

doi:10.15199/48.2024.01.49

Weryfikacja parametrów stabilizatorów systemowych PSS2A w sieci średniego napięcia z generacją rozproszoną

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących zastosowania stabilizatora systemowego PSS2A w sieci średniego napięcia zawierającej rozproszone źródła energii. Obecnie, w związku ze stałym wzrostem liczby jednostek wytwórczych o mocy kilku megawatów (w tym ze źródeł odnawialnych), kołysania elektromechaniczne mogą pojawiać się nie tylko w sieciach wysokich napięć, ale również w sieciach średnich napięć. Dobre tłumienie kołysań elektromechanicznych w rozpatrywanej sieci średniego napięcia uzyskano bez modyfikacji nastaw stabilizatora PSS2A, które wyznaczono poprzez analizę układu jednomaszynowego typu zespół wytwórczy – sieć sztywna.

Abstract. The paper presents the results of investigations on using of a PSS2A power system stabilizer in a medium voltage network containing distributed energy sources. Nowadays, due to the steady increase in the number of generating units with a capacity of several megawatts (including renewable energy sources), electromechanical swings may appear not only in high voltage networks, but also in medium voltage networks. The good electromechanical swings damping in the medium-voltage network considered was obtained without modification of the PSS2A stabilizer settings, which were determined for the generating unit – infinite bus system. (Verification of the PSS2A power system stabilizers parameters in a medium voltage network containing distributed energy sources).

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, kołysania elektromechaniczne, stabilizatory systemowe, generacja rozproszona.

Keywords: power system, electromechanical swings, power system stabilizers, distributed generation.

Wstęp

Od kilku lat można zaobserwować dynamiczny wzrost liczby rozproszonych źródeł energii elektrycznej, w tym odnawialnych źródeł energii. Jednostki wytwórcze lub zespoły jednostek (np. farmy wiatrowe) o mocy rzędu megawatów przyłączane są do systemu elektroenergetycznego (SEE) w stacjach wysokiego napięcia (110 kV). Mniejsze jednostki można podłączyć do sieci na stacjach średniego napięcia (SN).

Jak wykazały liczne badania [1-8], zakłócenia w pracy poszczególnych zespołów wytwórczych mogą niekorzystnie wpływać na pracę innych jednostek, również w sieciach SN. Przykładem takiej sytuacji może być nagłe wyłączenie generacji elektrowni wiatrowej z powodu stale rosnącej siły wiatru. Wyłączenie takie powoduje stan nieustalony, który w niekorzystnym przypadku może spowodować utratę stabilności kątowej, a w konsekwencji awaryjne wyłączenie różnych zespołów wytwórczych. Należy podkreślić, że zachowanie zespołów wytwórczych w stanach nieustalonych, w tym rozproszonych źródeł energii elektrycznej, ma fundamentalne znaczenie dla niezawodności zasilania odbiorców energii elektrycznej, a w przypadku zespołów kogeneracyjnych również odbiorców ciepła. Dlatego należy poszukiwać rozwiązań poprawiających warunki pracy źródeł, w tym sposobów ograniczania niekorzystnych skutków stanów nieustalonych. W pracy [9] przedstawiono podstawy teoretyczne metod doboru parametrów dwuwęzłowego stabilizatora systemowego PSS2A oraz wyznaczono parametry korektora tego stabilizatora poprzez analizę układu typu zespół wytwórczy - sieć sztywna.

W niniejszym artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie takiego stabilizatora w układzie wielomaszynowym z generacją rozproszoną.

Badania stanów nieustalonych występujących w analizowanej sieci SN z rozproszonymi źródłami opisano w rozdziałach 2 i 3. Wykazano, że stabilizator systemowy o parametrach określonych w układzie jednomaszynowym [9], wprowadzony do wybranego zespołu wytwórczego, dobrze tłumia kołysania elektromechaniczne w sieci średniego napięcia. Podsumowanie i wnioski z wykonanych badań przedstawiono w rozdziale 4.

Kołysania elektromechaniczne w sieci średniego napięcia z generacją rozproszoną

Ponieważ na SEE składa się wiele generatorów wzajemnie ze sobą powiązanych siecią elektroenergetyczną, występujące w SEE kołysania elektromechaniczne mogą być słabiej tłumione przez stabilizatory systemowe z parametrami dobranymi dla układu jednomaszynowego (nawet jeżeli dobór ten jest optymalny [10, 11]). W związku z tym zachodzi konieczność weryfikacji nastawień tych stabilizatorów. Weryfikacja taka może mieć miejsce w momencie uruchomienia stabilizatorów systemowych w rzeczywistym systemie w elektrowni. Weryfikacja może być również przeprowadzona metodami symulacyjnymi.

Problem pojawiających się kołysań elektromechanicznych i ich tłumienia dotyczył dotychczas sieci najwyższych napięć, do których przyłączane są zespoły wytwórcze dużej mocy instalowane w elektrowniach z generatorami synchronicznymi. Obecnie, z uwagi na stały wzrost liczby jednostek wytwórczych o mocach rzędu kilku megawatów (w tym odnawialnych źródeł energii), kołysania elektromechaniczne mogą pojawić się również w sieciach średnich napięć. W związku z tym zachodzi konieczność prowadzenia badań mających na celu poszukiwanie rozwiązań pozwalających na stabilizację pracy źródeł zainstalowanych w sieciach SN.

Wśród źródeł, które mogą mieć istotny wpływ na pojawianie się nietłumionych kołysań elektromechanicznych w sieciach średniego napięcia wymienić można między innymi elektrownie wiatrowe oraz biogazownie z silnikami spalinowymi [3, 12]. Elektrownie wiatrowe w czasie normalnej pracy można uznać za źródła o stosunkowo powolnych zmianach generowanej mocy. Odmianą sytuacja występuje, gdy prędkość wiatru przekracza dopuszczalną wartość. Wtedy turbina wiatrowa wyłącza się, powodując utratę mocy generowanej w danej części sieci. To z kolei powoduje skok napięcia i stan nieustalony w innych jednostkach wytwórczych przyłączonych do tej sieci, często związany z kołysaniami elektromechanicznymi. Z kolei źródła z silnikami spalinowymi zasilane biogazem mogą być przyczyną stanów nieustalonych, gdy pojawiają się zakłócenia w układzie zapłonowym lub dolotowym. W konsekwencji generator napędzany takim silnikiem może

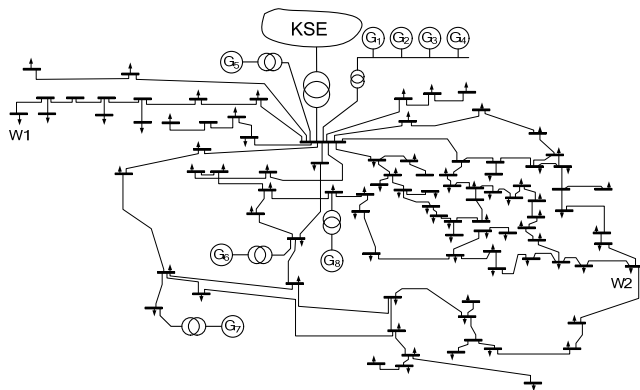
wykazywać znaczne wahania mocy, powodując stany nieustalone w sieci.

Dlatego konieczne jest prowadzenie badań mających na celu poszukiwanie rozwiązań, które ustabilizują pracę źródeł instalowanych w sieciach SN. Jednym z rozwiązań może być zastosowanie stabilizatorów systemowych. Problemem może być fakt, że źródła małej mocy (źródła rozproszone) często zarządzane są przez podmioty prywatne, które nie są zainteresowane montażem stabilizatorów systemowych w swoich jednostkach wytwórczych. Rozwiązaniem tego problemu mogą być układy do grupowego tłumienia kołysań elektromechanicznych [13]. Systemy te wymagają jednak dużej infrastruktury pomiarowej.

Jednym z rozwiązań może być zastosowanie jednego stabilizatora systemowego zainstalowanego w jednostce wytwórczej o największej mocy w danym fragmencie sieci elektroenergetycznej, np. w sieci średniego napięcia zasilanej z jednego transformatora.

Opis układu wielomaszynowego z generacją rozproszoną

W celu weryfikacji postawionej hipotezy i sprawdzenia poprawności doboru parametrów stabilizatora systemowego przedstawionego w pracy [9], rozważono sieć średniego napięcia o strukturze przedstawionej na rys. 1, stanowiącą fragment Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE).



Rys. 1. Uproszczony schemat analizowanej sieci średniego napięcia

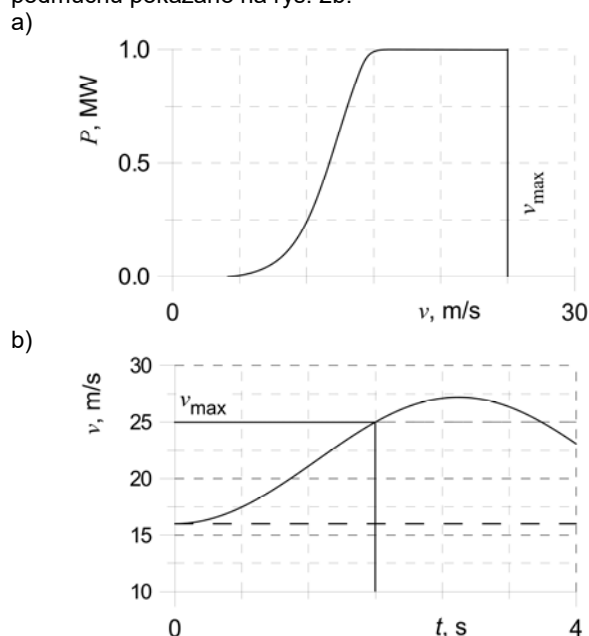
W sieci zainstalowano kilka źródeł wytwórczych o napięciu znamionowym 15 kV. Źródłem wytwórczym o największej mocy jest hybrydowa elektrownia wiatrowo-gazowa o łącznej mocy czynnej 6 MW. Elektrownia składa się z trzech elektrowni wiatrowych (G_1 , G_2 i G_3 na rys. 1) o mocy jednostkowej 1 MW z dwustronnie zasilanymi generatorami asynchronicznymi [12, 14] oraz jednej jednostki wytwórczej o mocy znamionowej 3 MW (G_4), składającej się z generatora synchronicznego oraz turbiny parowej zasilanej z kotła na biomasę. Dodatkowo do sieci przyłączone są cztery małe elektrownie wodne, jedna o mocy 1 MW (G_5) i trzy o mocy 0,5 MW (G_6 , G_7 i G_8).

Analizowana sieć składa się ze 181 węzłów i 191 linii. W sieci znajduje się 85 węzłów odbiorczych ze stacjami transformatorowymi SN/nn. Łączna długość linii w analizowanej sieci wynosi 60 km, w tym linie kablowe i napowietrzne.

Do badań symulacyjnych wykorzystano program PSLF. Modele matematyczne turbin, generatorów i układów wzbudzenia, w tym model matematyczny generatora synchronicznego GENROU, model statycznego układu wzbudzenia pracującego w KSE [15] oraz modele generatorów asynchronicznych zainstalowanych w

turbinach wiatrowych, przyjęto zgodnie ze standardami Komitetu IEEE [16]. Niezbędne dane, m.in. długości i przekroje linii, parametry transformatorów, uzyskano od Operatora Sieci Dystrybucyjnej. W badaniach symulacyjnych wykorzystano autorskie modele matematyczne opracowane w programie PSLF.

W badaniach symulacyjnych analizowano stany nieustalone spowodowane nagłym wyłączeniem generacji wszystkich trzech turbin wiatrowych wchodzących w skład elektrowni wiatrowo-gazowej (rys. 1). Przyjęto, że wyłączenie turbin wiatrowych było spowodowane przekroczeniem dopuszczalnej prędkości wiatru v_{max} . W związku z tym zamodelowano podmuch wiatru poprzedzający awaryjne wyłączenie turbin wiatrowych pracujących zgodnie z charakterystykami mocy (moc czynna P od prędkości wiatru v) przedstawionymi na rys. 2a. Turbiny wiatrowe wyłączano, gdy prędkość wiatru osiągnęła dopuszczalną prędkość turbin, co miało miejsce w czasie $t = 2$ s. Podmuch zamodelowano jako narastającą siłę wiatru zgodnie z funkcją sinusoidalną [17]. Przebieg prędkości wiatru w podmuchu pokazano na rys. 2b.



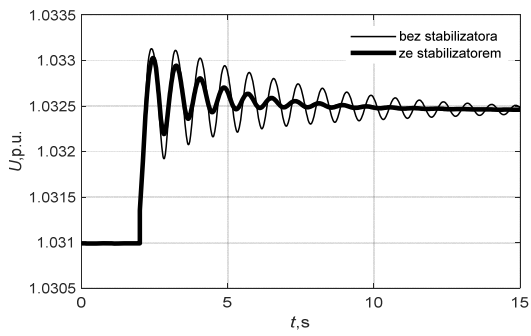
Rys. 2. Charakterystyka mocy turbin wiatrowych (a) oraz przebieg prędkości wiatru podczas podmuchu (b)

W rozpatrywanym przypadku łączna wyłączana moc czynna wyniosła 3 MW. Wyłączenie to spowodowało stan nieustalony w analizowanej sieci. Przebiegi wybranych wielkości otrzymane metodą symulacji komputerowej przedstawiono na rys. 3–7.

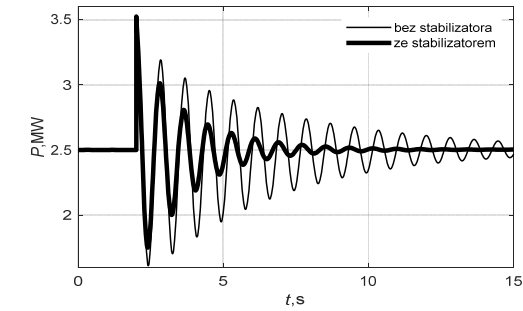
Na rys. 3 przedstawiono przebieg napięcia w głównym punkcie zasilania (GPZ) analizowanej sieci średniego napięcia.

Na rys. 4-6 pokazano przebiegi mocy chwilowych i napięć zaciskowych poszczególnych jednostek wytwórczych w dwóch przypadkach, tj. dla układu ze stabilizatorem systemowym PSS2A zainstalowanym w źródle G_4 oraz bez stabilizatora. Przebiegi mocy chwilowych i napięć na zaciskach generatorów G_6 i G_7 mają zbliżony kształt do przebiegów generatora G_5 , dlatego nie zostały pokazane na rysunkach. Na rys. 4c przedstawiono przebieg sygnału wyjściowego stabilizatora systemowego.

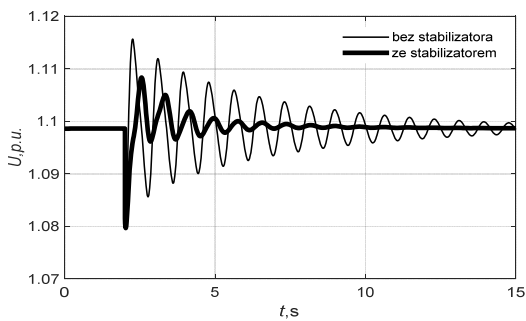
Dodatkowo na rys. 7 przedstawiono przebiegi napięć w dwóch wybranych węzłach sieci średniego napięcia ($W1$ i $W2$ zaznaczone na rys. 1).



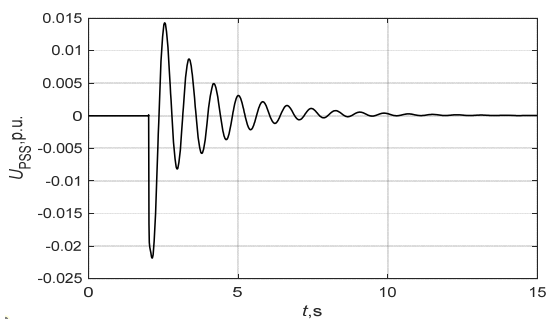
Rys. 3. Przebiegi napięcia w GPZ
a)



b)

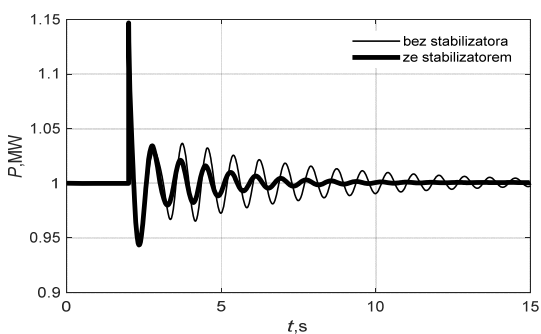


c)

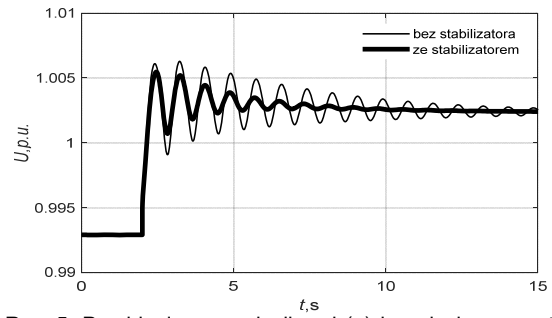


Rys. 4. Przebiegi: mocy chwilowej (a), napięcia generatora (b) i sygnału wyjściowego stabilizatora wyjściowego (c) w jednostce wytwórczej G_4

a)

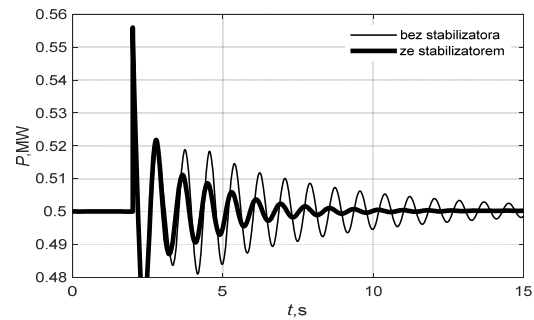


b)

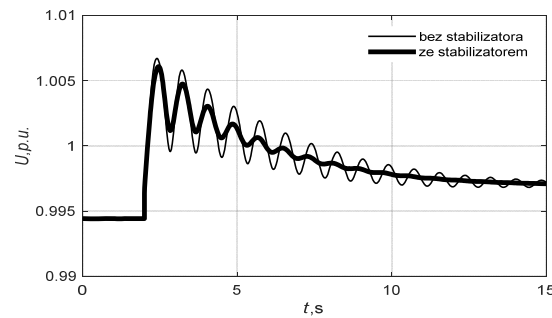


Rys. 5. Przebiegi: mocy chwilowej (a) i napięcia generatora (b) w jednostce wytwórczej G_5

a)

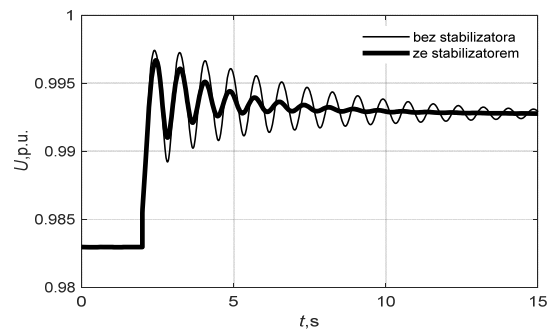


b)

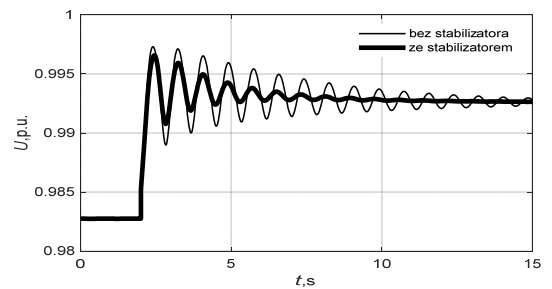


Rys. 6. Przebiegi: mocy chwilowej (a) i napięcia generatora (b) w jednostce wytwórczej G_8

a)



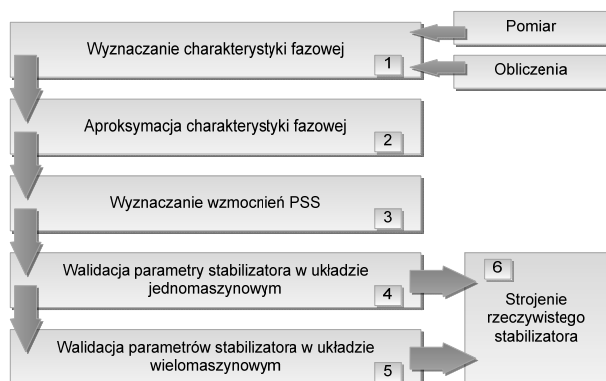
b)



Rys. 7. Przebiegi napięcia generatora w węzłach W1 (a) i W2 (b)

Podsumowanie i wnioski

W rozpatrywanej sieci SN z generacją rozproszoną zastosowanie jednego stabilizatora systemowego zainstalowanego w jednostce wytwórczej o największej mocy znamionowej pozwoliło na efektywne tłumienie kołysań elektromechanicznych mocy chwilowej we wszystkich jednostkach wytwórczych przyłączonych do tej sieci. Przebiegi regulacyjne napięcia w różnych miejscach SEE są również zadowalające i dobrze wytłumione. Dobre tłumienie kołysań elektromechanicznych uzyskano bez modyfikacji ustawień stabilizatora, które wyznaczono dla układu: zespół wytwórczy – sieć sztywna [9]. Zaproponowaną metodę doboru stabilizatora systemowego można przedstawić w postaci uproszczonego schematu blokowego jak na rys. 8, w którym poszczególnym blokom odpowiadają następujące działania:



Rys. 8. Schemat blokowy przedstawiający metodę wyznaczania parametrów stabilizatora systemowego

– Blok 1: Obliczenie charakterystyki fazowej funkcji przenoszenia G_{UU} lub G_{TU} [9] w zakresie częstotliwości elektromechanicznych od 0,1-2 Hz dla modelu układu jednomaszynowego, zespół wytwórczy – sieć sztywna, przy małym obciążeniu generatora. Obliczenia powinny uwzględniać rzeczywiste parametry modelu generatora i układu wzbudzenia. W miarę możliwości charakterystykę tę można wyznaczyć poprzez pomiar według schematu przedstawionego w [9].

– Blok 2: Obliczenie stałych czasowych korektora stabilizatora systemowego poprzez aproksymację charakterystyki fazowej transmitancji G_{UU} lub G_{TU} i spełnienie warunku kompensacji [9] w zakresie częstotliwości kołysań elektromechanicznych.

– Blok 3: Wyznaczenie wartości własnych macierzy stanu zlinearyzowanego modelu układu jednomaszynowego dla obciążenia znamionowego generatora przy zmienianej wartości współczynnika wzmocnienia K_{S1} stabilizatora systemowego. Obliczenie wzmocnienia K_{S1} poprzez analizę położenia wartości własnych macierzy na płaszczyźnie zespolonej. Wprowadzenie stabilizatora systemowego do układu powinno przesunąć w lewo elektromechaniczne wartości własne na płaszczyźnie zespolonej bez znaczącego przesunięcia pozostałych wartości własnych w prawo.

– Blok 4: Przeprowadzenie badań symulacyjnych w celu sprawdzenia poprawności działania stabilizatora systemowego w układzie jednomaszynowym.

– Blok 5: Modelowanie systemu wielomaszynowego, m.in. sieci średniego napięcia z generacją rozproszoną i wprowadzenie stabilizatora systemowego o wcześniej określonych parametrach do jednostki synchronicznej o najwyższej mocy znamionowej. Przeprowadzenie różnych badań symulacyjnych w celu sprawdzenia poprawności działania stabilizatora w układzie wielomaszynowym.

– Blok 6: Analiza pracy rzeczywistego SEE z zainstalowanym stabilizatorem systemowym.

Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy oraz w pracy [9] mogą stanowić podstawę do dalszych analiz mających na celu określenie zakresu zastosowania przedstawionej metody tłumienia kołysań elektromechanicznych w sieci rozdzielczej z zainstalowanymi źródłami rozproszonymi. Z przedstawionych wyników oraz badań przeprowadzonych dla sieci przesyłowych wysokiego napięcia [11] wynika, że nie jest konieczne stosowanie stabilizatorów systemowych we wszystkich zespołach wytwórczych. Jednak takie uogólnienie wymaga dalszych badań, m.in. dotyczących analizy modalnej rozpatrywanej sieci i optymalizacji miejsc instalacji stabilizatorów w SEE [18]. W celu poprawy tłumienia kołysań elektromechanicznych możliwa jest również optymalizacja lub polioptymalizacja współczynników wzmocnienia K_{S1} stabilizatorów systemowych, gdy zastosowano ich więcej w wielomaszynowym SEE [10, 11].

LITERATURA

1. Izdebski M.: *Weryfikacja wymagań odbiorczych stawianych układom regulacji napięcia generatorów synchronicznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk, 2019.
2. Tuttokmagi O., Kaygusuz A.: *Transient Stability Analysis of a Power System with Distributed Generation Penetration*. In Proceedings of the 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 154-158.
3. Campos-Gaona D., Stock A., Anaya-Lara O., Leithead W.: *Dynamic Wind Power Plant Control for System Integration Using the Generator Response Following Concept*. Energies 2020, 13(7), doi: 10.3390/en13071804.
4. Piekarz M., Robak S.: *Stability Studies of Offshore Grids*. Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, 2018, . 1-6.
5. Basler M.J., Schaefer R.C.: *Understanding Power System Stability*. IEEE Trans. on Industry Applications 2008, 44(2), pp. 463-474.
6. Thambirajah J., Barocio E., Thornhill N.F.: *Comparative review of methods for stability monitoring in electrical power systems and vibrating structures*. IET Generation, Transmission & Distribution 2010, 4(10), pp. 1086-1103.
7. Belaidi R., Bakdi M.: *Control and modelling of multi-machine power system stabilizer with FACTS*. Przegląd Elektrotechniczny, 98(2022) nr. 4, 12-15.
8. Dehiba I., Abid M., Aissaoui A., Dehiba B.: *Robust control of power system stabilizer using sliding mode approach*. Przegląd Elektrotechniczny, 97(2021) nr. 10, 82-86.
9. Paszek S., Pruski P., Nocoń A.: *Metody wyznaczania stałych czasowych członów korekcyjnych stabilizatorów systemowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 100 (2024), nr 1, 249-254
10. Paszek S., Nocoń A.: *Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters*; Lambert: Saarbrücken, 2014.
11. Paszek S., Nocoń A.: *Parameter polyoptimization of PSS2A power system stabilizers operating in a multi-machine power system including the uncertainty of model parameters*. Applied Mathematics and Computation 2015, 267, pp. 750-757.
12. Kumar V., Pandey A. S., Sinha S. K.: *Stability Improvement of DFIG-Based Wind Farm Integrated Power System Using ANFIS Controlled STATCOM*. Energies 2020, 13/18, doi: 10.3390/en13184707.
13. Kamwa I., Grondin R.: *PMU configuration for system dynamic performance measurement in large, multiarea power systems*. IEEE Trans. on Power Systems 2002, 17, no. 2, pp. 385-394.
14. Tsourakis G., Nanou S., Vournas C. A.: *Power System Stabilizer for Variable-Speed Wind Generators*. IFAC Proceedings Volumes 2011, 44, Issue 1, pp. 11713-11719.
15. Paszek S., Boboń A., Berhausen S., Majka Ł., Nocoń A., Pruski P.: *Synchronous generators and excitation systems operating in a power system. Measurements methods and modeling*, Monograph, series: Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 631; Springer: Cham, 2020.
16. Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc.: *Program PSS/E application guide*. Siemens Power Technologies Inc.
17. Bierbooms W., Dragt J. B.: *Verification of the Mean Shape of Extreme Gusts*. Wind Energy 1999, 2, pp. 137 – 150.
18. Pruski P., Paszek S.: *Location of generating units most affecting the angular stability of the power system based on the analysis of instantaneous power waveforms*. Archives of Control Science 2020, 30, No 2, pp. 273-293.