

doi:10.15199/48.2024.12.10

# Modelowanie zwarć wewnętrznych w generatorach i transformatorach oraz zabezpieczeń do ochrony przed ich skutkami

**Streszczenie.** W artykule opisano zagadnienia dotyczące modelowania zwarć wewnętrznych w generatorach synchronicznych i transformatorach. Opisano rodzaje zwarć wewnętrznych w tych elementach SEE, a także rodzaje zabezpieczeń chroniących je przed skutkami tych zwarć. Przedstawiono zbudowane w programie PSCAD/EMTDC układy testowe do badania zabezpieczeń do ochrony generatorów i transformatorów przed skutkami zwarć wewnętrznych. Zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych zamodelowanych zabezpieczeń od skutków zwarć wewnętrznych.

**Abstract.** The article describes issues related to modeling internal faults in synchronous generators and transformers. The types of internal short circuits in these power system elements are described, as well as the types of protections protecting them against the effects of these short circuits. Test systems built in the PSCAD/EMTDC program for testing protections for protecting generators and transformers against the effects of internal short circuits are presented. Selected results of simulation tests of modeled protection against the effects of internal short circuits are included. (*Modeling of internal faults in generators and transformers and protection against their effects*).

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, modelowanie zabezpieczeń, zwarcia wewnętrzne, PSCAD/EMTDC.  
**Keywords:** power system protections, modelling of power system protections, internal faults, PSCAD/EMTDC.

## Wstęp

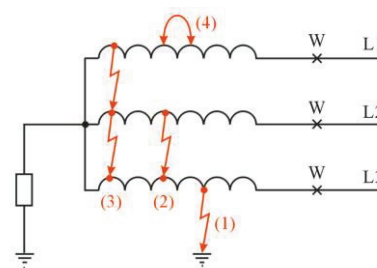
Za wytwarzanie energii elektrycznej odpowiadają w głównej mierze generatory synchroniczne, a za jej dystrybucję oraz wyprowadzenie mocy z elektrowni transformatory energetyczne. Ich prawidłowa praca ma istotny wpływ na bezpieczeństwo funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Jednym z zakłóceń pracy tych elementów są zwarcia wewnętrzne, które powinny być selektywnie i z możliwie najkrótszym czasem identyfikowane w celu ich skutecznej eliminacji.

Do ochrony generatorów i transformatorów przed skutkami zwarć wewnętrznych stosowane są urządzenia elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) eliminacyjnej [1,2]. Funkcje zabezpieczeniowe wykorzystywane do tego celu to m.in. zabezpieczenie różnicowe generatora, zabezpieczenie chroniące do 95% oraz chroniące 100% uzwojenia stojana oraz zabezpieczenie różnicowe transformatora. Należy podkreślić, że w celu prawidłowego działania zabezpieczeń kluczowe jest również wprowadzenie poprawnych ich nastaw, aby szybko i skutecznie eliminowały one zwarcia wewnętrzne, przy jednoczesnym odstrojeniu zabezpieczenia od warunków skutkujących zbędnym jego zadziałaniem.

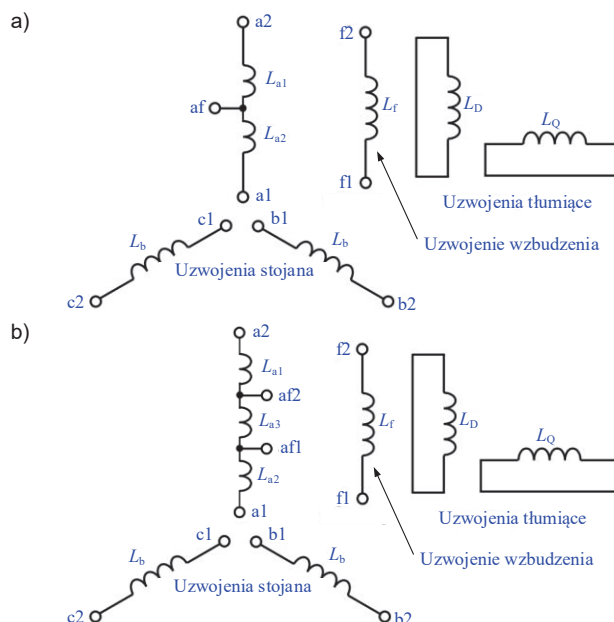
Do symulowania elektromagnetycznych stanów nieustalonych w systemach elektroenergetycznych (SEE) wykorzystuje się programy typu EMTP (ang. *Electromagnetic Transients Program*) [3]. Jednym z nich jest program PSCAD/EMTDC [4]. Oprogramowanie to jest stale rozwijane, a w jego bibliotece elementów są dostępne modele generatorów synchronicznych i transformatorów umożliwiające symulowanie zwarć wewnętrznych. Dzięki temu, że program PSCAD/EMTDC umożliwia wygenerowanie plików typu COMTRADE z zarejestrowanymi w trakcie symulacji przebiegami prądów i napięć w łatwy sposób można sprawdzać poprawności działania rzeczywistych urządzeń EAZ.

## Modelowanie zwarć wewnętrznych w generatorach

Zwarcia w obwodzie stojana należą do najczęstszych przyczyn uszkodzenia generatora [5]. Dzieli się one na zwarcia (rys.1) [1]: doziemne (1); międzyfazowe (2), (3); zwojowe (4).



Rys.1. Rodzaje zwarć wewnętrznych w uzwojeniach stojana generatora: (1) – zwarcie doziemne; (2), (3) – zwarcie międzyfazowe; (4) – zwarcie zwojowe; L1,L2,L3 – fazy; W – wyłącznik [6]



Rys.2. Schematy z podziałem uzwojeń stojana generatora w przypadku zwarć wewnętrznych: a) doziemnego, b) zwojowego; a,b,c – fazy; L - indukcyjności [7]

Modele generatorów dostępne w programach typu EMTP (np. PSCAD/EMTDC) przeznaczone do symulacji elektromechanicznych stanów nieustalonych opisane są

układami równań różniczkowych i algebraicznych [3]. Nie pozwalają one na symulację zwarć wewnętrznych (doziemnych, zwojowych, międzyfazowych) w uzwojeniach stojana. Ponadto modele te nie mają wyprowadzonego punktu gwiazdowego generatora co uniemożliwia modelowanie zabezpieczeń wykorzystujących ten punkt do swego działania (zabezpieczenie różnicowe od zwarć międzyfazowych w stojanie, zabezpieczenia chroniące do 95% i 100% uzwojeń stojana od zwarć doziemnych).

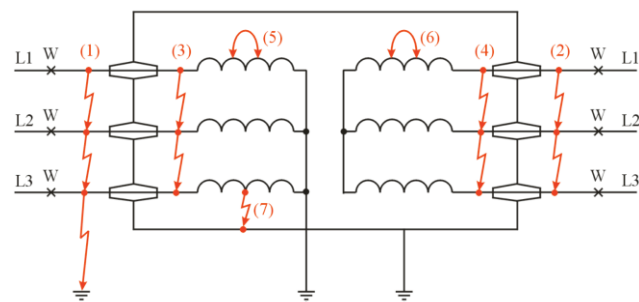
Modelowanie tego rodzaju zwarć umożliwia dopiero podział wybranego uzwojenia stojana na dwie części w przypadku zwarcia doziemnego lub na trzy części dla zwarcia zwojowego (rys.2). Wymaga to odpowiedniego przekształcenia macierzy tworzących model generatora [6,7]. Podczas badań symulacyjnych modeli zabezpieczeń wykorzystano model generatora z możliwością symulacji zwarć wewnętrznych (doziemnych i zwojowych) w fazie A udostępniony w bibliotece elementów programu PSCAD/EMTDC [7].

### Modelowanie zwarć wewnętrznych w transformatorach

W strefie ochrony transformatora trójfazowego, ograniczonej po stronie górnego i dolnego napięcia wyłącznikami W, mogą wystąpić następujące rodzaje zwarć (rys.3):

- zwarcia międzyfazowe zewnętrzne (z udziałem lub bez udziału ziemi) poza kadzią (1), (2);
- zwarcia międzyfazowe wewnętrzne (3), (4);
- zwarcia zwojowe (5), (6);
- zwarcia doziemne wewnętrzne (7).

Statystycznie do najczęściej występujących uszkodzeń transformatorów należą zwarcia zwojowe spowodowane uszkodzeniem układu izolacyjnego [8].



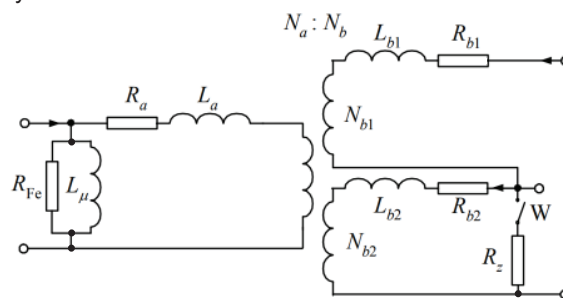
Rys.3. Rodzaje zwarć w transformatorze: (1), (2) – zwarcie doziemne i międzyfazowe zewnętrzne; (3), (4) – zwarcie międzyfazowe wewnętrzne; (5), (6) – zwarcie zwojowe; (7) – zwarcie doziemne wewnętrzne; L1,L2,L3 – fazy; W – wyłącznik [1]

Podobnie jak w przypadku generatorów programy typu EMTP zawierają modele transformatorów, które zwykle nie umożliwiają symulacji zwarć wewnętrznych. W takich przypadkach badanie skutków wystąpienia zwarć ogranicza się do ich symulacji między wyprowadzeniami faz transformatora i przekładnikami prądowymi lub poza przekładnikami prądowymi (zwarcia wewnętrzne lub zewnętrzne).

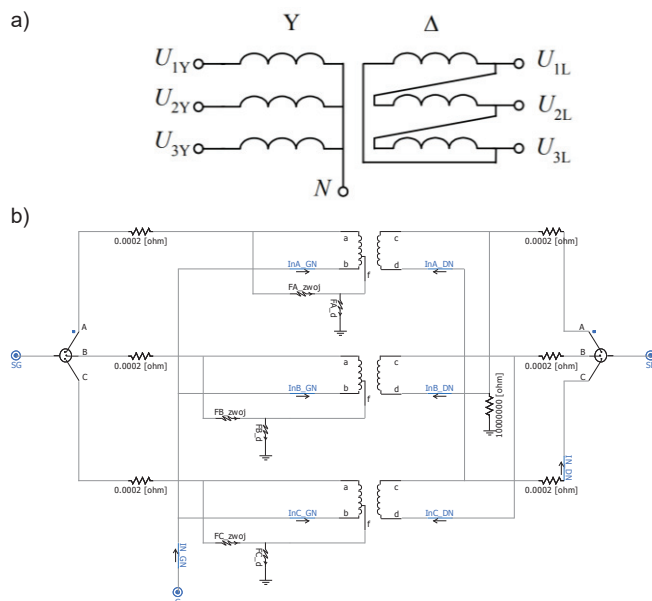
Zasada tworzenia modelu transformatora umożliwiającego symulację zwarcia wewnętrznego doziemnego, tak jak w przypadku generatorów, opiera się na podziale zwartego uzwojenia na dwie części, natomiast przy zwarcu wewnętrznym zwojowym uzwojenie dzielone jest na trzy części [9,10].

W celu zbudowania modelu transformatora trójfazowego dwuuzwojeniowego umożliwiającego symulację zwarć wewnętrznych można wykorzystać transformatory jednofazowe trójzwojeniowe (rys.4) dostępne w większości programów typu EMTP lub transformatory

jednofazowe dwuzwojeniowe z wewnętrznym odczepem (model dostępny w programie PSCAD/EMTDC). W takim przypadku z trzech jednostek jednofazowych można zbudować model transformatora trójfazowego. W tym celu zaciski strony pierwotnej i wtórnej transformatorów jednofazowych, należy odpowiednio połączyć w gwiazdę lub trójkąt, uzyskując w ten sposób określoną grupę połączeń transformatora. Na rysunku 5a pokazano schemat połączenia uzwojeń dla transformatora trójfazowego o grupie połączeń YNd11. Odzworowanie tej grupy połączeń w ramach modelu transformatora trójfazowego zbudowanego w programie PSCAD/EMTDC umożliwiającego symulację zwarć wewnętrznych pokazano na rysunku 5b.



Rys.4. Schemat zastępczy modelu transformatora jednofazowego trójzwojeniowego do symulacji zwarć wewnętrznych,  $R_x$ ,  $L_x$  – rezystancje i indukcyjności strony pierwotnej i wtórnej transformatora,  $N_x$  – liczba zwojów,  $R_{Fe}$  – rezystancja odpowiedzialna za straty w żelazie,  $L_\mu$  – indukcyjność magnesowania,  $R_z$  – rezystancja przejścia, W – wyłącznik,  $x = a, b, b1, b2$  [11]



Rys.5. Transformator o grupie połączeń YNd11: a) schemat, b) model ze włącznikami do symulacji zwarć wewnętrznych po stronie górnego napięcia zbudowany w programie PSCAD/EMTDC

Należy podkreślić, że odzworowanie transformatora trójfazowego za pomocą jednostek jednofazowych jest uproszczeniem, prawidłowym tylko dla transformatorów z rdzeniem pięciokolumnowym lub dużych transformatorów (np. blokowych) zbudowanych z jednostek jednofazowych, ponieważ transformator z rdzeniem trójkolumnowym nie pozwala na wydzielenie poszczególnych faz jako oddzielnych elementów. W przypadku transformatora trójkolumnowego wywołany przez składową zerową prądu strumień magnetyczny może się zamknąć jedynie przez

otoczenie rdzenia (powietrze, olej, obudowa), natrafiając na duży opór magnetyczny (reluktancję).

### Zabezpieczenia od zwarc wewnątrznych

Do zabezpieczeń stosowanych od skutków zwarc wewnątrznych (doziemnych i zwojowych) w obwodzie stojana generatora należą [1,2]:

- zabezpieczenie różnicowe wzdluzne (od skutków zwarc międzyfazowych),
- zabezpieczenie zerowonapięciowe chroniące do 95% uzwojenia stojana i zabezpieczenie chroniące 100% uzwojenia stojana np. kontrolujące podharmoniczny sygnał pomiarowy (od skutków zwarc doziemnych),
- zabezpieczenie podimpedancyjne (zabezpieczenie rezerwowe od skutków zwarc międzyfazowych).

Ze względu na konstrukcję generatorów o mocy znamionowej rzędu kilkuset MVA (w żłobku znajdują się pojedyncze zwoje uzwojenia stojana) nie stosuje się zabezpieczeń do ochrony od skutków zwarc zwojowych.

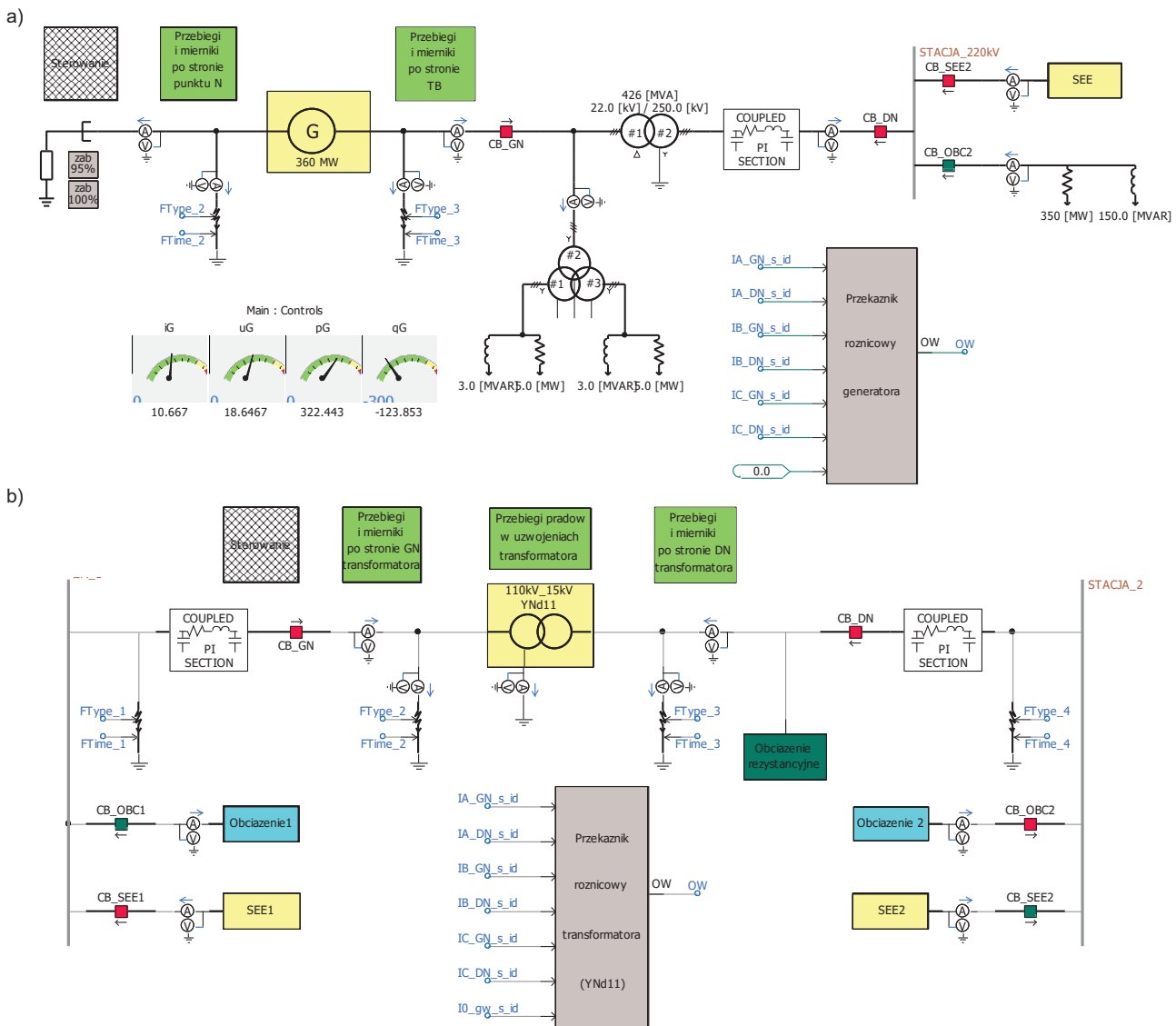
Podstawowymi zabezpieczeniami od zwarc wewnątrznych transformatorów o mocy znamionowej większej od 5 MVA są zabezpieczenia różnicowe [1].

Zabezpieczeniami rezerwowymi są zabezpieczenia zerowoprądowe ziemnozwarciowe, a dla transformatorów zainstalowanych w sieciach przesyłowych również zabezpieczenia odległościowe.

Opis sposobu modelowania zabezpieczeń różnicowych w programie PSCAD/EMTDC można znaleźć m.in. w artykule [12], natomiast zabezpieczeń odległościowych w artykule [13]. W pracy [14] opisano sposób modelowania zabezpieczenia chroniącego do 95% i chroniącego 100% uzwojenia stojana przed skutkami zwarc doziemnych.

### Układy testowe

Układy testowe wykonane w programie PSCAD/EMTDC do badań symulacyjnych działania zabezpieczeń od zwarc wewnątrznych w generatorach i transformatorach opisano w pracy [14]. Zamodelowane zostały w nich zabezpieczenia: różnicowe generatora, różnicowe transformatora oraz chroniące do 95% i chroniące 100% uzwojenia stojana. Opis sposobu modelowania w programie PSCAD/EMTDC pozostałych zabezpieczeń bloku wytórczego o mocy 360 MW można znaleźć w pracy [15].



Rys.6. Widok obwodów pierwotnych układu testowego do badania: a) zabezpieczeń od zwarc wewnątrznych w generatorze synchronicznym, b) zabezpieczenia różnicowego transformatora 110 kV/15 kV (YNd11) [14]

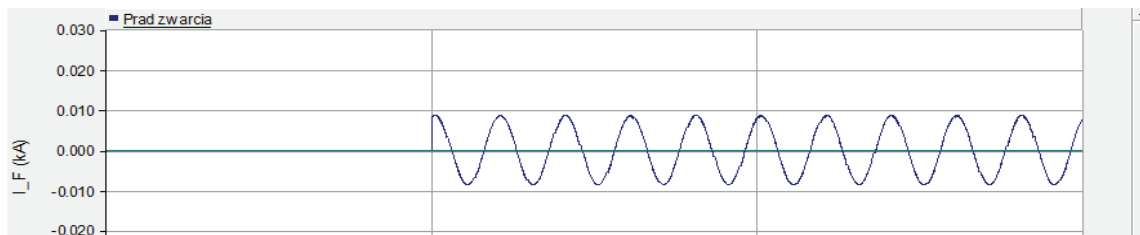
Do badań zabezpieczeń od zwarców wewnętrznych w generatorach wykorzystano układ testowy, którego wygląd obwodów pierwotnych pokazano na rysunku 6a. Do obwodów pierwotnych układu testowego należą m.in. blok zawierający model generatora synchronicznego wraz z układem wzbudzenia, transformator blokowy, linia blokowa, transformator potrzeb własnych, obciążenie i zastępczy SEE.

Widok obwodów pierwotnych układu testowego do badania zabezpieczenia różnicowego transformatora trójfazowego 110 kV/15 kV (YNd11), przedstawiono na rysunku 6b. Poza blokiem zawierającym model transformatora zbudowanego z jednostek jednofazowych obwody pierwotne układu składają się m.in. z modeli linii, obciążeń i zastępczych SEE. Dodatkowo, w ramach pracy [14] zbudowano układy testowe do symulacji zwarców wewnętrznych w transformatorach: 400 kV/110 kV (YNyn0) i 22 kV/250 kV (Dyn11).

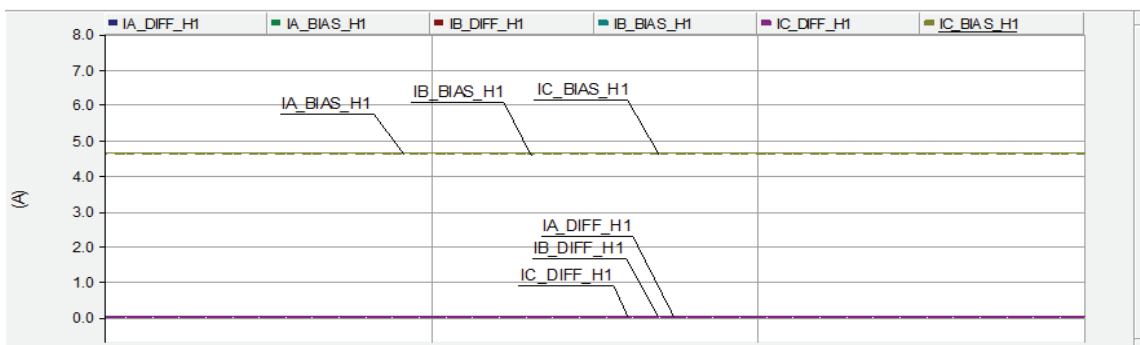
### Przykładowe wyniki badań

**Zwarcie wewnętrzne w generatorze.** W chwili  $t = 0,4$  s od początku symulacji w układzie testowym z generatorem synchronicznym (rys.6a) wykonano symulację zwarcia doziemnego obejmującego 50% uzwojenia fazy A stojana generatora, którego punkt gwiazdowy uziemiono przez rezystancję 1 k $\Omega$ . W konsekwencji następuje przepływ prądu zwarcia o niewielkiej amplitudzie ok. 10 A (rys.7a). Wystąpienie zakłócenia w pomijalnym stopniu wpłynęło na poziomy prądów różnicowych zmierzonych przez przekąźnik różnicowy, utrzymujących się na poziomie bliskim 0 A do końca symulacji (sygnały IA\_DIFF\_H1, IB\_DIFF\_H1, IC\_DIFF\_H1 na rys.7b) przy czym prądy hamujące nie przekraczały wartości 5 A (sygnały IA\_BIAS\_H1, IB\_BIAS\_H1, IC\_BIAS\_H1 na rys.7b).

a)



b)

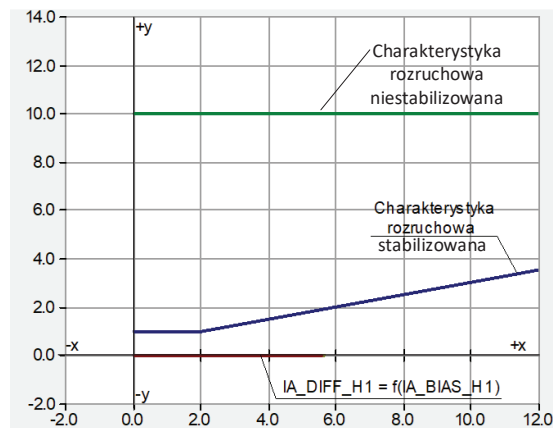


c)

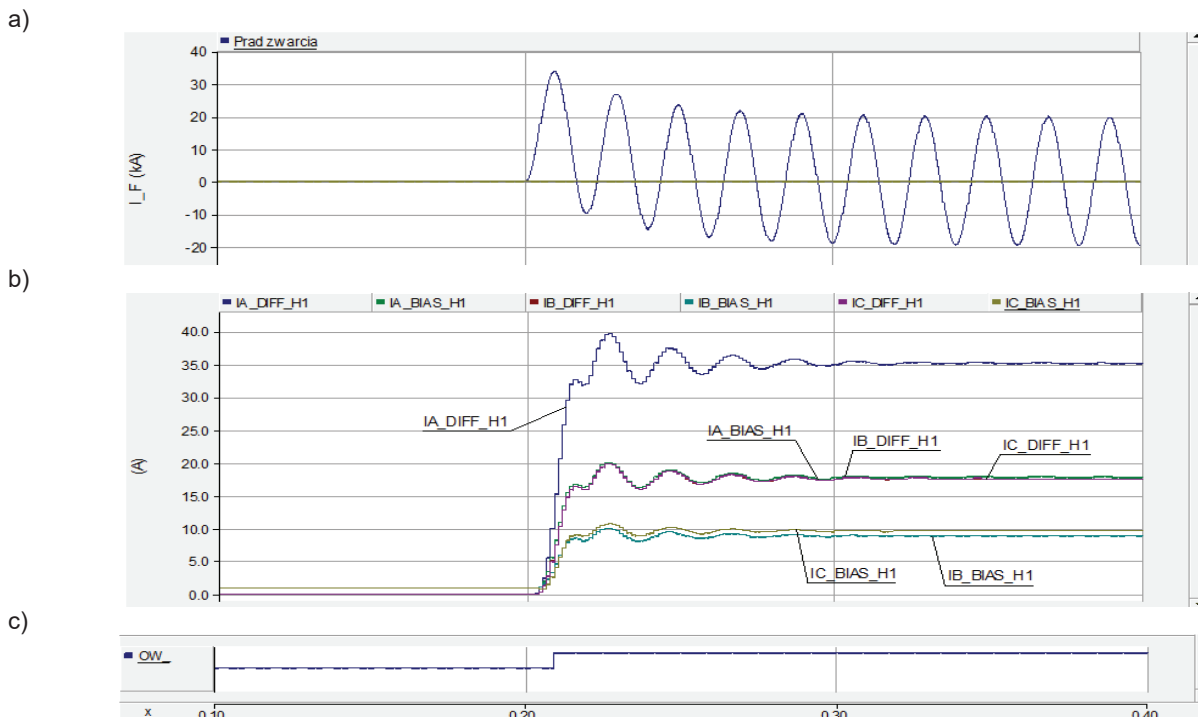


Rys.7. Przebiegi czasowe podczas symulacji zwarcia doziemnego obejmującego 50% uzwojenia fazy A stojana generatora: a) prąd zwarcia, b) prądy różnicowe i hamujące przekąźnika różnicowego, c) sygnał OW na otwarciu wyłącznika generatora [14]

Nieskuteczność zabezpieczenia różnicowego do eliminacji zwarców doziemnych w generatorze synchronicznym, którego punkt gwiazdowy uziemiony jest przez dużą impedancję, widać na wykresie z charakterystyką rozruchową zabezpieczenia różnicowego (rys.8). Przez cały czas trwania symulacji sygnały IA\_DIFF\_H1, IB\_DIFF\_H1 oraz IC\_DIFF\_H1 pozostawały w obszarze blokowania funkcji różnicowej. Nie wystąpiła również zmiana stanu sygnału OW (rys.7c), co oznacza, że zamodelowane zabezpieczenie różnicowe nie podało sygnału na otwarcie wyłącznika generatora.



Rys.8. Przebieg prądów zakłóceńowych względem charakterystyki rozruchowej przekąźnika różnicowego podczas zwarcia doziemnego obejmującego 50% uzwojenia fazy A stojana generatora [14]



Rys.9. Przebiegi czasowe podczas symulacji zwarcia doziemnego obejmującego 50% uzwojenia fazy A transformatora: a) prąd zwarcia, b) prądy różnicowe i hamujące przełącznika różnicowego, c) sygnał OW na otwarciu wyłączników po obu stronach transformatora [14]

**Zwarcie wewnętrzne w transformatorze.** W chwili  $t = 0,2$  s od początku symulacji w układzie testowym (rys.6b) zasymulowano zwarcie metaliczne doziemne obejmujące 50% uzwojenia fazy A strony górnego napięcia transformatora 110 kV/15 kV (YNd11).

Prąd zwarcia osiąga maksymalną wartość w pierwszym okresie przebiegu (rys.9a), równą 33,62 kA, zaś jego amplituda pod koniec symulacji stabilizuje się na poziomie ok. 20 kA.

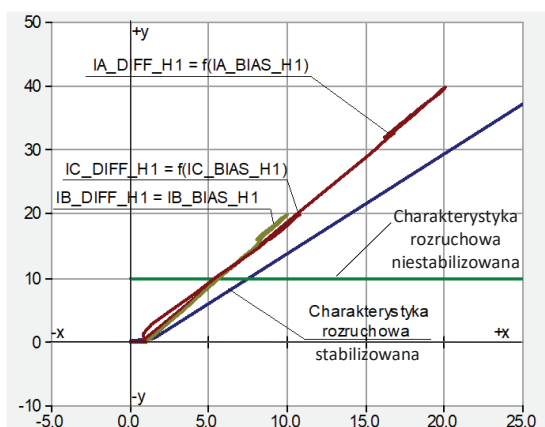
Po wystąpieniu zakłócenia prąd różnicowy fazy A przełącznika różnicowego (sygnał  $IA\_DIFF\_H1$  na rys.9b) osiąga wartość powyżej 35 A, natomiast prąd hamujący tej fazy (sygnał  $IA\_BIAS\_H1$  na rys.9b) nie przekracza wartości 20 A. Po czasie  $t = 8,8$  ms od momentu wystąpienia zwarcia następuje zmiana stanu sygnału OW (rys.9c), oznaczająca podanie sygnału na otwarcie wyłączników po obu stronach transformatora. Ostatecznie charakterystykę rozruchową zabezpieczenia różnicowego, przekraczając prądy różnicowe dla trzech faz (rys.10).

## Podsumowanie

Modelowanie zwarć wewnętrznych w generatorach i transformatorach jest zadaniem trudnym, w związku z koniecznością zastosowania modyfikacji w układach równań różniczkowych i algebraicznych opisujących generatory i transformatory. Programy typu EMTF zwykle nie zawierają modeli umożliwiających symulację tego typu zwarć. W takim wypadku badanie wpływu zakłóceń w generatorach i transformatorach ogranicza się jedynie do symulacji zwarć na ich zaciskach. Nowe modele w bibliotece elementów programu PSCAD/EMTDC pozwoliły znacznie poszerzyć zakres symulowanych zakłóceń i badań zabezpieczeń od skutków zwarć wewnętrznych w generatorach (zwarcia doziemne i zwojowe w uzwojeniach stojana) i transformatorach (zwarcia doziemne, zwojowe i międzyfazowe).

Ze względu na ryzyko poważnego uszkodzenia generatora lub transformatora, wskutek zawodnego działania zabezpieczeń, konieczne jest wprowadzenie właściwych nastaw dla poszczególnych funkcji zabezpieczeniowych. Cennym wsparciem podczas analizy poprawności wprowadzonych nastaw są badania symulacyjne skutków wystąpienia zwarć wewnętrznych w układach testowych. Dodatkowo istnieje możliwość sprawdzenia działania rzeczywistych urządzeń zabezpieczeniowych po wyeksportowaniu wyników symulacji (przebiegi prądów i napięć) wykonanych w programie PSCAD/EMTDC do pliku w formacie COMTRADE odczytywanym przez testery mikroprocesorowe.

**Autorzy:** dr hab. inż. Adam Smolarczyk, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: adam.smolarczyk@pw.edu.pl; mgr inż. Piotr Kwaczyński, PSE S.A., ul. Warszawska 165, 05-520 Konstancin-Jeziorna, E-mail: piotr.kwaczynski@pse.pl.



Rys.10. Przebieg prądów zakłóceniewych względem charakterystyki rozruchowej przełącznika różnicowego podczas zwarcia doziemnego obejmującego 50% uzwojenia fazy A transformatora [14]

## LITERATURA

- [1] Winkler W., Wiszniewski A., *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 2013
- [2] CIGRE, *International Guide on the Protection of Synchronous Generators*, Report 479, Working Group B5.04, October 2011
- [3] Kacejko P., Machowski J. Pijarski P., Smolarczyk A., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 2022
- [4] Manitoba HVDC Research Centre, *User's Guide. EMTDC. Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation*, Winnipeg, Canada, Manitoba HVDC Research Centre, 2010, <https://www.pscad.com>
- [5] Kandora W., Wojtas P., Sasic M., *Limited Access Inspection of Turbo Generators*. Przegląd Elektrotechniczny, r. 93 nr11/2017, listopad 2017, <http://pe.org.pl/articles/2017/11/19.pdf> (dostęp on-line: 19.04.2022)
- [6] Megahed A. I., Malik O.P., *Simulation of Internal Faults in Synchronous Generators*. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999
- [7] Martínez Cárdenas F., *ABC synchronous machine models to simulate internal faults*, MHI, HVDC Research Centre, June 2017
- [8] Kampinos J., Glinka T., Drak B., „Typowe przyczyny uszkodzeń eksploatacyjnych transformatorów energetycznych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 90 nr 1/2014
- [9] Bastard P., Berthand P., Meunier M., *A transformer model for winding fault studies*, IEEE, 1994 <https://ieeexplore.ieee.org/document/296246> (dostęp on-line: 22.04.2022)
- [10] Shruthi B.S., Vittal K.P., *Modelling and Simulation studies of Inter-winding Faults in a Three Phase Distribution Transformer using EMTDC/PSCAD*. IEEE, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6698718/> (dostęp on-line: 22.04.2022)
- [11] Rosołowski E., *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009
- [12] Smolarczyk A., *Wykorzystanie programu PSCAD/EMTDC do badania algorytmów zabezpieczeń różnicowych transformatorów*, *Wiadomości Elektrotechniczne* nr 9 (2013), 56-63
- [13] Smolarczyk A., „Modelowanie zakłóceń w sieciach wysokiego napięcia i zabezpieczeń odległościowych za pomocą programu PSCAD/EMTDC”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Nr 11 (2008), 28-32
- [14] Kwaczyński P., *Analiza działania zabezpieczeń od zwarc wewnątrznych w generatorach i transformatorach*, Praca dyplomowa magisterska, Instytut Elektroenergetyki PW, Warszawa, 2024
- [15] Litwin T., *Wykorzystanie programu PSCAD/EMTDC do zamodelowania układu generator-sieć sztywna i wybranych zabezpieczeń z nim związanych*, Praca dyplomowa magisterska, Instytut Elektroenergetyki PW, Warszawa, 2016