

Adam Gozdowiak, Ludwik Antal
Politechnika Wrocławska, Wrocław

WPLYW FORSOWANIA PRĄDU WZBUDZENIA NA PRZEBIEG ZJAWISKA UTRATY SYNCHRONIZMU TURBOGENERATORA

IMPACT FORCING OF EXCITATION CURRENT ON PROCESS OF THE TURBOGENERATOR SYNCHRONISM LOSS

Streszczenie: Prezentowany artykuł zawiera wyniki obliczeń symulacyjnych zjawiska utraty synchronizmu turbogeneratora podczas wyłączenia zwarcia w pobliżu turbogeneratora. Obliczenia wykonano przy pomocy polowo-obwodowego modelu turbogeneratora. Zbadano wpływ forsowania prądu wzbudzenia po pojawieniu się zakłócenia. W badaniach uwzględniono wpływ utraty synchronizmu przez turbogenerators na system elektroenergetyczny. Wyznaczono trajektorie impedancji widzianej z zacisków turbogenerators podczas forsowania prądu wzbudzenia, jak i przy braku układu regulacji prądu wzbudzenia.

Abstract: Presented article contains the simulation results of the turbogenerator synchronism loss during disable short close to turbogenerator. The results obtain by using field-circuit model of the turbogenerator. Forcing of the excitation current was taken into account during the fault. The investigations deal with an impact turbogenerator synchronism loss on the power system. The impedance trajectories on RX plane were determined in case of forcing of excitation current and without an automatic voltage regulation.

Słowa kluczowe: turbogenerator, utrata synchronizmu, metoda elementów skończonych
Keywords: turbogenerator, loss of synchronism, finite element method

1. Wstęp

Stabilna praca turbogenerators może zostać zachwiana poprzez wystąpienie różnych zakłóceń w systemie elektroenergetycznym mogących spowodować utratę synchronizmu. W takim przypadku powstają znaczne wahania wartości prądu stojana, które mogą doprowadzić do wahań napięć w systemie energetycznym. Naprężenia mechaniczne wału turbozespołu mogą doprowadzić do jego złamania. Działania cieplne dużych prądów powodują wzrost temperatury do wartości przekraczającej dopuszczalne wartości zastosowanej klasy izolacji zarówno elementów turbogenerators, jak i transformatora blokowego. Oscylacje napięcia na zaciskach turbogenerators silnie wpływają na pracę urządzeń potrzeb własnych bloku energetycznego i mogą doprowadzić do utknięcia silników asynchronicznych.

Powszechnie stosowanym zabezpieczeniem do wykrywania utraty synchronizmu jest zabezpieczenie podimpedancyjne, które mierzy impedancję widzianą z zacisków wyjściowych turbogenerators. Impedancja ta jest wyznaczana przez pomiar napięcia i prądu, a następnie zmierzone sygnały są obrabiane przez algorytm cyfrowy. Zadaniem układów zabezpieczeniowych jest natychmiastowe odłączenie

turbogenerators od sieci. Podczas utraty synchronizmu powstają asynchroniczne kołysania mocy i zmienia się wektor impedancji [1,2,3]. Szybka reakcja układów zabezpieczeniowych chroni uzwojenie stojana przed dynamicznym i cieplnym działaniem dużych prądów, a wirnik przed uszkodzeniami powstałymi na skutek indukowania się dużych prądów w przewodzących jego częściach. Podczas utraty synchronizmu napięcie na zaciskach turbogenerators maleje, natomiast prąd stojana wzrasta. W konsekwencji impedancja widziana z zacisków generatora zmniejsza się, co powoduje zmianę współczynnika mocy.

Zjawiska zachodzące podczas utraty synchronizmu dobrze opisuje polowo-obwodowy model obliczeniowy turbogenerators [5, 6, 7].

W prezentowanej pracy zawarto wyniki obliczeń symulacyjnych procesu utraty synchronizmu spowodowanego odłączeniem zwarcia trójfazowego w pobliżu turbogenerators. Zbadano przypadki, w których nastąpiło forsowanie prądu wzbudzenia w celu utrzymania znamionowej wartości tego prądu oraz przy pominięciu regulacji prądu wzbudzenia. Obecnie dopuszczalne forsowanie prądu wzbudzenia przy zastosowaniu statycznych układów wzbudzenia wynika z jego poziomu napięcia i może wynieść

2,5-3,0 U_{FN} . Statyczny układ wzbudzenia jest

tak dobierany, aby możliwe było wymuszenie takiego napięcia.

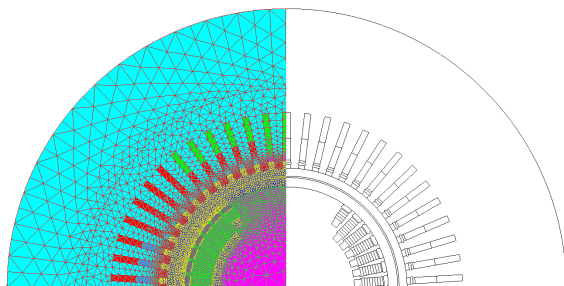
2. Model badanego turbogeneratora

Badaną maszyną jest 2-biegunowy turbogenerator, posiadający 54 żłobki w stojanie i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Dane znamionowe generatora zawiera tabela 1.

Tab. 1. Dane znamionowe badanego turbogenerators

Sym-bol	Wartość	Jednostka
S_N	500	MVA
U_{SN}	21	kV
I_{SN}	13,75	kA
$\cos\varphi_N$	0,80	-
I_{FN}	4,50	kA
n_N	3000	obr/min
M_N	1,273	MNm

Model symulacyjny składa się z dwóch części, polowej oraz obwodowej. W części polowej uwzględniono rzeczywisty rozkład uzwojeń rozłożonych w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci klinów wirnika. Oprócz uwzględnienia nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzeni stojana i wirnika, uwzględniono również zjawisko wypierania prądu w klinach wirnika oraz prądy wirowe indukowane w litej stali wirnika. Pominięto natomiast zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach stojana i wirnika oraz prądy wirowe w pakiecie blach stojana. Model polowy pokazuje rysunek 1. Model polowy w czasie obliczeń jest sprzęgnięty z modelem obwodowym zawierającym elementy skupione, reprezentujące uzwojenia i obwody znajdujące się w części polowej oraz rezystancje i indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika oraz klinów wirnika.



Rys. 1. Model polowy turbogenerators

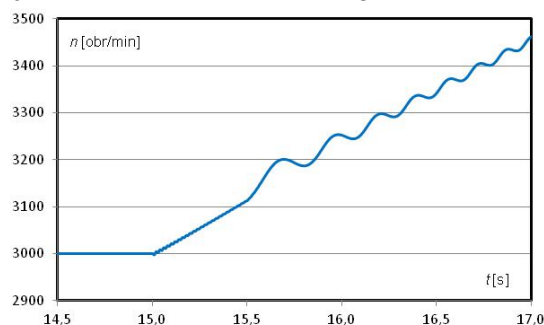
3. Wyniki obliczeń symulacyjnych

W rozpatrywanej analizie założono, że turbogenerator jest podłączony do systemu energetycznego przez transformator blokowy oraz linię dwutorową wysokiego napięcia. Badana maszyna pracuje na sieć sztywną ze znamionowym momentem napędowym, znamionowym napięciem stojana oraz ze znamionowym współczynnikiem mocy. W 15 sekundzie analizy następuje zwarcie trójfazowe w pobliżu turbogenerators, które jest odłączane po upływie 0,5 sekundy.

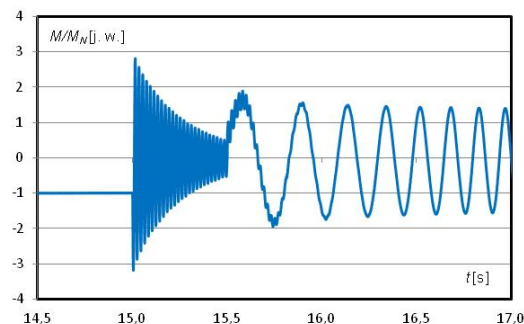
Analizie poddano dwa różne przypadki. Z forsowaniem prądu wzbudzenia oraz bez takiej regulacji.

3.1 Analiza utraty synchronizmu z forsowaniem prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}

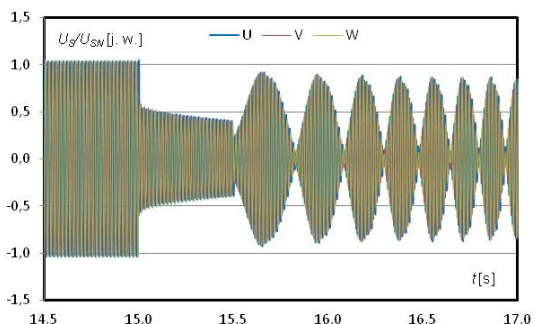
Zbadano przypadek utraty synchronizmu, podczas którego utrzymywano stałą wartość prądu wzbudzenia równą I_{FN} . W polowo-obwodowych obliczeniach symulacyjnych obliczono przebiegi czasowe prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego, prądów i napięć fazowych stojana, mocy czynnej i biernej, prądu klina wirnika oraz wyznaczono impedancję widzianą z zacisków turbogenerators.



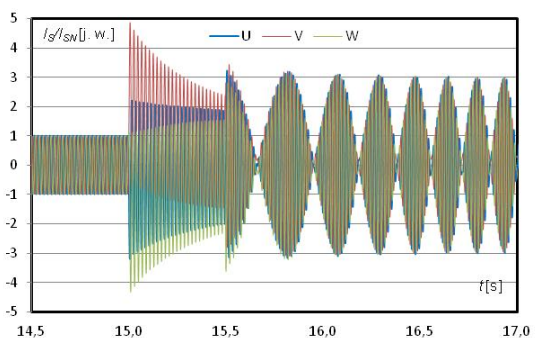
Rys. 2. Prędkość obrotowa przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



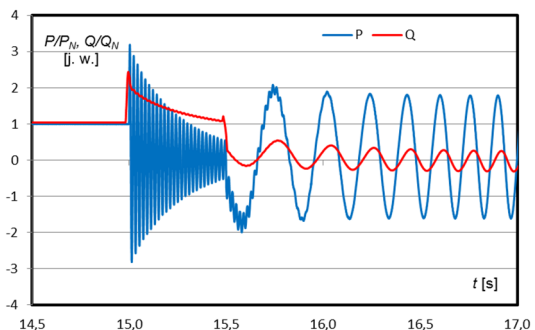
Rys. 3. Moment elektromagnetyczny przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



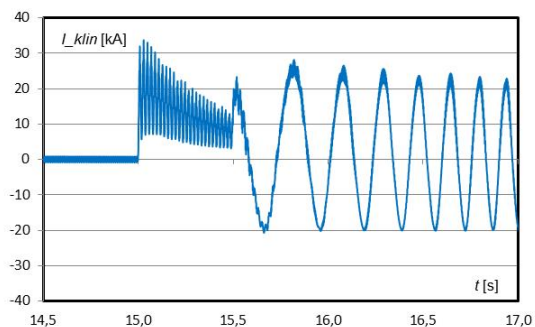
Rys. 4. Napięcia fazowe stojana przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



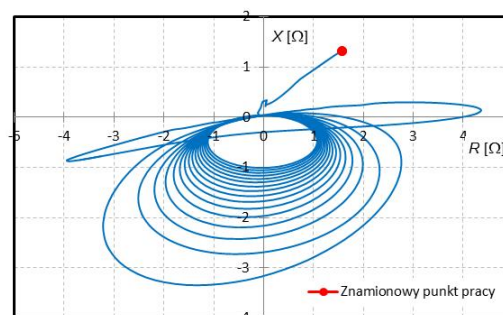
Rys. 5. Prądy stojana przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



Rys. 6. Moc czynna i bierna przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



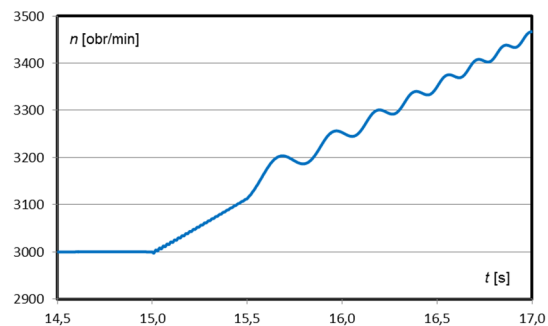
Rys. 7. Prąd klina wirnika przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}



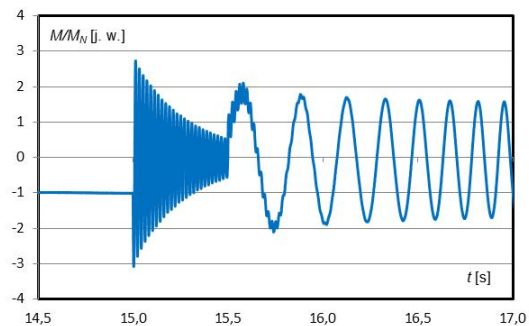
Rys. 8. Trajektoria impedancji turbogeneratora przy forsowaniu prądu wzbudzenia do wartości I_{FN}

3.2 Analiza utraty synchronizmu bez regulacji prądu wzbudzenia

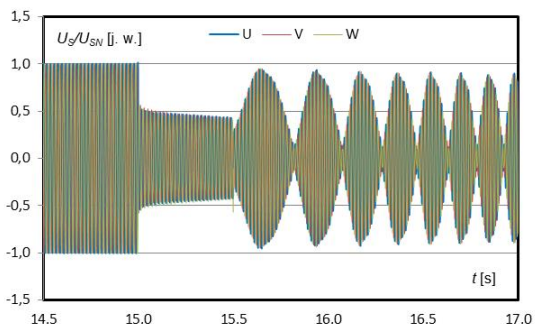
Dla określenia wpływu forsowania prądu wzbudzenia na pracę turbogeneratora podczas utraty synchronizmu, rozważono również przebieg tego zdarzenia bez regulacji prądu wzbudzenia. W połowo-obwodowych obliczeniach symulacyjnych obliczono przebiegi czasowe prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego, prądów i napięć fazowych stojana, mocy czynnej i biernej, prądu klina wirnika, prądu wzbudzenia oraz wyznaczono impedancję turbogeneratora widzianą z jego zacisków.



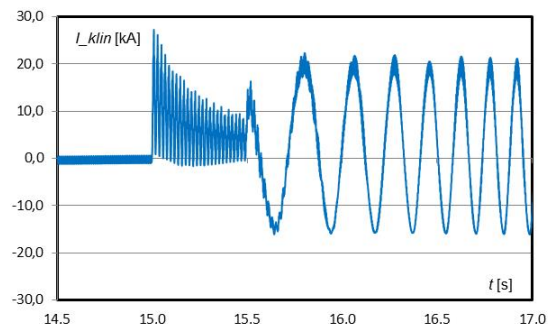
Rys. 9. Prędkość obrotowa bez forsowania prądu wzbudzenia



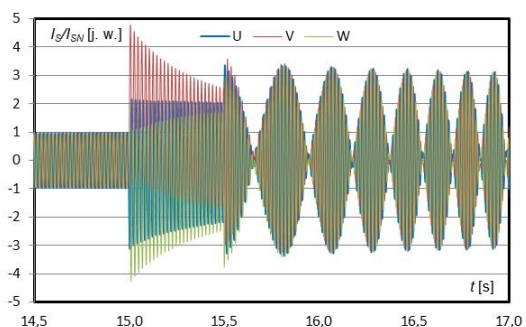
Rys. 10. Moment elektromagnetyczny bez forsowania prądu wzbudzenia



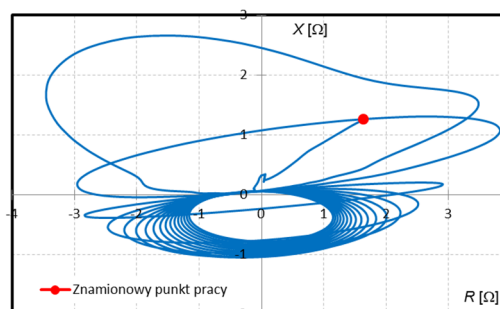
Rys. 11. Napięcia fazowe stojana bez forsowania prądu wzbudzenia



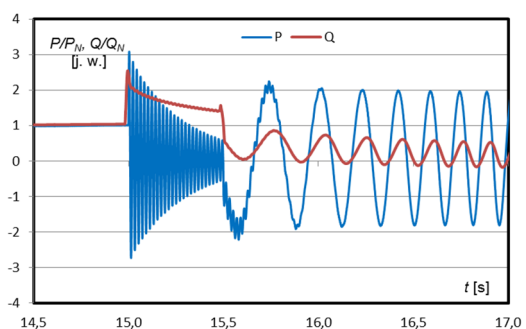
Rys. 15. Prąd klina wirnika bez forsowania prądu wzbudzenia



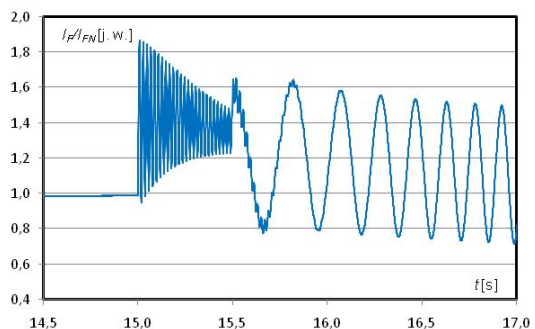
Rys. 12. Prądy stojana bez forsowania prądu wzbudzenia



Rys. 16. Trajektoria impedancji turbogeneratora bez forsowania prądu wzbudzenia



Rys. 13. Moc czynna i bierna bez forsowania prądu wzbudzenia



Rys. 14. Prąd wzbudzenia przy braku układu regulacyjnego

6. Wnioski

Utrata synchronizmu turbogeneratora po wyłączeniu bliskiego zwarcia powoduje znaczne kołysania mocy czynnej i biernej oraz znaczny wzrost prędkości obrotowej mimo dużego momentu bezwładności turboszespołu. Wzrost prędkości obrotowej stwarza zagrożenie przekroczenia wartości dopuszczalnej $1,2 n_n$ [4]. Przeprowadzone analizy nie wykazały wpływu forsowania prądu wzbudzenia na wartość prędkości obrotowej.

W tabeli 2 zestawiono obliczone wartości maksymalne momentu, napięcia, prądów i mocy przy forsowania prądu wzbudzenia, jak i przy braku układu regulacji prądu wzbudzenia.

Forsowanie prądu wzbudzenia przyczynia się do zmniejszenia momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmniejsza ryzyko uszkodzenia wału. Ponadto zmniejsza prądy stojana, czyli ogranicza straty ciepłone mocy w uzwojeniach. Zmniejsza również wahania mocy czynnej i biernej, lecz powoduje wzrost generowanej mocy czynnej w pierwszej chwili wypadnięcia z synchronizmu.

Wyznaczony przebieg prądu wzbudzenia bez jego regulacji (rys. 14) pokazuje, że oscylacje

tego prądu są znaczne i wahają się w granicach 0,79 – 1,65 I_{FN} .

Tab. 2. Obliczone wartości maksymalne momentu, napięcia, prądów i mocy przy forsowaniu prądu wzbudzenia, jak i przy braku układu regulacji prądu wzbudzenia

Symbol	Forsowanie prądu wzbudzenia	Brak układu regulacji prądu wzbudzenia
M_{MAX}/M_N [j. w.]	1,90	2,10
I_{S_MAX}/I_{SN} [j. w.]	3,45	3,60
U_{S_MAX}/U_{SN} [j. w.]	0,93	1,00
U_{S_MIN}/U_{SN} [j. w.]	0,08	0,13
I_{KLIN_MAX} [kA]	28,2	27,3
P_{MAX}/P_N [j. w.]	3,20	3,09
Q_{POB_MAX}/Q_N [j. w.]	2,45	2,55
I_{F_MAX}/I_{FN} [j. w.]	1,00	1,65
I_{F_MIN}/I_{FN} [j. w.]	1,00	0,79

Niekorzystnym skutkiem forsowania prądu wzbudzenia jest wzrost prądów płynących w obwodzie tłumiącym (w klinach wirnika) oraz zmniejszenie napięcia na zaciskach stojana, co przyczynia się do obniżenia napięcia w systemie elektroenergetycznym.

7. Literatura

- [1]. Winkler W., Wiszniewski A., *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 2004,
- [2]. An IEEE committee report, *Survey of experience with generator protection and prospects for improvements using digital computers*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988,
- [3]. Radfern M. A., Checksfield M. J., *A review of pole slipping protection*, IEE Colloquium on Generation protection, 1996,
- [4]. IEEE Std C50.13, *IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators rated 10 MVA and above*, 2005,
- [5]. Kisielewski P., Antal L., *Przebieg procesu utraty synchronizmu turbogeneratorsa*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 1/2012 (94),
- [6]. Kisielewski P., Antal L., *Zjawiska elektromagnetyczne w turbogeneratorze podczas utraty synchronizmu*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 84/2009,
- [7]. Kisielewski P., Antal L., *Obwody tłumiące turbogeneratorsa przy utracie synchronizmu*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 82/2009.

Autorzy

mgr inż. Adam Gozdowiak
dr hab. inż. Ludwik Antal, prof. PWR
Politechnika Wroclawska,
Katedra Maszyn, Napędów
i Pomiarów Elektrycznych,
ul. Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław
adam.gozdowiak@pwr.edu.pl
ludwik.antal@pwr.edu.pl