

generatory, źródła rozproszone, badania symulacyjne

Adrian NOCON*, Dominik SZUSTER*

BADANIA SYMULACYJNE STANÓW PRZEJŚCIOWYCH GENERATORÓW ŹRÓDEŁ ROZPROSZONYCH

Przedstawione w artykule badania symulacyjne dotyczą analizy stanów przejściowych generatorów synchronicznych i asynchronicznych zainstalowanych w źródłach rozproszonych pracujących w sieci rozdzielczej średniego napięcia. Obiektem badań jest sieć o napięciu 15 kV, w której zainstalowano pięć źródeł rozproszonych. W celu stabilizacji pracy sieci jedno źródło zostało wyposażone w regulator napięcia i częstotliwości. W ramach badań, przeprowadzono optymalizację parametrów tych regulatorów przy użyciu prostego algorytmu genetycznego. Przeprowadzono symulacyjną analizę wydzielenia się wyspy oraz przemijającego zwarcia występującego w czasie pracy wyspowej. W badaniach uwzględniono niepewność parametrów modeli matematycznych generatorów.

1. WPROWADZENIE

Stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną połączony z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi jakości energii sprawia, że coraz częściej prowadzone są analizy dotyczące możliwości zapewnienia stabilnej pracy wyspowej źródeł rozproszonych. Biorąc pod uwagę fakt, że źródła rozproszone mają moc nie przekraczającą 5 MW, analiza pracy wyspowej dotyczy przede wszystkim sieci rozdzielczych średnich napięć. Rozważane w badaniach problemy dotyczą między innymi: czynności łączeniowych związanych z wydzieleniem się wyspy, bilansu mocy, analizy stanów przejściowych źródeł rozproszonych oraz ponownego przyłączenia wyspy do systemu elektroenergetycznego [1].

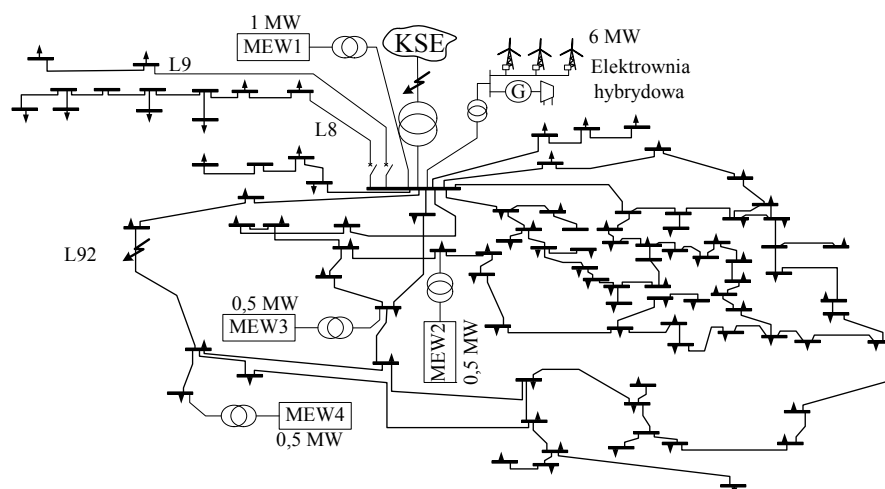
Analizowano stany przejściowe generatorów (synchronicznych i asynchronicznych) źródeł rozproszonych pracujących w sieci rozdzielczej średniego napięcia. Rozważano sieć, w której zainstalowano pięć źródeł rozproszonych, przy czym tylko jedno źródło zostało wyposażone w układy regulacji dostosowane do pracy wyspowej

* Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, adrian.nocon@polsl.pl, dominik.szuster@polsl.pl

(regulator napięcia i częstotliwości). W ramach badań przeprowadzono optymalizację parametrów tych regulatorów przy użyciu prostego algorytmu genetycznego. Przeprowadzone badania symulacyjne dotyczyły wydzielenia się wyspy oraz przemijającego zwarcia występującego w czasie pracy wyspowej. Uwzględniono niepewność parametrów modeli matematycznych generatorów.

2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE STANÓW PRZEJŚCIOWYCH

Badania dotyczą sieci dystrybucyjnej średniego napięcia (15 kV), stanowiącej fragment Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Analizowana sieć składała 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 [1]. Strukturę analizowanego systemu przedstawiono na rys. 1, na którym zaznaczono miejsca przyłączenia poszczególnych jednostek 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 z generatorami asynchronicznymi dwustronnie zasilanymi oraz jeden turbosespół zasilany biogazem o mocy 3 MW. Ponadto do sieci przyłączone były cztery małe elektrownie wodne, oznaczone odpowiednio MEW1 do MEW4.



Rys. 1. Struktura analizowanej sieci dystrybucyjnej
Fig. 1. Structure of the analysed distribution network

W obliczeniach przyjęto, że KSE dostarcza rozpatrywanej sieci 23,5% zapotrzebowanej mocy czynnej. Pozostałe 76,5% pokrywają źródła rozproszone. W związku

z takim podziałem mocy, nie ma możliwości zbilansowania sieci dla pracy wyspowej. Przyjęto więc, że w momencie wydzielania się wyspy, automatycznie (ze zwłoką własną wyłączników) zostają wyłączone linie L9 i L8 (rys. 1). Wybrane do wyłączenia linie (zasilające tereny wiejskie), zasilają odbiory stanowiące około 30% obciążenia całej sieci. Wyłączenie obu linii zmniejsza obciążenie sieci wydzielonej do mocy, którą mogą pokryć źródła rozproszone. Przyjęcie omówionego wyżej algorytmu wydzielania się wyspy w sposób uproszczony reprezentuje przypadek sieci średniego napięcia z zainstalowaną automatyką SCO.

Do badań symulacyjnych wykorzystano program PSLF. Przy czym przyjęto następujące modele matematyczne zespołów wytwórczych:

– siłownie wiatrowe: generator asynchroniczny – model GENWRI [3], układ sterowania rezystancją dodatkową – model EXWTG1 [3]; przyjęto, że siłownie pracują przy stałej mocy (pominięto oddziaływanie turbiny wiatrowej),

– turbozespół gazowy: generator synchroniczny – model GENROU [4], układ wzbudzenia – model krajowego statycznego układu wzbudzenia [4], turbina gazowa – modelowana jako układ inercyjny 2. rzędu z arbitralnie przyjętymi stałymi czasowymi równymi 200 ms i 50 ms, regulator mocy turbiny – model regulatora typu PI, regulator częstotliwości – model regulatora typu I [2],

– MEW: generator synchroniczny – model GENROU, układ wzbudzenia – model krajowego statycznego układu wzbudzenia [4], przyjęto, że zespoły pracują przy stałej mocy (pominięto oddziaływanie turbiny wodnej).

Parametry wyżej wymienionych modeli matematycznych przyjęto zgodnie z danymi katalogowymi producentów – Vestas dla siłowni wiatrowych i Stamford dla generatorów elektrowni gazowej i MEW. Natomiast parametry modeli matematycznych elementów sieci określono na podstawie danych operatora sieci i katalogów firmy FT Żychlin.

W celu zapewnienia poprawnej pracy wyspowej przeprowadzono optymalizację nastawień regulatorów turbozespołu gazowego elektrowni hybrydowej. Optymalizacji podlegały wzmożenia i stała czasowa regulatora mocy turbiny oraz stała czasowa całkowania regulatora częstotliwości. Optymalizacji dokonano minimalizując wskaźnik określający jakość regulacji mocy i częstotliwości [4]:

$$Q = w_1 \int \Delta p(t) dt + w_2 \int \Delta f(t) dt, \quad (1)$$

gdzie: Q – minimalizowany wskaźnik jakości, $\Delta p(t)$, $\Delta f(t)$ – odchyłki mocy chwilowej i częstotliwości generatora turbozespołu gazowego, w_1 , w_2 – dobrane arbitralnie współczynniki wagowe.

Minimalizację przeprowadzono w stanie przejściowym wywołanym nagłym wyłączeniem linii L0 wraz z jednoczesnym wyłączeniem linii L8 i L9. Do minimalizacji wskaźnika (1) wykorzystano algorytm genetyczny z krzyżowaniem zmiennoprzecinkowym metodą uśredniania i selekcją metodą turniejową [5].

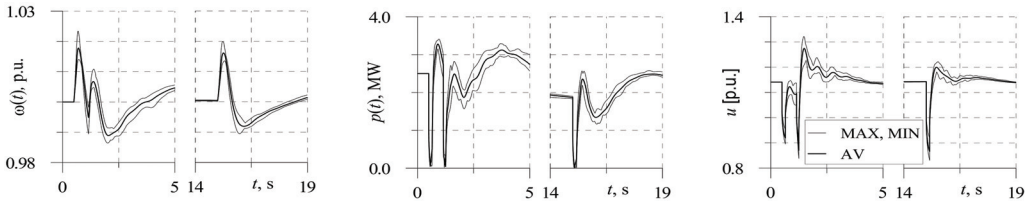
3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne przeprowadzono w programie PSLF w układzie jak na rys. 1, przy czym założono sekwencję zdarzeń występujących w analizowanej sieci uwzględniającą między innymi działanie automatyki SPZ linii L0:

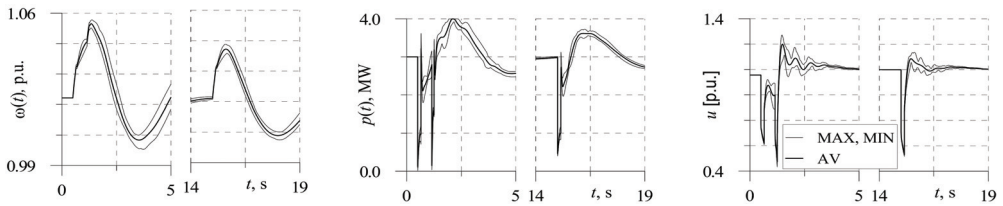
- w chwili $t = 0,5$ s następuje zwarcie w linii napowietrznej L0,
- po czasie zwłoki (150 ms), zwarcie wyłączane jest przez zabezpieczenie linii L0,
- po przerwie bezprądowej (0,5 s) następuje ponowne załączenie linii (SPZ), a tym samym ponowne zwarcie w linii L0,
- po kolejnych 150 ms zwarcie i linia L0 wyłączane są na stałe przez zabezpieczenie, w konsekwencji sieć dystrybucyjna trwale przechodzi do pracy wyspowej,
- po 100 ms następuje wyłączenie linii L8 i L9 zgodnie z założonym algorytmem obciążenia wyspy,
- w chwili $t = 15$ s (w czasie pracy wyspowej) następuje przejściowe zwarcie trwające 150 ms w linii średniego napięcia L92.

Badania symulacyjne wykonano z uwzględnieniem niepewności parametrów modeli matematycznych źródeł wytwórczych. Uwzględnienie niepewności parametrów związane jest z brakiem wiarygodnych danych dotyczących zainstalowanych źródeł (parametry przyjęto na podstawie danych katalogowych). W analizowanym przypadku niepewność parametrów uwzględniono poprzez zastąpienie konkretnej wartości parametru x_i rozkładem prawdopodobieństwa wystąpienia danej wartości parametru $k(x_i)$. Przy czym w obliczeniach założono, że wszystkie prawdopodobieństwa mają rozkład normalny, dla którego wartością średnią jest wartość parametru przyjęta z danych katalogowych, a zakres zmian parametru wynosi $\pm 25\%$.

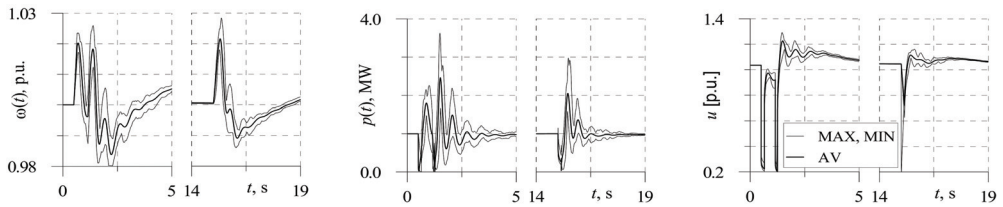
Badania symulacyjne z uwzględnieniem niepewności parametrów modelu matematycznego polegają na wielokrotnym powtarzaniu obliczeń przy losowo wybieranych wartościach parametrów zgodnie z założonym rozkładem prawdopodobieństwa. Przy czym po wylosowaniu wszystkich wartości parametrów następuje weryfikacja poprawności losowania, polegająca na sprawdzeniu czy wylosowane parametry mogą wystąpić w układzie rzeczywistym. Wynikami obliczeń symulacyjnych są pasma przebiegów wybranych wielkości zespołów wytwórczych (mocy chwilowej $p(t)$, napięcia zaciskowego $u(t)$ i prędkości kątovej $\omega(t)$). Wszystkie uzyskane pasma scharakteryzowane są poprzez wartość średnią (AV) i wartości graniczne (wartość maksymalną – MAX i minimalną – MIN). Przebiegi graniczne określają zakres zmian danej wielkości, w którym „znajdują się” wszystkie przebiegi uzyskane na drodze wielokrotnych symulacji. W przedstawionych badaniach przebiegi wyznaczono dla 100 zestawów parametrów wylosowanych zgodnie z przyjętym prawdopodobieństwem. Wybrane pasma przebiegów przedstawiono na rys. 2 do 5.



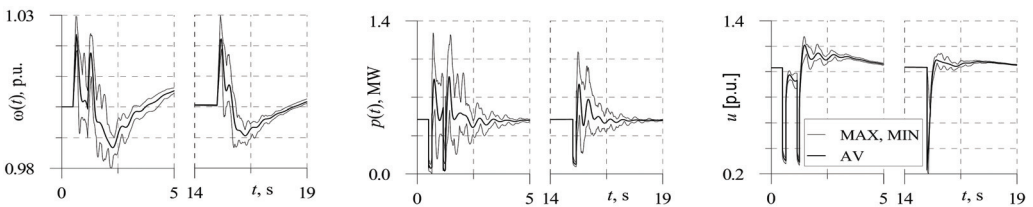
Rys. 2. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni gazowej
Fig. 2. Bands of waveform of gas power plant



Rys. 3. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wiatrowej
Fig. 3. Bands of waveform of wind power plant



Rys. 4. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wodnej MEW1
Fig. 4. Bands of waveform of hydropower plant MEW1



Rys. 5. Wybrane pasma przebiegów dla elektrowni wodnej MEW4
Fig. 5. Bands of waveform of hydropower plant MEW4

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyników symulacji można stwierdzić, że przy wyposażeniu tylko jednego źródła w układy regulacji przystosowane do pracy wydzielo-

nej, istnieje możliwość pracy wyspowej sieci z wieloma źródłami. Ponadto można zauważyć, że wpływ zmian parametrów modeli matematycznych generatorów na analizowane przebiegi jest niewielki (rys. 2–5), a zatem analiza pracy wyspowej, może zostać przeprowadzona jeszcze przed ostatecznym przyłączeniem źródeł do sieci (tj. bez znajomości wiarygodnych parametrów modeli). Wyniki takiej analizy mogą być podstawą do oceny dopuszczalności pracy wyspowej danej sieci.

Niemniej jednak problem analizy i oceny stanów przejściowych generatorów źródeł rozproszonych zainstalowanych w sieci dystrybucyjnej pracującej autonomicznie nie został wyczerpany. Problem ten wymaga dalszych badań, między innymi optymalizacji mocy i miejsca przyłączenia źródła z uwzględnieniem wielu dodatkowych kryteriów, w tym: obciążalności sieci, optymalnego rozplywu mocy w sieci, jakości energii, zapasu stabilności kątowej.

Praca jest częściowo finansowana przez Polskie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków budżetowych na naukę w latach 2009–2012 jako projekt badawczy N N511 352137.

LITERATURA

- [1] KACEJKO P., *Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym*, Politechnika Lubelska, Wydawnictwo Uczelniane, Lublin 2004.
- [2] MACHOWSKI J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [3] MILLER N.W., SANCHEZ-GASCA J.J., PRICE W.W., DELMERICO R.W., *Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations*, Power Engineering Society General Meeting IEEE, 2003.
- [4] PASZEK S., *Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [5] RUTKOWSKA D., PILIŃSKI M., RUTKOWSKI L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Łódź 1999.

SIMULATION INVESTIGATIONS OF TRANSIENT STATES OF DISTRIBUTED SOURCE GENERATORS

The simulation investigations presented in the paper concern analysis of transient states of synchronous and asynchronous generators installed in distributed sources working in the medium voltage distribution network. The 15 kV network in which there were installed five distributed sources was an object of investigations. In order to stabilize the network operation, one source was equipped with a voltage and frequency regulator. In the framework of the investigations there was performed parameter optimization of the regulators with use of a simple genetic algorithm. There was carried out simulation analysis of separation of an island and transient short-circuit occurring during island mode operation. The uncertainty of generator mathematical model parameters was taken into account in investigations.