

STANY PRZEJŚCIOWE I ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY STABILNOŚCI KĄTOWEJ ZAKŁADOWEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ PRACUJĄCEJ AUTONOMICZNIE

Streszczenie

W artykule analizowano sieć elektroenergetyczną (SE) średniego napięcia zakładu przemysłowego, obejmującego kilka hal produkcyjnych z zainstalowanymi silnikami indukcyjnymi. W sieci tej zainstalowane są dwie kogeneracyjne zespoły wytwórcze: z generatorem asynchronicznym i synchronicznym.

Badano zachowanie się SE zakładu m.in. w następujących stanach przejściowych: skokowe zmiany obciążenia sieci oraz awaryjne przejście sieci zakładowej do pracy autonomicznej. Takie stany przejściowe mogą zagrozić utratą stabilności kątowej układu. Z uwagi na brak wiarygodnych danych w obliczeniach uwzględniono niepewność parametrów modeli matematycznych elementów SE zakładu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w pewnych stanach przejściowych SE zakładu może wystąpić pojawienie się niegasnących kołysań elektromechanicznych, skutkujących awaryjnym wyłączeniem zespołów wytwórczych, a w konsekwencji utratą zasilania zakładu. W celu ograniczenia niekorzystnych zjawisk zaproponowano zastosowanie układów stabilizacyjnych zainstalowanych w układzie regulacji mocy turbiny oraz w układzie wzbudzenia generatora synchronicznego. Przeprowadzono optymalizację nastawień obu proponowanych stabilizatorów przy uwzględnieniu stanu przejściowego wywołanego awaryjnym wyłączeniem zespołu asynchronicznego. Do optymalizacji parametrów stabilizatorów zastosowano algorytm genetyczny.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że istnieje możliwość prowadzenia ruchu SE zakładu umożliwiającego pracę autonomiczną sieci z wykorzystaniem wszystkich zainstalowanych źródeł wytwórczych.

WSTĘP

Obecnie obserwuje się coraz większe zainteresowanie przedsiębiorstw, posiadających własne źródła zasilania (np. jednostki kogeneracyjne), budowaniem zakładowych sieci elektroenergetycznych zdolnych do pracy autonomicznej (pracujących poza Krajowym Systemem Elektroenergetycznym KSE). Warunkiem budowy takiej sieci jest zainstalowanie w niej źródeł o mocy znamionowej dostosowanej do potrzeb zakładu i wyposażenie ich w odpowiednie układy automatyki, zdolne do prowadzenia ruchu sieci w stanach ustalonych i przejściowych.

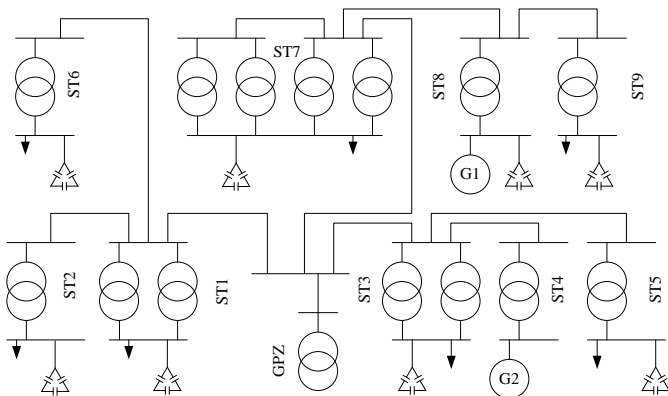
Szczególnie ważnym problemem związanym z pracą autonomiczną jednostek wytwórczych (pojedynczych lub pracujących równolegle na sieć wydzieloną) jest odpowiednie sterowanie zapewniające stabilność kątową całej sieci [3, 10]. Problem ten występuje, nie tylko w sieciach z zainstalowanymi jednostkami z generatorami synchronicznymi, ale również w sieciach, w których pracują różne inne rodzaje jednostek np. ogniwa fotowoltaiczne [11]. Układy sterowania muszą dostatecznie szybko dostosowywać wielkości sterowane (np. napięcie wzbudzenia generatora), aby pojawiające się w sieci zakłócenia nie powodowały utraty stabilności. Do szczególnie groźnych dla stabilności kątowej zakłóceń należy zaliczyć: zwarcia występujące w sieci pracującej autonomicznie, duże skokowe zmiany obciążenia (np. włączenie lub wyłączenie dużych odbiorników, wyłączenie jednego ze źródeł pracujących równolegle) oraz awaryjne przejście sieci zakładowej do pracy autonomicznej. Przejście awaryjne w odróżnieniu od przejścia planowanego, związane jest zazwyczaj z pojawieniem się dużej różnicy pomiędzy mocą generowaną i pobieraną, konieczne wówczas staje się odciążenie sieci – natychmiastowe wyłączenie części odbiorników – lub

gwałtowne zredukowanie mocy produkowanej w poszczególnych źródłach [5, 8]).

1. ANALIZOWANY ZAKŁADOWY SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY

Analizowana w niniejszym artykule sieć elektroenergetyczna (SE) zakładu jest siecią średniego napięcia (SN o napięciu znamionowym 15 kV) i zasilona jest linią napowietrzną ze stacji 110 kV/15 kV (GPZ). Obejmuje kilka hal produkcyjnych z zainstalowanymi silnikami indukcyjnymi stanowiącymi ok. 95% obciążenia zakładu. W SEE zakładu zainstalowane są dwie kogeneracyjne jednostki wytwórcze. Pierwszą stanowi kogenerator G1 z generatorem asynchronicznym o mocy znamionowej 1,9 MW i napięciu znamionowym 690 V. Druga jednostka G2 wyposażona jest w generator synchroniczny o mocy znamionowej 5,7 MW i napięciu znamionowym 6,3 kV. Przy czym tylko jednostka z generatorem synchronicznym ma zdolność zmiany generowanej mocy czynnej. Strukturę SE zakładu przedstawia rysunek 1.

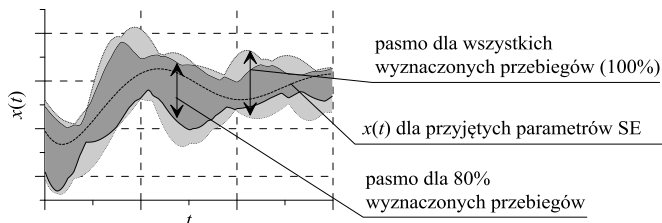
Z uwagi na liczbę zainstalowanych w sieci silników indukcyjnych, we wszystkich stacjach transformatorowych (z wyjątkiem ST4, do której przyłączona jest jednostka G2 z generatorem synchronicznym), po stronie niskiego napięcia zainstalowane są baterie kondensatorów przeznaczone do kompensacji mocy bierniej.



Rys. 1. Struktura analizowanej SE zakładu

Do zamodelowania stanów przejściowych wykorzystano następujące typy modeli [1, 2, 6, 9]:

1. Zespół asynchroniczny G1: generator asynchroniczny (model matematyczny jednokłatkowej maszyny indukcyjnej), turbina parowa (model matematyczny typu IEEE1 z pominięciem statyzmu i oddziaływania regulatora mocy).
2. Zespół synchroniczny G2: generator synchroniczny (model matematyczny typu GENROU), układ wzbudzenia (model matematyczny tyrystorowego układu wzbudzenia ze wzbudnicą synchroniczną), turbina parowa (model matematyczny typu IEEE1 z pominięciem statyzmu), stabilizator turbinowy (model matematyczny stabilizatora typu PD), regulator częstotliwości (model matematyczny regulatora typu PI), stabilizator wzbudzenia (model matematyczny stabilizatora PSS3B).
3. Odbiorniki energii (alternatywnie, w zależności od analizowanego przypadku): stała impedancja lub model matematyczny silnika jednokłatkowego z pominięciem oddziaływania układów przekształtnikowych.
4. Układy kompensacji mocy biernej: stała impedancja z pominięciem oddziaływania regulatora mocy biernej.



Rys. 2. Graficzna interpretacja wyznaczonych pasm przebiegów

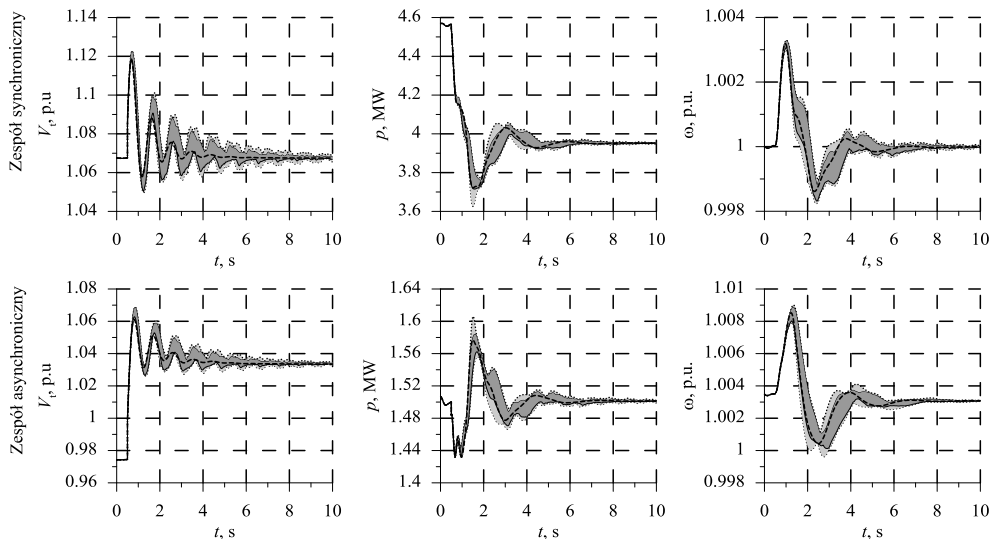
Z uwagi na brak wiarygodnych danych (dane stanowiące podstawę do wyznaczenia parametrów modeli matematycznych poszczególnych elementów SE zakładu zostały zaczerpnięte z dokumentacji techniczno ruchowej, nie zawsze zawierającej pełne informacje o modelowanym obiekcie) we wszystkich analizowanych stanach przejściowych uwzględniono niepewność parametrów [5]. Uwzględnienie niepewności nastąpiło poprzez przedstawienie pasm przebiegów analizowanych wielkości (np. napięcia zaciskowego twornika V_t , mocy chwilowej p , prędkości kątovej ω zespołów wytwórczych). Przy czym pasma przebiegów ograniczone są przebiegami granicznymi (maksymalnym i minimalnym) wyznaczonymi przez wielokrotną symulację SE zakładu przy zmienianych parametrach poszczególnych modeli matematycznych [8]. Ponadto na poszczególnych wykresach przebiegów dynamicznych przedstawiono pasmo dla 80% wyznaczonych przebiegów (wyznaczone przy odrzuceniu 10% skrajnych wartości przebiegów z każdej ze stron – tj. 10 i 90 percentyl). Graficzną interpretację wyznaczonych pasm przebiegów przedstawiono na rysunku 2.

2. STANY PRZEJŚCIOWE ZESPOŁÓW WYTWÓRCZYCH

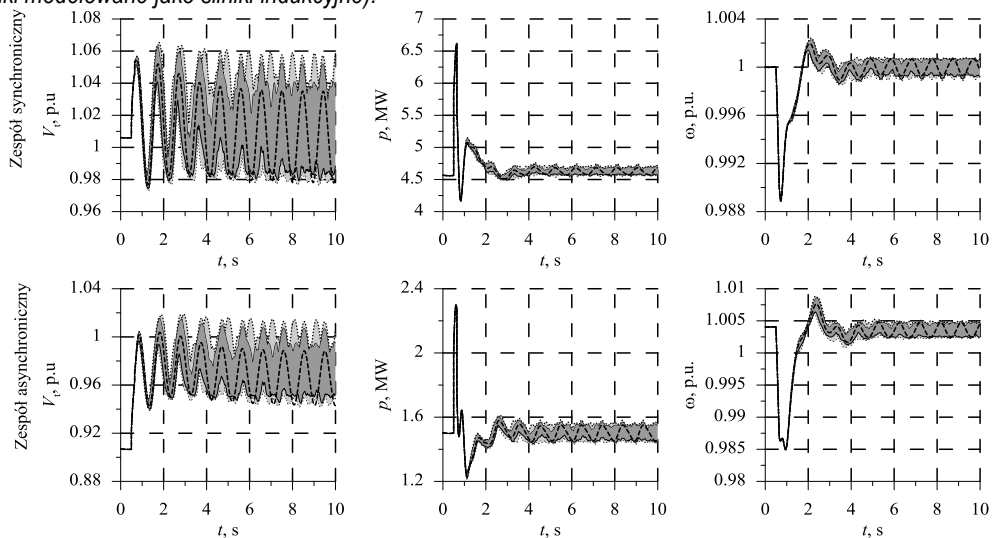
Na podstawie analizy struktury SE zakładu oraz uwarunkowań technologicznych produkcji, stwierdzono, że w badanym przypadku w sieci mogą występować następujące stany przejściowe, stanowiące zagrożenie dla stabilności kątovej: przejście SE zakładu od współpracy z siecią (zasilanie z GPZ) do pracy autonomicznej, nagły duży spadek obciążenia w czasie autonomicznej pracy SE zakładu, nagły wzrost obciążenia (związany z rozruchem silników w poszczególnych podstacjach) w czasie autonomicznej pracy SE zakładu, awaryjne wyłączenie zespołu asynchronicznego w czasie autonomicznej pracy SE zakładu, przemijające zwarcie na szynach nN poszczególnych podstacji w czasie autonomicznej pracy SE zakładu, krótkotrwały zanik napięcia w GPZ, przemijające zwarcie w linii łączącej SE zakładu z GPZ. Do dalszej analizy przyjęto dwa stany przejściowe, tj.: przejście SE zakładu do pracy autonomicznej oraz awaryjne wyłączenie zespołu asynchronicznego.

Proces przejścia SE zakładu do pracy autonomicznej jest związany z koniecznością zapewnienia zbilansowania mocy czynnej w obrębie SEE zakładu. Zbilansowanie realizowane jest dwiema drogami: poprzez zmianę mocy pobieranej przez odbiorniki energii lub/oraz poprzez zmianę wytwarzanej mocy czynnej w zespołach wytwórczych.

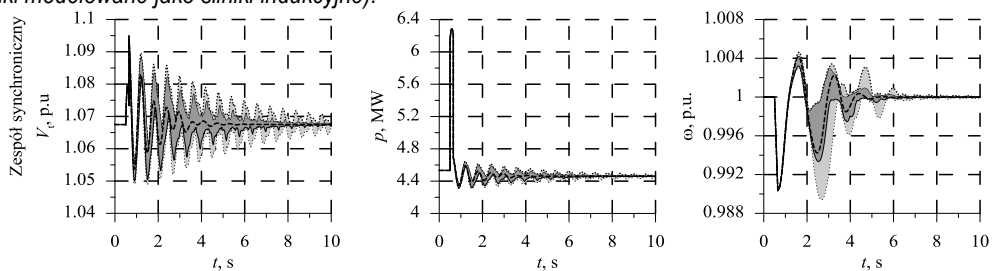
W prezentowanych badaniach rozważono dwa przypadki. W pierwszym przypadku jednostki wytwórcze pracujące w SE zakładu wytwarzały moc czynną większą o 0,6 MW od mocy zużywanej przez wszystkie zainstalowane odbiorniki. W związku z tym w chwili przejścia SEE zakładu do pracy autonomicznej konieczne jest szybkie zmniejszenie mocy wytwarzanej przez jednostkę G2 z generatorem synchronicznym. W drugim przypadku badano sytuację, w której odbiorniki zainstalowane w SE zakładu zużywają o 4 MW mocy więcej niż produkują źródła G1 i G2. W związku z tym w chwili przejścia SEE zakładu do pracy autonomicznej konieczne jest awaryjne wyłączenie podstacji ST1, ST2 i ST9. Przy czym wyłączenie zasymulowano z opóźnieniem wynikającym z przyczyn technologicznych. Wyniki przeprowadzonych przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3 – dla przypadku pierwszego oraz 4 – dla przypadku drugiego.



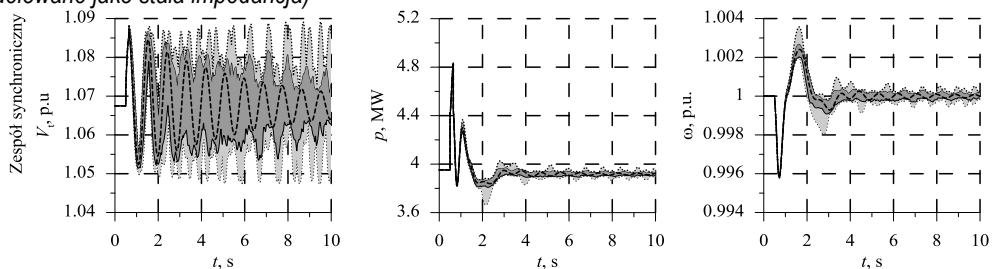
Rys. 3. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołów wytwórczych w czasie przejścia SE do pracy autonomicznej, przy małym obciążeniu podstacji (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne).



Rys. 4. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołów wytwórczych w czasie przejścia SE do pracy autonomicznej, przy dużym obciążeniu podstacji (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne).



Rys. 5. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołu wytwórczego synchronicznego w czasie awaryjnego wyłączenia zespołu asynchronicznego (odbiorniki modelowane jako stała impedancja)



Rys. 6. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołu wytwórczego synchronicznego w czasie awaryjnego wyłączenia zespołu asynchronicznego (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne)

Drugim analizowanym stanem przejściowym jest awaryjne wyłączenie zespołu asynchronicznego w czasie autonomicznej pracy SE zakładu. Wyłączenie takie, podobnie jak przejście SE zakładu do pracy autonomicznej, związane jest z pojawieniem się niedoboru mocy generowanej. W związku z tym konieczne jest odciążenie sieci przez wyłączenie części odbiorników. Ponadto wyłączenie jednego ze źródeł zmienia parametry dynamiczne pracującej SE zakładu. Dla tego stanu przejściowego przeanalizowano wpływ zastosowanego modelu matematycznego na przebiegi dynamiczne. Zasyulowano awaryjne wyłączenie generatora asynchronicznego dla modelowania odbiorników jako stała impedancja (wyniki przedstawiono na rysunku 5) oraz dla odbiorników modelowanych jako silniki indukcyjne (rysunek 6).

3. MOŻLIWOŚCI POPRAWY STABILNOŚCI PRACY ZESPOŁÓW WYTWÓRCZYCH

Z przeprowadzonych wyżej analiz wynika, że w pewnych stanach przejściowych SE zakładu może spowodować pojawienie się niegasnących kołysań elektromechanicznych skutkujących awaryjnym wyłączeniem zespołów wytwórczych a w konsekwencji utratą zasilania zakładu. W celu ograniczenia niekorzystnych zjawisk proponuje się zastosowanie układów stabilizacyjnych zainstalowanych w układach regulacji mocy turbiny oraz w układzie wzbudzenia generatora synchronicznego [9].

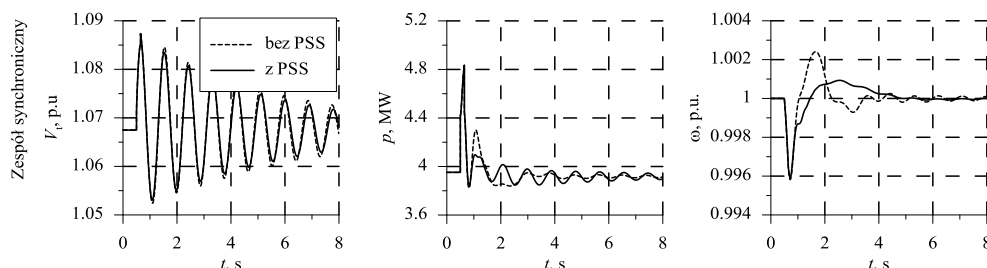
Pewną alternatywą do powyższej propozycji może być zainstalowanie w SE zakładu odpowiednio sterowanej jednostki bilansującej. Przy czym jednostką bilansującą może być generator synchro-

niczny z zasobnikiem energii. Jednakże rozwiązanie to wymaga dodatkowych znacznych nakładów inwestycyjnych, przez co nie zostało przeanalizowane.

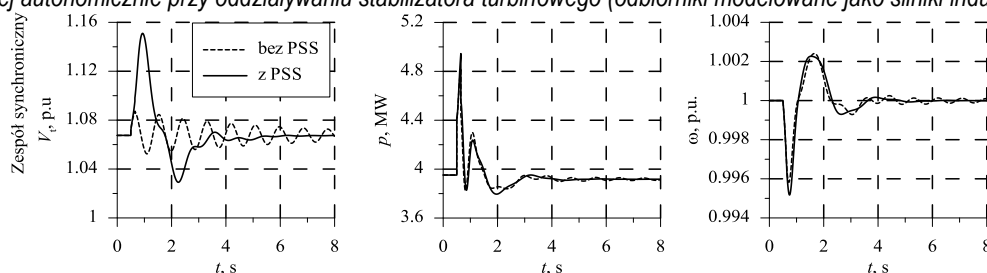
Optymalnego doboru nastawień obu proponowanych stabilizatorów dokonano dla stanu przejściowego wywołanego awaryjnym wyłączeniem zespołu asynchronicznego w SE zakładu pracującej autonomicznie. Do optymalizacji parametrów stabilizatorów zastosowano algorytm genetyczny [4].

Uzyskane przebiegi napięcia zaciskowego twornika V_t , mocy chwilowej p oraz prędkości kątowej ω zespołu synchronicznego dla oddziaływania stabilizatora w układzie regulacji turbiny przedstawiono na rysunku 7. Analogiczne przebiegi dla oddziaływania stabilizatora w układzie regulacji wzbudzenia generatora synchronicznego przedstawiono na rysunku 8.

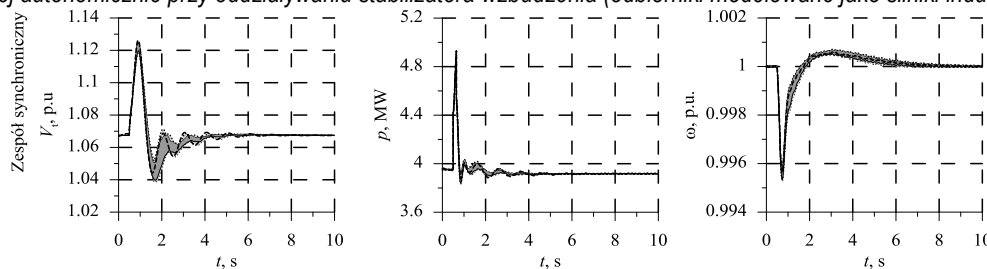
Ponadto na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przebiegi w dwóch różnych stanach przejściowych (w stanach, dla których układ bez stabilizatorów może być niestabilny, niestabilność uwidoczniła się na przebiegach przedstawionych na rysunkach 4 i 6) przy jednoczesnym działaniu obu stabilizatorów.



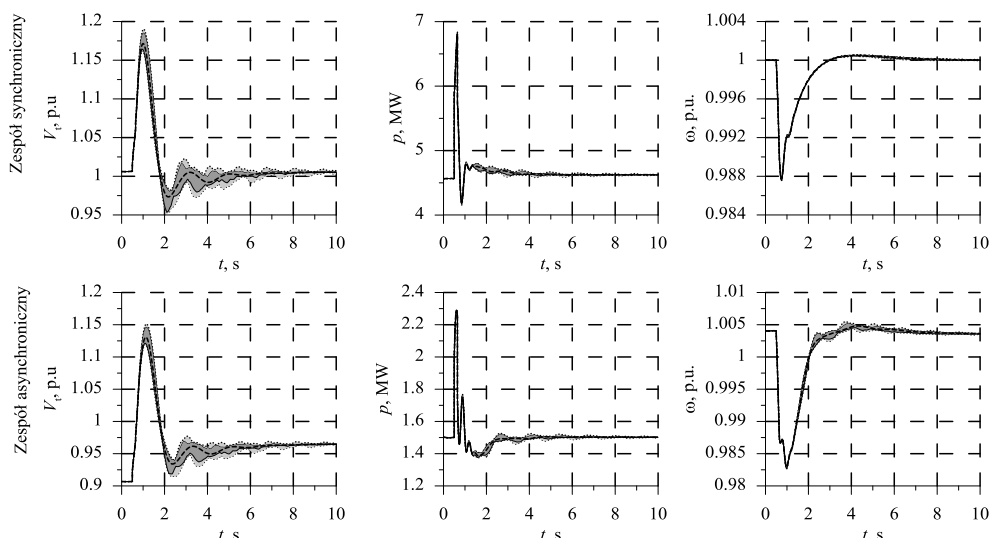
Rys. 7. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołu wytwórczego synchronicznego w czasie awaryjnego wyłączenia zespołu asynchronicznego w SE pracującej autonomicznie przy oddziaływaniu stabilizatora turbinowego (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne)



Rys. 8. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołu wytwórczego synchronicznego w czasie awaryjnego wyłączenia zespołu asynchronicznego w SE pracującej autonomicznie przy oddziaływaniu stabilizatora wzbudzenia (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne)



Rys. 9. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołu wytwórczego synchronicznego w czasie awaryjnego wyłączenia zespołu asynchronicznego w SEE pracującej autonomicznie przy oddziaływaniu dwóch stabilizatorów i małym obciążeniu podstacji (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne)



Rys. 10. Wybrane przebiegi dynamiczne zespołów wytwórczych w czasie przejścia SEE do pracy autonomicznej, przy oddziaływaniu dwóch stabilizatorów i dużym obciążeniu podstacji (odbiorniki modelowane jako silniki indukcyjne)

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że istnieje możliwość prowadzenia ruchu SE zakładu umożliwiającego pracę autonomiczną sieci z wykorzystaniem wszystkich zainstalowanych źródeł wytwórczych. Ponadto stwierdzono:

- Dopuszczalne zakresy zmian częstotliwości (normatywnie $\pm 1\%$) i napięcia w poszczególnych węzłach SE zakładu (normatywnie $\pm 10\%$), przekraczane są przejściowo w pierwszych chwilach po wystąpieniu dużego zakłócenia (np. przy przejściu SE zakładu do pracy autonomicznej). W związku z tym w takich sytuacjach może wystąpić konieczność zmian w nastawieniach parametrów układów napędowych i zespołów automatyki zabezpieczeniowej.
- Różne rodzaje modeli matematycznych odbiorników zainstalowanych w SE zakładu prowadzą do zasadniczo różnych wyników badań symulacyjnych. Może to być przyczyną błędnych wyciecznych projektowych dla centralnego układu regulacji SE zakładu.
- Wśród możliwości poprawy warunków pracy SE zakładu (w szczególności eliminacji stanów przejściowych mogących doprowadzić do awaryjnego wyłączenia źródeł wytwórczych) można wymienić: stosowanie stabilizatorów w układach regulacji turbin i napięcia generatorów synchronicznych, prowadzenie ruchu sieci współpracującej z KSE przy ograniczonej wartości mocy przekazywanej do KSE, stosowanie szybkiej regulacji turbin, śledzenie aktualnego stanu sieci i prowadzenie działań prewencyjnych (np. przygotowywanie odbiorników do awaryjnego wyłączenia).

Zasadniczy wpływ na przebiegi dynamiczne w SE zakładu mają parametry zespołów wytwórczych, a w szczególności nastawienia układów regulacji (generatorów i turbiny). W związku z tym w każdym indywidualnym przypadku, niezbędna jest pomiarowa i symulacyjna weryfikacja tych parametrów. Po przeprowadzeniu analizy uzyskanych wyników pomiarów (w szczególności estymacji parametrów modeli matematycznych na podstawie zarejestrowanych przebiegów [7]) możliwa jest wiarygodna ocena możliwości i zakresu prowadzenia ruchu SE zakładu w różnych stanach pracy, w tym pracy autonomicznej.

Zastosowana w badaniach metoda uwzględnienia niepewności parametrów modeli matematycznych umożliwia wstępną ocenę możliwości poprawnej pracy projektowanej sieci w stanach przejściowych. Metoda ta wymaga wielokrotnej symulacji stanów przejściowych, ale uzyskane wyniki (przy odpowiednim doborze uwzględnianych zakresów niepewności), czyli pasma przebiegów z dużym prawdopodobieństwem zawierają przebiegi jakie wystąpią w układzie rzeczywistym. Na podstawie takich przebiegów można planować (projektować) środki zaradcze zwiększające pewność zasilania zakładu. Niemniej jednak, w ostatnim etapie projektowania układów sterowania SE zakładu, konieczne jest przeprowadzenie testów sprawdzających, które powinny być poprzedzone wiarygodną estymacją parametrów modeli matematycznych elementów SE zakładu [1, 2, 6].

BIBLIOGRAFIA

1. Berhausen S., Paszek S.: Pomiarowa estymacja parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego przy wykorzystaniu sygnałów pseudolosowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, R.89, Nr 9, 2013, s. 1-5.
2. Berhausen S., Paszek S.: Use of the finite element method for parameter estimation of the circuit model of a high power synchronous generator. *Bulletin of the Polish Academy of Science* 2015, Vol. 63, No. 3, 2015, pp. 1-8.
3. Machowski J.: *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo OWPW, Warszawa 2007.
4. Nocoń A., Paszek S.: Optymalizacja parametrów regulatora elektrowni wirtualnej źródeł rozproszonych w SEE. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010 R. 86 nr 8, s. 82-86.
5. Nocoń A., Szuster D.: Dynamika źródła rozproszonego z uwzględnieniem niepewności parametrów. *Zeszyty Problematyczne "Maszyny Elektryczne" BOBRME* Nr. 88, Katowice 2010, s. 187-190.
6. Paszek S., Berhausen S., Boboń A., Majka Ł., Nocoń A., Pasko M., Pruski P., Kraszewski T.: *Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
7. Paszek S., Nocoń A., Boboń A., Majka Ł., Berhausen S., Pruski P., Szuster D., *Pomiarowe wyznaczanie parametrów zespołów wytwórczych pracujących w Krajowym Systemie Elek-*

- troenergetycznym, Przegląd Elektrotechniczny 2014 R. 90 nr 1, s. 193-195.
8. Paszek S., Nocoń A., Boboń A.: Wpływ wartości parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych na wybrane przebiegi nieustalone w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Przegląd Elektrotechniczny, 2014 R. 90 nr 3, s. 98-102.
 9. Paszek S., Nocoń A.: Optimisation and polyoptimisation of power system stabilizer parameters, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken 2014.
 10. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
 11. Robak S.: Stabilność kątowna systemu elektroenergetycznego z zainstalowanymi źródłami fotowoltaicznymi, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91 NR 8/2015, s. 1-6, DOI: 10.15199/48.2015.08.01.

can state that there is the possibility of continuous operation of a plant power network enabling the autonomous operation mode of this network with the use of all installed generating units.

Autorzy:

dr inż. A. Nocoń - Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10. Tel.: 32 2371229

prof. dr hab. inż. S. Paszek - Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10. Tel.: 32 2371229

mgr inż. M. Kasprzyk - Gliwickie Biuro Projektów Budownictwa Przemysłowego Projprzem S.A., 44-101 Gliwice, ul. Prymasa Stefana Wyszyńskiego 11. Tel.: 32 7882080

TRANSIENT STATES AND ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE ANGULAR STABILITY OF AN INDUSTRIAL PLANT POWER NETWORK OPERATING IN AUTONOMOUS MODE

Abstract

In the paper, there is analyzed a medium voltage power network of an industrial plant consisting of several production halls with installed induction motors. Two cogeneration generating units, with an asynchronous and synchronous generator, are installed in this network.

There was investigated the behavior of the industrial plant power network in the following transient states: step changes in the network load and emergency change of the plant network operation to autonomous mode. Such transient states may result in the loss of the power system angular stability. Due to the lack of reliable data, the uncertainty of the mathematical model parameters of the plant power network elements was taken into account in calculations.

Based on the analyses performed, it was stated that non-decaying electromechanical swings followed by emergency disconnection of generating units and, in consequence, the loss of the plant supply could occur in some transient states of the plant power network. To prevent such a situation, there was proposed the use of stabilizers installed in the turbine governor and the synchronous generator excitation system. The optimization of the settings of both proposed stabilizers when taking into account the transient state caused by the emergency disconnection of the asynchronous unit was performed. A genetic algorithm was used for the parameter optimization of the stabilizers.

Based on the simulation investigations made, one