

Adam Gozdowiak, Piotr Kisielewski
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

UTRATA POLA WZBUDZENIA TURBOGENERATORA

TURBOGENERATOR OPERATION DURING LOSS OF FIELD

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych utraty synchronizmu turbogeneratorsa z powodu zwarcia uzwojenia wzbudzenia podczas znamionowej pracy. W obliczeniach wykorzystano zweryfikowany pomiarowo model polowo-obwodowy turbogeneratorsa, który umożliwia zaobserwowanie zjawisk zachodzących w trudno dostępnym pomiarowo wirniku. Zbadano wpływ utraty synchronizmu na stabilność systemu elektroenergetycznego oraz wykazano najbardziej narażone na uszkodzenia węzły konstrukcyjne turbogeneratorsa.

Abstract: This article shows the simulation results of the loss of turbogenerator synchronism due to loss of field during rated operation work. Verified field-circuit model of turbogenerator was used to perform the calculation results. This model allows observing the physical phenomena existing in the rotor. Presented analysis shows the impact turbogenerator synchronism loss on the power system stability and the construction components which are the most vulnerable to damage.

Słowa kluczowe: turbogenerator, utrata synchronizmu, stabilność, metoda elementów skończonych

Keywords: turbogenerator, loss of synchronism, stability, finite element method

1. Wstęp

Utrata pola wzbudzenia turbogeneratorsa jest stanem awaryjnym, w czasie, którego trwania ulegają znacznej zmianie wielkości fizyczne zarówno maszyny, jak i systemu elektroenergetycznego. Stan ten powstaje na skutek zwarcia uzwojenia wzbudzenia, zaniku prądu wzbudzenia, zwarć w SEE i spowodowane nimi samoczynne ponowne załączenie (SPZ) linii, otwarcie uzwojenia wzbudzenia, awarii układu wzbudzenia oraz z powodu utraty zasilania układu wzbudzenia [2, 3]. Utrata pola wzbudzenia turbogeneratorsa stwarza poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa turbogeneratorsa oraz systemu elektroenergetycznego, dlatego istotne jest właściwe ustawienie nastaw w urządzeniach zabezpieczających. O niezawodności zadziałania zabezpieczenia decyduje czas przebywania wektora impedancji wewnątrz charakterystyki rozruchowej. W praktyce przyjmuje się czas równy $2\div 5$ s. Po tym okresie turbogenerator jest odstawiany lub zmniejszana jest moc turbiny i maszyna zaczyna pracować asynchronicznie. Utrata pola wzbudzenia na skutek zwarcia uzwojenia wzbudzenia jest jedną z najczęściej występujących awarii [4, 5]. Autorzy w pracy [5] przytaczają statystyki, z których wynika, że 20% postojów wywołanych awarią wirnika powstaje na skutek utraty pola wzbudzenia spowodowaną zwarcie uzwojenia wirnika. Znane z literatury analizy omawianego stanu

awaryjnego były przeprowadzane przy wykorzystaniu klasycznych modeli obwodowych. W pracy [4] zastępczy model obwodowy turbogeneratorsa posiadający obwód w osi podłużnej i poprzecznej, został rozbudowany o dodatkowe gałęzie i elementy pasywne odzwierciedlające prądy wirowe w przewodzących częściach wirnika, zgodnie z równaniami zaproponowanymi przez Canay'a [6]. Pomimo zastosowania rozszerzonego modelu obwodowego nie uzyskano zadawalających wyników. Na podstawie porównań zmierzonych wielkości fizycznych (mocy czynnej i biernej oraz napięcia i prądu stojana) dostrzega się znaczące różnice i dlatego istnieje ryzyko wyciągnięcia błędnych wniosków. Praca [7] natomiast przedstawia porównanie wyników obliczeń utraty pola wzbudzenia przy wykorzystaniu sprzęgnięcia zweryfikowanego pomiarowo modelu polowego i obwodowego oraz uproszczonego modelu obwodowego bazującego na równaniach Parka. Porównań dokonano na podstawie przebiegów prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego. Otrzymane wyniki znacząco różnią się od siebie. Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu obwodowego są znacząco zawyżone, co prowadzi do przeszacowania ryzyka, jakie niesie za sobą ten anormalny stan pracy. Modelowanie polowo-obwodowe turbogeneratorsa umożliwia uzyskanie informacji

o zjawiskach elektromagnetycznych zachodzących w trudno dostępnym pomiarowo częściach konstrukcyjnych wirnika stanowiących klatkę tłumiącą, która w znaczący sposób wpływa na stabilność pracy maszyny w SEE.

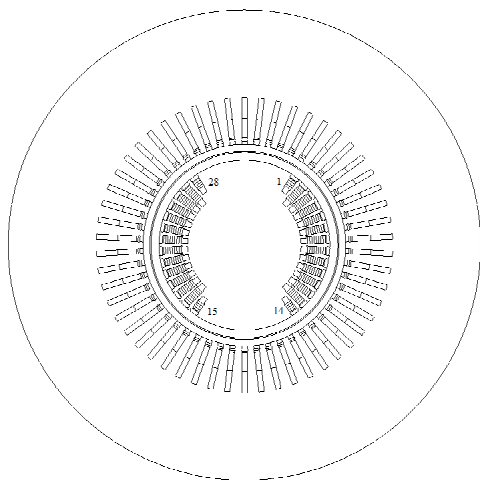
2. Model badanego turbogeneratora

Badaną maszyną jest 2-biegunowy turbogenerator, którego dane znamionowe zawarto w tabeli 1.

Tab. 1. Dane znamionowe badanej maszyny

Symbol	Wartość	Jednostka
S_N	500	MVA
U_{SN}	21	kV
I_{SN}	13,75	kA
$\cos\phi_N$	0,80	-
I_{FN}	4,5	kA
n_N	3000	obr/min
M_N	1,273	MNm

Model obliczeniowy składa się z dwóch części, polowej oraz obwodowej. Model polowy (rysunek 1) odzwierciedla rzeczywisty rozkład uzwojeń rozłożonych w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci niemagnetycznych klinów wirnika i litej stali wirnika. W czasie obliczeń uwzględniono nieliniowość charakterystyk magnesowania rdzeni stojana i wirnika, zjawisko wypierania prądu w klinach wirnika oraz prądy wirowe indukowane w litej stali wirnika. Model polowy w czasie obliczeń był sprzęgnięty z modelem obwodowym posiadający elementy skupione, reprezentujące uzwojenia i obwody w części polowej oraz elementy pasywne stanowiące połączenia czołowe uzwojenia stojana, wirnika oraz klinów wirnika.

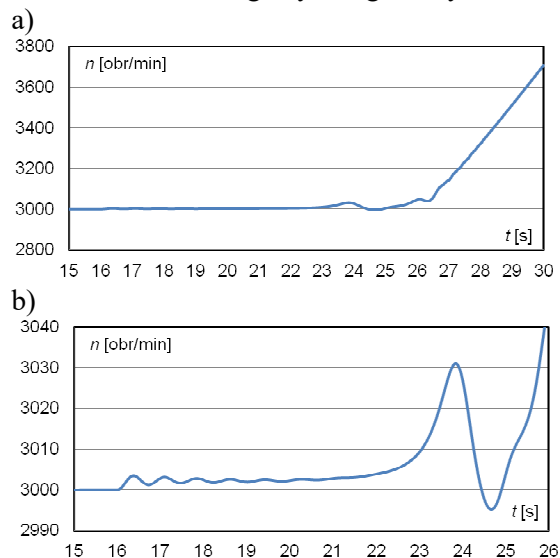


Rys. 1. Model polowy turbogeneratora z zaznaczoną numeracją klinów wirnika

3. Wyniki obliczeń

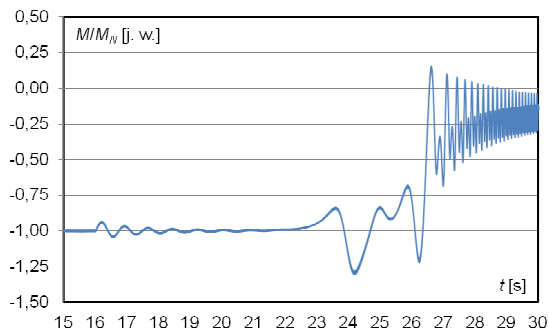
Zbadano symulacyjnie skutki zwarcia uzwojenia wirnika przy stałym znamionowym momencie pochodzącym od turbiny. Przed awarią turbogenerator pracował w znamionowych warunkach pracy. Zwarcie uzwojenia wzbudzenia nastąpiło w 16. sekundzie symulacji. Z obliczeń symulacyjnych wyznaczone zostały przebiegi prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego, napięcia i prądu twornika, prądu wzbudzenia, prądów w klinach wirnika, mocy czynnej i biernej oraz wektora położenia impedancji widzianej z zacisków stojana.

Podczas utraty pola wzbudzenia turbogenerator pracuje przy niedowzbudzeniu. W tym stanie wirnik gwałtownie przyspiesza, ponieważ moc mechaniczna pochodząca od turbiny jest zamieniana w energię kinetyczną. Jeżeli nie zostanie natychmiast ograniczony dopływ pary do turbiny, to maszyna ulegnie zniszczeniu, ponieważ nie jest zaprojektowana na wytrzymanie prędkości powyżej $1,2n_N$. Przebieg prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 2, natomiast momentu elektromagnetycznego na rysunku 3.



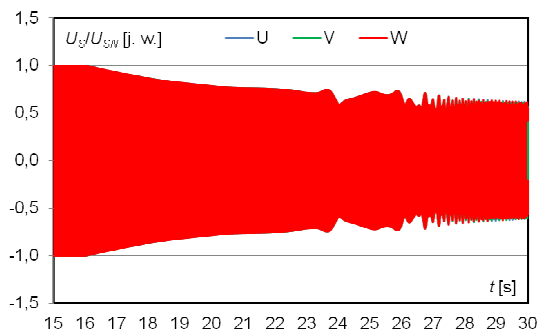
Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej

Utrata pola wzbudzenia osłabia sprzężenie magnetyczne między stojanem a wirnikiem, które jest za słabe na to, aby całkowita moc pochodząca od turbiny była zamieniana na moc elektryczną w przypadku, gdy $M=M_N$. W tym stanie turbogenerator pobiera moc bierną indukcyjną z SEE przekraczającą dwukrotną wartość znamionowej mocy biernej, jaką generuje w znamionowych warunkach pracy, co skutkuje obniżeniem napięcia na zaciskach maszyny.

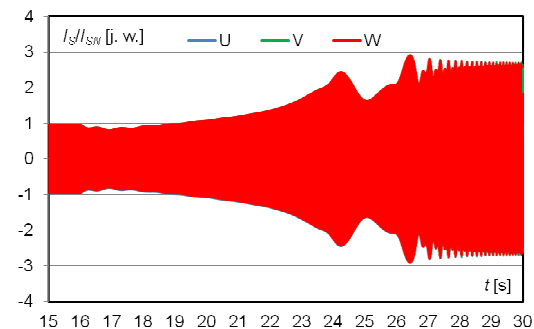


Rys. 3. Przebieg momentu elektromagnetycznego

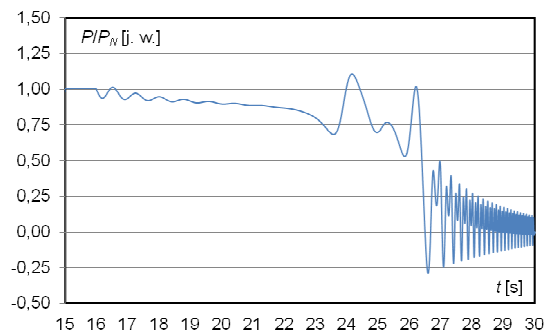
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono odpowiednio przebieg napięcia i prądu stojana, natomiast na rysunkach 6 i 7 przebieg mocy czynnej i biernej.



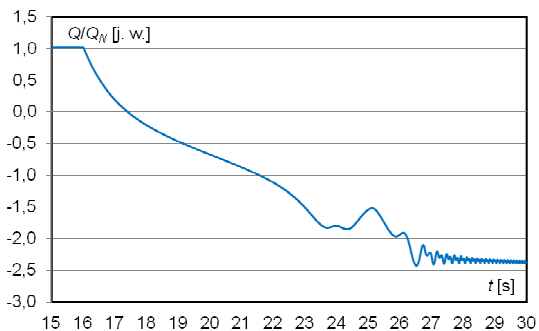
Rys. 4. Przebieg napięcia stojana



Rys. 5. Przebieg prądu stojana

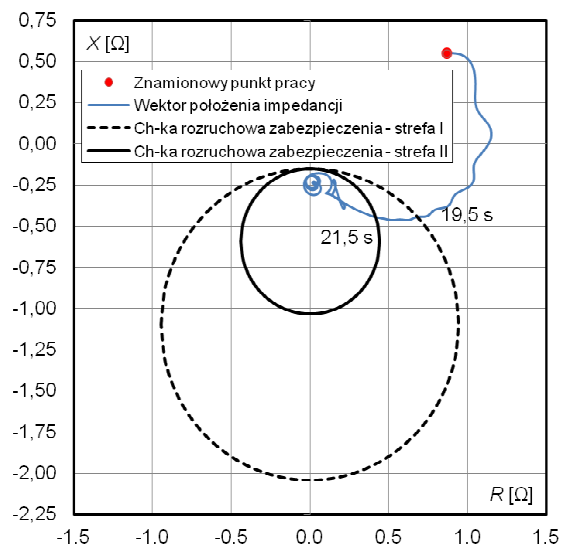


Rys. 6. Przebieg mocy czynnej



Rys. 7. Przebieg mocy biernej

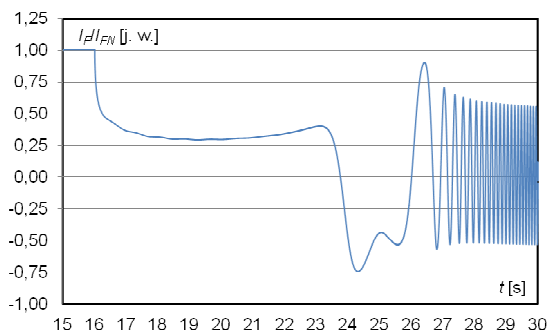
Z wyniku spadku napięcia na zaciskach, prąd twornika wzrasta osiągając wartość powyżej $2I_N$, przy stałym momencie napędowym. Zmiana stosunku U_S/I_S powoduje zmianę położenia wektora impedancji widzianej z zacisków turbogeneratora, którego obliczona trajektoria została przedstawiona na rysunku 8. W 19,5s wektor przechodzi przez strefę I charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia, czyli po 3,5s od chwili zwarcia uzwojenia wzbudzenia, natomiast w 21,5s wchodzi do strefy II i już z niej nie wychodzi. Na podstawie normy [8] strefa II jest wyposażona w zwłokę czasową równą 0,1s. Od czasu wykrycia awarii przez zabezpieczenie do chwili zadziałania głównego wyłącznika mija 450ms. A zatem długość trwania tej awarii od chwili zwarcia do wyłączenia to 5s, po którym moc turbiny zostanie zredukowana poprzez upust pary, bądź turbogenerator zostanie odstawiony.



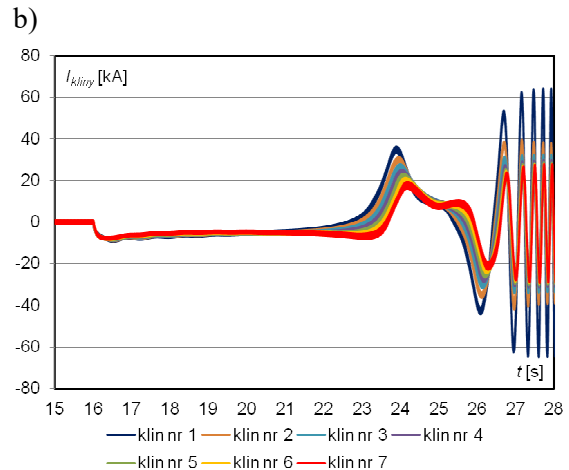
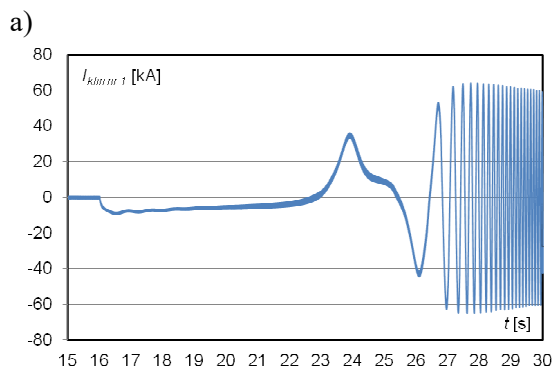
Rys. 8. Wektor położenia impedancji widzianej z zacisków twornika

Podczas utraty pola wzbudzenia turbogenerator zachowuje się jak generator asynchroniczny, w którym występuje zjawisko indukowania się prądów w przewodzących częściach wirnika, które silnie nagrzewają elementy konstrukcyjne. Turbogeneratory nie są projektowane, aby wytrzymać termicznie tak wysokie temperatury, przekraczające zastosowaną do produkcji klasę izolacji. Brak ekranowania strumienia rozproszenia stojana przez strumień rozproszenia wirnika przyczynia się do wzrostu temperatury w skrajnych częściach konstrukcyjnych stojana.

Przebieg prądu w zwartym uzwojeniu wzbudzenia jest przedstawiony na rysunku 9, natomiast rysunek 10 ukazuje przebieg prądu w wybranych klinach wirnika. Największa wartość prądu występuje w klinie o numerze 1, który znajduje się najbliżej dużego zęba wirnika. Turbogenerator nie jest zaprojektowany, aby pracować bez prądu wzbudzenia. W odróżnieniu od maszyny indukcyjnej, generator synchroniczny nie jest zdolny do długoterminowego wytrzymania indukujących się prądów w przewodzących częściach konstrukcyjnych wirnika, tj. odkuwka wirnika, kliny niemagnetyczne oraz kołpaki.



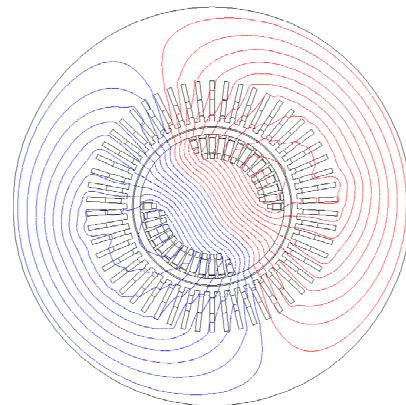
Rys. 9. Przebieg prądu w uzwojeniu wirnika



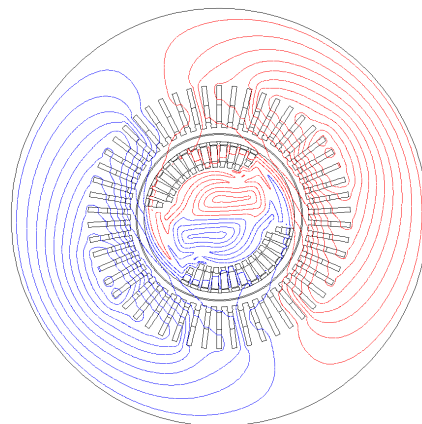
Rys. 10. Przebieg a) indukowanego prądu w klinie nr 1; b) w wybranych klinach wirnika

Linie stałego potencjału magnetycznego oraz rozkład indukcji magnetycznej przedstawiono na rysunkach 11 i 12. Podczas utraty pola wzbudzenia stojan ulega rozmagnesowywaniu, a w wirniku pojawiają się duże nasycenia, szczególnie w dużych zębach.

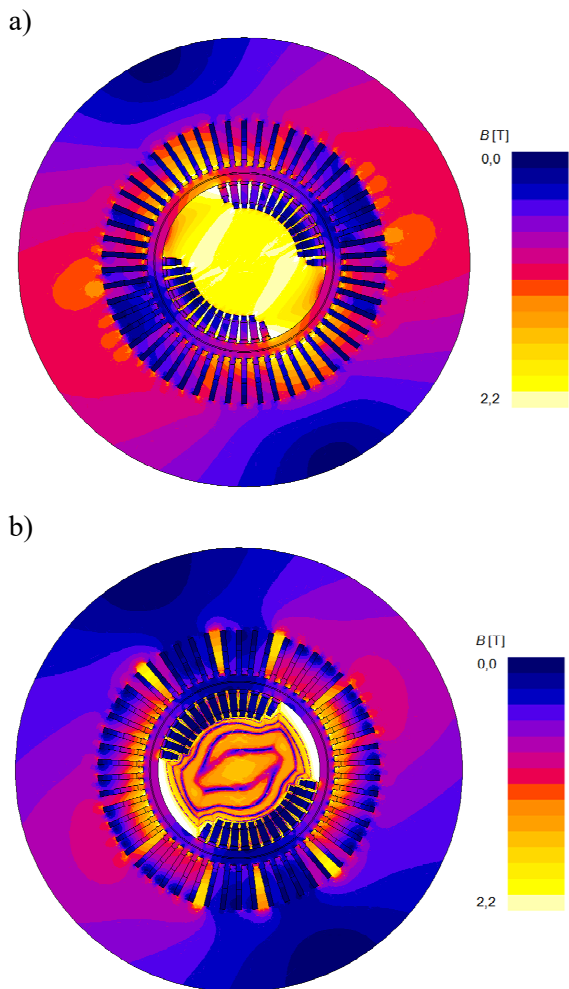
a)



b)



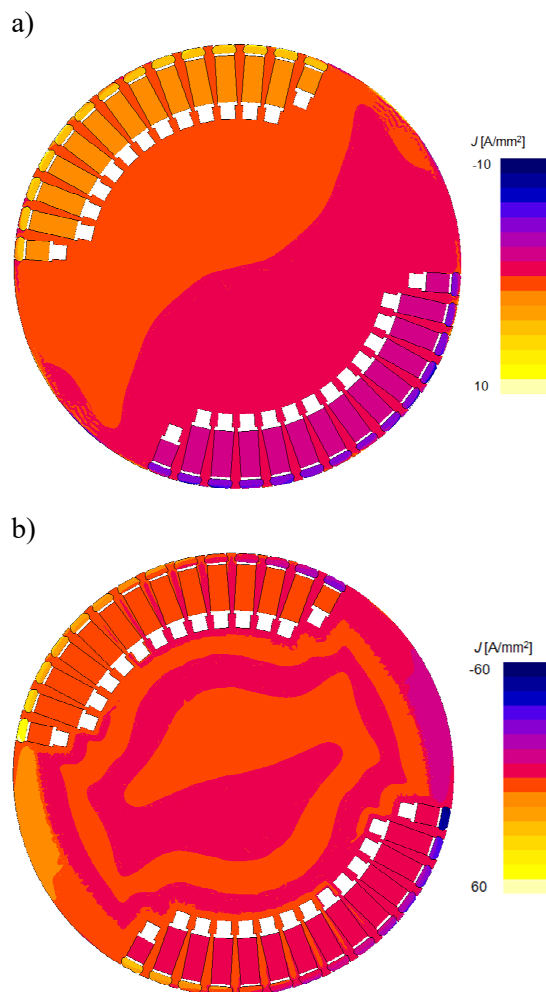
Rys. 11. Linie stałego potencjału magnetycznego: a) podczas pracy znamionowej; b) po 11 sekundach od zwarcia uzwojenia wzbudzenia



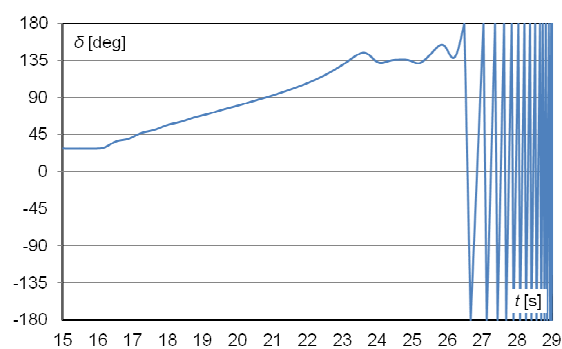
Rys. 12. Moduł indukcji magnetycznej: a) podczas pracy znamionowej; b) po 11 sekundach od zwarcia uzwojenia wzbudzenia

Na podstawie rozkładu gęstości prądu (rys. 13) można wywnioskować, że nie ma ryzyka uszkodzenia uzwojenia wzbudzenia na skutek przepływu przez niego prądu większego od prądu znamionowego. Na dodatek gęstość prądu w zębach wirnika jest zbliżona do gęstości prądu w żłobkach wirnika, a zatem uzwojenie nie jest dodatkowo nagrzewane. Najbardziej narażonymi elementami konstrukcyjnymi są kliny wirnika oraz kołpaki. Ryzyko jest tym większe im mniejszy styk tych elementów.

Utrata pola wzbudzenia dla $M=M_N$ powoduje, że kąt mocy osiąga wartość powyżej 90deg i turbogenerator wypada z synchronizmu. Przebieg kąta mocy jest widoczny na rysunku 14. W chwili, gdy osiąga on wartość 180deg, generowana moc czynna gwałtownie maleje, a pozostałe wielkości fizyczne takie jak: moc bierna, prąd i napięcie stojana zaczynają oscylovwać.



Rys. 13. Rozkład gęstości prądu w wirniku: a) podczas pracy znamionowej; b) po 11 sekundach od zwarcia uzwojenia wzbudzenia



Rys. 14. Przebieg kąta mocy

4. Wnioski

W pierwszej chwili zwarcia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora pracującego w znamionowych warunkach pracy obserwuje się tłumienie kołysań wirnika, lecz na skutek wzrastającego kąta mocy w czasie trwania zwarcia, maszyna wypada z synchronizmu z powodu słab-

nałego sprzęgnięcia magnetycznego między wirnikiem, a stojanem. Z rozkładu gęstości prądu można dostrzec duży udział litej stali wirnika w procesie tłumienia kołysań mocy. Pomijanie jej udziału w stanach dynamicznych może doprowadzić do błędnych wniosków oraz niedoszacowania początkowych wartości wielkości fizycznych definiujących zagrożenia, na które są poddawane elementy konstrukcyjne turbogeneratorów.

5. Literatura

- [1]. P. Kisielewski, L. Antal, "Research of the turbogenerator stability using field-circuit modeling", *XIX International Conference on Electrical Machines*, ICEM 2010, Rome, Italy, 6-8, pages 1-4, September 2010.
- [2]. J. Przybysz., *Turbogeneratory*, Warszawa, IEN, s. 20-35, 2011.
- [3]. H. Yaghobi, H. Mortazavi, H. R. Mashhadi, *Study on application of flux linkage of synchronous generator for loss of excitation detection*, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, pages: 802-817, 2013.
- [4]. K. Z. Guo, W. D. Zhu, F. W. Tan, R. L. Jin, G. Wang, *Analysis of Large Turbogenerators's Asynchronous Operation during Loss of Field*, *Power System Technology*, vol. 2, page 935-940, 1998.
- [5]. J. Hu, Liang Y., J. Chen, H. Huang, *Simulation Analysis for Asynchronous Operation Capacity of Turbogenerator under Excitation-Loss*, *Strategic Technology*, pages: 529-532, 2011.
- [6]. I. M. Canay, *Causes of discrepancy on calculation of rotor quantities and exact equivalent diagram of the synchronous machine*, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pages 1114-1120, 1969.
- [7]. W. Guorui, L. Haisen, *Time step finite element analysis for synchronous generator's asynchronous operation during loss of field*, *Power and Energy Society General Meeting*, pages 1-4, 2012.
- [8]. IEEE Standards, *IEEE Guide for AC Generator Protection*, C37.102, 2006.
- [9]. J. Machowski, J. R. Bialek, J. R. Bumby, *Power system dynamics: stability and control*, John Wiley & Sons, Chichester, 2008.

Autorzy

mgr inż. Adam Gozdowiak
dr inż. Piotr Kisielewski
Politechnika Wrocławska
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
adam.gozdowiak@pwr.edu.pl
piotr.kisielewski@pwr.edu.pl