

Pomiarowe wyznaczanie parametrów zespołów wytwórczych pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

Streszczenie. W artykule opisano pomiarowe metody estymacji parametrów modeli matematycznych elementów składowych zespołów wytwórczych pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Przedstawiono metody wyznaczania parametrów modeli generatorów synchronicznych, układów wzbudzenia z regulatorami napięcia oraz turbin parowych wraz z układami regulacji prędkości. 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. **Measurement methods for parameter estimation of the mathematical models of component elements of generating units operating in the Polish Power System**

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, zespół wytwórczy, estymacja parametrów

Keywords: power system, generating unit, parameter estimation.

doi:10.12915/pe.2014.01.47

Wstęp

W modelowaniu stanów dynamicznych Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) najczęściej wykorzystywana jest baza parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych, których wartości określone są na podstawie danych katalogowych, projektowych (często z pominięciem wpływu eksploatacji i modernizacji na wartości parametrów) oraz szacunków na podstawie typowych danych zawartych w publikacjach naukowo-technicznych. Przyjęte na tej podstawie wartości parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych nie odpowiadają aktualnym wartościom parametrów eksploatowanych zespołów. W konsekwencji wnioski formułowane na podstawie wyników badań symulacyjnych mogą być mylne, a w skrajnym przypadku przeciwne z wnioskami, jakie mogłyby być wyciągnięte z badań prowadzonych w oparciu o wiarygodne parametry modeli matematycznych.

Dla przykładu niekorzystnego wpływu źle dobranych parametrów modeli matematycznych na wyniki badań symulacyjnych, w niniejszym artykule przedstawiono analizę stanów przejściowego fragmentu 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 testami pomiarowymi stanu ustalonego. Przykładem takich testów są zakłócenia w postaci wprowadzenia dodatkowej składowej napięciowej w układzie wzbudzenia generatora synchronicznego (np. skokowa zmiana wartości zadanej napięcia twornika lub sygnał pseudolosowy PRBS) oraz zrzutu mocy (czynnej lub biernej) generatora [1, 5].

Najczęściej metodyka wyznaczania parametrów polega na aproksymacji przebiegów pomiarowych przez funkcje wyrażone przez poszukiwane parametry poszczególnych modeli elementów zespołu wytwórczego, również z

uwzględnieniem nieliniowości modeli w tym charakterystyki magnesowania. W konsekwencji, estymacja parametrów poszczególnych modeli dynamicznych elementów zespołu wytwórczego sprowadza się do minimalizacji funkcji opisującej różnicę pomiędzy przebiegiem rzeczywistym i symulowanym [3].

W szczególności podstawą estymacji parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego mogą być wyniki pomiarów wybranych wielkości (prądów, napięć i położenia magneśnicy) w stanach ustalonych oraz nieustalonych, wywołanych następującymi wymuszeniami:

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

Do rejestracji wykorzystywanych w procesie estymacji wielkości, na obiekcie rzeczywistym (np. blok elektrociepłowni) wykorzystywać można rejestrator zakłóceń elektroenergetycznych mierzący następujące wielkości:

- napięcie twornika (pomiar realizowany za przekładnikami napięciowymi generatora),
- prąd twornika (pomiar w obwodach za przekładnikami prądowymi za pomocą przetwornika cęgowego),
- napięcie wzbudzenia (pomiar bezpośredni za pomocą separowanego przetwornika napięcie/napięcie),
- prąd wzbudzenia (pomiar bezpośredni za pomocą przetwornika cęgowego lub pośredni w obwodach za boczniakiem pomiarowym),

– kąt położenia wału generatora, czyli kąt wewnętrznych (pomiar za pomocą enkodera zamocowanego na wale generatora bądź czujnika magnetycznego lub optycznego).

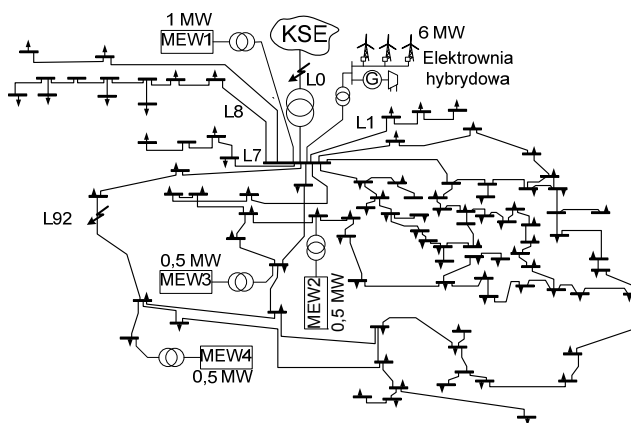
Metoda estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia i turbin z regulatorami prędkości jest zbliżona do metody wyznaczania parametrów modeli generatorów. W procesie estymacji układów wzbudzenia uwzględnia się sygnały wyjściowe generatora (np. sygnały napięcia stojana, prądu wzbudzenia generatora) jako wielkości wejściowe układu wzbudzenia. Podstawowym przebiegiem wykorzystywanym podczas estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia jest napięcie wzbudzenia generatora (sygnał wyjściowy układu wzbudzenia) [5]. Typowym zakłóceniem, które jest brane pod uwagę przy estymacji parametrów modeli matematycznych układów wzbudzenia i turbin jest zrzut mocy generatora. Przy czym do estymacji parametrów układu wzbudzenia najlepiej przyjąć taki stan pracy, w którym początkowa moc czynna generatora jest równa zero, ograniczyć to wpływ turbiny i jej układ regulacji na przebiegi dynamiczne. Dodatkowo można uwzględnić również inne zakłócenia, najlepiej w postaci odpowiednio dobranej skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia dla biegu jałowego.

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, estymacja parametrów modelu turbiny i jej układu regulacji polega na minimalizacji różnicy pomiędzy przebiegiem z symulacji i przebiegiem zarejestrowanym na obiekcie rzeczywistym [5]. 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, zwiększa jego skuteczność i szybkość działania. 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 program PARZW opracowany w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej [1, 2].

Stany przejściowe sieci wydzielonej

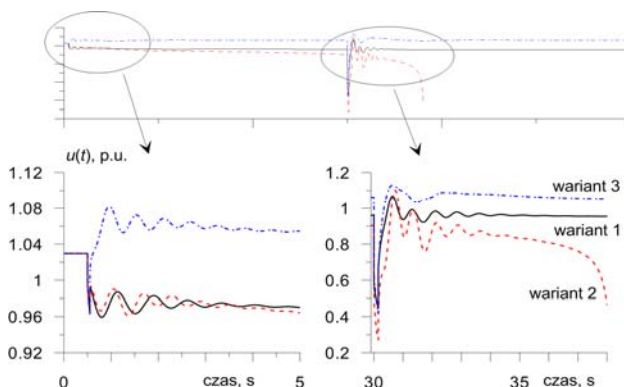
Dla zobrazowania wpływu parametrów modeli matematycznych elementów zespołu wytwórczego na wyniki badań symulacyjnych, a w konsekwencji na wnioski, formułowane na podstawie wyników badań, przeprowadzono przykładową analizę możliwości pracy autonomicznej fragmentu sieci średniego napięcia z zainstalowanymi źródłami wytwórczymi. Przedstawione w artykule przykładowe badania dotyczą dystrybucyjnej sieci 15 kV. Analiza dotyczy sieci o łącznej długości linii ok. 60km, z 181 węzłami w tym 5 węzłami wytwórczymi [4]. Strukturę analizowanego systemu przedstawia na rys. 3. Na schemacie sieci zaznaczono miejsca przyłączenia źródeł wytwórczych 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 turboszpół zasilany biogazem o mocy 3 MW. Ponadto do sieci przyłączone są cztery małe elektrownie wodne, oznaczone na schemacie odpowiednio MEW1 – o mocy 1MW oraz do MEW2 do MEW3 – o mocy 0.5MW.



Rys. 1 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 celu zbilansowania sieci przyjęto, że w momencie przejścia sieci do pracy autonomicznej, automatycznie zostaje wyłączony fragment sieci. W rozpatrywanym przypadku wyłączenie może dotyczyć linii 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 turboszpół gazowym układ regulacji napięcia i częstotliwości [4].



Rys. 2. Przebiegi napięcia (a) i mocy chwilowej (b) turboszpół gazowego oraz mocy chwilowej siłowni wiatrowych (c) w czasie pracy analizowanej sieci SN

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 łączącej sieć SN z KSE,

- po czasie zwłoki następuje wyłączenie wybranych linii otwartych zgodnie z założonym algorytmem odciążenia sieci SN, przy czym w wariantach pierwszym i drugim wyłączane są linie L1 i L7, natomiast w wariantach 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 turbogeneratora części gazowej elektrowni hybrydowej przedstawiono na rys. 4.

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. Przy czym wariant drugi jest wariantem niestabilnym dynamicznie. Wymaganie wyłączenia odpowiednich linii należy uwzględnić w algorytmie czynności łączeniowych przeprowadzanych przy przejściu sieci do pracy wydzielonej.

Naturalną konsekwencją różnego algorytmu przejścia sieci do pracy wyspowej jest pozbawienie energii elektrycznej odbiorców zasilanych z linii L8 (wariant 3), 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.

Reasumując wyżej przedstawione informacje i wnioski płynące z przeprowadzonych badań można określić perspektywę wykorzystania wiarygodnych parametrów dynamicznych zespołów wytwórczych [5, 6, 7, 8]:

- 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] 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.
- [2] 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.
- [3] Majka Ł., Paszek S.: Wykorzystanie algorytmu hybrydowego do estymacji parametrów modelu matematycznego zespołu wytwórczego. „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 8, s. 70-76.
- [4] 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.
- [5] Paszek S.: Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego. Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Robak S.: Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 1, 2008, s. 54-57.
- [7] 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.
- [8] 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.