

*turbogenerator, stabilność, system elektroenergetyczny,
samoczynne ponowne załączenie linii,
metoda elementów skończonych*

Adam GOZDOWIAK*, Piotr KISIELEWSKI*

ANALIZA PRZEBIEGU PRACY TURBOGENERATORA PO WYSTĄPIENIU SAMOCZYNNEGO PONOWNEGO ZAŁĄCZENIA LINII

Za pomocą zweryfikowanego pomiarowo modelu połowo-obwodowego turbogeneratorsa zbadano zjawiska powstające podczas pojawienia się różnych zwarć na linii dwutorowej. W artykule przedstawiono symulacyjne wyniki obliczeń pracy turbogeneratorsa przyłączonego do systemu elektroenergetycznego podczas działania automatyki samoczynnego ponownego załączenia linii po wystąpieniu zwarcia na linii przesyłowej.

1. WSTĘP

W elektroenergetycznych liniach napowietrznych najczęściej pojawiające się zwarcia mają charakter przemijający. Tym zwarciom towarzyszy palący się łuk elektryczny między przewodami różnych faz lub między jednym przewodem a uziemioną konstrukcją słupa elektroenergetycznego. Po wyłączeniu linii, łuk elektryczny gaśnie i jeżeli przerwa beznapięciowa będzie trwała odpowiednio dłużej niż czas niezbędny do dejonizacji przestrzeni połukowej, łuk ten nie zapali się ponownie.

Przemijający charakter zwarć w liniach napowietrznych pozwala na zastosowanie automatyki samoczynnego ponownego załączenia linii (SPZ). Automatyka ta umożliwia przeprowadzenie testu trwałości zwarcia, polegającego na podaniu sygnału załączającego po uprzednio wyłączonej linii przez zabezpieczenia. Jeżeli zwarcie posiadało charakter przemijający to po zadziałaniu SPZ linia powraca do normalnej pracy, lecz gdyby zwarcie trwało nadal linia zostaje całkowicie wyłączona. Automatyka SPZ w liniach napowietrznych o napięciu 220 kV posiada jedno łączenie w jednym cyklu w celu sprawdzenia trwałości zwarcia. Automatyka SPZ przyczynia się do zwiększe-

* Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych.

nia niezawodności zasilania odbiorców oraz nie dopuszcza na przekształcenie się zwarć przemijających w trwałe [7, 8].

W pracy przedstawiono zjawiska towarzyszące turbogeneratorowi w przypadku poprawnie działającej automatyki samoczynnego ponownego załączenia linii podczas trwałego zwarcia trójfazowego, dwufazowego oraz jednofazowego z ziemią na linii dwutorowej.

2. MODEL BADANEGO TURBOGENERATORA

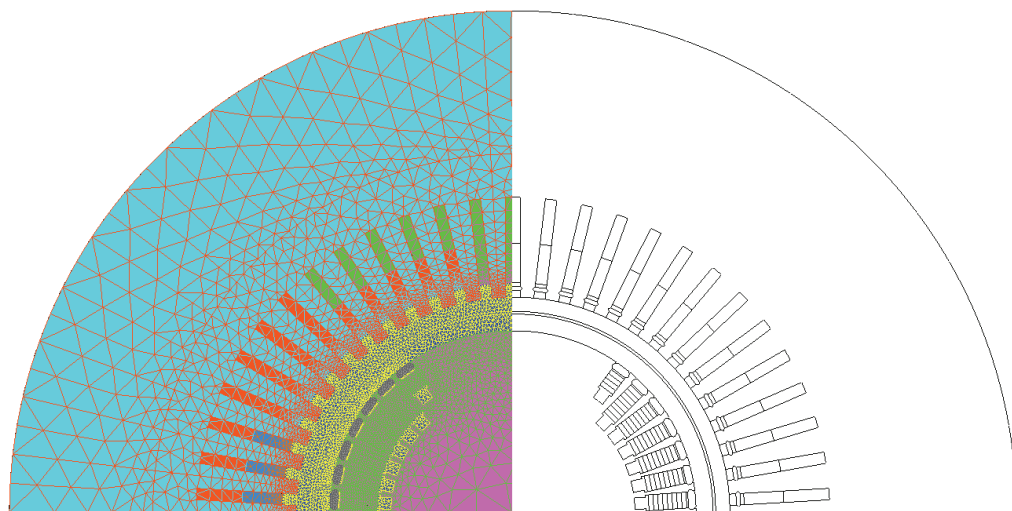
Badaną maszyną był turbogenerator 2-biegunowy, posiadający 54 żłobki na stojanie i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Podstawowe parametry generatora zostały zamieszczone w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe badanego turbogeneratora

Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
Znamionowa moc pozorna	500	MVA
Znamionowe napięcie na zaciskach stojana	21	kV
Znamionowy prąd stojana	13,75	kA
Znamionowy współczynnik mocy	0,80	–
Znamionowy prąd wzbudzenia	4,5	kA
Znamionowa prędkość obrotowa	3000	obr/min
Znamionowy moment obciążenia	1,27	MNm

Opracowany dwuwymiarowy model symulacyjny składa się z części polowej oraz obwodowej. W części polowej uwzględniono rzeczywisty rozkład uzwojeń rozłożonych w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci klinów i litej stali. 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. Pominęto zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach stojana i wirnika oraz prądy wirowe w pakietach blach stojana. Przyjęte wstępne założenia w dokładny sposób odzwierciedlają zjawiska zachodzące w turbogeneratorze w stanach nieustalonych [1–6].

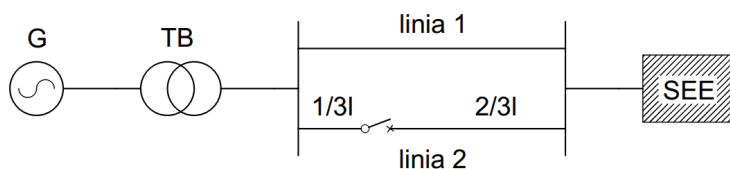
Przekrój poprzeczny modelu polowego przedstawiono na rysunku 1. Model turbogeneratora poddano dyskretyzacji za pomocą trójkątnych elementów skończonych drugiego rzędu, które składają się z 77 000 węzłów. Natomiast model obwodowy, jaki został użyty w czasie symulacji zwarć powstających na linii, został przedstawiony i opisany w pracach [5, 6].



Rys. 1. Model połowy badanego turbogeneratora

3. WYNIKI OBLICZEŃ

W czasie symulacji badano przypadek, w którym turbogenerator był przyłączony do systemu elektroenergetycznego i pracował w znamionowych warunkach pracy. W badaniach uwzględniono transformator blokowy oraz dwutorową linię przesyłową o napięciu 220 kV i długości 100 km. System elektroenergetyczny został zamodelowany jako sieć sztywna. Miejsce zwarcia linii dwutorowej zostało przedstawione na rysunku 2.

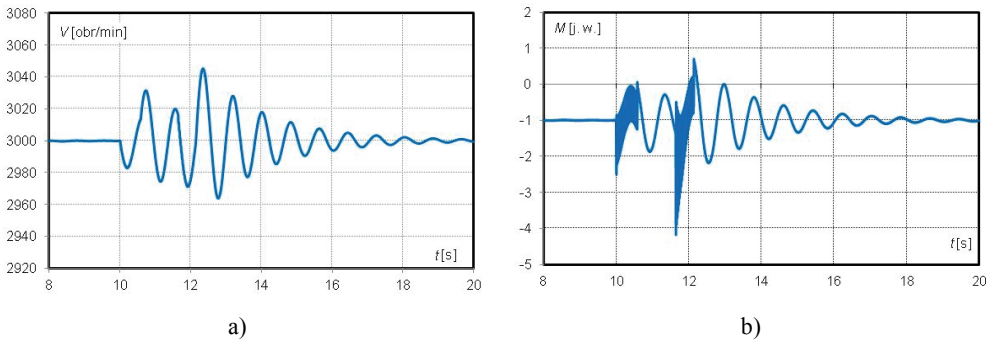


Rys. 2. Miejsce powstawania zwarc na linii dwutorowej

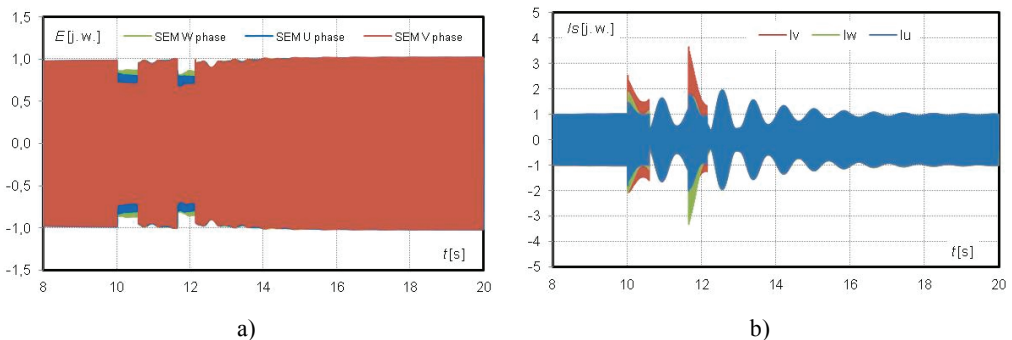
Symulowanie zwarc realizowano za pomocą zwierania odpowiednich faz w jednym z torów linii przesyłowej. Przyjęta w obliczeniach impedancja łuku zwarciovego dla zwarc międzyfazowych wynosiła $0,1 \Omega$, natomiast dla zwarcia jednofazowego z ziemią 5Ω [8]. Założono, że na linii przesyłowej zastosowano wyłączniki pneumatyczne o czasie otwarcia 60ms i zamknięcia 80 ms [8]. Dodatkowo przyjęto SPZ trójfazowy, który załączał 3 fazy jednocześnie.

Automatyka SPZ linii polegała na skokowym załączeniu linii. Analizowane zwarcia rozpoczynały się w 10 sekundzie i trwały przez okres 0,5 s. Czas ten został przyjęty jako niezbędny do wykrycia zwarcia. Po tym czasie linia została wyłączana na 1 s podczas wcześniej wymuszonego zwarcia. Czas 1s jest niezbędny do dejonizacji przestrzeni połukowej dla linii 220 kV w przypadku zwarcia przemijającego [8]. Po okresie wyłączenia linii SPZ załącza linię na zwarcie. W ten sposób zasymulowano stan, w którym zwarcia przemijające przekształciły się w trwałe. W rozpatrywanym przypadku automatyka SPZ wymuszała jednokrotne załączenie linii, a następnie jej całkowite odłączenie.

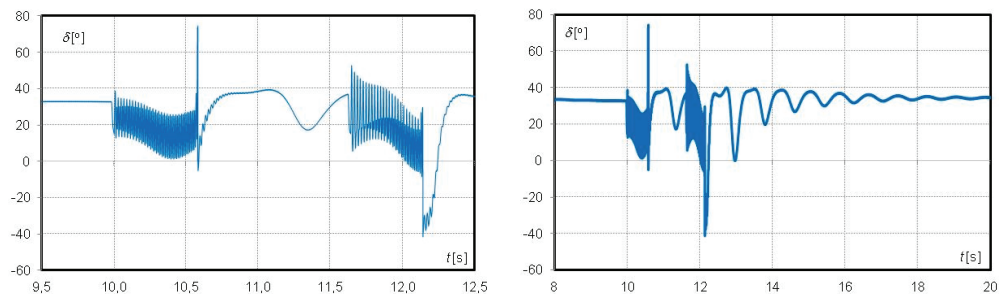
3.1. ZWARCIE TRÓJFAZOWE



Rys. 3. Przebieg a) prędkości obrotowej i b) momentu elektromagnetycznego podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarciu trójfazowym

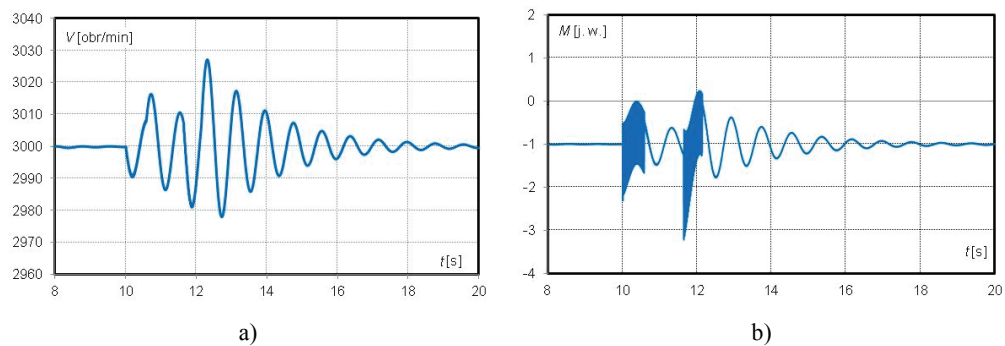


Rys. 4. Przebieg a) siły elektromotorycznej i b) prądów fazowych stojana podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarciu trójfazowym

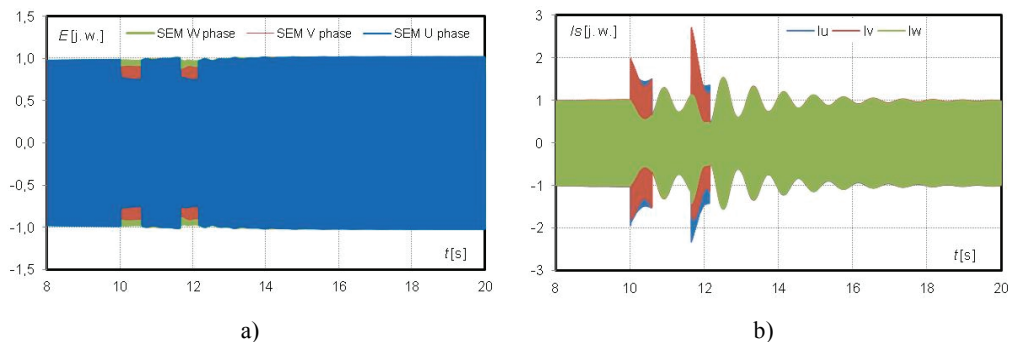


Rys. 5. Przebieg kąta mocy podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarcu trójfazowym

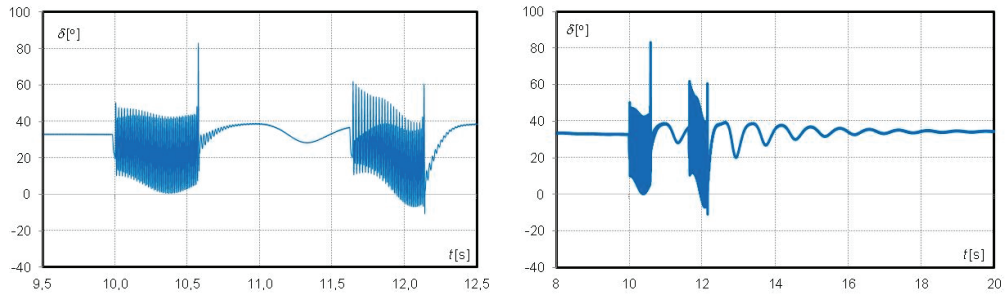
3.2. ZWARCIE DWUFAZOWE



Rys. 6. Przebieg a) prędkości obrotowej i b) momentu elektromagnetycznego podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarcu dwufazowym (U-V)

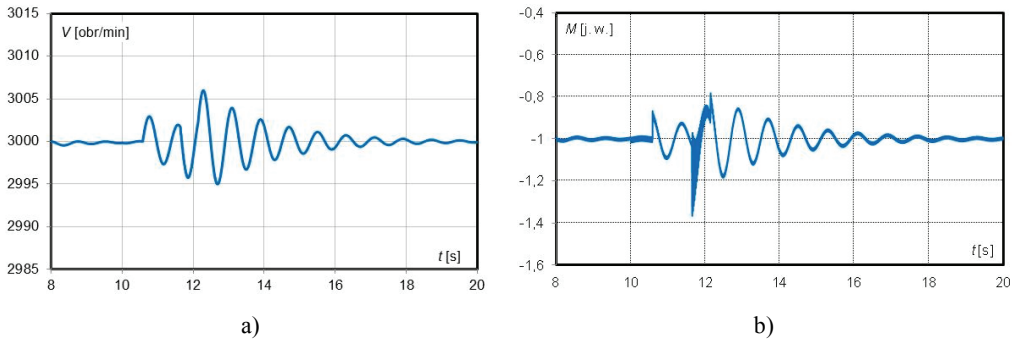


Rys. 7. Przebieg a) siły elektromotorycznej i b) prądów fazowych stojana podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarcu dwufazowym (U-V)

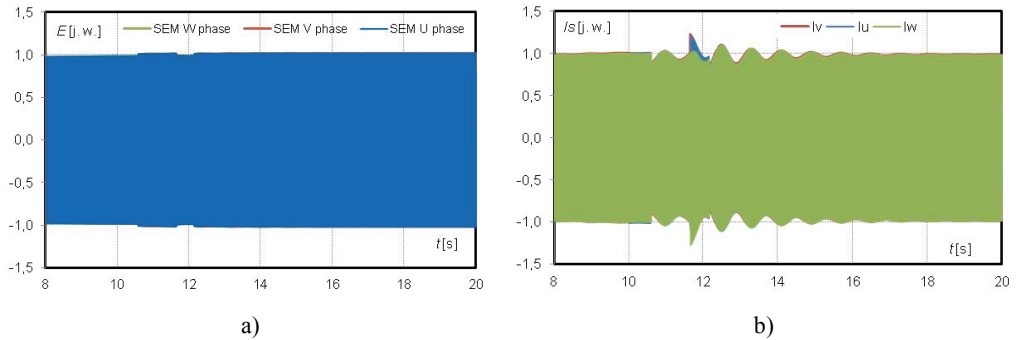


Rys. 8. Przebieg kąta mocy podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarceniu dwufazowym (U-V)

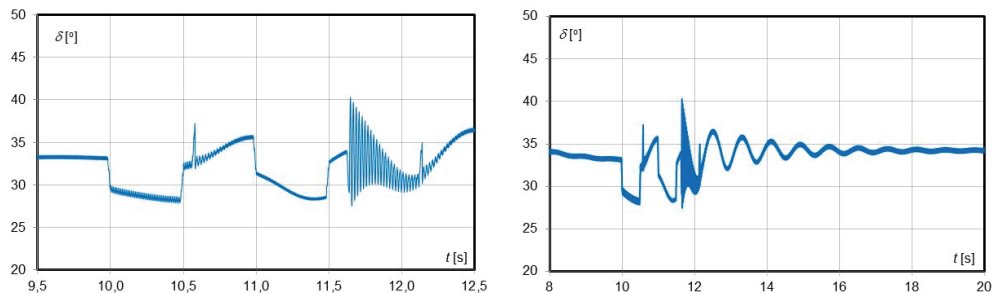
3.3. ZWARCIE JEDNOFAZOWE Z ZIEMIĄ



Rys. 9. Przebieg a) prędkości obrotowej i b) momentu elektromagnetycznego podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarceniu jednofazowym z ziemią (U-ziemia)



Rys. 10. Przebieg a) siły elektromotorycznej i b) prądów fazowych stojana podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarcieniu jednofazowym z ziemią (U-ziemia)



Rys. 11. Przebieg kąta mocy podczas zadziałania automatyki SPZ linii przy zwarciu jednofazowym z ziemią (U-ziemia)

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz dla wybranego miejsca zwarcia, turbogenerator utrzymywał się w synchronizmie, pomimo pojawienia się dużych kołysań prędkości obrotowej dochodzących do 3050 obr/min. Należy spodziewać się, że dla zwarcia trójfazowego powstałego na linii dwutorowej, turbogenerator może wypaść z synchronizmu w przypadku, gdyby miejsce zwarcia powstało bliżej transformatora blokowego. W takim przypadku pojawiłaby się mniejsza impedancja zwarcia, a tym samym znacznie większe prądy fazowe turbogeneratorsa i większy moment elektromagnetyczny. Pojawienie się sygnału z automatyki SPZ na załączenie linii pociągnęłoby za sobą załączenie turbogeneratorsa na znacznie większą impedancję niż w badanym przypadku, a w konsekwencji czego doprowadziłoby do dalszego wzrostu prędkości obrotowej wirnika [5].

Przeprowadzona analiza dla najczęstszych zwarć w liniach napowietrznych (zwarcia jednofazowe z ziemią) obrazuje, że nie są one niebezpieczne dla turbogeneratorsa. Nie zaobserwowano większych wahań siły elektromotorycznej, a pojawiające się prądy w uzwojeniu stojana nie przekraczają $1,2I_n$.

Wystąpienie zwarcia trójfazowego oraz dwufazowego na linii dwutorowej napowietrznej wymusza powstanie znacznych chwilowych wartości prądów stojana $3,8I_n$ dla zwarcia trójfazowego i $2,8I_n$ dla zwarcia dwufazowego. Przy niedokładnie dobranej selektywności zabezpieczenia generatora, może on zostać wyłączony przez zabezpieczenia nadprądowe.

W przypadku zwarcia trójfazowego zaobserwowano znaczne zmniejszenie siły elektromotorycznej dochodzące do $0,7E_n$. Taka niska wartość SEM może wywołać niskie napięcie w linii napowietrznej i doprowadzić do zadziałania zabezpieczenia podnapięciowego.

LITERATURA

- [1] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Model polowo-obwodowy turbogenerators*, Prace Nauk. IMNiPE PWr., Nr 59, SiM, Nr 26, Wrocław 2006, 53–60.
- [2] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Reakcja wirnika turbogenerators na zwarcia zacisków stojana*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 87, 2010.
- [3] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Zjawiska zachodzące w turbogeneratorsze przy udarowym zwarciu symetrycznym*, Prace Nauk. IMNiPE PWr., Nr 59, SiM, Nr 26, Wrocław 2006.
- [4] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Zakłócenia pracy turbogenerators spowodowane zvarciami w systemie elektroenergetycznym*, Prace Nauk. IMNiPE PWr., Nr 60, SiM, Nr 27, Wrocław 2007.
- [5] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Wpływ zmian parametrów linii elektroenergetycznej na stabilność pracy turbogenerators w systemie elektroenergetycznym*, Prace Nauk. IMNiPE PWr., Nr 65, SiM, Nr 31, Wrocław 2011.
- [6] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Zastosowanie modelowania polowo-obwodowego do analizy stanów nieustalonych turbogenerators*, Prace Nauk. IMNiPE PWr., Nr 63, SiM, Nr 29, Wrocław 2009.
- [7] KURNILUK W., WOLIŃSKI K.W., *Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2012, 331–336.
- [8] WINKLER W., WISZNIEWSKI A., *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1999.
- [9] MACHOWSKI J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [10] MACHOWSKI J., BIELAK J., BUMPY J., *Power System Dynamics: Stability and Control*, Wiley Publisher, 2009.

ANALYSIS OF THE TURBOGENERATOR WORK
AFTER APPEARANCE OF AUTOMATIC SWITCHING LINE

The investigations were prepared using a valid field-circuit model of the turbogenerator. The analysis refer to an appearance of the faults in the transmission line. During this study the physical phenomena existing in turbogenerator during the faults were analyzed.