

Piotr Kisielewski, Ludwik Antal

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej

## NARAŻENIA WIRNIKA TURBOGENERATORA PODCZAS PRACY NIESTABILNEJ

### EXPOSURE OF THE TURBOGENERATOR ROTOR DURING UNSTABLE WORK

**Abstract:** This paper presents two-dimensional field-circuit model of 500 MVA turbogenerator. Model is designed to calculate static and dynamic characteristics of machine. During solving field equations real physical characteristics of materials, configuration of windings, damper circuit and motion elements in electromagnetic field are taken into account. In circuit part there is an electrical scheme. The electrical elements correspond with winding in the field model. Parameters of frontal connections are included. The model was applied to calculate and show exposure of the turbogenerator rotor during unstable work.

**Keywords:** *turbogenerators, stability research, field-circuit modeling*

#### 1. Wstęp

Turbogeneratory są podstawowymi źródłami energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. Podczas pracy są narażone na działanie sił dynamicznych i naprężeń termicznych. Podczas pracy ustalonej nie przekraczają one wartości dopuszczalnych. W stanach awaryjnych, a szczególnie przy pracy niestabilnej wielkość narażeń maszyny zależy nie tylko od konstrukcji samego turbogeneratora, ale również od parametrów zwarciovych sieci elektroenergetycznej, do której generator jest podłączony. Dlatego takie same generatory, ale zainstalowane w różnych miejscach systemu energetycznego, różnie odczuwają skutki pracy niestabilnej.

W pracy przedstawiono narażenia wirnika turbogeneratora podczas pracy niestabilnej oraz pokazano wyniki obliczeń symulacyjnych dla przykładowych nieustalonych stanów jego pracy.

Podczas zakłócenia wirnik turbogeneratora jest narażony na duże przeciążenia dynamiczne, znacznie większe niż to wynika z pracy znamionowej. Pojawiają się one w przypadku wystąpienia zwarcia, w wyniku złej synchronizacji oraz podczas utraty synchronizmu.

W maszynie synchronicznej pracującej asymetrycznie występują straty mocy w klatce tłumiącej oraz litej bezcece wirnika. Powodują one dodatkowe nagrzewanie jego wirnika. W niekorzystnych przypadkach straty mocy spowodowane asymetrią mogą przekraczać całkowite straty mocy wirnika podczas pracy znamionowej.

Stosowane w praktyce do badania stanów zakłóceń metody obwodowe zawierają znaczne uproszczenia rozwiązywanego układu równań. Pomijają nieliniowość obwodu magnetycznego, redukują obwody wirnika, transponują uzwojenia do układu dwuosowego. Ze względu na bardzo małe stałe czasowe związane z obwodem tłumienia w porównaniu ze stałymi czasowymi związanymi z obwodem wzbudzenia uważa się, że zjawiska w obwodzie tłumienia mają mały wpływ na stabilność generatora. Błąd wartości kąta granicznego, określonej bez uwzględnienia wpływu obwodów tłumiących ocenia się na 1%; stąd najczęściej do rozważań nad stabilnością statyczną przyjmuje się turbogenerator z jednym tylko obwodem w wirniku, mianowicie z podłużnym obwodem wzbudzenia.

Wpływ nasycenia na stabilność turbogeneratora ma dwójaki charakter, wynikający z tego, że odpowiednie reaktancje nasycone mają mniejsze wartości niż reaktancje nienasycone oraz z tego, że wartości tych reaktancji zmieniają swoje wartości w funkcji kąta obciążenia, a więc także i w funkcji czasu. Zmniejszenie wartości reaktancji powoduje zwiększenie wartości mocy przy danym kącie obciążenia, czyli powoduje podwyższenie przebiegu danej charakterystyki kątowej przy reaktancji nasyconej w stosunku do odpowiedniej charakterystyki przy reaktancji nienasyconej, co z kolei powoduje odpowiednie zwiększenie mocy krytycznej i momentu krytycznego. Zmienność wartości reaktancji w funkcji kąta obciążenia powoduje pojawienie

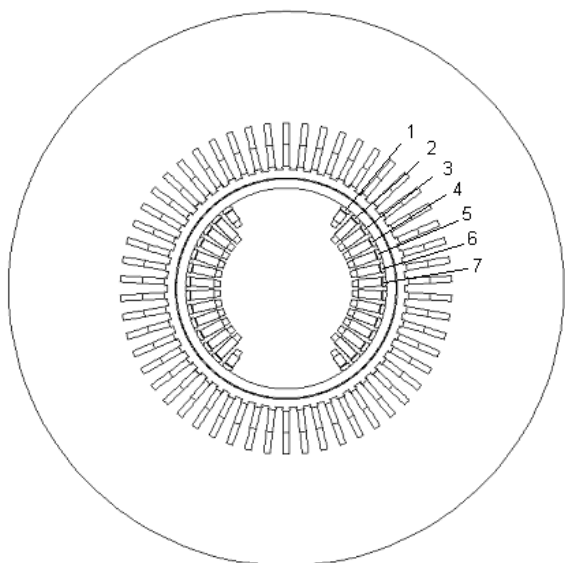
się odpowiednich harmonicznych w kątowej charakterystyce momentu, czyli powoduje zwiększenie granicznego kąta obciążenia.

W wyniku rozwiązania uproszczonego układu równań otrzymuje się przybliżone przebiegi czasowe wielkości elektrycznych (napięcia, prądy, moc) i mechanicznych (moment, prędkość i położenie kątowe wirnika). Rozwiązanie tych równań nie daje również informacji o zjawiskach elektromagnetycznych i cieplnych zachodzących w elementach konstrukcyjnych wirnika podczas zakłócenia. Lepsze wyniki daje analiza polowo-obwodowa pracy turbogeneratora, która uwzględni nieliniowości, nie wymaga transpozycji i nie zakłada stałości parametrów. Model polowo-obwodowy umożliwia wyznaczanie wielkości fizycznych również w miejscach niedostępnych pomiarowo. W istniejących publikacjach występują próby wyznaczania parametrów maszyn [2, 5, 6].

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych procesu wypadania z synchronizmu turbogeneratora o mocy 500 MVA podczas jego pracy w systemie elektroenergetycznym przy nagłej zmianie obciążenia oraz pracy z dużą asymetrią (odłączenie jednej z faz).

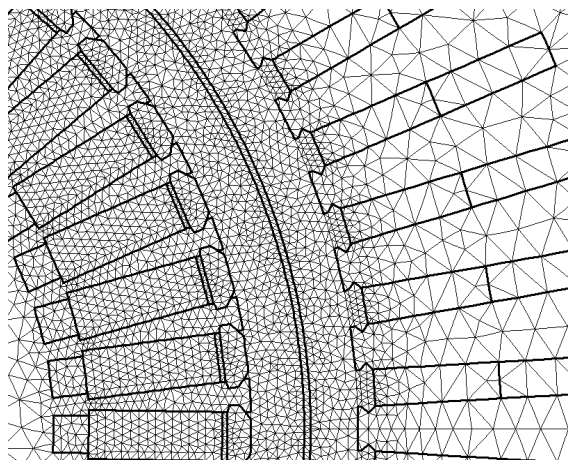
## 2. Model polowo-obwodowy

Symulowanym obiektem jest turbogenerator o mocy 500 MVA. Przekrój poprzeczny maszyny przedstawiono na rysunku 1.

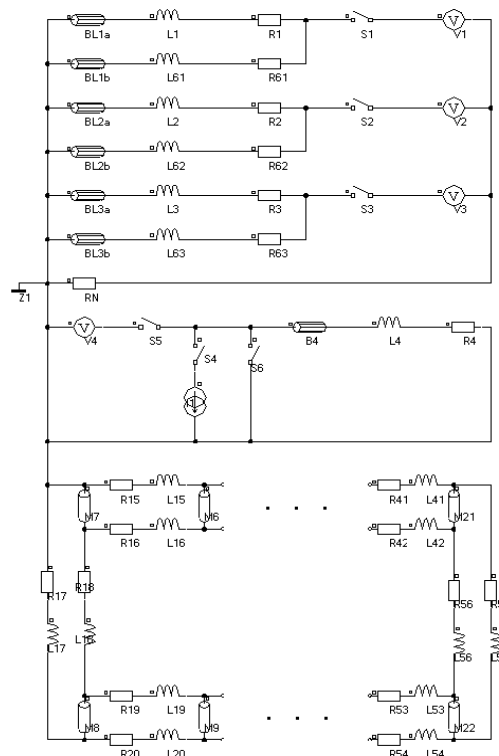


Rys. 1. Przekrój poprzeczny modelu turbogeneratora

Dwuwymiarowy polowo – obwodowy model turbogeneratora sporządzono przy pomocy pakietu Flux 9.2.2. Siatka dyskretyzacyjna modelu zbudowana jest z 41 544 elementów powierzchniowych drugiego rzędu i zawiera 83 197 węzłów. Fragment siatki modelu przedstawiono na rysunku 2. Model polowy uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnesowania elementów obwodu magnetycznego oraz prądy wirowe indukujące się w klinach żłobków wirnika. Pełniejszy opis modelu przedstawiono publikacjach [3, 4, 5].



Rys. 2. Fragment siatki dyskretyzacyjnej

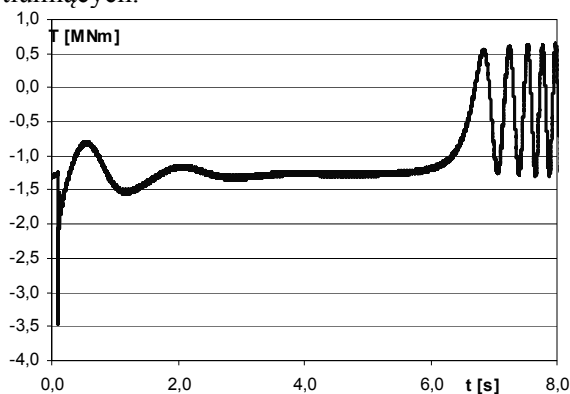


Rys. 3. Część obwodowa modelu maszyny

W szczelinie powietrznej znajduje się pasmo elementów odkształcalnych, którego siatka jest generowana w trakcie obliczeń stosownie do aktualnego położenia wirnika wirującego z zadaną, stałą prędkością kątową. Model obwodowy poza elementami reprezentującymi uzwojenia i lite przewodniki modelu polowego, zawiera źródła oraz rezystancje i reaktancje czołowych części uzwojeń o stałych wartościach. Parametry części czołowych wyznaczono z wzorów stosowanych w projektowaniu maszyn synchronicznych. Część obwodową modelu, zawierającą obwody stojana, wzbudzenia oraz klatkę tłumiącą przedstawiono na rysunku 3.

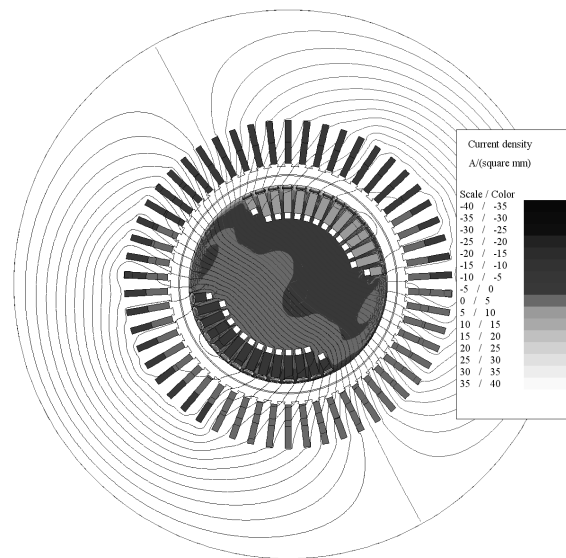
### 3. Wyniki obliczeń

Wykonano polowo-obwodową analizę nagłego zwiększenia obciążenia turbogenerators pracującego w stanie ustalonym w warunkach znamionowych. W wyniku symulacji obliczone zostały przebiegi prądów w uzwojeniach generatora, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej. Symulowano przypadki, w których przy zwiększaniu obciążenia turbogenerator utrzymywał się w pracy synchronicznej oraz takie, w których wypadał z synchronizmu. Zbadano zmiany rozkładów pola magnetycznego, przebiegi prądów twornika, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej wirnika podczas utraty synchronizmu w wyniku skokowego zwiększenia obciążenia maszyny. Przebieg momentu elektromagnetycznego turbogenerators przy wypadaniu z synchronizmu przedstawiono na rysunku 4. W wyniku kołysań pojawiają się prądy o dużych wartościach zarówno w uzwojeniach stojana jak i w obwodach tłumiących.

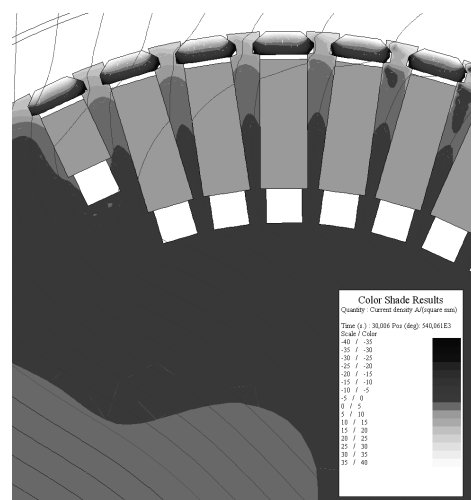


Rys. 4. Moment elektromagnetyczny podczas skokowej zmiany obciążenia

Zbadano również inny stan pracy turbogenerators stanowiący istotne narażenie dla wirnika turbogenerators, a mianowicie niesymetrię obciążenia spowodowaną odłączeniem jednej z faz (asymetria 100%). Praca asymetryczna istotnie deformuje pole magnetyczne w maszynie, co skutkuje powstaniem prądów o znacznych gęstościach w klatce tłumiącej oraz litej stali wirnika. Przykładowy rozkład pola magnetycznego oraz gęstości prądów przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

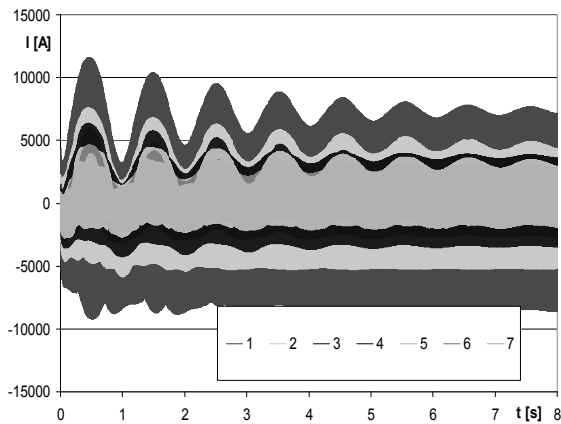


Rys. 5. Rozkład pola magnetycznego oraz gęstości prądów przy 100% asymetrii (stan ustalony)

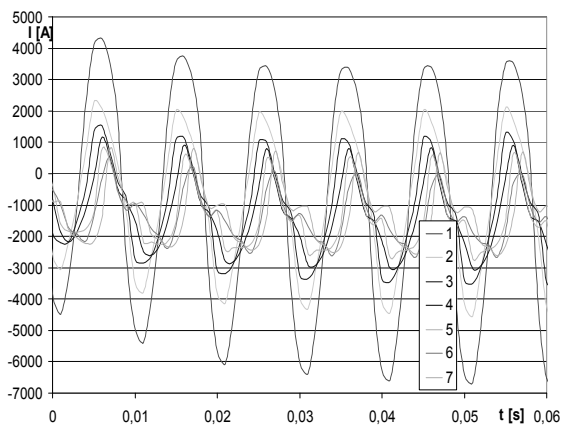


Rys. 6. Rozkład gęstości prądów wirnika przy 100% asymetrii (stan ustalony)

Przebiegi prądów w częściach czynnych uzwojenia tłumiącego przedstawiono na rysunkach 7 oraz 8.



Rys. 7. Prądy w częściach czynnych uzwojenia tłumiącego przy 100% asymetrii



Rys. 8. Prądy w częściach czynnych uzwojenia tłumiącego przy 100% asymetrii (początek stanu przejściowego)

#### 4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki obliczeń polowo-obwodowych ilustrują zagrożenia dla konstrukcji wirnika turbogeneratorsa podczas pracy niestabilnej oraz niesymetrycznej. Obliczony rozkład gęstości prądów w klatce tłumiącej i beczce wirnika wskazuje na istotny wpływ właściwości litego żelaza wirnika na parametry maszyny w stanach przejściowych.

Zarówno kołysania wirnika jak i długotrwała praca turbogeneratorsa obciążonego niesymetrycznie stwarzają niebezpieczeństwo przegrzania wirnika.

Opracowany i użyty do obliczeń model turbogeneratorsa (zweryfikowany obliczeniami

i pomiarami parametrów i charakterystyk) pozwala poprawnie odwzorować zjawiska zachodzące w maszynie w stanach ustalonych oraz przejściowych. Można więc nim badać stabilność pracy cylindrycznej maszyny synchronicznej przy dowolnych zakłóceniach.

#### 5. Literatura

- [1] Cedrat, *FLUX® 9.20 User's guide*, November 2005.
- [2] Kisielewski P., Antal L.: *Wyznaczanie parametrów turbogeneratorsa z symulacji polowo-obwodowych*, XLII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kraków 2006.
- [3] Kisielewski P., Antal L.: *Polowo-obwodowy model turbogeneratorsa*, P. N.. IMNiPE PWr. nr 60, SiM nr 27, 2006, 53 – 60.
- [4] Kisielewski P., Antal L.: *Badanie reakcji turbogeneratorsa na zmiany napięcia i częstotliwości systemu*, Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 62, SiM nr 27, 2007, s. 56 – 64.
- [5] Ramirez C., Tu Xuan M., Simond J., Schafer D., Stephan C.: *Synchronous machines parameters determination using finite element method*, International Conference on Electrical Machines. ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo, Finland, ref. 1130.
- [6] Wamkeue R., Elkadri N.E.E., Kamwa I., Chacha M.: *Unbalanced transient-based finite-element modeling of large generators*, Electric Power Systems Research 56 (2000) 205-210.

#### Autorzy

dr inż. Piotr Kisielewski  
 dr hab. inż. Ludwik Antal, prof. PWr  
 Politechnika Wrocławska,  
 Instytut Maszyn, Napędów  
 i Pomiarów Elektrycznych,  
 ul. Smoluchowskiego 19  
 50-372 Wrocław  
 piotr.kisielewski@pwr.wroc.pl  
 ludwik.antal@pwr.wroc.pl

Praca naukowa finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w Krakowie ze środków na naukę w latach 2011-2013 jako projekt badawczy Nr 3141/B/T02/2011/40

#### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Bronisław Drak