

Dominik Szuster, Adrian Nocoń
Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki i Informatyki

WPLYW PARAMETRÓW SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ŚREDNIEGO NAPIĘCIA NA STANY PRZEJŚCIOWE GENERATORÓW ŹRÓDEŁ ROZPROSZONYCH – ANALIZA WRAŻLIWOŚCI

INFLUENCE OF MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK PARAMETERS ON TRANSIENT STATES OF DISTRIBUTED GENERATORS – SENSITIVITY ANALYSIS

Abstract: The presented investigations deal with the analysis of transient waveforms of distributed sources connected to the medium voltage distribution network. The paper presents analysis results of the influence of the distribution network mathematical model parameters on the transient states of these sources. The investigations were performed based on the sensitivity theory. Synthetic, integral indicators were used for assessment of the influence of the network model parameters. In the investigations conducted there were applied nonlinear mathematical models of the power system elements. Moreover, the uncertainty of the distributed source model and distribution network parameters was taken into account.

1. Wstęp

W obecnych czasach można wyraźnie zaobserwować wzrost zainteresowania źródłami rozproszonymi. Jest to spowodowane chęcią ograniczenia emisji szkodliwych gazów (między innymi CO₂, NO_x) poprzez wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych (np. mikro elektrowni wodnych), a także dążeniem do zwiększenia bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju dzięki wzrostowi udziału generacji rozproszonej w strukturze wytwarzania energii [7]. Źródła rozproszone, które charakteryzuje niewielka moc (do 5MW) najczęściej instalowane są w sieci rozdzielczej średniego napięcia.

Występujące w sieci zakłócenia mogą niekorzystnie wpływać na pracę poszczególnych źródeł rozproszonych np. powodując utratę ich stabilności a w konsekwencji awaryjne wyłączenie źródła. W związku z tym konieczne stają się badania stanów dynamicznych systemu elektroenergetycznego (SEE) z uwzględnieniem generacji rozproszonej [7]. Badania te mogą być podstawą do projektowania układów regulacji źródeł rozproszonych, np. stabilizatorów systemowych. Badania stanów zakłóceńowych należy przeprowadzić w oparciu o wiarygodne parametry modeli matematycznych elementów systemu elektroenergetycznego (źródeł rozproszonych i sieci dystrybucyjnej) [3]. Przy czym wyznaczenie parametrów modeli matematycznych następuje zazwyczaj na drodze estymacji metodami numerycznymi [6]. Przy tak przyjętej metodologii badań zasadne staje się poszukiwanie parametrów, których

wartości mają największy i najmniejszy wpływ na końcowe wyniki analizy. Po określeniu tychże parametrów możliwe stają się badania, w których dokładnie wyznacza się parametry o największym znaczeniu (wpływie na analizowane przebiegi przejściowe) a pozostałe parametry określa się w sposób przybliżony. Tak skonstruowany model pozwala w znaczny sposób ograniczyć nakłady pracy na dokładną estymację wszystkich (znaczących i mniej znaczących) parametrów.

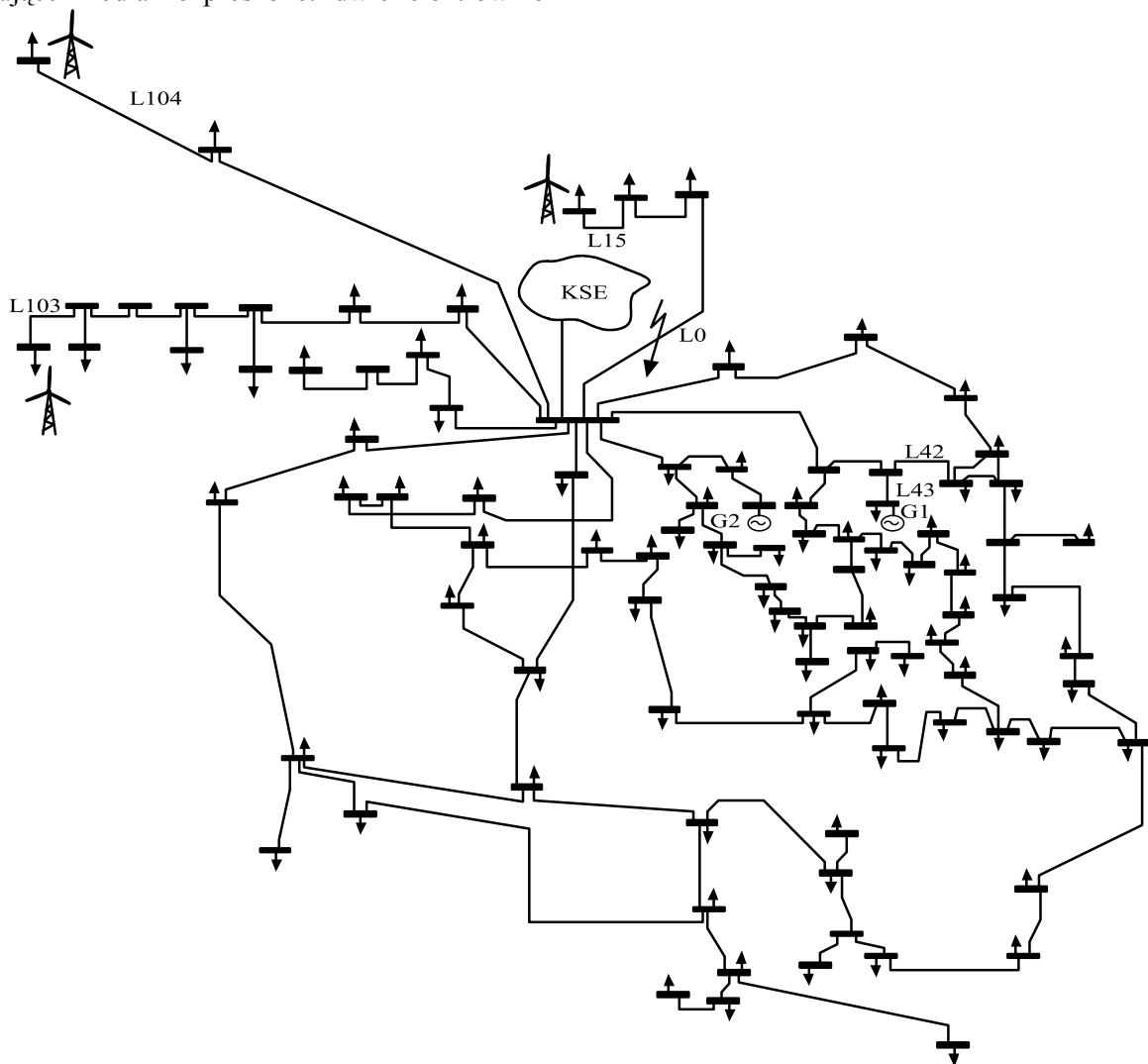
Wyznaczenie znaczących i mniej znaczących parametrów modeli matematycznych powinno dotyczyć wszystkich elementów analizowanego systemu (generatorów, układów regulacji i sieci elektroenergetycznej). Ze względu na mnogość parametrów w niniejszym artykule przedstawiono jedynie wyniki analizy wpływu parametrów modelu matematycznego sieci dystrybucyjnej na stany przejściowe generatorów źródeł rozproszonych. Analizę w odniesieniu do parametrów generatorów przedstawia praca [4].

W prezentowanych badaniach określenie bardziej i mniej znaczących parametrów sieci dystrybucyjnej przeprowadzono w oparciu o teorię wrażliwości. Do oceny wpływu parametrów modelu sieci wykorzystano syntetyczne wskaźniki całkowite. W przeprowadzanych badaniach zastosowano nieliniowe modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego. Ponadto uwzględniono niepewność parametrów modeli matematycznych (źródeł rozproszonych i sieci dystrybucyjnej), dla których wyznaczana była wrażliwość.

2. Model matematyczny analizowanego systemu elektroenergetycznego

W prezentowanej pracy, jako przedmiot badań symulacyjnych został wykorzystany model sieci rozdzielczej 15kV będącej fragmentem Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Strukturę sieci pokazano na rys. 1 [2]. Model analizowanego SEE składał się z 181 węzłów, 191 linii i 85 odbiorników. Przyjęto, że w rozpatrywanym systemie zainstalowane są następujące źródła rozproszone: dwie elektrownie

wodne o mocy 1MW każda, które pracują znamionowo (oznaczone na rys. 1, jako G1 i G2) i trzy elektrownie wiatrowe o mocy 1,65 MW z generatorami asynchronicznymi sterowanymi poprzez zmianę rezystancji w odwodzie wirnika. Siłownie te oddają do sieci 60% swojej mocy znamionowej. Analizowana sieć zawiera także zastępczy zespół wytwórczy reprezentujący w sposób uproszczony dynamikę pozostałej części KSE.



Rys. 1. Schemat strukturalny sieci rozdzielczej SN

W badaniach symulacyjnych wykorzystano uwzględniające nieliniowość następujące modele źródeł rozproszonych:

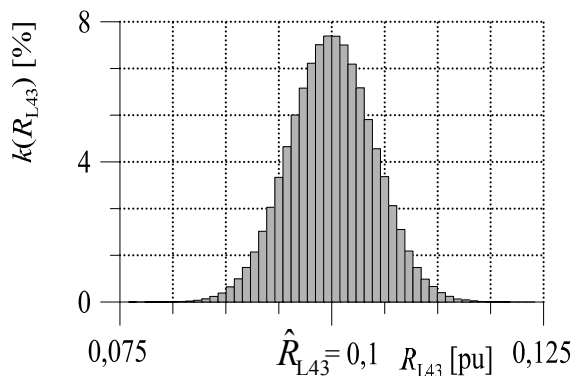
- zespół reprezentujący ekwiwalent KSE zamodelowano modelem typu GENCLS,
- zespoły hydroelektrowni – modelami typu: GENSAL (generator), EXST1 (układ

wzbudzenia), HYG0V (turbina wodna),

- zespoły elektrowni wiatrowych – modeli typu: GENWRI (generator asynchroniczny), EXWTG1 (układ regulacji), WNDTRB (turbina wiatrowa).

Oprócz tego zamodelowano transformator 110 kV / 15 kV łączący sieć dystrybucyjną

z krajowym systemem elektroenergetycznym, transformatory 15 kV / 0,4 kV zasilające odbiorcy niskiego napięcia oraz sieć elektroenergetyczną. Model matematyczny sieci elektroenergetycznej określają wartości rezystancji i reaktancji poszczególnych gałęzi. Zakładając, że parametry modeli matematycznych źródeł rozproszonych i sieci dystrybucyjnej wyznaczane są ze skończoną dokładnością, w przeprowadzonych badaniach uwzględniono niepewność niektórych parametrów modeli źródeł rozproszonych, ekwiwalentu systemu elektroenergetycznego i sieci dystrybucyjnej. Przy czym parametry uwzględniające niepewność to: przejściowa stała czasowa w osi d generatora G1 - T_{d0G1} , reaktancja przejściowa w osi d generatora G1 - X_{dG1} , stała czasowa inercji zespołu wytwórczego G1 - H_{G1} , przejściowa stała czasowa w osi d generatora G2 - T_{d0G2} , reaktancja przejściowa w osi d generatora G2 - X_{dG2} , stała czasowa inercji zespołu wytwórczego G2 - H_{G2} , stała czasowa inercji zespołu wytwórczego reprezentującego ekwiwalent KSE - H_{PS} oraz parametry sieci, tj. rezystancje i reaktancje linii L0, L15, L42, L43, L103 i L104 (rys. 1). Uwzględnienie niepewności parametrów wyżej wymienionych modeli uzyskano poprzez zastąpienie konkretnych ich wartości x_i rozkładem normalnym prawdopodobieństwa wystąpienia danej wartości parametru $k(x_i)$ o zakresie $\pm 25\%$, dla którego wartością średnią \hat{x}_i jest wartość x_i [1], [4]. Dla modelu uwzględniającego niepewność parametrów badania symulacyjne przeprowadzono poprzez wielokrotne powtarzanie obliczeń przy losowo wybieranych wartościach parametrów zgodne z założonym rozkładem prawdopodobieństwa [3]. Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa dla rezystancji linii L43 pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład prawdopodobieństwa dla rezystancji linii L43

3. Analiza wrażliwości wybranych przebiegów dynamicznych na zmiany parametrów sieci dystrybucyjnej

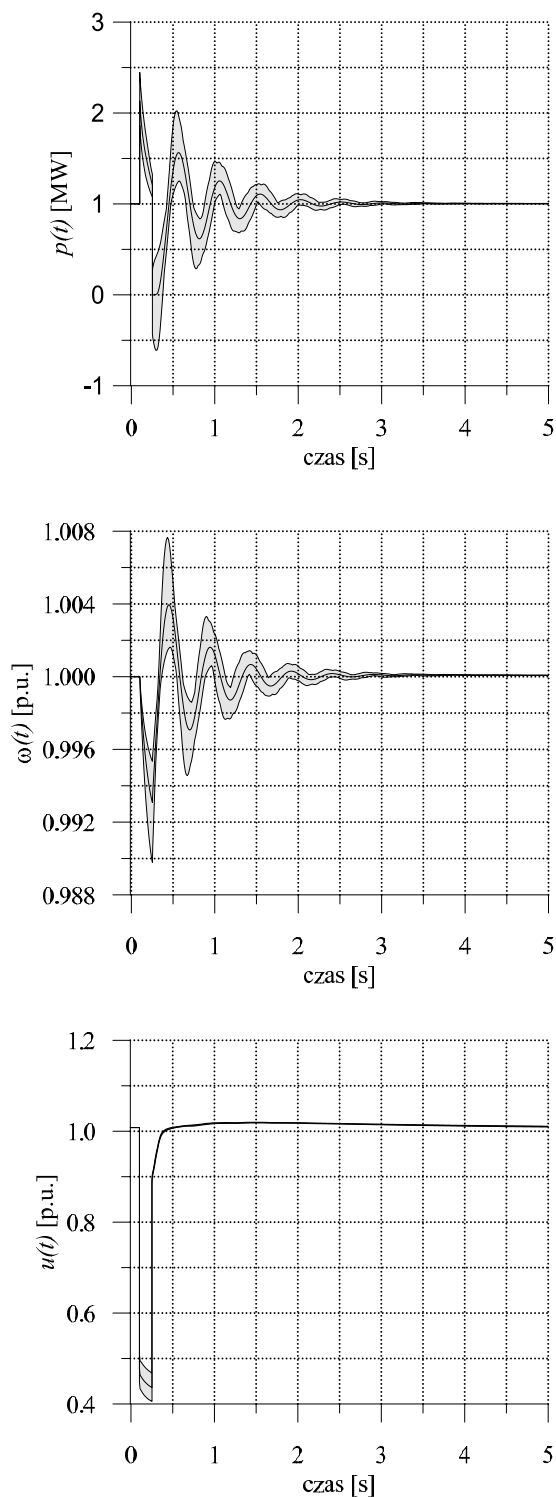
W niniejszym artykule badano wpływ zmian parametrów modelu sieci, dla których uwzględniono niepewność, na przebiegi wielkości związanych ze stabilnością SEE w stanach przejściowych źródła rozproszonego G1. Przebiegami tymi były: odchyłki mocy chwilowej $\Delta p(t)$, odchyłki napięcia zaciskowego $\Delta u(t)$ oraz zmiany prędkości wirowania $\Delta \omega(t)$. Uzyskano je w stanach dynamicznych spowodowanych nagłym wyłączeniem wszystkich siłowni wiatrowych oraz dla przemijającego zwarcia w linii L0 zaznaczonej na rys. 1. Do oceny wrażliwości wybranych przebiegów na zmiany parametrów sieci wykorzystano wrażliwość półwzględną. Ze względu na czasowe uzależnienie wartości wrażliwości przyjęto całkowite wskaźniki wrażliwości:

$$Sq_1(t) = \int_0^t \left| \frac{\partial q(t)}{\partial x_i} \right| \cdot x_i \cdot dt \quad (1)$$

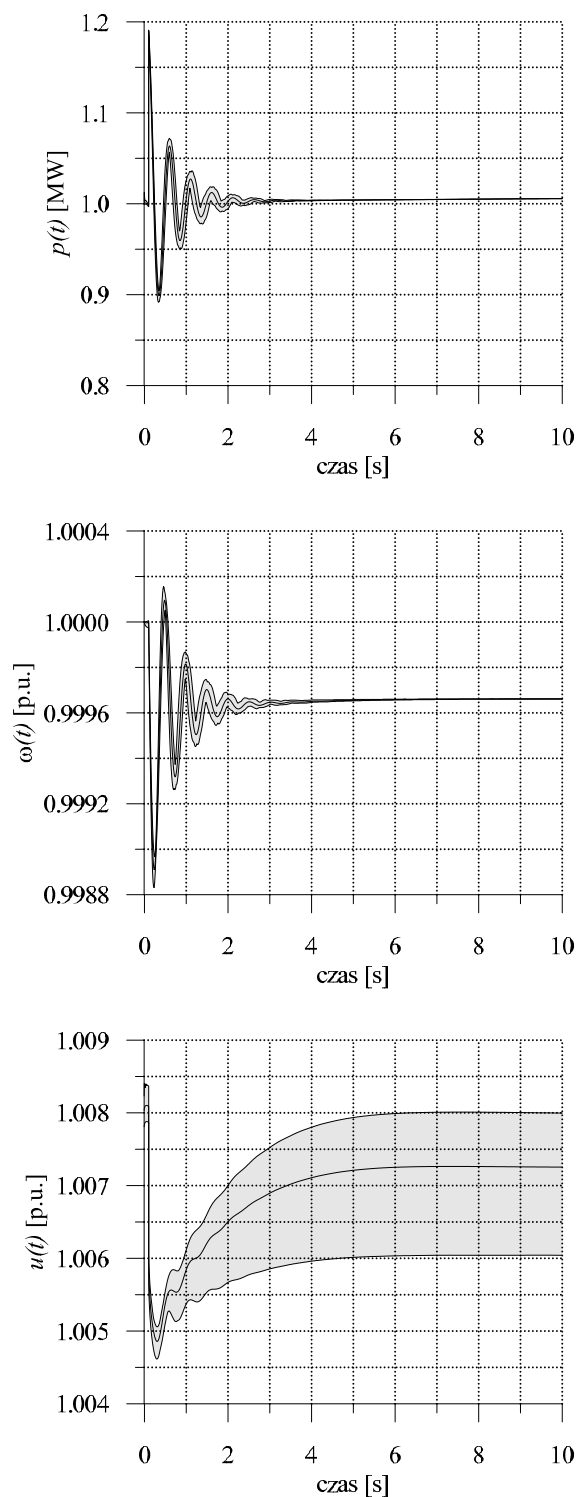
$$Sq_2(t) = \int_0^t \left(\frac{\partial q(t)}{\partial x_i} \cdot x_i \right)^2 dt \quad (2)$$

gdzie: $q(t)$ – przebieg dla którego wyznaczana jest wrażliwość ($\Delta p(t)$, $\Delta u(t)$ lub $\Delta \omega(t)$), x_i – wartość parametru względem którego wyznaczana jest wrażliwość, t – czas analizy stanu przejściowego [3]. W wyniku badań symulacyjnych uwzględniających niepewność parametrów modeli otrzymano pasma przebiegów wybranych wielkości (mocy, napięcia i prędkości wirowania) oraz pasma wrażliwości. Przy czym wszystkie uzyskane pasma określone są poprzez przebiegi graniczne (maksimum i minimum) a także wartość średnią.

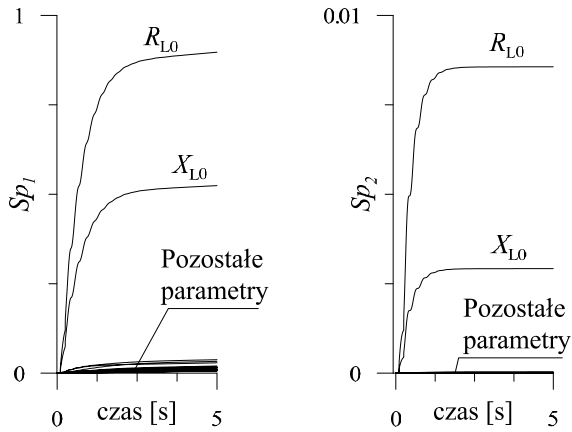
Badania przeprowadzono w oparciu o zestaw 100 wylosowanych parametrów zgodnie z rozkładem normalnym prawdopodobieństwa. Pasma przebiegów mocy chwilowej, prędkości wirowania i napięcia zaciskowego dla zespołu wytwórczego G1 przedstawiono na rys. 3 przy zwarcia w linii L1 oraz na rys. 4 przy wyłączenia generacji farm wiatrowych. Na rys. od 5 do 10 przedstawiono przebiegi wskaźników wrażliwości (1) i (2), odpowiednio dla zwarcia i wyłączenia generacji siłowni wiatrowych. Przy czym ze względu na czytelność rysunków na wykresach tych przedstawiono tylko wartości średnie wskaźników wrażliwości.



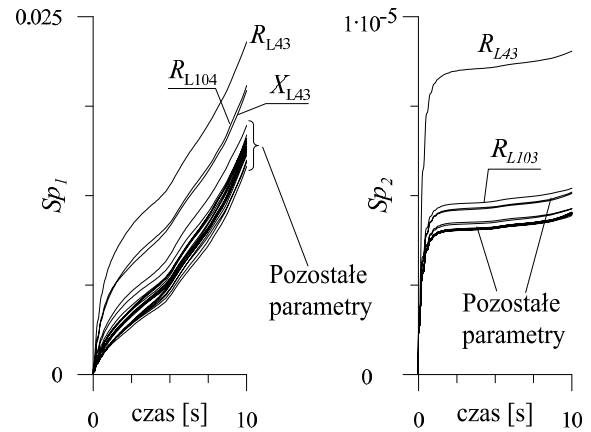
Rys.3. Pasma przebiegów mocy chwilowej $p(t)$, prędkości wirowania $\omega(t)$ i napięcia zaciskowego $u(t)$ generatora G1 przy zwarciu w linii L0



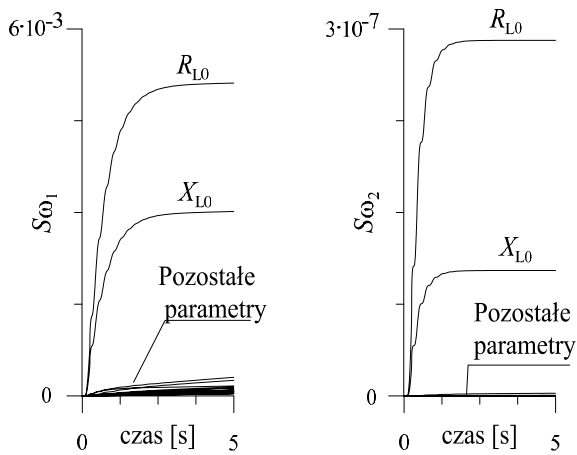
Rys.4. Pasma przebiegów mocy chwilowej $p(t)$, prędkości wirowania $\omega(t)$ i napięcia zaciskowego $u(t)$ generatora G1 przy wyłączeniu siłowni wiatrowych



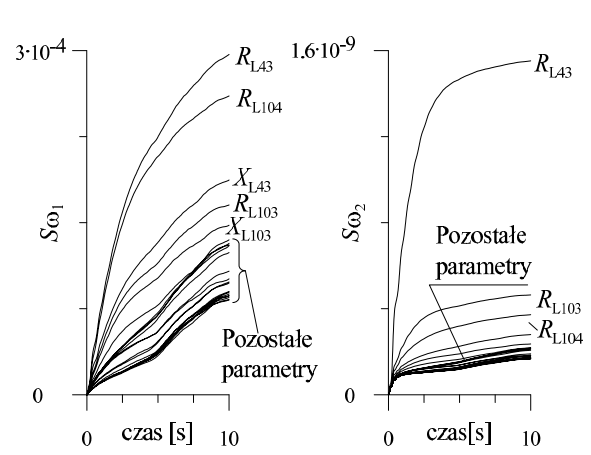
Rys.5. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $Sp(t)$ generatora G1 przy zwarciu w linii L0



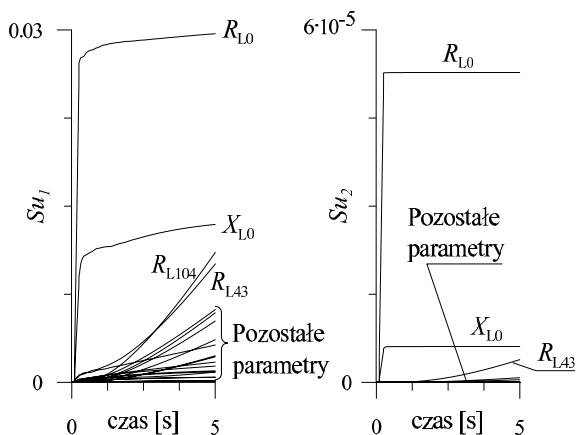
Rys.8. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $Sp(t)$ generatora G1 przy wyłączeniu generacji siłowni wiatrowych



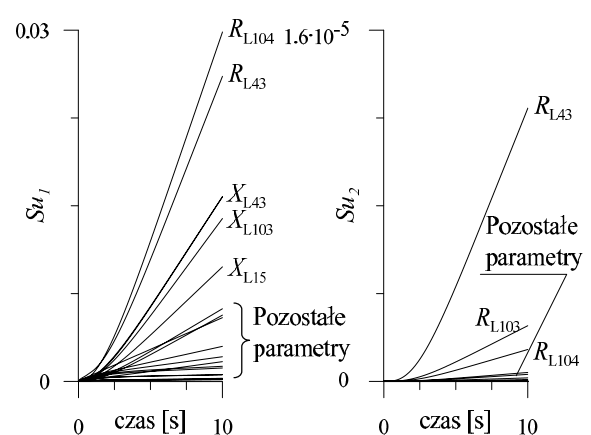
Rys.6. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $S\omega(t)$ generatora G1 przy zwarciu w linii L0



Rys.9. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $S\omega(t)$ generatora G1 przy wyłączeniu generacji siłowni wiatrowych



Rys.7. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $Su(t)$ generatora G1 przy zwarciu w linii L0



Rys.10. Przebiegi średniej wartości wskaźników wrażliwości mocy chwilowej $Su(t)$ generatora G1 przy wyłączeniu generacji siłowni wiatrowych

4. Wnioski

Z przedstawionych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Na przebiegi wyjściowe generatora G1 (odchyłki mocy czynnej i prędkości obrotowej) podczas symetrycznego zwarcia szczególnie wpływają rezystancja i reaktancja linii, w której to zwarcie wystąpiło. Przebieg napięcia zaciskowego dodatkowo wrażliwy jest na rezystancję linii, która łączy generator z siecią - R_{L43} . Z kolei w przypadku wyłączenia elektrowni wiatrowych duży wpływ na wszystkie analizowane przebiegi mają parametry linii, która łączy generator z siecią (a szczególności jej rezystancja), a także parametry linii, do których przyłączane są farmy wiatrowe.
- W celu oceny współpracy generatora z systemem elektroenergetycznym (w szczególności jego stabilności dynamicznej) należy znać wiarygodne parametry sieci. Jednakże z przeprowadzonych badań wynika, że nie wszystkie parametry sieci jednakowo wpływają na stany przejściowe generatora. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że największe znaczenie mają parametry linii łączącej generator z siecią oraz parametry linii, w której wystąpiło zakłócenie.
- Zastosowanie modeli z uwzględnieniem niepewności parametrów generatora źródła rozproszonego i sieci elektroenergetycznej wymaga dokonania oceny wagi poszczególnych parametrów i pozwala na analizę stanów przejściowych generatora w sieci przy mniejszym nakładzie kosztów (głównie na estymację parametrów).
- W celu poprawnego doboru układów regulacji generatorów źródeł rozproszonych, w tym stabilizatorów systemowych, konieczne staje się wyznaczenie dokładnego modelu i parametrów sieci, do której źródło zostało przyłączone. Ze względu na trudności z wyznaczeniem wiarygodnych parametrów, do modelowania sieci można wykorzystać modele z uwzględnieniem niepewności. Jednakże wymaga to dalszych badań ze względu na konieczność uwzględnienia tejże niepewności w algorytmie optymalizacyjnym.

5. Literatura

- [1] Nocoń A., Pasko M., Paszek S.: *Sensitivity analysis including uncertainty of synchronous generator model parameters*. 9th International Conference Control of Power Systems'10, Tatranské Matliare, Slovak Republic, June 2010, pp. 105-128.
- [2] Kacejko P., Adamek S., Pijarski P.: *Ocena oddziaływania generacji rozproszonej na statyczne wskaźniki jakości napięcia w terenowych sieciach rozdzielczych*. XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowa APE'09, Jurata 2009, materiały konferencyjne tom IV, ss. 87-96.
- [3] Nocoń A., Szuster D.: *Distributed source mathematical model including parameter uncertainty*. 33th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, SPETO'2010, Ustroń May 2010, pp. 35-37.
- [4] Nocoń A., Paszek S., Bojarska M.: *Analiza wrażliwości przebiegów zakłóceń z uwzględnieniem niepewności parametrów modelu systemu elektroenergetycznego* XIV Międzynarodowa Konferencja Naukowa APE'11, Jurata 2011, materiały konferencyjne (w druku)
- [5] Paszek S.: *Optymalizacja stabilizatorów systemowych w systemie elektroenergetycznym* Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej seria Elektryka z. 161, Gliwice 1998.
- [6] Majka, Ł., Paszek, S. (2008): *Measurement-based model parameter estimation for electrical part of Rybnik power plant generating unit*, Pr. Nauk. PŚl. Elekt. 2008 R. 54 z. 2 (206), pp. 67-77.
- [7] Popczyk J., Paszek S., Nocoń A., Kraszewski T.: *Projekt badawczy zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006*, Raporty z realizacji zadań za 2007 i 2008r, Gliwice 2007, 2008 r.

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.

Autorzy

Mgr inż. Dominik Szuster, Dr inż. Adrian Nocoń, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10A, tel.: (32)-237-25-22, dominik.szuster@polsl.pl, adrian.nocoon@polsl.pl

Recenzent

Dr hab. inż. Michał Zeńczak