

## MODELOWANIE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO W NIESYMETRYCZNYCH STANACH PRACY SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ PRZEGLĄD NARZĘDZI

Robert RINK<sup>1</sup>, Robert JANKOWSKI<sup>2</sup>, Michał KOSMECKI<sup>3</sup>, Arkadiusz KUBANEK<sup>4</sup>, Maciej WILK<sup>5</sup>

Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk

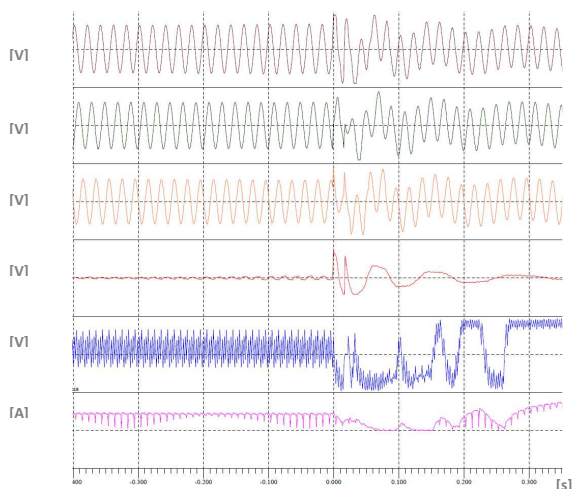
1. e-mail: kazik@prz.edu.pl
2. e-mail: r.jankowski@ien.gda.pl
3. e-mail: m.kosmecki@ien.gda.pl
4. e-mail: a.kubanek@ien.gda.pl
5. e-mail: m.wilk@ien.gda.pl

**Streszczenie:** Analiza zachowania generatora synchronicznego przyłączonego do systemu elektroenergetycznego podczas zakłóceń niesymetrycznych, a w szczególności kwestia odpowiedniego modelowania generatora, jest w literaturze fachowej bardzo rzadko podejmowana. W artykule przeprowadzono analizę porównawczą modeli generatora synchronicznego wykorzystywanych w programach do symulacji stanów dynamicznych [1], a następnie zbadano możliwości dostosowania ich do szczególnego przypadku badań w stanach niesymetrycznych biegu jałowego generatora.

**Słowa kluczowe:** Stany niesymetryczne, model generatora synchronicznego, analiza EMT.

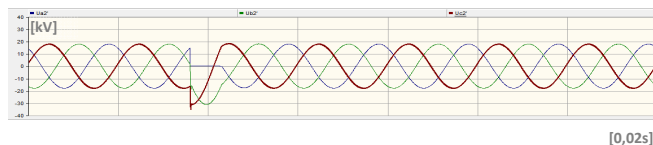
### 1 WPROWADZENIE

Stany zakłóceń, takie jak zwarcia niesymetryczne w stacjach elektroenergetycznych, zaburzają stabilną pracę generatorów synchronicznych i ich układów wzbudzenia. W artykule główny nacisk położono na badanie niesymetrycznych stanów zakłóceń w rozdzielniach



Rys. 1. Przebiegi: napięć fazowych, napięcia zerowego w punkcie neutralnym generatora oraz napięcia i prądu wzbudzenia podczas zwarcia doziemnego jednej fazy uzwojenia stojana generatora

stacji elektrownianych. Szczególną uwagę poświęcono możliwości symulacji zachowania generatora synchronicznego ze statycznym układem wzbudzenia w stanie pracy niesymetrycznej. Zagadnienia te poruszane były w artykule [2], a jedną z przesłanek, stojącą za podjęciem tej pracy było zdarzenie w jednej z elektrowni. Opisano tam przypadek, w którym w trakcie pracy generatora na biegu jałowym nastąpiła seria przemijających zwarć jednej fazy uzwojeń stojana do obudowy (zwarcie doziemne). Próby odtworzenia metodą symulacyjną, zarejestrowanych przebiegów podczas tego zdarzenia (rys. 1), pokazały, że jest to zadanie trudne. Przy wykorzystaniu programów symulacyjnych nie udało się odtworzyć wolnozmienniej składowej oscylacji gasnącej, która pojawiła się w przebiegach napięć fazowych oraz napięcia pomiędzy punktem neutralnym uzwojeń stojana a potencjałem ziemi (rys. 2).



Rys. 2. Przebiegi napięć fazowych generatora na biegu jałowym przy zwarciu doziemnym uzwojenia stojana – symulacja w programie PSCAD

### 2 WYBRANE NARZĘDZIA DO SYMULACJI STANÓW DYNAMICZNYCH W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Istnieją liczne programy do symulacji i badania stanów dynamicznych systemów elektroenergetycznych (SEE). Nie wszystkie programy oferują jednak możliwość analizy trójfazowych wartości chwilowych, co jest kluczowe w symulacji niesymetrycznych stanów przejściowych. Po wstępnej selekcji ograniczono się do omówienia w artykule trzech spośród nich:

- Simulink firmy Mathworks
- PSCAD firmy Manitoba HVDC Research Centre
- PowerFactory firmy DigSilent GmbH

## 2.1 Program Simulink

Do modelowania układów fizycznych firma MathWorks stworzyła specjalny zestaw narzędzi i bibliotek elementów – Simscape, który pozwala budować modele odzwierciedlające strukturę i cechy fizyczne elementów i powiązań między nimi, np. takie układy jak maszyny elektryczne, mostki prostownikowe, siłowniki hydrauliczne czy systemy chłodnicze, poprzez połączenie podstawowych komponentów.

Elementy oraz narzędzia do modelowania i symulacji elementów SEE zawiera biblioteka *SimPowerSystems*. Biblioteka zawiera modele urządzeń elektrycznych, w tym maszyn trójfazowych, napędów elektrycznych, urządzeń przekształtnikowych (FACTS) oraz źródeł energii odnawialnej. Pakiet *SimPowerSystems* programu Simulink zawiera dwa rodzaje modeli maszyny synchronicznej, zawartych odpowiednio w bibliotekach:

- *Simscape Components Library* (SCL)
- *Specialized Technology Library* (STL)

*Simscape Components Library* ma zastosowanie przede wszystkim tam, gdzie:

- zjawiska nieelektryczne stanowią znaczny udział w analizowanym układzie
- istnieje potrzeba stosowania niestandardowych elementów definiowanych przy użyciu języka Simscape
- istnieje potrzeba dokładnego zamodelowania zjawisk związanych z nieliniowymi przy przełączaniu

*Specialized Technology Library* ma zastosowanie przede wszystkim tam, gdzie:

- symulacje mają być przeprowadzone w trybie fazorowym
- istnieje potrzeba stosowania obliczeń rozplywowych
- istnieje potrzeba wydajnego prowadzenia symulacji dużych SEE

Modele *Simscape Components Library* mogą być zarówno jednokreskowe (*single-line*) – w zastosowaniu do modeli i zakłóceń symetrycznych, jak i trójfazowe – w zastosowaniu do analiz stanów niesymetrycznych, np. zwarć jednofazowych. Modele opisywane są równaniami różniczkowymi. Symulacje w oparciu o modele *Specialized Technology* są szybsze, gdy zastosujemy metodę fazorową. Metodę tę stosuje się do symulowania zachowań dużych systemów, gdy zjawiska przejściowe związane z łączeniami nie muszą być modelowane dokładnie.

### Modele generatorów synchronicznych w *Simscape Components Library*

Biblioteka SCL zawiera sześć wersji modelu maszyny synchronicznej [3], trzy opisane parametrami fizycznymi:

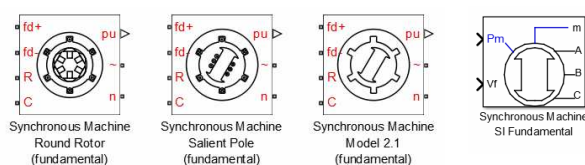
- *Synchronous Machine Round Rotor (fundamental)* - model maszyny synchronicznej z wirnikiem cylindrycznym
- *Synchronous Machine Salient Pole (fundamental)* - model maszyny synchronicznej jawnobiegunowej
- *Synchronous Machine Model 2.1 (fundamental)* - uproszczony model maszyny synchronicznej z wirnikiem cylindrycznym

oraz analogiczne trzy modele opisane parametrami standardowego modelu maszyny synchronicznej w jednostkach względnych [pu]:

- *Synchronous Machine Round Rotor (standard)*
- *Synchronous Machine Salient Pole (standard)*

- *Synchronous Machine Model 2.1 (standard)*

Zgodnie z zapewnieniem firmy Mathworks *Synchronous Machine Round Rotor* oraz *Synchronous Machine Salient Pole* to modele maszyny synchronicznej w pełni zgodne z [4].



Rys. 3. Graficzna reprezentacja modeli maszyny synchronicznej w bibliotece SCL i STL

### Modele generatorów synchronicznych w *Specialized Technology Library*

Biblioteka *Specialized Technology Library* (STL) zawiera pięć wersji modelu maszyny synchronicznej [5]:

- *Synchronous Machine SI Fundamental* - model maszyny synchronicznej opisany parametrami fizycznymi w jednostkach SI
- *Synchronous Machine pu Fundamental* - model maszyny synchronicznej opisany parametrami fizycznymi w jednostkach względnych
- *Synchronous Machine pu Standard* - model maszyny synchronicznej opisany parametrami modelu standardowego w jednostkach względnych
- *Simplified Synchronous Machine SI Units* - uproszczony model maszyny synchronicznej opisany w jednostkach SI
- *Simplified Synchronous Machine pu Units* - uproszczony model maszyny synchronicznej opisany w jednostkach względnych

Część elektryczna modelu maszyny jest opisana układem równań stanu szóstego rzędu, część mechaniczna – równaniem jak w modelu uproszczonym (moment na wirniku jest funkcją napięcia w osiach  $d$  i  $q$  za reaktancją podprzejściową, a nie jak w modelu pełnym SCL funkcją strumieni w osiach  $d$  i  $q$ ). Modele uproszczone nie uwzględniają składowej zerowej.

### Ograniczenia modeli STL

W modelach dyskretnych stosowanie modelu maszyny synchronicznej z biblioteki STL dyskretyzowanego nieiteracyjną metodą trapezów lub metodą prostokątów w przód (*forward Euler*) może wymagać przyłączenia małych pasożytniczych rezystancji na zaciskach generatora. Aby uniknąć oscylacji numerycznych, należy dołączyć odpowiednio duże obciążenie, przy czym im krok całkowania dłuższy tym większe powinno obciążenie. Minimalne obciążenie rezystancyjne wynosi 2,5% mocy znamionowej maszyny ( $P_n$ ) dla kroku całkowania 25  $\mu$ s oraz 5% dla kroku całkowania 50  $\mu$ s. Dla generatora o mocy 380 MW z krokiem całkowania 25  $\mu$ s obciążenie powinno być nie mniejsze niż 9,5 MW. Jeżeli model jest dyskretyzowany metodą trapezową iteracyjną, wówczas wymagane minimalne obciążenie jest dużo mniejsze i wynosi ok. 0,1% mocy znamionowej, co przekłada się na spowolnienie obliczeń. Na tej podstawie można stwierdzić, że model generatora synchronicznego (dyskretyzowany nieiteracyjną metodą trapezów lub metodą prostokątów w przód) nie nadaje się do symulacji pracy na biegu jałowym bez obciążenia choćby potrzebami własnymi. Niedoskonałością tego modelu jest brak uwzględnienia

pojemności pomiędzy uzwojeniami stojana a obudową oraz pomiędzy wirnikiem a obudową generatora.

## 2.2 Program PSCAD

Pierwsza wersja programu do symulacji stanów przejściowych zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w SEE w dziedzinie czasu (EMTDC – *Electromagnetic Transients including DC*) powstała w roku 1975 w firmie Manitoba Hydro (obecnie: Manitoba HVDC Research Centre). Geneza powstania była związana z koniecznością symulacji pracy łącza Nelson River HVDC. Program był rozwijany i w roku 1988 został wzbogacony o graficzny interfejs pod nazwą PSCAD [5]. Program EMTDC oraz PSCAD/EMTDC wyznaczał kierunki i standardy modelowania zjawisk elektromagnetycznych w SEE i w układach elektrycznych.

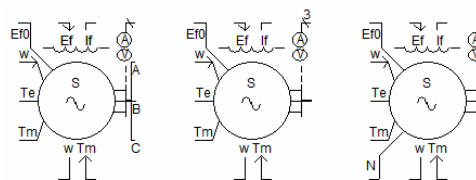
Elementy SEE w programie PSCAD/EMTDC, wykorzystywane do symulacji zjawisk są opisane za pomocą równań różniczkowych w dziedzinie czasu [6], [7]. Program EMTDC rozwiązuje te równania ze stałym krokiem całkowania  $\Delta t$ , równym krokowi symulacji (obliczeniowemu). Domyślnie krok  $\Delta t$  równy jest 50  $\mu s$ . Sygnały wyznaczone w dziedzinie czasu mogą być przeliczone na wielkości fazorowe reprezentowane przez moduł i kąt fazowy. Stały krok obliczeń w procesie symulacji powoduje pewne ograniczenia, dotyczące elementów kluczujących, np. wyłączników czy diod. Jeśli proces łączeniowy nastąpi tuż po pierwszym kroku obliczeń (całkowania), to zostanie on przeprowadzony dopiero w kroku następnym obliczeń. Aby zlikwidować te efekty zastosowano algorytm interpolacyjny, wyznaczający dokładny moment procesu łączeniowego. Dla tego momentu następuje rozwiązanie równań różniczkowych. Następnie obliczenia są kontynuowane dla przyjętego kroku całkowania (symulacji).

### Algorytm Dommel

Obliczenia wykonywane przez EMTDC, a także przez niektóre inne programy EMTP (*Electromagnetic Transients Program* – program analizy stanów nieustalonych w dziedzinie czasu), opierają się na zasadach określonych przez H. Dommela [8]. Stworzył on podwaliny pod pakiet programowy ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) [9]. Sformułowane przez niego reguły były podstawą opracowania kolejnych wersji tego programu. Te same algorytmy wykorzystywane są w symulatorach czasu rzeczywistego zjawisk elektromagnetycznych występujących w sieci (np. RTDS). Podstawą algorytmów Dommela jest sprowadzenie pojemności oraz indukcyjności występujących w modelu układu do ekwiwalentnych dwójników łożonych z rezystancji i idealnych źródeł prądowych.

### Modelowanie maszyny synchronicznej w programie PSCAD/EMTDC

Sposób modelowania maszyny synchronicznej jest opisany w pracy [4]. Model maszyny synchronicznej biblioteki programu PSCAD występuje zarówno z jednym jak i z dwoma uzwojeniami tłumiącymi w osi  $q$ . Może być użyty zarówno jako model maszyny z wirnikiem cylindrycznym jak i maszyny synchronicznej jawnobiegunowej. Modelowany generator może być sterowany sygnałem zadanej prędkości ( $\omega$ ) jak i sygnałem momentu obrotowego ( $T_e$ ).



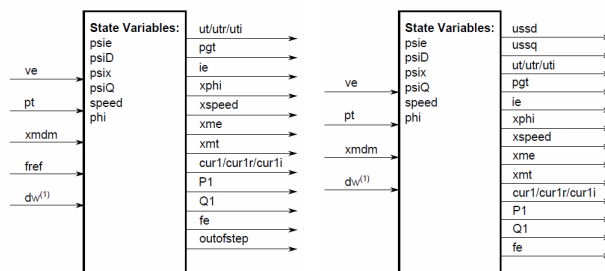
Rys. 4. Graficzna reprezentacja modelu maszyny synchronicznej w trzech postaciach w programie PSCAD

## 2.3 Program PowerFactory

Program PowerFactory firmy DigSilent pozwala na analizowanie stanów dynamicznych w trzech trybach symulacji [10]:

- Analiza wartości skutecznych prądów i napięć trójfazowych (RMS) dla sieci przedstawionej w sposób symetryczny.
- Analiza wartości skutecznych prądów i napięć trójfazowych (RMS) dla sieci przedstawionej w sposób niesymetryczny (osobno dla każdej fazy).
- Analiza wartości chwilowych prądów i napięć trójfazowych (EMT) dla sieci przedstawionej w sposób niesymetryczny (osobno dla każdej fazy).

Rysunek 5 przedstawia bloki modeli maszyn synchronicznych biblioteki PowerFactory do analizy stabilności (*RMS-simulation*) oraz do analizy wartości chwilowych prądów i napięć trójfazowych (*EMT-simulation*). Modele bazują na opracowaniach [11] i [12].



Rys. 5. Bloki we/wy modeli maszyny synchronicznej do analizy SEE: stabilności (*RMS-simulation*) – po lewej stronie; stanów elektromagnetycznych (*EMT-simulation*) – po prawej stronie

W analizie typu *RMS-simulation* pomija się pochodne prądów, co pozwala na zwiększenie kroku obliczeniowego w porównaniu do modelu EMT. W celu przyspieszenia analizy typu *RMS* dodatkowo upraszcza się model generatora synchronicznego w aspekcie zmian prędkości obrotowej. Możliwe są trzy podejścia:

- Uwzględnianie wpływu zmian prędkości obrotowej - równania opisujące model generatora uwzględniają zmienność prędkości obrotowej.
- Pominięcie wpływu zmian prędkości obrotowej - przyjmuje się, że wartość prędkości obrotowej jest równa jej wartości początkowej. Zakłada się, że zmiany prędkości są pomijalne i nie mają istotnego wpływu na napięcie stojana. Model jest dokładny, gdy odchyłki prędkości obrotowej od prędkości początkowej są znikome.
- Częściowe pominięcie wpływu zmian prędkości obrotowej - w równaniu modelu generatora, opisującym napięcie indukowane w uzwojeniu stojana, przyjmuje się, że wartość prędkości obrotowej jest równa jej wartości początkowej, tzn. wartość strumienia mnoży się przez wartość prędkości z uwzględnieniem odchylenia.



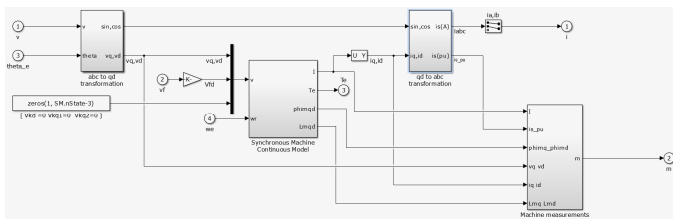
### 3 ANALIZA MOŻLIWOŚCI MODYFIKACJI MODELU GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Biblioteczne modele dobrze odwzorowują zachowanie maszyn synchronicznych pracujących w sieci. Badanie pracy generatorów na biegu jałowym, w szczególności w stanach zakłóceń niesymetrycznych, wymaga modelu o bardziej złożonej strukturze. W związku z tym przeprowadzono analizę możliwości modyfikacji w danym programie modelu generatora synchronicznego pod kątem badania stanów niesymetrycznych w pracy na biegu jałowym. Zagadnienie to rozważano w dwóch aspektach. Pierwszy z nich, to zweryfikowanie możliwości wprowadzenia korekt w dostępnych modelach bibliotecznych, drugi zaś to opracowanie własnej struktury modelu, optymalnej dla potrzeb modelowania pracy generatora na biegu jałowym.

#### 3.1 Program Simulink

##### Biblioteczny model generatora – analiza możliwości modyfikacji modelu

Struktura modelu generatora w bibliotece SCL nie jest dostępna, zatem nie można jej modyfikować. W bibliotece STL struktura modelu generatora jest dostępna (rys. 6), jednak możliwość modyfikacji jest zablokowana.



Rys. 6. Pierwsza warstwa struktury modułu elektrycznego (*Electrical model*) modelu Synchronous Machine pu Standard STL

##### Model użytkownika w Matlabie

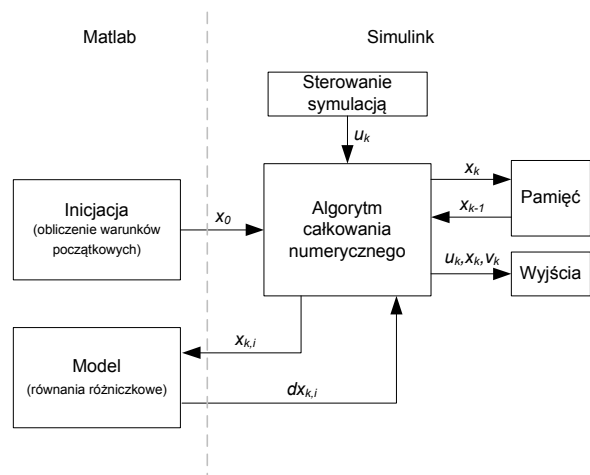
W ramach prowadzonych prac badawczych opracowano własny model generatora w środowisku Matlab/Simulink. Symulacja pracy maszyny synchronicznej wymaga rozwiązywania równań różniczkowych opisujących model. Obliczenia rozwiązujące równania różniczkowe mogą być prowadzone w oparciu o solver programu Simulink albo własny solver. Wybrano drugie rozwiązanie, co pozwalało zachować kontrolę nad procesem obliczeniowym. Opracowany model symulacyjny generatora wraz ze środowiskiem obliczeniowym składa się z kilku modułów, których wzajemne relacje przedstawiono na rysunku 7.

Główne moduły to:

- Algorytm całkowania numerycznego – jądro środowiska odpowiedzialne za przebieg symulacji. Moduł ten opisany jest funkcją realizującą całkowanie numeryczne w oparciu o algorytm Rungego-Kutty czwartego rzędu. Funkcja odczytuje warunki początkowe oraz pięciokrotnie wywołuje funkcję opisującą model maszyny po to, aby otrzymać pochodną wektora stanu dla danego kroku obliczeniowego  $k$  i danej iteracji  $i$ . Funkcja wyprowadza również obliczone w  $k$ -kroku wielkości wyjściowe.
- Inicjacja – skrypt oblicza parametry wykorzystywane w modelu na bazie parametrów symulowanego generatora, warunki początkowe

(wartości wektora stanu w chwili  $k=0$ ), jak również definiujący wektor parametrów  $P$ , wektor zmiennych stanu  $x$  oraz wektor sygnałów  $v$ .

- Model (równania różniczkowe i algebraiczne) – funkcja opisująca model generatora wraz z układem wzbudzenia i regulacji napięcia oraz model SEE.
- Sterowanie symulacją – moduł wraz z graficznym interfejsem użytkownika, pozwalający zmieniać wartości sygnałów i wartości zadanych (takich jak napięcie zadane generatora, obciążenie), jak również pozwalający szybko zmieniać wartości wybranych parametrów modelu, np. impedancja połączenia generatora i SEE.
- Pamięć – pamięć wektora stanu z poprzedniego kroku obliczeniowego.
- Wyjścia – moduł obsługujący rejestrację sygnałów oraz ich wizualizację online na ekranie komputera.



Rys. 7. Schemat blokowy modelu użytkownika

W opisanym środowisku zaimplementowano klasyczny model generatora opisany za pomocą ośmiu zmiennych stanu, odpowiadających odpowiednio uzwojeniom twornika w osi  $d$  i  $q$ , uzwojeniom tłumiaczym w osi  $d$  i  $q$ , obwodowi tłumiaczemu w osi  $q$ , obwodowi wzbudzenia oraz wałowi turboszespołu. W części obejmującej układ wzbudzenia i regulacji napięcia wykorzystano standardowy model EXST1A. Przyjęto, że generator pracuje w SEE modelowanym jako źródło SEM za impedancją odpowiadającą impedancji zastępczej systemu w punkcie przyłączenia, powiększonej o impedancję linii i transformatora blokowego.

Dzięki temu, że algorytm całkowania numerycznego, jak i sam model opisane są bardzo efektywnym kodem, istnieje możliwość symulacji całego układu w czasie rzeczywistym. Testy opracowanego modelu przeprowadzono przy wykorzystaniu środowiska Simulink RealTime.

Zarejestrowane przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 8. Symulację wykonano przy założeniu nagłej zmiany impedancji pomiędzy generatorem a siecią sztywną, co odpowiadało zwarciu odległemu. W drugiej części przebiegu widoczna jest odpowiedź układu na zmianę zadanej wartości napięcia generatora. Przedstawiono przebiegi: napięcia wzbudzenia ( $E_{fd}$ ), napięcia na zaciskach generatora ( $U_i$ ), mocy czynnej ( $P$ ) i biernej ( $Q$ ) oraz kąta wirnika generatora ( $\Delta\theta$ ).



Rys. 8. Przebiegi symulacji generatora synchronicznego w środowisku Simulink RealTime

Prezentowany sposób opisu i opracowania modelu symulacyjnego generatora synchronicznego daje użytkownikowi bardzo szerokie możliwości, pozwalające, m.in., na implementację modeli o wysokim stopniu złożoności. Przy bardzo złożonym modelu może nie być możliwości prowadzenia symulacji w czasie rzeczywistym, gdyż czas potrzebny na wykonanie obliczeń dla pojedynczego kroku obliczeniowego może okazać się większy niż krok całkowania. Będzie natomiast możliwe prowadzenie symulacji w trybie offline.

Powyższą metodę można wykorzystać do badań symulacyjnych z zastosowaniem modeli o niewielkiej liczbie elementów. Przykładem jest praca generatora w SEE modelowanym jako źródło napięcia z impedancją, praca na biegu jałowym lub praca na potrzeby własne. W przypadku konieczności ujęcia w modelu większej liczby elementów SEE istnieją dwie możliwości:

- Samodzielne opisanie tej części SEE równaniami różniczkowymi i symulacja tej części modelu na takiej samej zasadzie jak modelu generatora.
- Powiązanie za pomocą źródeł prądowych modelu generatora z modelem SEE opracowanym z wykorzystaniem elementów biblioteki *SimPowerSystems*. Opcja ta jest jednym z rozważanych kierunków dalszego rozwoju opracowanego środowiska.

### 3.2 Program PSCAD

Program PSCAD oferuje użytkownikowi w bibliotece bardzo dokładny model generatora synchronicznego do analizy wartości chwilowych (EMT) przy symulowaniu stanów pracy: symetrycznych i niesymetrycznych generatora pracującego w sieci. Nie ma możliwości modyfikacji modelu.

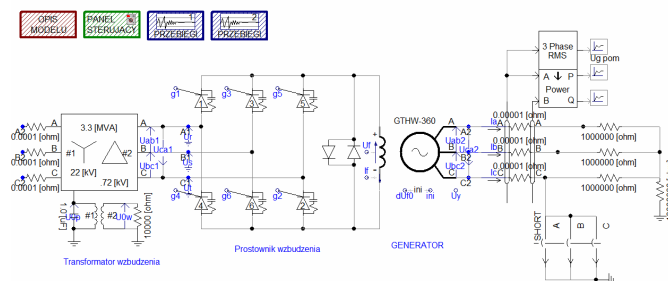
#### Model użytkownika

Jedną z cech, które czynią PSCAD dobrym narzędziem do symulacji jest możliwość projektowania własnych modeli [5]. Użytkownik może opracowywać modele o różnym stopniu złożoności struktury. Modele użytkownika mogą być tworzone na dwa sposoby: graficznie z wykorzystaniem istniejących komponentów w pakiecie, albo z wykorzystaniem języka programowania. Model własny może mieć zarówno własną reprezentację graficzną jak i karty parametrów.

### Przykład modelu użytkownika zbudowanego z elementów bibliotecznych

Zbudowano model generatora synchronicznego, którego wzbudzenie sterowane jest elektrycznie – zaciski uzwojenia wzbudzenia połączone są bezpośrednio z modelem elektrycznym prostownika tyrystorowego układu wzbudzenia. Wykorzystano biblioteczny model maszyny synchronicznej, który jest sterowany sygnałowo.

Na rysunku 9 przedstawiono schemat połączenia generatora synchronicznego w prowadzonych symulacjach.



Rys. 9. Schemat połączenia modelu generatora synchronicznego sterowanego poprzez tyrystorowy prostownik wzbudzenia

Przebiegi badania symulacji przemijającego zwarcia jednofazowego z wykorzystaniem opracowanego modelu pokazano na rysunku 2. Podobnie, jak przedstawiony powyżej model, można opracować w oparciu o elementy biblioteczne model generatora synchronicznego o własnej złożonej strukturze.

### Model własny użytkownika w języku programowania

Modele mogą być definiowane z użyciem języków programowania Fortran oraz C. Modele w języku Fortran (wersja Fortran 90) mogą być dołączone bezpośrednio w segmencie modelu albo jako podprogram lub funkcja skompilowana i wywoływana z biblioteki. Podobnie można wprowadzić definicję modelu w kodzie języka C, skompilowanego do postaci \*.obj. Funkcje w kodzie C mogą być wywoływane bezpośrednio z modelu w kodzie Fortranu.

### 3.3 Program PowerFactory

W programie PowerFactory brak jest dostępu do struktury modelu maszyny synchronicznej i co za tym idzie, nie ma możliwości zmian. Możliwa jest korekta modeli układów regulacji generatora, np. układów wzbudzenia, dostępnych w bibliotece. PowerFactory umożliwia opracowanie własnych modeli w oparciu o własny język programowania, przeznaczonych przede wszystkim do opracowania własnych modeli układów regulacji. Opracowanie własnego dokładnego modelu maszyny synchronicznej, umożliwiającego również symulację pracy generatora na biegu jałowym w stanie niesymetrycznym, byłoby dużym wyzwaniem. Narzędzie programowania PowerFactory nie jest odpowiednie do stawianych wymagań przy opracowaniu takiego modelu. W opracowaniu takiego modelu należałoby korzystać z modeli obwodowych (elektrycznych) takich jak: sterowane źródło napięciowe, przekształtnik i obciążenie, co komplikowałoby strukturę modelu. PowerFactory jest wydajnym narzędziem do analizy SEE, ale nie jest przewidziane do budowy złożonych modeli takich urządzeń jak maszyna synchroniczna. Pożądany efekt można osiągnąć mniejszym nakładem pracy i z większą elastycznością, budując modele w programach PSCAD lub Simulink.

## 4 WNIOSKI

W artykule przeprowadzono weryfikację oraz analizę porównawczą modeli maszyn synchronicznych dostępnych w programach symulacyjnych, w szczególności pod kątem badania stanów pracy niesymetrycznej. Przeprowadzona analiza pozwoliła sformułować następujące wnioski.

W zakresie weryfikacji i analizy porównawczej dostępnych w programach symulacyjnych modeli generatora synchronicznego w stanach pracy niesymetrycznej:

- Modele generatorów synchronicznych w programach Simulink, PSCAD oraz PowerFactory są przystosowane do symulacji chwilowych fazowych wartości prądów i napięć (*EMT-simulation*).
- Modele te mają ograniczenia w postaci minimalnej mocy obciążenia generatora, koniecznej zapewnienia stabilności numerycznej.
- Modele poprawnie odwzorowują pracę generatorów w stanach obciążenia.
- Możliwość modelowania pracy generatora na biegu jałowym jest ograniczona, ze względu na wymagane minimalne obciążenie generatora.
- Nie jest możliwe dokładne odwzorowanie pracy generatora na biegu jałowym w stanach niesymetrycznych – modele nie uwzględniają pojemności pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika a obudową.

W zakresie analizy możliwości modyfikacji modelu generatora w celu dostosowania do szczególnego przypadku badań w stanach niesymetrycznych biegu jałowego:

- Dla żadnego z analizowanych programów nie jest przewidziana możliwość modyfikacji bibliotecznych modeli generatora synchronicznego.
- Budowa i użytkowanie modeli maszyny synchronicznej w programie Simulink, przy wykorzystaniu języka programowania Matlab, wykazało, że możliwe jest opracowanie własnego szczegółowego modelu generatora synchronicznego w programie Simulink.
- Program PSCAD oferuje narzędzia do opracowania własnych dowolnie złożonych modeli generatorów, w szczególności modelu generatora synchronicznego, zarówno w języku programowania (Fortran, C) jak i z wykorzystaniem elementów dostępnych w bibliotece programu PSCAD.
- Budowa własnych modeli innych niż układy regulacji w programie PowerFactory (np. maszyna synchroniczna) jest bardzo złożone. Pożądaną efekt można osiągnąć mniejszym nakładem pracy i z większą elastycznością, budując modele w programach PSCAD lub Simulink.
- Model generatora synchronicznego do symulowania stanów niesymetrycznych na biegu jałowym

powinien uwzględniać pojemność pomiędzy uzwojeniami generatora a obudową.

Podsumowanie:

- Modele generatora synchronicznego do analizy EMT, w przypadku każdego z ocenianych programów (Simulink, PSCAD, PowerFactory) nadają się do symulacji pracy generatora przy wystąpieniu stanów niesymetrycznych w stacji SEE.
- Dodatkowe wymagania odnośnie modelowania maszyny synchronicznej wnoszą analiza niesymetrycznych zakłóceń pracy generatora na biegu jałowym. Żaden z rozważanych programów nie oferuje modelu wystarczająco dokładnie odwzorowującego zachowanie generatora w tych stanach pracy. Możliwość tworzenia własnych złożonych modeli urządzeń, w szczególności generatora synchronicznego, dają programy Simulink i PSCAD.

## 5 BIBLIOGRAFIA

1. Jankowski R., Kosmecki M., Kubanek A., Rink R., Wilk M. i in.: Studium badawcze właściwości generatora synchronicznego ze statycznym układem wzbudzenia w niesymetrycznych stanach pracy, Instytut Energetyki 2016.
2. Madajewski K., Rink R.: The Operation of The Excitation and Voltage Control System of a Synchronous Generator in Asymmetrical States, ActaEnergetica nr 2, czerwiec 2011.
3. Synchronous Machine Round Rotor – dokumentacja modelu maszyny synchronicznej w programie SIMULINK HELP:/SimPowerSystems/ Simscape Components/ Machines/.
4. Kundur, P.: Power System Stability and Control, New York, NY, McGraw Hill, 1993.
5. Synchronous Machine – dokumentacja modelu maszyny synchronicznej w programie SIMULINK HELP:/SimPowerSystems/Specialized Technology/Motors and Generators/ Blocks/ Synchronous Machine.
6. EMTDC Users Guide V4.6.0, Manitoba Research HVDC Center.
7. PSCAD Users Guide V4.6.0, Manitoba Research HVDC Center.
8. Dommel H.W.: Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks, IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, VOL. PAS-88, No. 4, April 1969.
9. Dommel H.W.: Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP theory book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
10. DiGSILENT PowerFactory Technical Reference Documentation, Synchronous Machine ElmSym, TypSym, ver 2016.2, DiGSILENT GmbH, Gomaringen, Germany 2016.
11. B. Oswald: Netzberechnung 2: Berechnung transienter Vorgänge in Elektroenergie-versorgungs-netzen. VDE-Verlag, 1 edition, 1996.
12. B. Oswald: Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeitern. Springer Vieweg, 2 edition, 2013.

## MODELING OF SYNCHRONOUS GENERATOR IN ASYMMETRIC OPERATION TOOLS OVERVIEW

An analysis of the behavior of a synchronous generator connected to a power station during unbalanced disturbances, in particular the issue of proper modeling, is rarely undertaken in professional literature. This paper describes the comparative analysis of synchronous generator models in selected transient simulation programs. The possibility of correcting the existing models and adjusting them to the special case of idle asymmetric tests was examined.

**Keywords:** Asymmetrical states, synchronous generator model.