

Piotr Kisielewski, Ludwik Antal  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## BADANIE STABILNOŚCI TURBOGENERATORA PRZY ZMIANACH OBCIĄŻENIA

### RESEARCH OF TURBOGENERATOR STABILITY FOR LOAD CHANGES

**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 stator currents, magnetic torque and rotor speed in case of sudden power increase.

#### 1. Wstęp

Wystąpienie zakłócenia w systemie elektroenergetycznym np. zwarcie może doprowadzić do zmiany jego konfiguracji. Odłączenie części systemu powoduje konieczność przejęcia obciążenia przez pozostałe w systemie generatory. Dla tych maszyn taka sytuacja jest widoczna jako nagle zwiększenie obciążenia.

Zakłócenia w pracy turbozespołu podłączonego do sieci elektroenergetycznej mogą prowadzić do utraty synchronizmu, czyli utraty stabilności. Znajomość zjawisk elektromagnetycznych i przebiegów wielkości fizycznych w stanach awaryjnych pozwala na konstruowanie układów regulacji przeciwdziałających skutkom zakłócenia i utrzymujących turbogenerator w pracy synchronicznej.

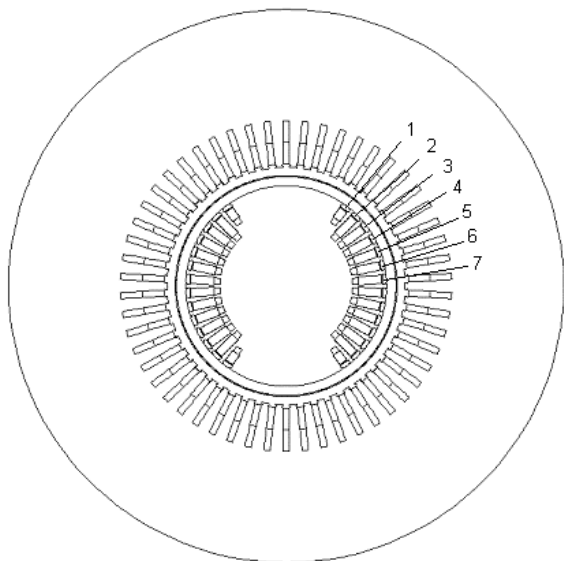
Stosowane w praktyce do badania stanów zakłóceniovych metody obwodowe zawierają znaczne uproszczenia rozwiązywanego układu równań. Pomijają nieliniowość obwodu magnetycznego, redukują obwody wirnika, transponują uzwojenia do układu dwuosowego. Ze względu na bardzo małe stałe czasowe związane z obwodem 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 dwojaki 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 krzywej momentu w funkcji kąta obciążenia, czyli powoduje zwiększenie kąta granicznego.

W wyniku rozwiązania uproszczonego układu równań otrzymuje się przybliżone przebiegi czasowe wielkości elektrycznych (napięcia, prądu, moc) i mechanicznych (moment, prędkość i położenie kątove 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.

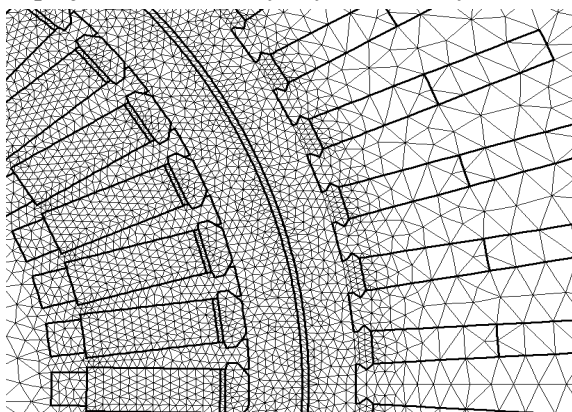
#### 2. Model polowo-obwodowy

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



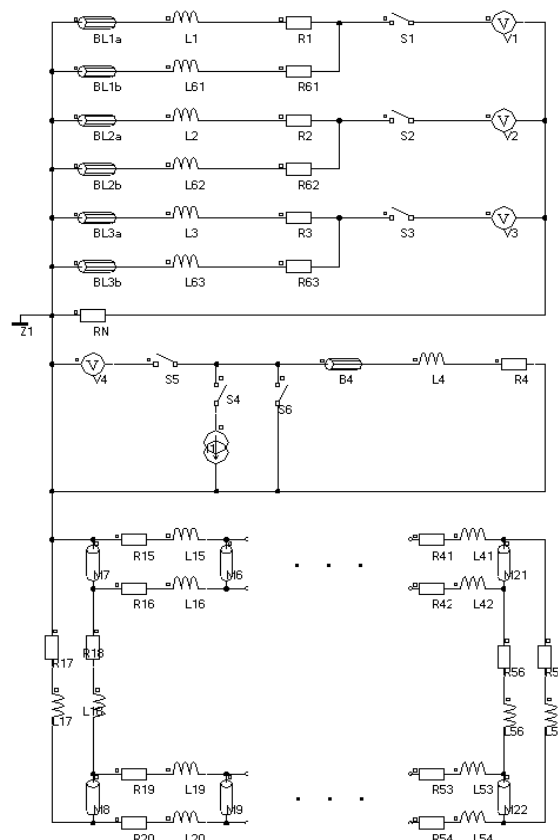
Rys. 1. Przekrój poprzeczny modelu turbogeneratora

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 rys. 2. Model polowy uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnesowania elementów obwodu magnetycznego oraz prądy wirowe indukujące się w klinach żłobków wirnika. 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 przewody 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.



Rys. 2. Fragment siatki dyskretyzacyjnej

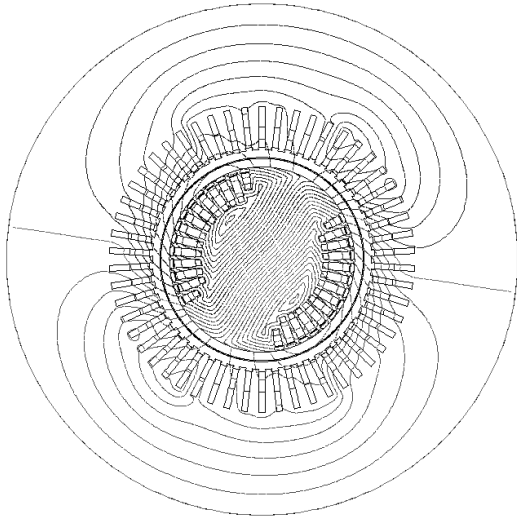
Część obwodową modelu, zawierającą obwody stojana, wzbudzenia oraz klatkę tłumiącą przedstawiono na rysunku 3.



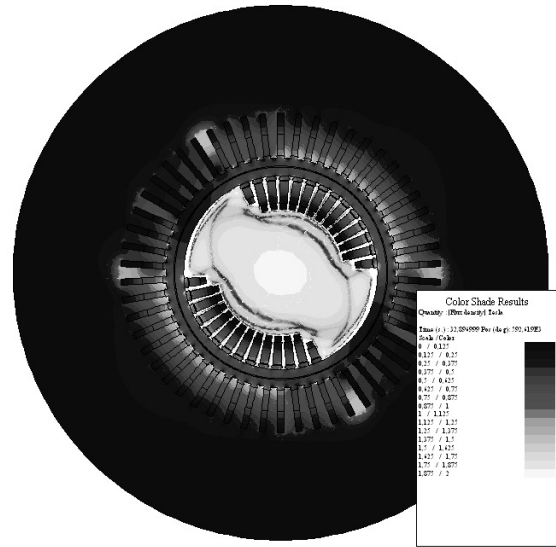
Rys. 3. Część obwodowa modelu maszyny

### 3. Wyniki obliczeń

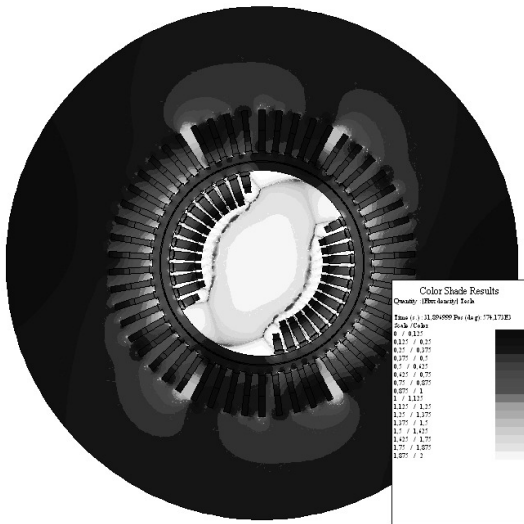
Używając modelu polowo-obwodowego symulacyjnie zbadano skutki nagłego zwiększenia obciążenia turbogeneratora pracującego w stanie ustalonym w warunkach znamionowych. W wyniku symulacji obliczone zostały przebiegi prądów w uzwojeniach generatora, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej. 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. Rozkłady pola magnetycznego oraz modułu indukcji w przekroju poprzecznym turbogeneratora przy wypadaniu z synchronizmu przedstawiono na rysunku 4 oraz 5.



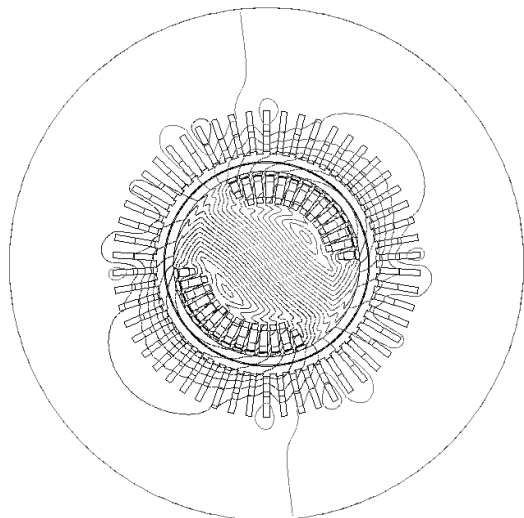
Rys. 4. Linie stałego potencjału magnetycznego po wypadnięciu z synchronizmu



Rys. 7. Moduł indukcji w przekroju poprzecznym maszyny po wypadnięciu z synchronizmu

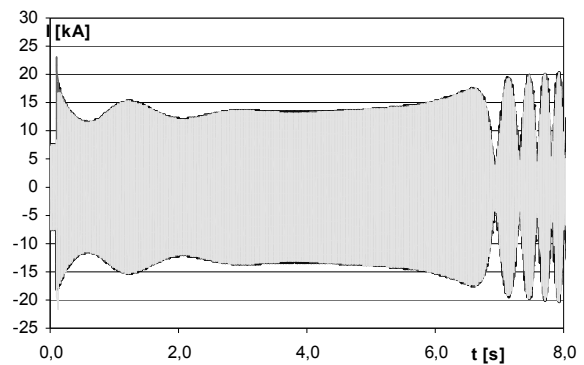


Rys. 5. Moduł indukcji w przekroju poprzecznym maszyny po wypadnięciu z synchronizmu

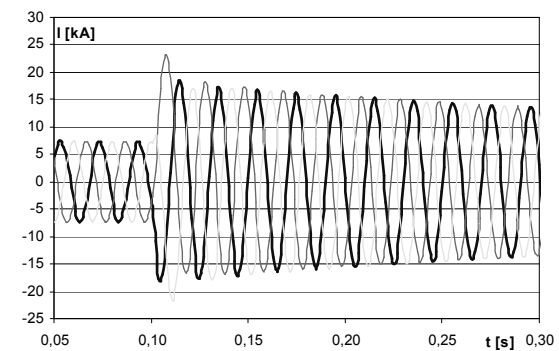


Rys. 6. Linie stałego potencjału magnetycznego po wypadnięciu z synchronizmu

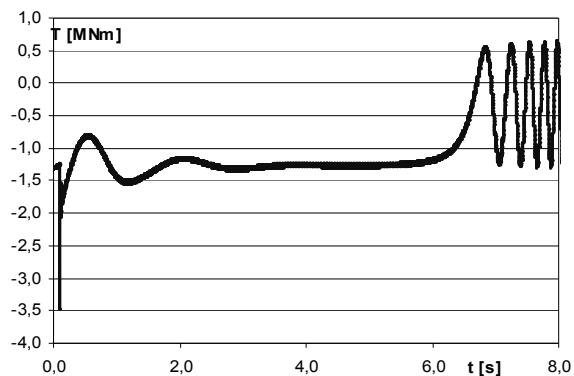
Przebiegi prądów w uzwojeniach stojana, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej podczas zakłócenia pracy i wypadania z synchronizmu przedstawiono na rysunkach 8 - 13.



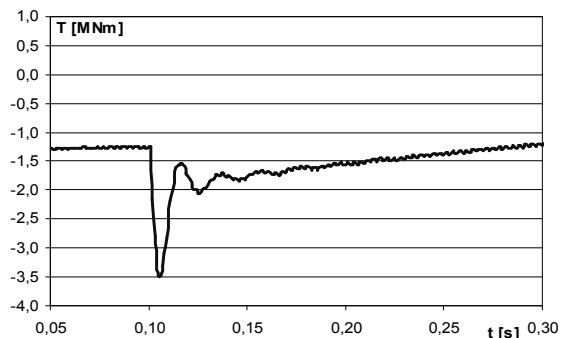
Rys. 8. Prądy stojana podczas zakłócenia



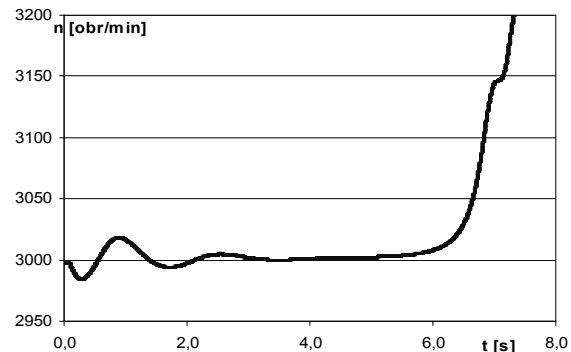
Rys. 9. Prądy stojana w chwili wypadania z synchronizmu



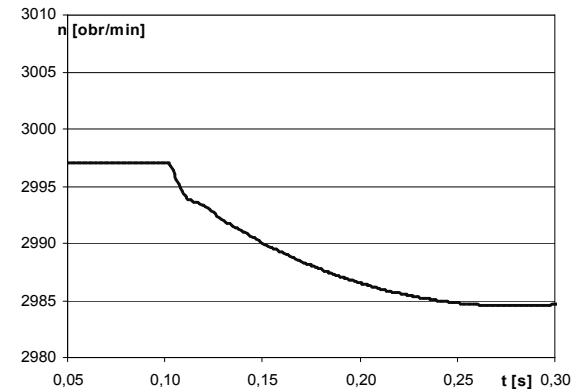
Rys. 10. Moment elektromagnetyczny podczas skokowej zmiany obciążenia



Rys. 11. Moment elektromagnetyczny w chwili wypadania z synchronizmu

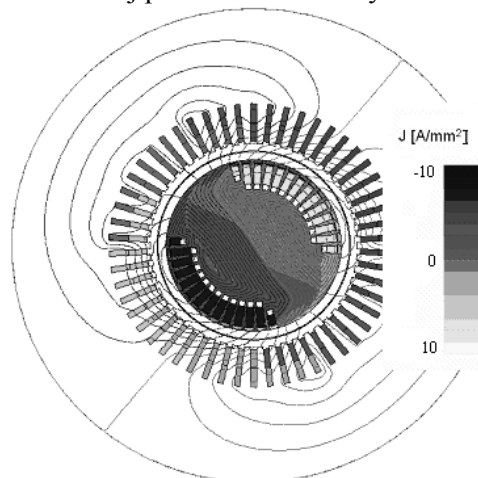


Rys. 12. Prędkość obrotowa podczas skokowej zmiany obciążenia

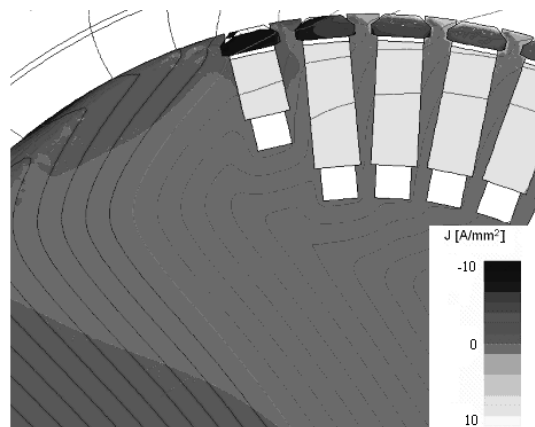


Rys. 13. Prędkość obrotowa w chwili wypadania z synchronizmu

Przykładowy rozkład pola magnetycznego oraz gęstości prądów przy przejściu w stan pracy niestabilnej przedstawiono na rys. 14 oraz 15.



Rys. 14. Rozkład pola magnetycznego oraz gęstości prądów przy przejściu w stan pracy niestabilnej



Rys. 15. Rozkład gęstości prądów wirnika przy przejściu w stan pracy niestabilnej

#### 4. Podsumowanie

Skokowe zwiększenie obciążenia generatora może być przyczyną utraty jego stabilności. Analizowany przypadek pokazuje, iż pomimo zanikania kołysań wirnika, stan nieustalony ciągle trwa. Objawia się tym, że stale, w wyniku małego poślizgu, zwiększa się kąt obciążenia, co prowadzi do wypadnięcia z synchronizmu.

Opracowany model turbogeneratora zweryfikowany obliczeniami parametrów i charakterystyk pozwala poprawnie odwzorować zjawiska zachodzące w maszynie w stanach ustalonych oraz przejściowych. Przy użyciu tego modelu można badać stabilność pracy maszyny synchronicznej przy dowolnych zakłóceniach.

Uzyskane rozkłady pól oraz czasowe przebiegi prądów i momentu ilustrują mechanizm powstawania składowych prądów zwarciovych. Obliczony rozkład gęstości prądów w klatce tłumiącej i becze wirnika wskazuje na istotny wpływ właściwości litego żelaza wirnika na parametry maszyny i początkowe wartości prądów oraz momentu elektromagnetycznego.

## 5. Literatura

- [1]. CEDRAT, *FLUX® 9.20 User's guide*, November 2005.
- [2]. Kisielewski P., Antal L.: *Wyznaczanie parametrów turbogenerators z symulacji polowo - obwodowych*, XLII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kraków 2006.
- [3]. Kisielewski P., Antal L.: *Polowo-obwodowy model turbogenerators*, P. N. IMNiPE PWr. nr 60, SiM nr 27, 2006, 53 – 60.
- [4]. Kisielewski P., Antal L.: *Badanie reakcji turbogenerators 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 Wroclawska,  
Instytut Maszyn, Napędów  
i Pomiarów Elektrycznych,  
ul. Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław  
piotr.kisielewski@pwr.wroc.pl  
ludwik.antal@pwr.wroc.pl