

Wpływ wartości parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych na wybrane przebiegi nieustalone w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

Streszczenie. W artykule opisano pomiarowe metody estymacji parametrów modeli matematycznych elementów składowych zespołów wytwórczych pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Przy estymacji parametrów poszczególnych modeli analizowano m.in. odpowiedzi układów przy zrzutach mocy i zmianach napięcia zadanego (skokowych i pseudolosowych) w układzie regulacji napięcia generatora. Ponadto na podstawie badań symulacyjnych przedstawiono wpływ wartości parametrów modeli matematycznych (często przyjmowanych arbitralnie) na przebiegi nieustalone napięć i mocy chwilowych zespołów wytwórczych, występujące w stanach normalnych i awaryjnych KSE.

Abstract. In the paper there are described measurement methods for parameter estimation of the mathematical models of component elements of generating units operating in the Polish Power System (PPS). When estimating the parameters of particular models, there were analysed, among others, the responses of the systems at load rejection and changes (step and random) of the reference voltage in the generator voltage regulation system. Moreover, based on simulation investigations, there is presented the influence of the mathematical model parameters (often assumed arbitrarily) on transient waveforms of different quantities, among others currents and voltages of the generating units, occurring under normal and emergency conditions of the PPS operation. (The influence of the values of generating unit mathematical model parameters on selected transient waveforms in the Polish Power System)

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, zespół wytwórczy, estymacja parametrów, wpływ wartości parametrów na przebiegi nieustalone.

Keywords: power system, generating unit, parameter estimation, the influence of the values of generating unit on transient waveforms.

doi:10.12915/pe.2014.03.20

Wstęp

W badaniach symulacyjnych stanów dynamicznych Krajowego Systemu Elektroenergetycznego najczęściej wykorzystywana jest baza parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych, których wartości określone są na podstawie danych katalogowych i projektowych dostarczanych przez producentów elementów składowych zespołów (często z pominięciem wpływu eksploatacji i modernizacji na wartości parametrów). Parametry te są szacowane na podstawie typowych danych publikowanych w opracowaniach naukowo-technicznych, lub przyjmowane są a priori spośród tak zwanych parametrów standardowych, często zapisanych jako dane startowe programów symulacyjnych. Określone w powyższy sposób wartości parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych są przybliżone, obciążone w wielu przypadkach dużym błędem i nie odpowiadają aktualnym wartościom parametrów eksploatowanych zespołów. W konsekwencji wnioski formułowane na podstawie wyników badań mogą być mylne, a w skrajnym przypadku przeciwne do wniosków, jakie mogłyby być wyciągnięte z badań prowadzonych w oparciu o wiarygodne dane.

W artykule przedstawiono pomiarowe metody estymacji parametrów modeli matematycznych elementów składowych zespołów wytwórczych (generatorów synchronicznych, układów wzbudzenia z regulatorami napięcia oraz turbin parowych wraz z układami regulacji prędkości) pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Ponadto na podstawie badań symulacyjnych przedstawiono wpływ wartości parametrów modeli matematycznych (często przyjmowanych arbitralnie) na przebiegi nieustalone napięć i mocy chwilowych zespołów wytwórczych, występujące w stanach normalnych i awaryjnych KSE.

Metody estymacji parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych

Parametry modeli matematycznych poszczególnych elementów zespołów wytwórczych (generatorów, układów wzbudzenia wraz z układami regulacji napięcia i turbin lub

silników napędowych) można wyznaczyć na podstawie analizy przebiegów dynamicznych wywołanych odpowiednio dobranymi zakłóceniami (testami pomiarowymi) stanu ustalonego zespołu. Testy pomiarowe mogą być zaprojektowane w taki sposób, aby były bezpieczne i możliwe do wykonania dla pracującego układu. Przykładem takich testów są zakłócenia wprowadzone w układzie wzbudzenia generatora synchronicznego, takie jak skokowa zmiana lub sygnał pseudolosowy PRBS (z ang. Pseudo Binary Random Sequence) napięcia zadanego regulatora napięcia lub zrzut mocy generatora, pracującego w określonych warunkach [2, 12]. Odpowiedni wybór testu i sygnałów pomiarowych umożliwia wyodrębnienie badanego elementu zespołu wytwórczego poprzez zredukowanie lub wyeliminowanie wpływu pozostałych elementów zespołu i tym samym uproszczenie procesu estymacji jego parametrów.

Przebiegi zmierzone w czasie testu (np. prądy, napięcia, położenia wału generatora i prędkość obrotowa), będące podstawą estymacji parametrów, muszą być poddane numerycznej obróbce, której celem jest wstępne przetworzenie i filtracja zakłóceń [2, 9, 12]. Natomiast metodyka wyznaczania parametrów może polegać na aproksymacji przebiegów pomiarowych przez funkcje wyrażone przez poszukiwane parametry poszczególnych modeli elementów zespołu wytwórczego, również z uwzględnieniem nieliniowości modeli (np. charakterystyki magnesowania). W konsekwencji, estymacja parametrów poszczególnych modeli dynamicznych elementów zespołu wytwórczego może być przeprowadzona metodą najmniejszych kwadratów. W procesie aproksymacji parametry te dobierane są w taki sposób, aby zminimalizować błąd średniokwadratowy, definiowany dla odchyłek (określonych w zarejestrowanych, i -tych chwilach czasowych) między przebiegami zmierzonymi i przebiegami obliczonymi na podstawie modeli matematycznych [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]:

$$(1) \quad \varepsilon_w(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n (W_{i(m)} - W_{i(s)}(\mathbf{P}))^2,$$

gdzie: indeksem m oznaczono zmierzony przebieg wielkości W , a indeksem s oznaczono symulowany przebieg wielkości W , obliczony dla wektora poszukiwanych parametrów \mathbf{P} . W przypadku uwzględnienia kilku przebiegów wielkości, błąd średniokwadratowy jest sumą błędów zdefiniowanych dla poszczególnych przebiegów, z uwzględnieniem odpowiednio dobranych współczynników wagowych w_k :

$$(2) \quad \varepsilon(\mathbf{P}) = \sum_k w_k \varepsilon_{wk}(\mathbf{P}).$$

W niniejszym artykule przykładowo przedstawiono proces estymacji parametrów turbozespołu pracującego w elektrociepłowni. Do podstawowych składowych tego zespołu wytwórczego, których parametry modeli matematycznych można estymować zalicza się generator synchroniczny, układ wzbudzenia oraz turbinę i jej układ regulacji.

Podstawą estymacji parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego mogą być wyniki pomiarów wybranych wielkości w stanach ustalonych oraz niestabilnych, spowodowanych następującymi zakłóceniami (testami):

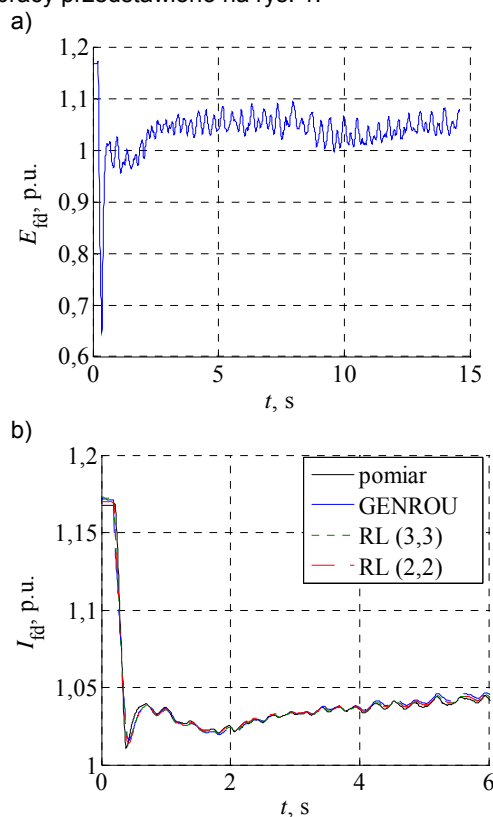
- otwarciem wyłącznika głównego łączącego zespół wytwórczy z systemem elektroenergetycznym, powodującym zrzut mocy generatora,
- skokową zmianą napięcia zadanego regulatora napięcia generatora synchronicznego pracującego na biegu jałowym,
- wprowadzeniem zakłócenia w postaci sygnału pseudolosowego PRBS w postaci dodatkowej składowej napięcia zadanego regulatora napięcia generatora pracującego na biegu jałowym,
- skokową zmianą napięcia zadanego regulatora napięcia generatora synchronicznego pracującego w zespole wytwórczym współpracującym z SEE,
- wprowadzeniem zakłócenia w postaci sygnału pseudolosowego PRBS w postaci dodatkowej składowej napięcia zadanego regulatora napięcia generatora pracującego w zespole wytwórczym współpracującym z SEE.

Podstawową zaletą trzech pierwszych z wymienionych powyżej zakłóceń jest wyeliminowanie wpływu na badany zespół wytwórczy zewnętrznego SEE.

W związku z powyższym procedura związana z przeprowadzeniem testów zespołu wytwórczego może wyglądać następująco:

- Pomiar rezystancji na postoju generatora.
- Uruchomienie generatora na biegu jałowym.
- Zdjęcie charakterystyki biegu jałowego dla napięcia twornika zmieniającego się w granicach od 0 do 1,2 napięcia znamionowego.
- Pomiar na biegu jałowym przy zakłóceniu pracy ustalonej skokowymi zmianami napięcia zadanego np. o wartości $\pm 5\%$ lub sygnałem PRBS.
- Synchronizacja z systemem.
- Zrzut mocy biernej - wyłączenie bloku z systemu z zadanymi wartościami mocy wynikającym ze specyfiki zespołu, w tym z wymogami technologicznymi: moc bierna na poziomie od 0,4 do 0,7 mocy znamionowej oraz moc czynna na poziomie minimum technologicznego. Po zrzucie mocy nie może nastąpić wyłączenie turbiny i układu wzbudzenia.
- Synchronizacja z systemem.
- Pomiar stanów przejściowych przy obciążeniu mocą czynną i bierną przy zakłóceniu pracy ustalonej skokowymi zmianami napięcia zadanego np. o wartości $\pm 5\%$ lub sygnałem PRBS.

- Zrzut mocy czynnej - wyłączenie bloku z systemu z zadanymi wartościami mocy: moc czynna na poziomie od 0,2 do 0,4 mocy znamionowej, moc bierna indukcyjna lub pojemnościowa od 0,1 do 0,3 mocy znamionowej. Po zrzucie mocy nie może nastąpić wyłączenie turbiny i układu wzbudzenia. Przykładowe przebiegi w tym stanie pracy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Pomiarowy (po filtracji) przebieg napięcia wzbudzenia generatora (sygnał wejściowy estymacji) – (a) oraz przebiegi pomiarowe i aproksymujące prądu wzbudzenia (b) przy arbitralnym zrzucie mocy w Elektrociepłowni Halemba

Warto nadmienić, że przedstawione wyżej pomiary przeprowadzane są z niewielką interwencją w układy pomiarowe zespołu wytwórczego, gdyż mogą być dokonywane w obwodach wtórnych przekładników za pomocą odpowiednich przetworników pomiarowych. Do rejestracji wielkości wykorzystywany może być separowany rejestrator zakłóceń elektroenergetycznych mierzący następujące wielkości:

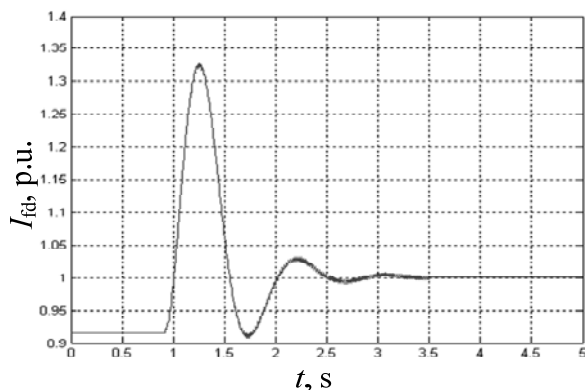
- Napięcie twornika – pomiar bezpośredni w obwodach za przekładnikami napięciowymi.
- Prąd twornika – pomiar w obwodach za przekładnikami prądowymi przez przetwornik cęgowy.
- Napięcie wzbudzenia – pomiar bezpośredni przez separowany przetwornik napięcie/napięcie.
- Prąd wzbudzenia – pomiar bezpośredni przez przetwornik cęgowy lub pośrednio w obwodach za bocznikiem pomiarowym przez separowany przetwornik napięcie/napięcie lub prąd/napięcie.
- Położenie wału generatora – pomiar przez enkoder zamocowany na wale generatora, czujnik magnetyczny lub czujnik optyczny.

Metodyka estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia i turbin jest zbliżona do metodyki wyznaczania parametrów modeli generatorów. W procesie estymacji układów wzbudzenia uwzględnia się sygnały wyjściowe generatora (np. sygnały: napięcia stojana, prądu wzbudzenia generatora) jako wielkości wyjściowe układu wzbudzenia. Podstawowym przebiegiem

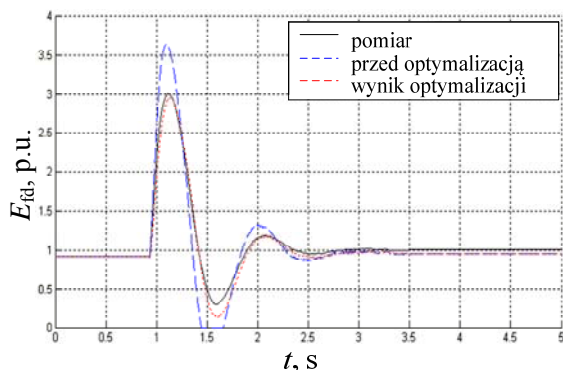
wykorzystywanym podczas estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia jest napięcie wzbudzenia generatora (sygnał wyjściowy układu wzbudzenia) [12]. Dostępność większej liczby wewnętrznych sygnałów pomiarowych (np. napięcia wyjściowego regulatora napięcia, prądu wzbudzenia, napięcia wzbudzenia i napięcia wyjściowego wzbudnicy, w przypadku wzbudzenia elektromaszynowego) i wykorzystanie ich podczas obliczeń znacznie ułatwia proces estymacji parametrów. W tym przypadku można bowiem podzielić układ wzbudzenia na podzespoły (np. regulator napięcia, wzbudnica, układ formowania napięcia wzbudzenia, które mają swoje sygnały wejściowe i wyjściowe) i obliczenia parametrów podzielić na oddzielne etapy. W każdym etapie można, biorąc pod uwagę sygnały wejściowe, wyjściowe oraz strukturę poszczególnego podzespołu, obliczać jego parametry.

Typowym zakłóceniem, które jest brane pod uwagę przy estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia i turbin jest zrzut mocy generatora. W obliczeniach parametrów układu wzbudzenia najlepiej przyjmując taki stan pracy, w którym początkowa moc czynna generatora jest równa zero, wówczas na przebiegi dynamiczne nie wpływa turbina i jej układ regulacji. Dodatkowo można uwzględnić również inne zakłócenia, najlepiej w postaci odpowiednio dobranej skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia przy otwartym wyłączniku głównym (praca generatora na biegu jałowym). Przykładowe przebiegi dynamiczne wykorzystane w estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia przedstawiono na rys. 2.

a)



b)



Rys. 2. Pomiarowe przebiegi: prądu wzbudzenia generatora (a) – sygnały wejściowe estymacji oraz przebieg napięcia wzbudzenia generatora – pomiarowy i aproksymowany – (b) przy skokowej zmianie o +5% napięcia zadanego regulatora napięcia

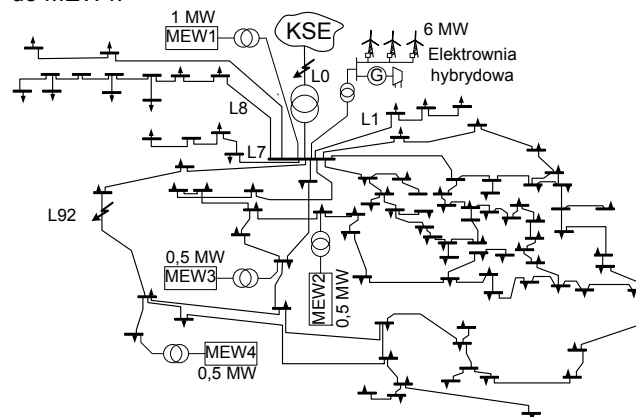
Estymacja parametrów modelu turbiny i jej układu regulacji przebiega w procesie iteracyjnym w taki sposób, aby obliczone na podstawie tych parametrów przebiegi dynamiczne aproksymowały przebiegi zmierzone z

określoną dokładnością [12]. Z punktu widzenia turbiny i jej układu regulacji najważniejsze są sygnały prędkości kątowej generatora i mocy mechanicznej turbiny. Zastosowanie jednak innych mierzalnych sygnałów wewnętrznych układu regulacji turbiny ułatwia proces estymacji parametrów i zwiększa jego skuteczność. Aby na przebiegi dynamiczne przy zrzucie mocy wpływała turbina i jej układ regulacji, początkowa moc czynna generatora musi być różna od zera.

Wyżej przedstawiony proces estymacji parametrów modeli matematycznych elementów zespołu wytwórczego może być przeprowadzony z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania. Takim oprogramowaniem działającym w środowisku Matlab / Simulink jest PARZW opracowany w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Program ten pozwala na wykonanie krok po kroku wszystkich czynności niezbędnych do obliczenia parametrów modeli matematycznych elementów zespołów wytwórczych (w tym modeli generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia) na podstawie przebiegów dynamicznych zmierzonych w elektrowni [2, 3].

Stany przejściowe sieci wydzielonej

Dla zobrazowania wpływu parametrów modeli matematycznych na wyniki badań symulacyjnych, a w konsekwencji na wytyczne konstrukcyjno-eksploatacyjne, formułowane na podstawie wyników badań, przeprowadzono przykładową analizę możliwości pracy autonomicznej fragmentu sieci średniego napięcia z zainstalowanymi źródłami rozproszonymi. Przedstawione w artykule przykładowe badania dotyczą sieci dystrybucyjnej o napięciu 15 kV, stanowiącej fragment Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Analizę przeprowadzono dla sieci składającej się ze 191 linii o długości około 60 km oraz 181 węzłów, w tym 85 węzłów odbiorczych ze stacjami transformatorowymi SN/nn i 5 węzłami wytwórczymi [11]. Strukturę analizowanego systemu przedstawiono na rys. 3. Na schemacie sieci zaznaczono miejsca przyłączenia źródeł rozproszonych i ich moce znamionowe. Przyjęto, że w analizowanej sieci zainstalowana jest jedna wiatrowo-gazowa elektrownia hybrydowa, w której skład wchodzi trzy siłownie wiatrowe o mocy jednostkowej 1 MW oraz jeden turbospół zasilany biogazem o mocy 3 MW. Ponadto do sieci przyłączone są cztery małe elektrownie wodne, oznaczone na schemacie odpowiednio od MEW1 do MEW4.



Rys. 3. Struktura analizowanej sieci średniego napięcia

W obliczeniach przyjęto, że do rozpatrywanej sieci z KSE dostarczane jest około 25% zapotrzebowanej mocy czynnej. Pozostałe 75% mocy pokrywają źródła rozproszone zainstalowane w sieci SN. W związku z takim podziałem mocy, nie ma możliwości zbilansowania sieci dla pracy autonomicznej. Przyjęto zatem, że w momencie

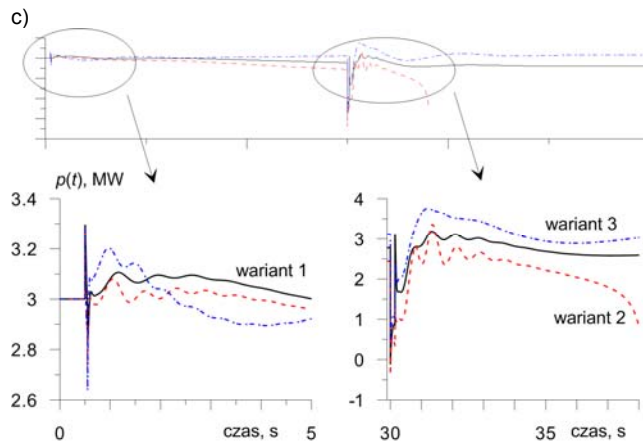
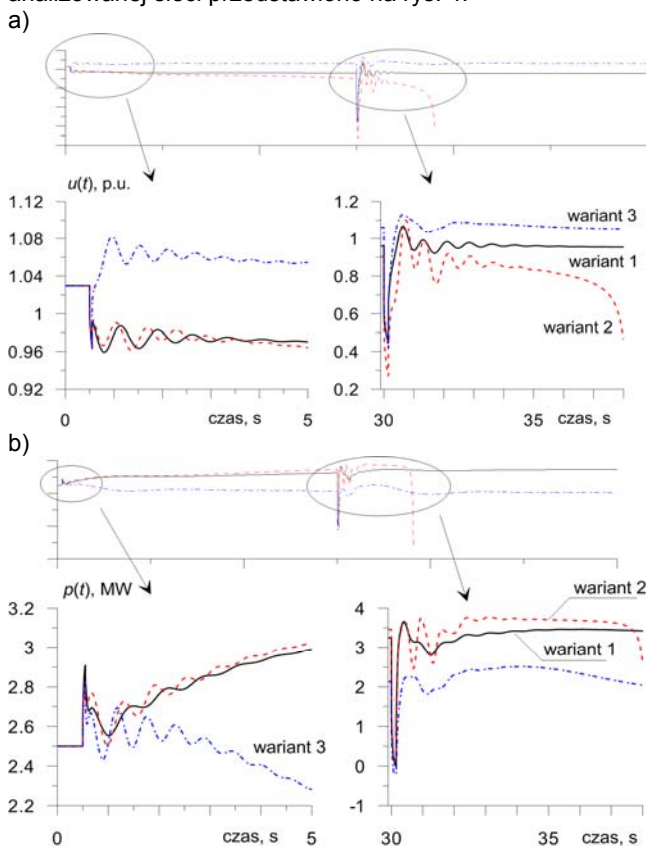
przejścia sieci do pracy autonomicznej, automatycznie zostaje wyłączony fragment sieci zapewniający zbilansowanie sieci w stanie ustalonym i stabilność w stanie przejściowym. W rozpatrywanym przypadku wyłączenie może dotyczyć linii otwartych L1, L7 oraz L8.

Do badań symulacyjnych wykorzystano program PSLF firmy GE, przeprowadzając obliczenia symulacyjne w trzech wariantach. W pierwszym wariantcie uwzględniono modele matematyczne i ich parametry zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, doświadczeniem autorów i wynikami estymacji. W drugim wariantcie przyjęto modele i parametry dynamiczne zgodnie z wytycznymi programu symulacyjnego, czyli przyjęto modele i parametry domyślne proponowane w dokumentacji programu. W trzecim wariantcie zachowując strukturę modelu matematycznego (domyślne rodzaje modeli i domyślne parametry) taką samą jak w wariantcie drugim, zmieniono natomiast algorytm przejścia sieci do pracy autonomicznej, tak aby zapewnić stabilność pracy sieci. Przy czym we wszystkich trzech wariantach, w celu zapewnienia możliwości pracy autonomicznej sieci, zamodelowano w turbozespolu gazowym układ regulacji napięcia i częstotliwości [11].

Zgodnie z wcześniej podanymi uwagami, założono następującą sekwencję zdarzeń związanych z przejściem sieci dystrybucyjnej do pracy autonomicznej:

- w chwili $t = 0,5$ s następuje trwałe wyłączenie linii L0 łączącej sieć SN z KSE,
- po czasie zwłoki następuje wyłączenie wybranych linii otwartych zgodnie z założonym algorytmem odciążenia sieci SN, przy czym w wariantcie pierwszym i drugim wyłączane są linie L1 i L7 natomiast w wariantcie trzecim L1, L7 oraz L8,
- w chwili $t = 30$ s (w czasie pracy autonomicznej) następuje przejściowe zwarcie trwające 150 ms w linii L92.

Przykładowe przebiegi dynamiczne napięcia i mocy chwilowej jednostek wytwórczych pracujących w analizowanej sieci przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi napięcia (a) i mocy chwilowej (b) turbozespołu gazowego oraz mocy chwilowej siłowni wiatrowych (c) w czasie pracy analizowanej sieci SN

Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że w zależności od przyjętych typów modeli i ich parametrów dynamicznych zapewnienie możliwości autonomicznej pracy sieci wymaga wyłączenia dwóch (dla wariantu pierwszego) lub trzech (dla wariantu trzeciego) linii. Wymaganie to należy uwzględnić w algorytmie automatycznych czynności łączeniowych przeprowadzanych przy przejściu sieci do pracy wydzielonej. Czego naturalną konsekwencją jest pozbawienie energii elektrycznej odbiorników zasilanych z linii L8, a tym samym generowanie kosztów niedostarczonej energii. Jak już wspomniano, przedstawione analizy i badania symulacyjne, stanowią podstawę do projektowania systemu automatyki zabezpieczeniowej i łączeniowej umożliwiającej sieci przejście do pracy wydzielonej bez potrzeby wyłączania źródeł rozproszonych. Ponadto wyników analizy nie można zweryfikować pomiarowo bez przeprowadzenia bardzo trudnego i kosztownego eksperymentu systemowego. W konsekwencji ustalony na etapie badań symulacyjnych algorytm pracy sieci (w rozpatrywanym przypadku, wariant trzeci) zostanie przyjęty do realizacji praktycznej, powodując stałą generację kosztów niedostarczenia energii.

Przedstawiony w artykule przykład odnosi się do terenowej sieci dystrybucyjnej, jednakże podobna sytuacja może dotyczyć sieci zakładowych. Jednym z takich przykładów, znanych z doświadczenia autorów artykułu, może być sieć zakładu przemysłowego z własnym zespołem wytwórczym, w którym stosunkowo często przeprowadza się rozruch dużej maszyny asynchronicznej. Po przeprowadzeniu modernizacji rozdzielni SN/nn zakładu bez uwzględnienia wytycznych związanych z dynamiką sieci, okazało się, że nie ma możliwości rozruchów bez specjalnego przygotowania sieci.

Reasumując wyżej przedstawione informacje i wnioski płynące z przeprowadzonych badań można określić perspektywę wykorzystania wiarygodnych parametrów dynamicznych zespołów wytwórczych [12, 13, 14, 15]:

- Ocena przyczyn i skutków awarii systemowych związanych ze stanami przejściowymi systemu elektroenergetycznego. Ponadto na podstawie uzyskanych wiarygodnych danych modeli matematycznych zespołów wytwórczych można przewidywać awarie systemowe i podejmować działania zapobiegające tym awariom.
- Ocena stabilności kątowej systemu. Przy czym oceny stabilności kątowej i zapasu stabilności można dokonać na etapie analiz systemowych (ocena „off-line”) oraz w

- trakcie prowadzenia ruchu sieci elektroenergetycznej (ocena „on-line”) przy wykorzystaniu analizy modalnej i wyników pomiarów rozproszonych.
- Optymalizacja parametrów stabilizatorów systemowych, w tym specjalnych stabilizatorów systemowych przeznaczonych dla źródeł rozproszonych.
 - Optymalizacja nastawień układów regulacji, automatyki zabezpieczeniowej i łączeniowej.
 - Optymalizacja miejsca przyłączenia i mocy nowych rozproszonych jednostek wytwórczych.
 - Ocena wpływu przyłączenia nowych jednostek wytwórczych, w tym źródeł rozproszonych, na system elektroenergetyczny przeprowadzana w ramach „ekspertyzy przyłączeniowej”.
 - Planowanie rozwoju i bieżąca obsługa rozproszonych źródeł energii umożliwiających pracę autonomiczną, a w konsekwencji minimalizacja strat związanych z niedostarczeniem energii elektrycznej.
 - Analiza stanów przejściowych i możliwości wystąpienia zakłóceń pracy sieci przemysłowych.
 - Planowanie rozwoju sieci przemysłowych, ze szczególnym uwzględnieniem źródeł wytwórczych.

LITERATURA

- [1] Abd-Alla A.N., Cheng S.J., Wen J.Y., Zhang J.: Model Parameter Identification of Excitation System based on a Genetic Algorithm Techniques. Power System Technology. International Conference on Power System Technology, October 2006, pp. 1-5.
- [2] Boboń A., Paszek S., Pruski P., Kraszewski T., Bojarska M.: Computer-aided determining of parameters of generating unit models based on measurement tests. Electrical Review (Przegląd Elektrotechniczny) 2011, R.87 nr 5, pp. 17-21.
- [3] Boboń A., Paszek S., Pruski P.: Program PARZW jako narzędzie do obliczeń parametrów modeli generatorów synchronicznych. 34-th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, SPETO'2011, Ustroń May 2011, s. 103-104.
- [4] de Mello F.P., Ribeiro J.R.: Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 4, July / August 1977, pp. 1211-1218.
- [5] Feltes J.W., Lima L.T.G.: Validation of Dynamic Model Parameters for Stability Analysis: Industry Need, Current Practices and Future Trends. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, Vol.3, 13-17 July 2003, pp.1295-1301.
- [6] Feltes J.W., Orero S., Fardanesh B., Uzunovic E., Zelingher S., Abi-Samra N.: Deriving Model Parameters from Field Test Measurements. IEEE Computer Applications in Power, Oct. 2002, pp. 30-36.
- [7] Hemandez J.A., Botero H.A., Ospina J.D., Perez J.C.: Excitation System Parameters Estimation Using Evolutionary Algorithms. "Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America", TDC '06, 2006, pp.1-6.
- [8] Klucznik J., Dobrzyński K., Lubośny Z., Trębski R.: Wykorzystanie przebiegów rejestracji szybkozmiennych do weryfikacji modeli dynamicznych KSE. XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Jurata, czerwiec 2011, t. I, s. 213-220.
- [9] Majka Ł., Paszek S.: Wykorzystanie algorytmu hybrydowego do estymacji parametrów modelu matematycznego zespołu wytwórczego. „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 8, s. 70-76.
- [10] Nocoń A., Boboń A., Paszek S., Pruski P.: Pomiarowa estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w elektrociepłowni. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 NR 9a/2012, s.46-49.
- [11] Nocoń A., Szuster D.: Dynamika źródła rozproszonego z uwzględnieniem niepewności parametrów. XLVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME'2010, Gliwice-Ustroń 21-24.06.2010, Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 88, Katowice 2010, s.187-190.
- [12] Paszek S.: Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego. Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [13] Robak S.: Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1, 2008, s. 54-57.
- [14] Szuster D., Nocoń A.: Wpływ parametrów sieci dystrybucyjnej średniego napięcia na stany przejściowych generatorów źródeł rozproszonych - analiza wrażliwości, Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME-Komel Nr. 92, Katowice 2011, s. 181-186.
- [15] Zajczyk R.: Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów dynamicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Stefan Paszek, E-mail: Stefan.Paszek@polsl.pl, dr inż. Adrian Nocoń, E-mail: Adrian.Nocon@polsl.pl, dr inż. Andrzej Boboń, E-mail: Andrzej.Bobon@polsl.pl, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice