędnych logarymicznych i liniowych przekładnika rzeczywistego i modelowanego można dokonać odpowiednio na podstawie wykresów z rysunku 1 i 2. Jak widać, odwzorowanie jest wiarygodne w szerokim zakresie zmian prądu pierwotnego z wyjątkiem wartości bardzo małych, tj. poniżej 0.25 A. Dokładność odwzorowania charakterystyki rzeczywistego przekładnika można poprawić modelując indukcyjność wielomianem stopnia wyższego od 3.

Analizując dokładność zaproponowanego modelu przekładnika Ferrantiego, zauważono pewne rozbieżności wyników związane z błędami modelowania w środowisku EMTP względem metod w Simscap Electrical podczas wydłużania kroku obliczeń ΔT . Przyczyną tych rozbieżności jest prawdopodobnie zastosowanie prostych metod rozwiązywania równań różniczkowych (metod integracji) w EMTP względem Simulinka, w którym można wybierać spośród wielu różnych metod modelowania układów dynamicznych. Mając to na uwadze, należy, korzystając ze środowiska EMTP, zachować z tego i nie tylko tego względu ostrożność przy przyspieszaniu obliczeń poprzez wydłużanie kroku obliczeń ΔT .

Wpływ nieliniowości charakterystyki przekładnika na pomiar admitancji

Do analizy dokładności pomiaru składowych admitancji zamodelowano mieszaną napowietrzno-kablową sieć SN z pięcioma liniami o łącznym doziemnym prądzie pojemnościowym systemu $I_{CS}=75,7\text{ A}$.

Wysokooporowe jednofazowe zwarcia doziemne modelowano w linii o największym i najmniejszym pojemnościowym prądzie ziemnozwarciowym odpowiednio $I_{CF4}=27,51\text{ A}$ i $I_{CF2}=4,25\text{ A}$, dobierając taką wartość rezystancji gruntu, aby składowa zerowa napięcia podczas doziemienia była równa połowie przyjętego napięciowego progu rozruchowego członu nadnapięciowego $U_0 = 10\text{ V}$.

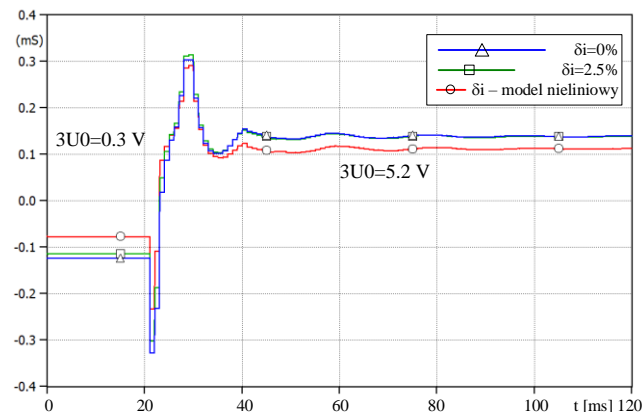
Wyniki zestawiano dla trzech sposobów modelowania przekładnika Ferrantiego: przekładnika idealnego (model bez poprzecznej gałęzi magnesowania), przekładnika ze stałą procentową wartością błędu prądowego 2,5%, oraz przekładnika z zaproponowaną charakterystyką magnesowania modelowaną wielomianem trzeciego stopnia.

Ponieważ badania prowadzono dla sieci z punktem neutralnym izolowanym, główną uwagę położono na wartości susceptancji jako wielkości kryterialnej zabezpieczenia ziemnozwarciowego.

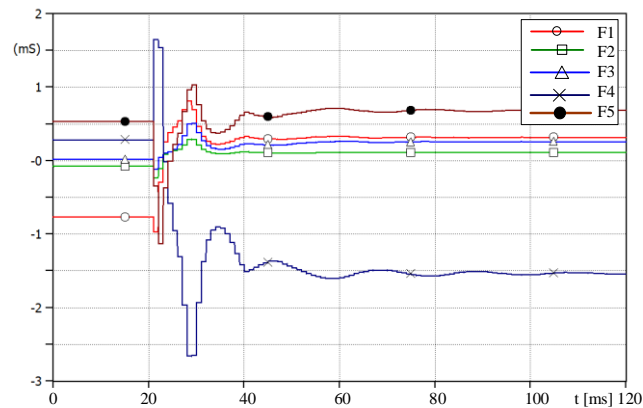
Dla tak zamodelowanej sieci napięcie $3U_0$ po wtórnej stronie filtra składowej zerowej (układ otwartego trójkąta) przyjmowało wartości poniżej 10 V dla całkowitej rezystancji ścieżki zwarcia powyżej 2,7 k Ω .

Na rysunku 6 przedstawiono wartości wyznaczanych susceptancji dla trzech modeli magnesowania PP zainstalowanych na linii o najmniejszym pojemnościowym prądzie ziemnozwarciowym podczas doziemienia w linii o prądzie pojemnościowym największym spośród wszystkich

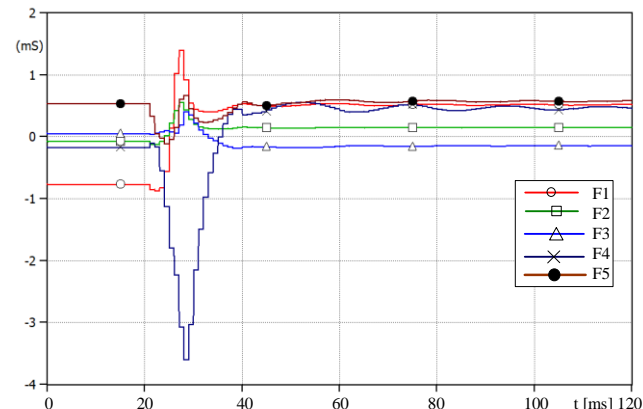
linii sieci SN. Widać, że błąd pomiaru jest znacznie większy dla PP z modelowaną nieliniowo gałęzią magnesowania w porównaniu wynikami otrzymanymi na podstawie transformacji prądu przez przekładnik idealny i PP ze stałą wartością indukcyjności poprzecznej gałęzi magnesowania.



Rys.6. Wyniki pomiaru susceptancji dla składowej zerowej w linii $I_{CL2}= 4,25\text{ A}$ podczas doziemienia w linii $I_{CL1}= 27,51\text{ A}$ dla trzech sposobów modelowania poprzecznej gałęzi magnesowania PP Ferrantiego ($R_i=2,7\text{ k}\Omega$)



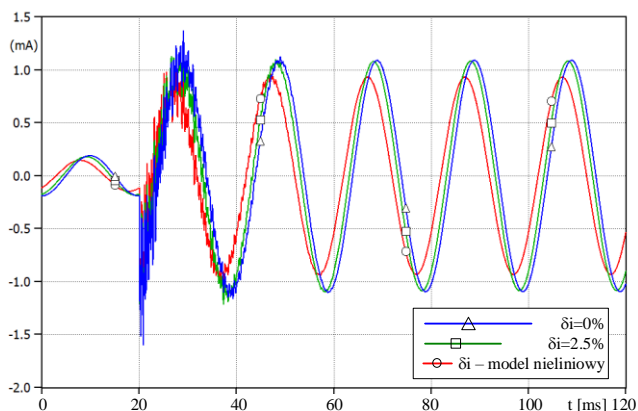
Rys.7. Wyniki pomiaru susceptancji dla składowej zerowej linii sieci $I_{CS}= 75,7\text{ A}$ podczas doziemienia w linii $I_{CF4}= 27,51\text{ A}$ liczonych na podstawie składowej zerowej prądów transformowanych przez nieliniowe PP Ferrantiego ($R_i=2,7\text{ k}\Omega$)



Rys.8. Wyniki pomiaru susceptancji dla składowej zerowej linii sieci $I_{CS}= 75,7\text{ A}$ podczas doziemienia w linii $I_{CF4}= 27,51\text{ A}$ liczonych na podstawie składowej zerowej prądów transformowanych przez nieliniowe PP Ferrantiego ($R_i=10\text{ k}\Omega$)

Z kolei na rysunku 7 zestawiono wyniki pomiaru susceptancji we wszystkich liniach sieci podczas tego

samego doziemienia, które dot. rysunku 8. Widać tutaj różnicę w znaku susceptancji linii doziemionej vs. linii zdrowych. Mimo możliwości rozróżnienia stanu tych linii na podstawie znaku susceptancji, kryterium nie zostanie uruchomione ze względu na niską wartość kryterium nadnapięciowego $3U_0$.



Rys.9. Przebiegi składowej zerowej prądu (po stronie wtórnej) podczas doziemienia w linii F4 otrzymane dla trzech sposobów modelowania poprzecznej gałęzi magnesowania PP Ferrantiego ($R_f=10\text{ k}\Omega$)

Przy wzroście rezystancji przejścia do $10\text{ k}\Omega$ wartości susceptancji wyznaczone dla poszczególnych linii są już porównywalne pod względem znaku i wartości (nierozróżnialne) względem wartości dla stanu przed zwarcia. Względnie duże błędy transformacji PP Ferrantiego (20% i więcej) nakładają się na błędy wynikające z dużego udziału w $3U_0$ napięciowej asymetrii sieci.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe chwilowe wartości prądów wtórnych trzech modeli PP Ferrantiego dla doziemienia przez $R_f = 10\text{ k}\Omega$. Z przebiegów tych można wywnioskować, że nieliniowość charakterystyki dla małych wartości prądu pierwotnego wpływa znacząco również na błąd kątowy i tym samym wskazowy PP.

Wnioski

Model PP Ferrantiego z nieliniowością charakterystyki magnesowania dla małych prądów pierwotnych zaproponowano w celu uwzględnienia w większym stopniu wpływu rzeczywistej nieliniowości krzywej magnesowania rdzenia tego typu przekładnika na działanie algorytmów klasyfikacji stanu sieci SN podczas zjawisk charakteryzujących się skrajnie małymi wartościami mierzonych prądów zabezpieczeniowych.

Niekonwencjonalne metody wykrywania np. zwarcz wysokooporowych zwykle wykorzystują kryteria odstrajane od częstotliwości podstawowej sieci elektroenergetycznej, jednak nieliniowość rzeczywistej charakterystyki magnesowania PP mogą mieć wpływ na przebiegi chwilowe składowej zerowej prądu również dla wyższych

częstotliwości. Wg autorów zapewnienie odpowiedniej czułości i selektywności projektowanych niekonwencjonalnych metod estymacji stanu elementów sieci el-en. wymaga uwzględnienia w miarę możliwości wszystkich źródeł błędów sygnałowych pogarszających skuteczność tych metod.

Zaproponowane podejście stanowi uzupełnienie zbioru modeli źródeł zakłóceń, którymi, z punktu widzenia automatyki zabezpieczeniowej, są również: naturalna asymetria sieci SN, harmoniczne sygnałów zabezpieczeniowych mające swe źródło poza zjawiskami zwarciami oraz błędy PP dla podanej klasy dokładności.

Autorzy: dr hab. inż. Mirosław Łukowicz, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Janiszewskiego 8, 50-372 Wrocław, E-mail: miroslaw.lukowicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Mateusz Myśliwiec, Szkoła Doktorska Politechniki Wroclawskiej, E-mail: mateusz.mysliwiec@pwr.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Hoppel W., Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażań; Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [2] Marciniak L., Parametry asymetrii dla składowej zerowej w sieciach średnich napięć; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 3/2020
- [3] Huang Jingguang, Hu Xiangyong, Li Xianshan, Hu Hanmei, Lv Yanping., A Novel Single-Phase Earth Fault Feeder Detection by Traveling Wave and Wavelets, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006, Chongqing, China, 22–26 October 2006.
- [4] Bretas AS, Hadsaid N., Fault Diagnosis in Deregulated Distribution Systems using an Artificial Neural Network, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 23–27 January 2000, Vol. 2, pp. 821–823.
- [5] El-Amin IM, Al-Mubarak MH., Detection of high impedance faults using artificial neural networks, 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12–15 May 2003.
- [6] Haghifam M.-R., Sedighi A.-R., Malik OP., Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., May 2006, Vol. 153, No. 3, pp. 359–367.
- [7] Marciniak L., Wykrywanie zwarcz doziemnych w sieciach średnich napięć z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej sygnałów, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017, pp. 56-59.
- [8] Altonen J., Wahlroos A., Application of novel multi-frequency neutral admittance method into earth-fault protection in compensated MV-networks; 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), April 2014.
- [9] Altonen J., Wahlroos A., Vahakuopus S., Application of multi-frequency admittance based fault passage indication in practical compensated medium-voltage network, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Glasgow 12-15 June 2017, pp. 947–951.
- [10] Jones K. W., Addressing Window Type Transformer Proximity Errors, 59th Annual Conference for Protective Engineers, Texas A&M, College Station, USA (2006).