

Polowo-obwodowa analiza podwójnego zwarcia doziemnego w uzwojeniu wzbudzenia turbogeneratorsa

Streszczenie. Prezentowany artykuł zawiera wyniki obliczeń przebiegu podwójnego zwarcia doziemnego w uzwojeniu wzbudzenia turbogeneratorsa. Symulowane zwarcia umiejscowiono w zwojach uzwojenia wirnika znajdujących się tuż pod kołpakami. W obliczeniach wykorzystano polowo-obwodowy model turbogeneratorsa. Zbadano zjawiska zachodzące w trudno dostępnych pomiarowo, przewodzących elementach konstrukcyjnych wirnika. Obliczono wyższe harmoniczne w przebiegach indukowanej siły elektromotorycznej i prądu twornika.

Abstract. Presented article contains the computation results of double ground faults occurred in the turbogenerator excitation winding. During the calculation process the ground faults were placed in rotor coils located under the retaining ring. The field-circuit model of the turbogenerator was used during the computations. The great emphasis was placed on the physical phenomena existing in the rotor because the measurement of rotor damper bar currents is difficult in practice. In addition the higher harmonics of electromotive force and stator current were estimated. (**Field-circuit analysis of double ground faults in the turbogenerator excitation winding**).

Słowa kluczowe: turbogenerator, podwójne zwarcie doziemne, metoda elementów skończonych, anormalny stan pracy.

Keywords: turbogenerator, double field ground, finite element method, abnormal operating state.

Wstęp

Uszkodzenia wirnika turbogeneratorsa są dość częste i powstają na skutek znacznych sił odśrodkowych wywołujących duże naprężenia. Podczas normalnej pracy izolacja uzwojenia wzbudzenia jest narażona na elektryczne, mechaniczne i cieplne obciążenia, które z czasem prowadzą do jej degradacji [1]. Degradacja izolacji postępuje również z powodu licznych uruchomień turbozespołu oraz znacznych wahań generowanej mocy biernej. Duży wpływ na stan izolacji uzwojenia wzbudzenia mają anormalne stany pracy, w wyniku których wirnik silnie się nagrzewa, powstają przepięcia łukowe oraz duże naprężenia mechaniczne. Do anormalnych stanów pracy można zaliczyć turbogenerator pracujący jako silnik, błędną synchronizację, załączenie odstawionego wcześniej turbogeneratorsa do systemu elektroenergetycznego (SEE), pracę powyżej prędkości synchronicznej, stany pracy, podczas których pojawia się składowa przeciwna prądu stojana indukująca w przewodzących częściach wirnika prądy o podwójnej częstotliwości sieciowej powodujące silne nagrzewanie elementów konstrukcyjnych wirnika.

Wirnik turbogeneratorsa jest najbardziej narażony na zwarcia doziemne, które najczęściej pojawiają się w części czołowej uzwojenia wzbudzenia, w miejscach pod kołpakami. Pojedyncze zwarcie doziemne powoduje pojawienie się małych prądów zwarciovych. To zwarcie prowadzi do zmiany potencjałów poszczególnych punktów względem masy i nie stanowi natychmiastowego zagrożenia dla pracy turbogeneratorsa, jednak praca z pojedynczym zwarcie doziemnym nie jest zalecana [2].

Prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia podwójnego jest największe po wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego powodującego z czasem pogorszenie stanu izolacji uzwojenia wzbudzenia. Przy podwójnym zwarcie doziemnym prąd przepływa między dwoma uziemionymi punktami. Prąd ten może wytworzyć wystarczającą ilość ciepła do topienia litej stali wirnika, klinów wirnika oraz kołpaków. Takie zjawisko może doprowadzić do nieodwracalnego uszkodzenia nagrzewanych komponentów, a w najgorszym przypadku do pęknięcia wału turbogeneratorsa. Po wystąpieniu podwójnego zwarcia doziemnego część uzwojenia wzbudzenia jest zwarta, co przyczynia się do zniekształcenia pola magnetycznego w szczelinie magnetycznej maszyny, co może doprowadzić do powstania silnych drgań wału wirnika mogące doprowadzić do uszkodzeń łożysk [3, 4].

Turbogenerator z pojedynczym zwarcie doziemnym w uzwojeniu wirnika może nadal pracować jeżeli zastosowano zabezpieczenie od podwójnego zwarcia doziemnego, które w sposób automatyczny odstawi turbogenerator od SEE. Obecnie stosowane urządzenia automatyki zabezpieczeniowej tylko sygnalizują zwarcie pojedyncze [2, 5, 6]. W praktyce najczęściej po wykryciu pojedynczego zwarcia doziemnego, turbogenerator zostaje odstawiony, a uszkodzone uzwojenie zostaje naprawione. W ten sposób unika się groźnego, podwójnego zwarcia doziemnego. Zdarzają się jednak takie sytuacje, że obsługa lekceważy alarm informujący o zaistniałym zwarcie i ryzykuje wystąpienie podwójnego zwarcia doziemnego i znacznych uszkodzeń generatora [3]. Zabezpieczenie sygnalizujące zwarcie pojedyncze musi być niezawodne, ponieważ każdy alarm o pojedynczym zwarcie doziemnym jest sprawdzany, czyli generator jest odstawiany i na postoju są dokonywane oględziny, a następnie wykonywana jest naprawa uszkodzonej izolacji [4]. Wyłączenie turbogeneratorsa po każdym błędnym zadziałaniu zabezpieczenia jest kosztowne, lecz ignorowanie alarmu o zwarcie doziemnym w uzwojeniu wzbudzenia i dopuszczenie do podwójnego zwarcia doziemnego może spowodować znacznie większe straty [2].

Modelowanie polowo-obwodowe do badania skutków zwarców w uzwojeniach maszyn elektrycznych dotychczas były stosowane dla silników indukcyjnych małej mocy. Powodem takiego ograniczenia była konieczność weryfikacji pomiarowej skutków zwarców. Weryfikacja taka przeprowadzona na celowo uszkodzonych uzwojeniach wykazała, że uzyskany z obliczeń symulacyjnych opis zjawisk jest poprawny [7, 8]. Można więc przypuszczać, że taka analiza jest również poprawna w badaniu zjawisk zachodzących w turbogeneratorsie podczas podwójnego zwarcia doziemnego w uzwojeniu wzbudzenia.

Polowo-obwodowy model turbogeneratorsa

Badaną maszyną jest dwubiegunowy turbogenerator, posiadający 54 żłobki w stojanie i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Dane znamionowe maszyny zestawiono w tabeli 1.

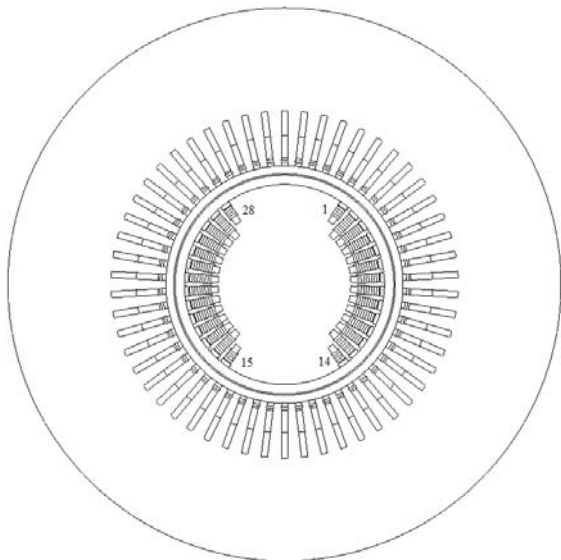
Zbudowany model symulacyjny składa się z części polowej (rys. 1) oraz obwodowej (rys. 2). W części polowej uwzględniono rzeczywisty rozkład uzwojeń w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci klinów wirnika. Oprócz uwzględnienia nieliniowości charakterystyk

magnesowania rdzenia 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. Przyjęte założenia odzwierciedlają zjawiska zachodzące w turbogeneratorze w stanach nieustalonych. Weryfikacja modelu została przedstawiona w pracach [9, 10].

Tabela 1. Dane znamionowe badanego turbogeneratora

Symbol	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

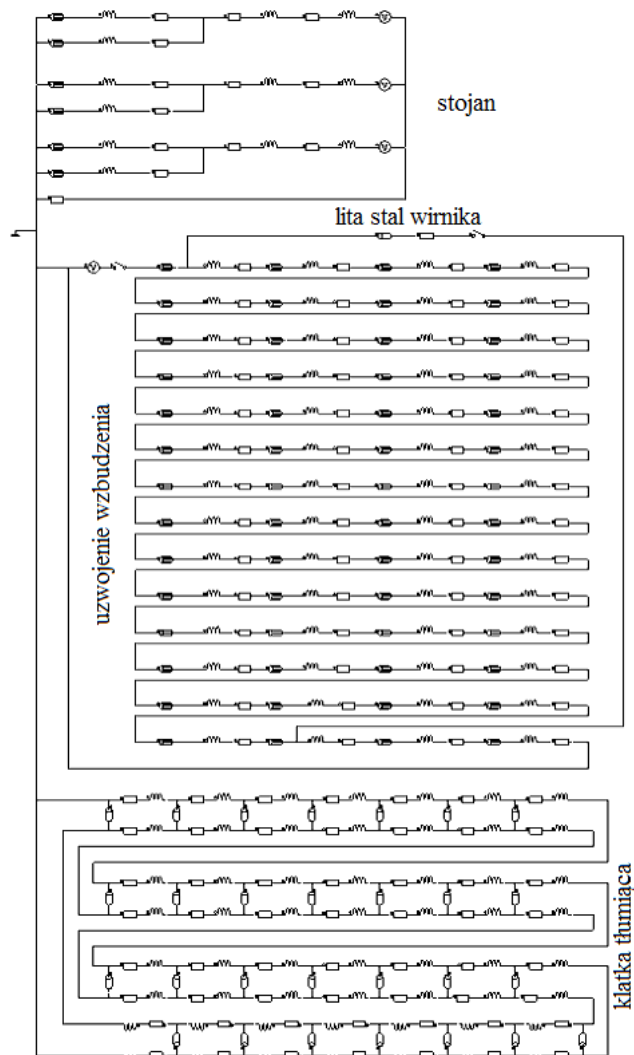
Badana maszyna posiada jedną parę biegunów oraz dwuwarstwowe uzwojenie stojana. Model połowy jest sprzężony z modelem obwodowym zawierającym elementy skupione, reprezentujące uzwojenia i obwody znajdujące się w części polowej oraz rezystancje i indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia stojana, wirnika oraz klinów wirnika, tworzące klatkę tłumiącą.



Rys.1. Model połowy turbogeneratora

W modelu obwodowym uzwojenie wzbudzenia zostało rozłożone w taki sposób, aby możliwe było zamodelowanie wszystkich możliwych przypadków zwarć doziemnych występujących w zwojach znajdujących się tuż pod kołpakiem (pierwszy zwoj pod klinem wirnika, rys. 1). Uzwojenie wzbudzenia rozbito na 14 części (rys. 2) reprezentujących liczbę żłobków przypadających na jeden biegun. Pierwszym elementem w każdej z tych części jest element odpowiadający jednemu zwojowi znajdującemu się tuż pod klinem wirnika w części aktywnej dla bieguna dodatniego. Następnie umiejscowiono dwa elementy pasywne (rezystor i cewkę) reprezentujące część czołową pierwszego zwoju. Kolejny element reprezentuje jeden zwoj znajdujący się tuż pod klinem wirnika w części aktywnej dla bieguna ujemnego, a w dalszej kolejności ułożono dwa elementy pasywne reprezentujące część czołową tego zwoju. Kolejny element reprezentuje 3 zwoje dla żłobków wirnika numer 1, 14, 15 i 28 (znajdujących się tuż przy dużym zębie) lub 7 zwojów dla pozostałych żłobków (dla bieguna dodatniego). W dalszej części znajdują się dwa

elementy reprezentujące połączenia czołowe wspomnianych powyżej zwojów. Ostatnie trzy elementy reprezentują 3 zwoje dla żłobków wirnika numer 1, 14, 15 i 28 lub 7 zwojów dla pozostałych żłobków dla bieguna ujemnego oraz dwa elementy pasywne reprezentujące połączenia czołowe tych zwojów.



Rys.2. Model obwodowy turbogeneratora

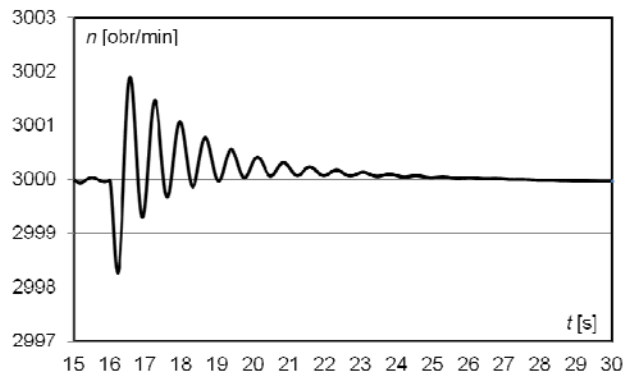
Wyniki obliczeń

Wykorzystując połowo-obwodowy model turbogeneratora symulacyjnie zbadano skutki podwójnego zwarcia doziemnego w uzwojeniu wzbudzenia. Zwarcia zasymulowano w zwojach znajdujących się tuż pod kołpakiem w żłobkach nr 1 oraz 15 (rys. 1), przy czym w żłobku 1 znajduje się początek uzwojenia wzbudzenia, natomiast w żłobku 15 jego koniec. Zbadano najgorszy przypadek podwójnego zwarcia doziemnego, w którym większa część zwojów uzwojenia wirnika jest zwarta i prąd zamiast przez uzwojenie, płynie przez litą stal wirnika.

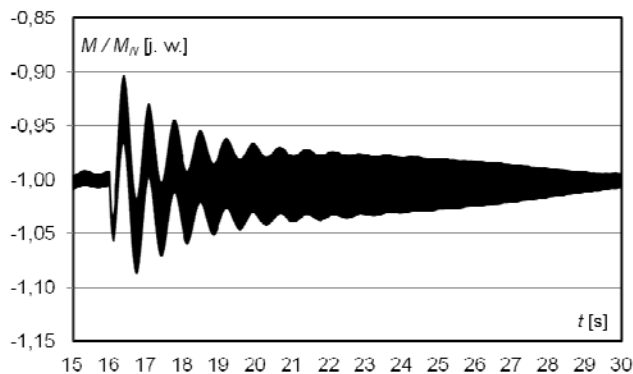
Badane zwarcie wystąpiło w 16. sekundzie analizowanej pracy generatora. Turbogenerator przed zwarciem pracował w znamionowych warunkach pracy. Przyjęta do obliczeń rezystancja zwarcia wynosi $10^{-6} \Omega$. Przyjęto tak małą wartość rezystancji, ponieważ wartość rezystancji uzwojenia wzbudzenia wynosi ok. $0,08 \Omega$. Poczynione założenie gwarantuje, że cały prąd zwarciový przepłynie przez litą stal wirnika (co jest najgroźniejszym przypadkiem zwarcia).

Wyniki obliczeń symulacyjnych podwójnego zwarcia doziemnego uzwojenia wzbudzenia przedstawiono na rysunkach 3 – 10. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg

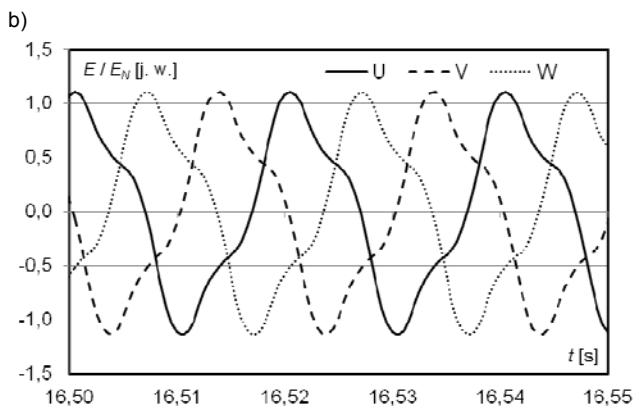
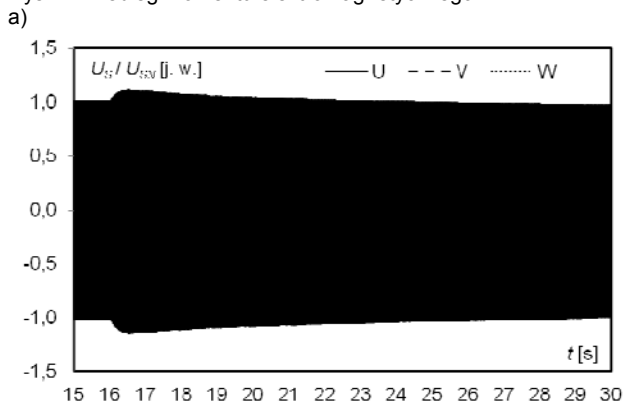
prędkości obrotowej, natomiast na rysunku 4 przebieg momentu elektromagnetycznego. Dla badanego przypadku nie odnotowano znaczących wahań prędkości obrotowej. Natomiast moment elektromagnetyczny w pierwszej chwili zwarcia oscylował w granicach $\pm 10\%$, a następnie ustalił się w swojej znamionowej wartości.



Rys.3. Przebieg prędkości obrotowej



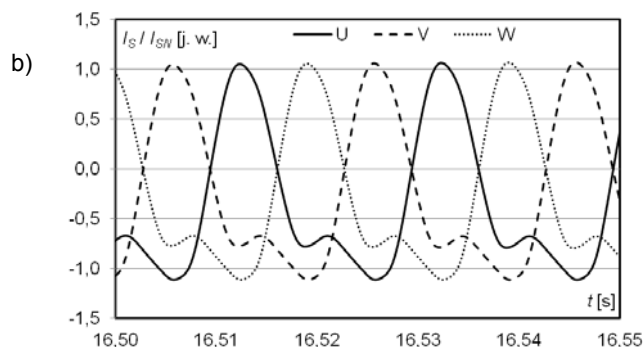
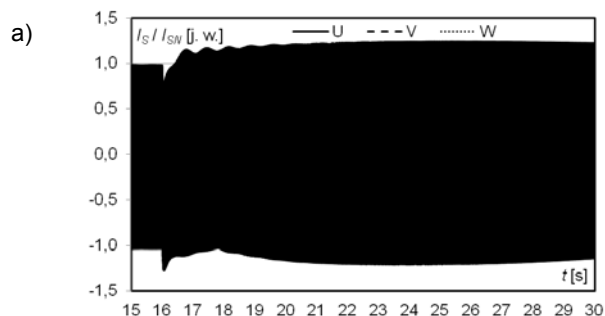
Rys.4. Przebieg momentu elektromagnetycznego



Rys.5. Przebieg a) napięcia na zaciskach twornika oraz b) indukowanej siły elektromotorycznej w uzwojeniu twornika

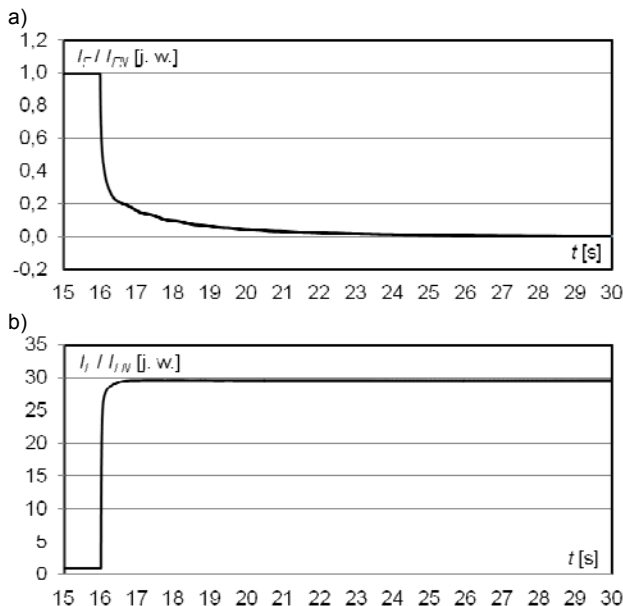
Maksymalna zarejestrowana chwilowa wartość napięcia na zaciskach turbogeneratorsa wynosi ok. $1,11 U_N$ (rys. 5a) i nie stanowi ona zagrożenia dla wytrzymałości izolacji uzwojenia stojana. Dodatkowo na rysunku 5b pokazano przebiegi indukowanej siły elektromotorycznej w każdej fazie stojana po upływie 0,5 s od podwójnego zwarcia doziemnego. Można dostrzec znaczne odkształcenie przebiegu od sinusoidalnego. Wynika to z niesymetrycznego pola magnetycznego wzdłuż szczeliny.

Maksymalna zarejestrowana chwilowa wartość prądu stojana wynosi ok. $1,25 I_N$ (rys. 6a) i w przeciwieństwie do napięcia, nie maleje wraz z trwaniem zwarcia, lecz utrzymuje swoją wartość przekraczającą wartość prądu znamionowego. Podobnie jak w przypadku SEM, tak i w przebiegu prądu można zaobserwować zniekształcony przebieg, znacząco różniący się od sinusoidalnego (rys. 6b).



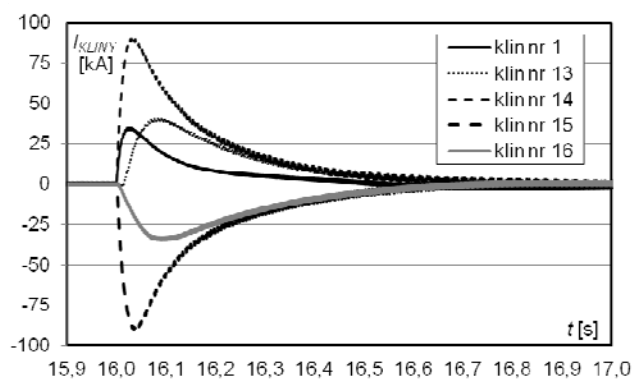
Rys.6. Przebieg prądu stojana

Na rysunkach 7a i 7b przedstawiono przebiegi prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzenia. Rysunek 7a prezentuje prąd płynący przez zwarte zwoje uzwojenia wirnika. Prąd ten maleje do zera, ponieważ przyjęta wartość rezystancji zwarcia jest na tyle mała, że prąd przytływa w całości przez litą stal wirnika. Stała czasowa zanikania prądu zależy od rezystancji zwartych zwojów. Rysunek 7b przedstawia prąd płynący przez zwoje połączone szeregowo z litą stalą wirnika. Szybkość narastania tego prądu w badanym przypadku jest bardzo duża i zależy od liczby zwojów niezwartych i ich rezystancji, od wartości rezystancji zwarcia oraz rezystywności stali z jakiej jest wykonana odkuwka wirnika. Ustalona wartość prądu zależy również od napięcia przyłożonego do zacisków uzwojenia wzbudzenia. Prąd ten jest największym zagrożeniem dla wirnika turbogeneratorsa, ponieważ jego wartość może być kilkadziesiąt razy większa od znamionowego prądu wzbudzenia i może spowodować topienie stali. Szybkość narastania jest na tyle wysoka, że urządzenia zabezpieczające przed podwójnym zwarcie doziemnym powinny reagować natychmiast, aby nie dopuścić do uszkodzenia elementów konstrukcyjnych wirnika.



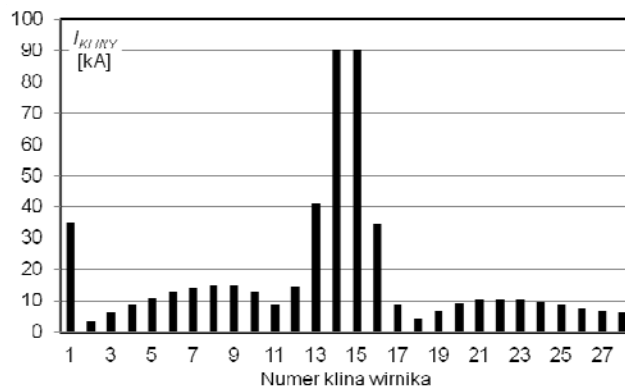
Rys. 7. Przebieg prądu uzwojenia wzbudzenia przez a) zwarte zwoje; b) niezwarne zwoje

Szybki narost prądu płynącego przez litą stal wirnika (rys. 7b) powoduje indukowanie się prądów w przewodzących klinach wirnika (w klatce tłumiącej). Przebiegi prądów w wybranych klinach zostały przedstawione na rysunku 8. Wraz z osiągnięciem stanu ustalonego przez prąd zwarcia, prądy w klinach wirnika zanikają na skutek rozproszenia energii, lecz nie do stanu jak przed zwarcia. Wartości prądów w klinach są większe ponieważ podwójne zwarcie doziemne zniekształciło pole magnetyczne w szczelinie i powstały wyższe harmoniczne, które to przyczyniają się do indukowania prądów w przewodzących częściach wirnika.



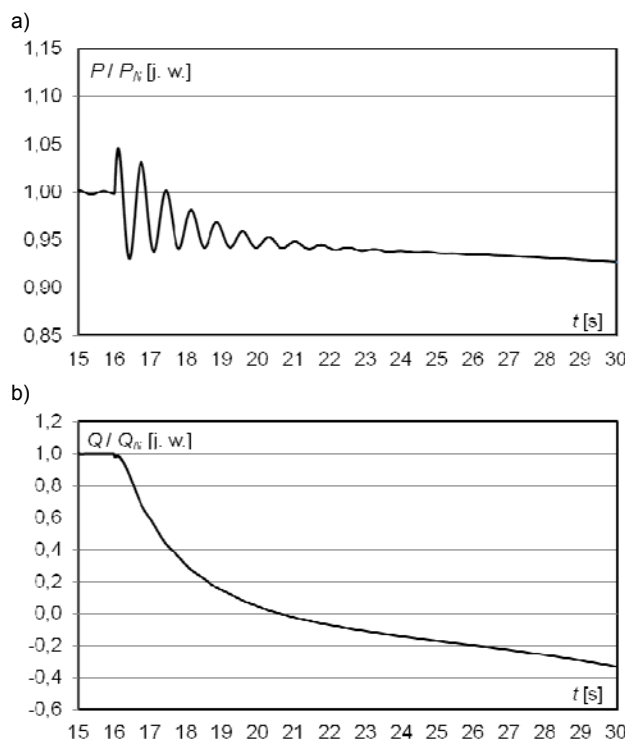
Rys.8. Przebieg prądu w wybranych klinach wirnika

Pełen obraz maksymalnych chwilowych wartości prądów w klinach wirnika pokazano na rysunku 9. Numer klina odpowiada numerowi żłobka wirnika (rys. 1). Najbardziej narażonymi klinami wirnika oprócz klinów numer 1 i 15, pod którymi wystąpiły zwarcia doziemne w uzwojeniu wzbudzenia, narażone są również kliny numer 13, 14 oraz 16, czyli sąsiadujące z klinem numer 15. A zatem najbardziej narażonymi klinami są te, które znajdują się nad miejscem zwarcia doziemnego, w których prąd wzbudzenia wpływa do litej stali wirnika oraz kliny z nimi sąsiadujące. Natomiast w miejscu drugiego zwarcia doziemnego (pod klinem numer 1), w którym prąd wypływa z litej stali do uzwojenia wirnika, znaczny prąd jest tylko w klinie numer 1. Przez sąsiednie kliny nie płyną prądy o znacznych wartościach.



Rys.9. Maksymalne chwilowe wartości prądów w klinach wirnika (numeracja zgodna z rysunkiem 1)

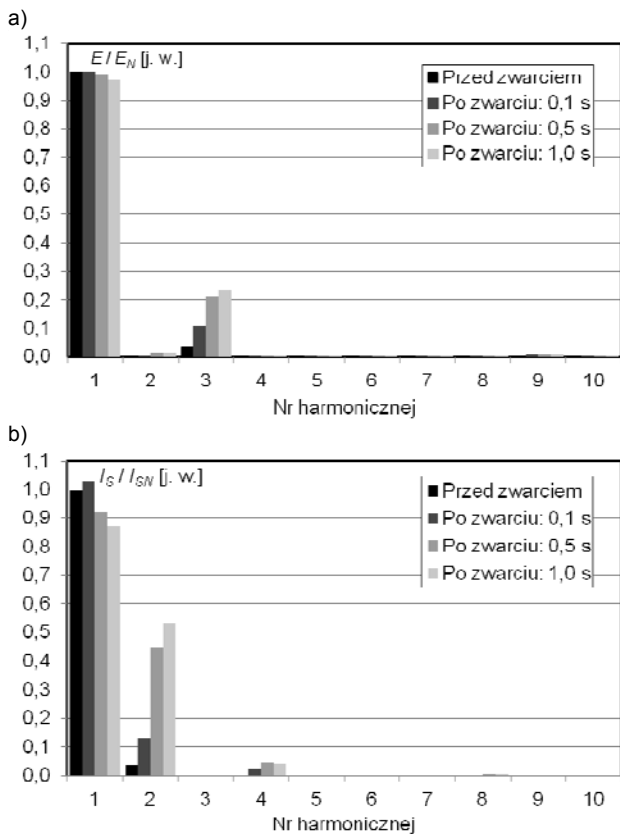
Na rysunku 10a przedstawiono przebieg mocy czynnej. W pierwszej chwili zwarcia można dostrzec oscylacje w generowanej mocy czynnej, a następnie zmniejszanie jej wartości. Rysunek 10b ilustruje przebieg mocy biernej. Na skutek zwarcia znacznej liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia, zmniejsza się przepływ wzbudzenia i już po ok. 4,5 s od podwójnego zwarcia doziemnego, turbogenerator zaczyna pobierać moc bierną z SEE w celu namagnesowania rdzeni stojana i wirnika.



Rys.10. Przebieg a) mocy czynnej; b) mocy biernej

Rysunek 11a przedstawia harmoniczne przebiegu SEM wyznaczone w znamionowych warunkach pracy, jak i po wystąpieniu podwójnego zwarcia doziemnego po upływie 0,1, 0,5 oraz 1 s. Odształcony przebieg indukowanej siły elektromotorycznej w uzwojeniu twornika (rys. 5b) posiada znaczący udział trzeciej harmonicznej (150 Hz), który nie wpływa na pracę turbogeneratorską, gdyż uzwojenie stojana jest połączone w gwiazdę i nie płyną prądy tej harmonicznej, powodując dodatkowe straty mocy. Podobnie przeprowadzono rozkład na wyższe harmoniczne prądu stojana (rys. 11b). Zauważono znaczący wzrost drugiej harmonicznej (100 Hz), która to indukuje w przewodzących częściach wirnika prądy wirowe.

Wraz w upływie czasu trwania zwarcia następuje wzrost harmonicznym zarówno indukowanej siły elektromotorycznej w uzwojeniu twornika, jak i prądu stojana. Wynika to z malejącej wartości prądu wzbudzenia przepływającego przez zwarte zwoje uzwojenia wzbudzenia (rys. 7a), powodując tym samym coraz większe zniekształcenie pola magnetycznego w szczelinie między stojanem a wirnikiem.



Rys.11. Wyższe harmoniczne a) siły elektromotorycznej; b) prądu stojana

Podsumowanie

Podwójne zwarcie doziemne w uzwojeniu wzbudzenia stanowi zagrożenie dla pracy turbogeneratorsa ze względu na prąd zwarciaowy osiągający wartości kilkadziesiąt razy większą od znamionowego prądu wzbudzenia. Tak wielka wartość prądu może wytworzyć znaczne ilości ciepła mogące stopić stal wirnika oraz doprowadzić do nieodwracalnych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych wirnika. Nie odnotowano większych wahań prędkości obrotowej, ani momentu elektromagnetycznego, czyli nie powstają w tym stanie dodatkowe naprężenia w wale turbogeneratorsa.

Zwarcia doziemne w uzwojeniu wzbudzenia zniekształcają pole magnetyczne w szczelinie turbogeneratorsa powodując zniekształcenie przebiegu siły elektromotorycznej i prądu stojana. W przypadku SEM wzrasta trzecia harmoniczna, natomiast w prądzie stojana pojawia się druga harmoniczna (składowa przeciwna). Zniekształcenie pola magnetycznego może spowodować podwyższone drgania łożysk.

Wartość prądów indukowanych w klinach wirnika zależy od miejsca pojawienia się zwarć doziemnych. Najbardziej narażone są kliny znajdujące się w sąsiedztwie zwarć. Szybkość narastania prądów w klinach jest podyktowana szybkością narostu prądu zwarciaowego płynącego przez stal wirnika. Natomiast zanik prądów w klinach jest wynikiem rozpraszania w nich energii.

Autorzy: mgr inż. Adam Gozdowiak, dr inż. Piotr Kisielewski, dr hab. inż. Ludwik Antal, Wrocław Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław.
E-mail: adam.gozdowiak@pwr.edu.pl, piotr.kisielewski@pwr.edu.pl, ludwik.antal@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kiameh P., Electrical Equipment Handbook: Troubleshooting and Maintenance, McGraw-Hill Education, 2003, 383-393
- [2] Belan A., Eleschova Z., Janicek F., The Cause of False Operating of the Rotor Ground Fault Protection Based on the AC Injection method, *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, 2005, 1-7
- [3] Mozina C., Advances In Generator Field Ground Protection Using Digital Technology. *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2004, 87-93
- [4] Eleschova Z., Belan A., Gasparovsky D., Rotor Ground Fault Protection of Generator with Static Excitation System. *Electrical Engineering*, 2005, 138-146
- [5] Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, 2004, Warszawa
- [6] IEEE Std. C37.102, *IEEE Guide for AC Generator Protection*, 2006
- [7] Ewert P., Kowalski C., Wolkiewicz M., Model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego ze zvarciami zwojowymi, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały*, 2013, nr 33, 194-206
- [8] Antal M., Antal L., Zawilak J.: Badania uszkodzeń uzwojenia stojana klatkowego silnika indukcyjnego, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, 2007, nr 76, 83-88
- [9] Kisielewski P., Antal L.: Model polowo-obwodowy turbogeneratorsa. *Zagadnienia Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2006, 61-68
- [10] Gozdowiak A., Kisielewski P.: Wyznaczenie i weryfikacja parametrów turbogeneratorsa z symulacji polowej i polowo-obwodowej, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 2014, nr 34, 295-302