

*turbogenerator, modelowanie polowo-obwodowe,
układ regulacji, turbina parowa*

Adam GOZDOWIAK*, Piotr KISIELEWSKI*

MODELOWANIE UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ TURBOGENERATORA

W artykule przedstawiono nowy sposób modelowania układu regulacji mocy czynnej turbogenera-
toratora. Wykorzystując dwa oddzielne środowiska programowe: FLUX oraz SIMULINK, zbadano
wpływ zmiany momentu napędowego pochodzącego od turbiny parowej na stabilność pracy turbo-
generatora. Zaprezentowane wyniki przedstawiają przebiegi czasowe wybranych wielkości elektro-
mechanicznych reprezentujących pracę turbogenera-
toratora w stanach dynamicznych.

1. WSTĘP

W systemie elektroenergetycznym głównym źródłem mocy jest generator syn-
chroniczny napędzany przez turbinę parową bądź gazową. Ciągła zmiana pobierania
energii elektrycznej przez odbiory lub odbiorców, wymusza ciągłą regulację w celu
dostosowania parametrów pracy do aktualnego zapotrzebowania.

Obecnie znane i opisywane metody obliczeniowe służące do badania stabilności
systemu elektroenergetycznego opierają się głównie na modelowaniu obwodowym
maszyny, poprzez opisanie właściwości generatora synchronicznego w osiach d i q
[6], [7]. W wielu tych metodach pomija się nieliniowość charakterystyki magnesowa-
nia bądź próbuje się ją z pewną dokładnością przybliżyć. W wielu metodach obwo-
dowych nie uwzględnia się prądów wirowych i pomniejsza lub zwiększa wpływ klatki
tłumiącej na tłumienie kołysań wirnika. Dlatego można sądzić, że nie odzwierciedlają
one w dość dokładny sposób zjawisk występujących w generatorze synchronicznym.

Metoda polowo-obwodowa jest odpowiednim narzędziem do badania stabilności
pracy w systemie elektroenergetycznym, gdyż z bardzo dobrą dokładnością potrafi
odzworować zjawiska występujące w turbogeneratorze na skutek różnych zakłóceń.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wrocław,
ul. Smoluchowskiego 19, adam.gozdowiak@pwr.wroc.pl, piotr.kisielewski@pwr.wroc.pl.

W tej metodzie w każdym kroku symulacyjnym są rozwiązywane równania strumieniowo-napięciowe oraz równania ruchu wirnika. W obliczeniach uwzględnione są rzeczywiste parametry konstrukcyjne i charakterystyki magnesowania. Uwzględnienie litych klinów żłobków wirnika przyczynia się do odwzorowania rzeczywistych parametrów klatki tłumiącej i zaobserwowania jej realnego wpływu na tłumienie kołysań.

2. OPIS WYKORZYSTYWANYCH MODELI W PROCESIE SYMULACJI

Model turbogenerators użytego w procesie symulacji opisano szczegółowo w [3]. Został on zbudowany w programie FLUX 9.2.2 przeznaczonym do symulacji zjawisk elektromagnetycznych oraz termodynamicznych. Program ten jest powszechnie wykorzystywany do projektowania, analizowania oraz optymalizacji maszyn elektrycznych [1].

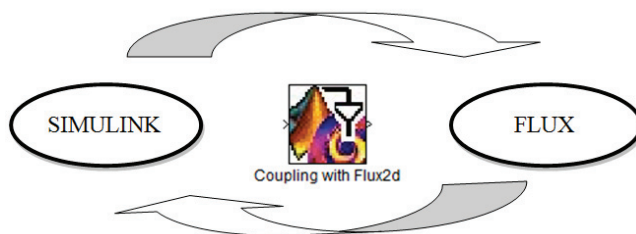
Rozpatrywany model maszyny został zweryfikowany poprzez porównanie zmierzonych charakterystyk statycznych (biegu jałowego, zwarcia, krzywych V) z charakterystykami wyznaczonymi przy użyciu metody połowo-obwodowej. Wykonano obliczenia zwarcia maszyny i na ich podstawie wyznaczono reaktancje i stałe czasowe. Wartości te zostały porównane z danymi pomiarowymi. Na podstawie tej weryfikacji stwierdzono, że opracowany model turbogenerators pozwala poprawnie odwzorować zjawiska zachodzące w maszynie w stanach ustalonych i przejściowych [4]. Dane znamionowe badanej maszyny zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe turbogenerators

Nazwa parametru	Jednostka	Wartość
Moc pozorna	MVA	500
Napięcie stojana	kV	21
Prąd stojana	kA	13,7
Prąd wzbudzenia	kA	4,5
Prędkość obrotowa	obr/min	3000
Moment obrotowy	MNm	1,27
Współczynnik mocy	–	0,80

Model turbogenerators jest modelem dwuwymiarowym zbudowanym z dwóch części: połowej oraz obwodowej. W części połowej uwzględniono rzeczywiste właściwości materiałowe (nieliniową charakterystykę magnesowania blach elektrotechnicznych), rozkład uzwojeń. W modelu uwzględniono lite elementy klatki tłumiącej w postaci klinów żłobków uzwojenia wzbudzenia. Natomiast część obwodowa zawiera elementy skupione odpowiadające uzwojeniom i obwodom istniejącym w części połowej. Reaktancje i rezystancje połączeń czołowych zostały uwzględnione w części obwodowej. Sposób ich obliczeń został zaprezentowany w [3].

W niniejszej pracy wykorzystano możliwość sprzężenia pakietu oprogramowania FLUX ze środowiskiem programowym MATLAB-SIMULINK pozwalającym na budowanie modeli symulacyjnych przy użyciu praktycznego interfejsu graficznego oraz umożliwiającym symulację w czasie ciągłym lub dyskretnym. Obszerna baza bibliotek zapewnia symulację zróżnicowanych modeli oraz umożliwia zamodelowanie układów regulacji. Sprzężenie pomiędzy pakietami oprogramowania jest możliwe dzięki bibliotece „Coupling with Flux2d” przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Biblioteka „Coupling with Flux2d”

O możliwościach wykorzystania powyższych programów w celach regulacyjnych wspomniano już wcześniej w [5]. Wielkości fizyczne jakie mogą być wprowadzane i odczytywane w każdym kroku czasowym symulacji podano w tab. 2. Dodatkowo symulacyjny krok czasowy może zostać użyty jako zmienna wejściowa i być zmieniany w dowolnej chwili w procesie symulacyjnym.

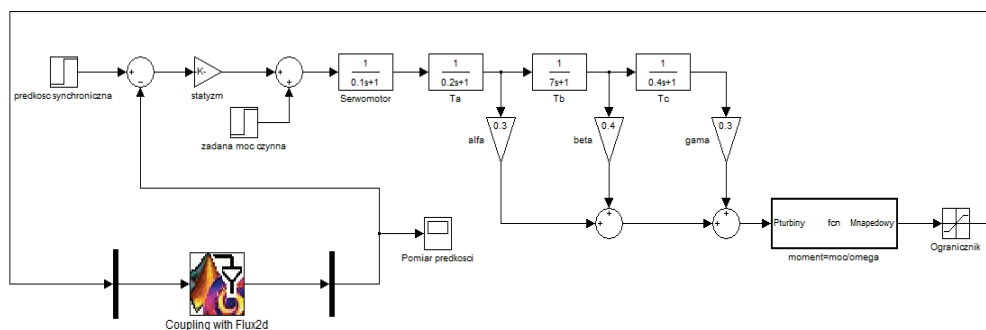
Tabela 2. Wielkości elektryczne i mechaniczne mogące zostać użyte w procesie symulacji maszyn elektrycznych

Wielkość elektryczna	Wielkość mechaniczna
Prąd	Prędkość obrotowa
Napięcie	Moment obrotowy
Rezystancja	Moment bezwładności
Indukcyjność	Położenie wirnika

Model regulacji mocy czynnej turbogeneratorsa został zbudowany w środowisku SIMULINK. W badanym przypadku generowana moc czynna jest dostarczana przez turbinę parową z pojedynczym przegrzewaczem pary, która jest regulowana za pomocą urządzeń elektrohydraulicznych. W rozważaniach pominięto stałe czasowe urządzeń elektronicznych, gdyż ich czas reakcji jest bardzo krótki i nie wprowadzają one znaczących opóźnień. Wykorzystywane w budowie tego modelu stałe czasowe odzwierciedlające rzeczywiste elementy regulacyjne [2], przedstawiono w tab. 3. Natomiast stworzony na potrzeby symulacji model regulacji mocy czynnej turbogeneratorsa jest widoczny na rys. 2.

Tabela 3. Wartości stałych czasowych wykorzystanych w procesie symulacji

Opis	Zmienna	Wartość
Statyzm	ρ	0,05 s
Stała czasowa hydraulicznego serwomotoru	T_{SM}	0,1 s
Stała czasowa reprezentująca zwłokę czasową wynikającą ze zmiany położenia zaworu i przejścia pary przez część wysokoprężną turbiny	T_A	0,2 s
Stała czasowa wynikająca z przegraniem pary i przejściem jej przez część średnioprężną turbiny	T_B	7,0 s
Stała czasowa będąca rezultatem przejścia pary przez zwrotnicę rurową i rozprężenia się w części niskoprężnej	T_C	0,4 s
Stosunek mocy mechanicznej powstałej w części wysokoprężnej do całkowitej mocy turbiny	α	0,3
Stosunek mocy mechanicznej powstałej w części średnioprężnej do całkowitej mocy turbiny	β	0,4
Stosunek mocy mechanicznej powstałej w części niskoprężnej do całkowitej mocy turbiny	γ	0,3

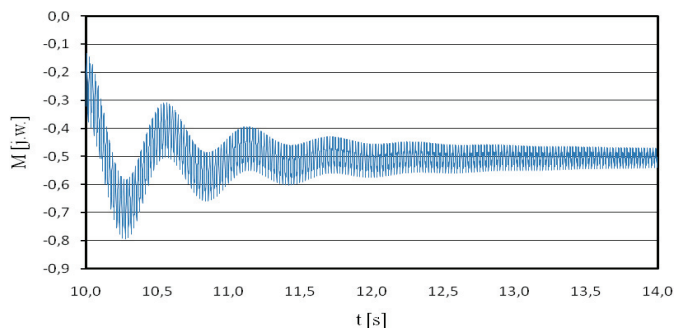


Rys. 2. Model regulacji mocy czynnej turbogenerators

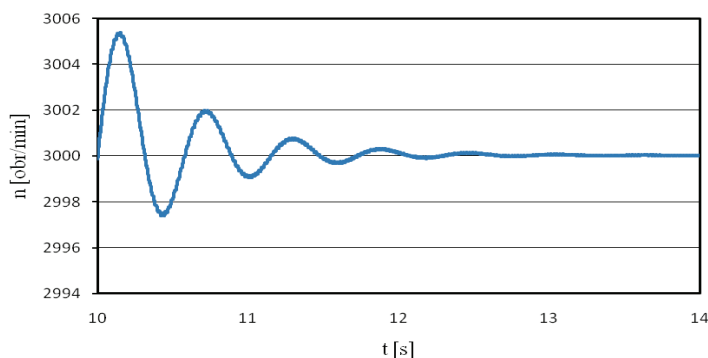
3. WYNIKI

Turbogenerator jest sprzęgnięty z turbiną parową oraz jest podłączony do systemu elektroenergetycznego. W obliczeniach uwzględniono rzeczywisty moment bezwładności turbosespołu. Stosunek momentu bezwładności turbiny do momentu bezwładności turbogenerators wyniósł 5:1. Założono, że system elektroenergetyczny posiada stałe parametry takie jak częstotliwość i napięcie. Turbogenerator w pierwszej fazie symulacji pracował z obciążeniem wynoszącym $0,25 M_n$. W 10 sekundzie pracy wprowadzono sygnał regulacyjny zwiększający moment napędowy do $0,50 M_n$.

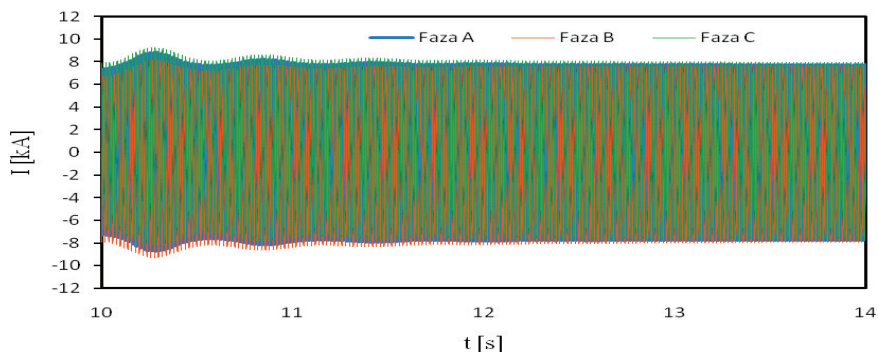
W celach porównawczych przedstawiono wyniki z dwóch symulacji przy skokowym wymuszeniu momentu napędowego (rys. 3–5) oraz przy uwzględnieniu układu regulacyjnego (rys. 6–8).



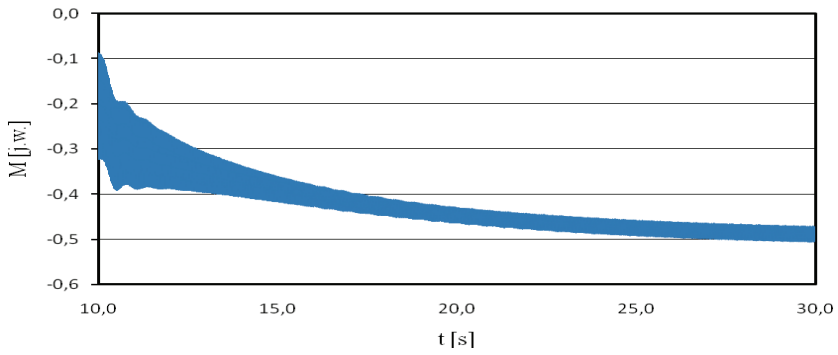
Rys. 3. Przebieg momentu elektromagnetycznego po skokowym wymuszeniu momentu napędowego



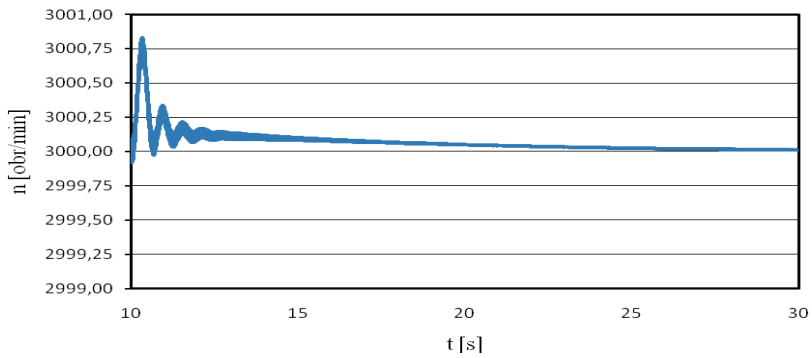
Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej po skokowym wymuszeniu momentu napędowego



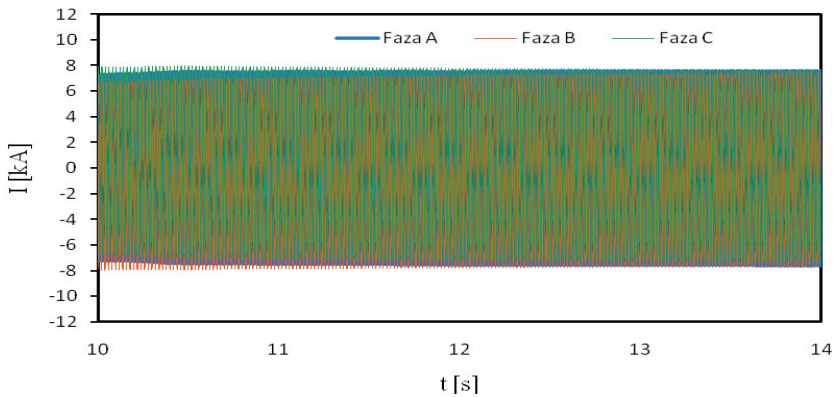
Rys. 5. Przebieg prądów stojana po skokowym wymuszeniu momentu napędowego



Rys. 6. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas zmiany momentu napędowego przy załączonym układzie regulacyjnym



Rys. 7. Przebieg prędkości obrotowej podczas zmiany momentu napędowego przy załączonym układzie regulacyjnym



Rys. 8. Przebieg prądów stojana podczas zmiany momentu napędowego przy załączonym układzie regulacyjnym

3. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki były możliwe do osiągnięcia poprzez zastosowanie dwóch środowisk programowych. Wykorzystanie połowo-obwodowego modelu turbogeneratora wraz z układem regulacji pozwoliło na wyznaczenie charakterystyk elektrycznych i mechanicznych.

Duża bezwładność turbozespołu uniemożliwiła przy zmieniającym się momencie napędowym pochodzącym od turbiny, na gwałtowne zmiany prędkości obrotowej oraz wartości prądów stojana.

Przedstawiona metoda prowadzenia symulacji pracy turbozespołu jest punktem wyjścia do dalszych badań w których model obliczeniowy zostanie rozbudowany o dodatkowe elementy. Aby móc kontrolować generowaną mocą czynną, bierną oraz napięcie na zaciskach turbogeneratora, niezbędne jest zbudowanie dodatkowego układu regulacyjnego – regulatora prądu wzbudzenia.

LITERATURA

- [1] CEDRAT, *FLUX® 9.20, User's guide*, November 2005.
- [2] IEEE COMMITTEE REPORT, *Dynamic models for steam and hydroturbines in power system studies*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-87 (6), 1973b, 1460–1464.
- [3] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Polowo-obwodowy model turbogeneratora*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, 2006, nr 59, 53–60.
- [4] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Weryfikacja pomiarowa obliczonych charakterystyk statycznych turbogeneratora*, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. PEMINE Rytro, BOBRME Komel 2007, 167–170.
- [5] KISIELEWSKI P., GOZDOWIAK A., *Modeling of the turbogenerator regulation systems*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2013, nr 98, 69–72.
- [6] KUNDUR P., *Power system stability and control*, McGraw-Hill, New York 1994.
- [7] MACHOWSKI J., BIALEK J. W., BUMBY J. R., *Power system Dynamics, Stability and control*, John Wiley & Sons, Wiltshire 2008.

MODELING OF THE TURBOGENERATOR ACTIVE POWER CONTROL SYSTEM

Presented article shows the results of transient states forced by shaft torque changes. A new method of turbogenerator governing system utilizing the field-circuit model coupled with regulation system was shown. In this case it is possible to simulate the real phenomenon existing in the large synchronous generator during input data changes.