

Estimation of the Influence of Power System Mathematical Model Parameter Uncertainty on PSS2A System Stabilizers

Authors

Adrian Nocoń
Stefan Paszek

Keywords

power system, power system stabilizers, polyoptimisation, parameter uncertainty

Abstract

This paper presents an analysis of the influence of uncertainty of power system mathematical model parameters on optimised parameters of PSS2A system stabilizers. Optimisation of power system stabilizer parameters was based on polyoptimisation (multi-criteria optimisation). Optimisation criteria were determined for disturbances occurring in a multi-machine power system, when taking into account transient waveforms associated with electromechanical swings (instantaneous power, angular speed) and terminal voltage waveforms of generators. A genetic algorithm with floating-point encoding, tournament selection, mean crossover and perturbative mutations, modified for the needs of investigations, was used for optimisation. The impact of uncertainties on the quality of operation of power system stabilizers with optimised parameters has been evaluated using various deformation factors.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015305

Introduction

Power system stabilizers (PSSs) are to damp low-frequency electromechanical swings of synchronous generator rotors [1, 3, 4]. Stabilizers damp electromechanical swings through appropriate control of the excitation voltage, and indirectly, of the electromagnetic torque of a synchronous generator [1, 4]. In the investigations, there were analysed two-input PSS2 system stabilizers recommended by the IEEE committee. Their structure and properties are discussed in more detail in [4]. Fig. 1 shows the structural diagram of the stabilizer.

The investigations were performed for a 7-machine CIGRE power system presented in Fig. 2. After assuming appropriate models and system element parameters, it turned out that the system was unstable. The instability is due to, among other things, the use of static excitation systems (controlled by fast voltage regulators with high gain) in voltage regulation systems of synchronous generators (operating close to the rated state). Therefore, it was assumed that each generating unit was equipped with a power system stabilizer.

For simplicity, only gains K_{S1} of all stabilizers were the subject of polyoptimisation [2, 3, 4]. The other parameters were arbitrarily assumed on the basis of the analyses presented in reference literature [3, 4]. The optimisation employed a genetic algorithm with floating-point encoding, multi-criteria tournament selection, modified simple crossover and non-uniform mutation [2, 4]. In addition, the impact of parameter uncertainties of the

system mathematical model on the performance of the optimised stabilizers was analysed. The uncertainty impact was evaluated for selected parameters of mathematical models for all optimal solutions, using the compromise set deformation factors developed for the purpose of the analysis [2].

Mathematical model of the analysed system

The mathematical model of the analysed multi-machine power system (Fig. 2) was developed in a Matlab environment. In the calculations, it was assumed that the GENROU nonlinear model (when taking into account saturation of the magnetic circuit) represented the synchronous generators in all generating nodes, the non-linear model of the Polish national static excitation system represented the excitation systems and the IEEEG1 steam turbine model represented the turbines [4]. The state equations of particular generating units were associated with the power network voltage-current equations by using relative network quantities for the generator state equations, and by transformation of the generator stator currents and voltages to a common coordinate system rotating with the angular speed equal to the average electrical angular speed of all the synchronous machines, under steady-state conditions. The relative network quantities were determined when assuming a common reference power (base power) for all the generating units $S_{ref} = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ [4].

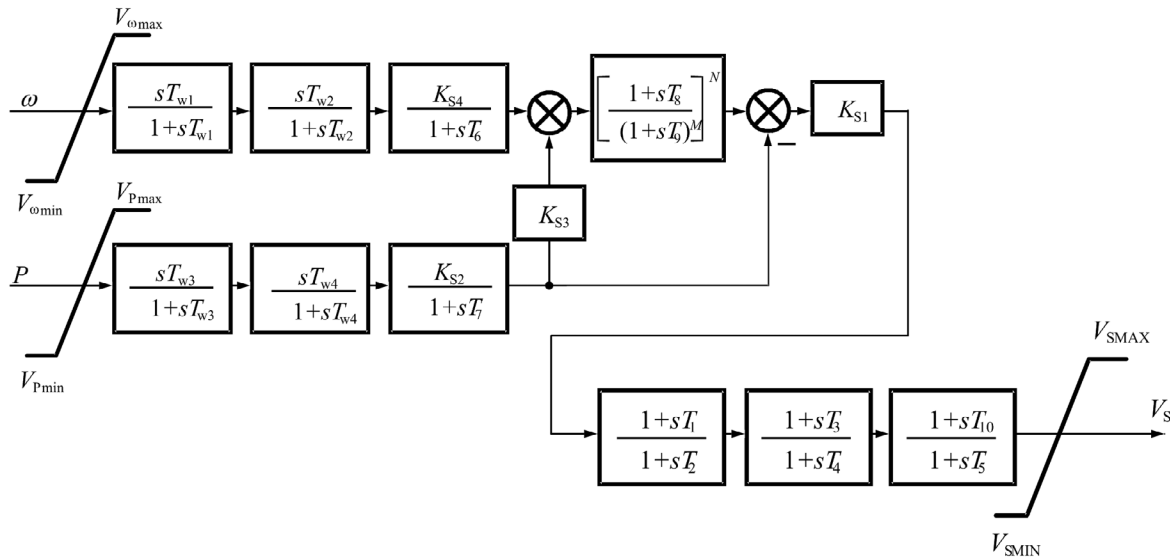


Fig. 1. Structural diagram of the two-input PSS2A system stabilizer

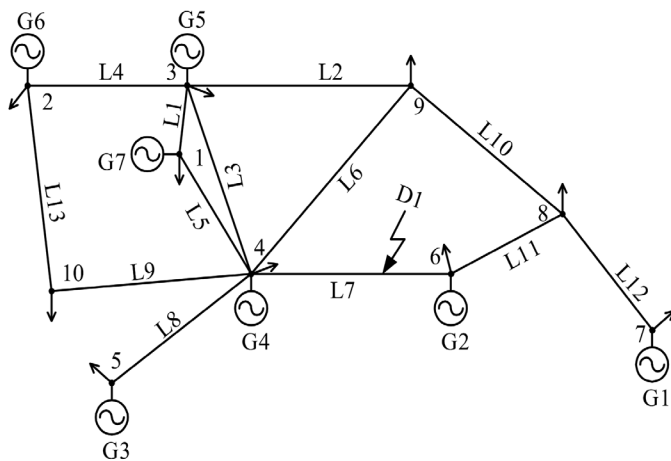


Fig. 2. Schematic diagram of the 7-machine CIGRE power system

Polyoptimisation of PSS2 stabilizer parameters

Due to the complexity of the phenomena in the power system, the process of power system stabilizer parameter optimisation should take into account many, sometimes contradictory, criteria associated with the damping of electromechanical swings and limitation of voltage changes in individual generating units, during various disturbances of the steady state [3, 4]. This problem can be solved by multi-criteria optimisation [2, 4]. In polyoptimisation there is a vector criterion (instead of one objective function), in which one can take into account not only different criteria quantities for a selected transient state (e.g. deviations of power or terminal voltage of a generator), but also additional criteria quantities for various transient states (e.g. terminal voltage waveforms for different short-circuit locations). However, expanding the vector criterion increases its size, and the result becomes less clear. Therefore in this paper,

the index dimension is limited to 3. The transient state associated with a symmetrical short-circuit in line L7 (D1 in Fig. 2) of duration equal to 0.25 s is analysed, when assuming the optimisation criterion in the following form:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_\omega \\ Q_V \\ Q_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta\omega_{ij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta V_{Tij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta P_{ij}| \end{bmatrix} \quad (1a)$$

where:

$$w_{pi} = \frac{n_i S_{Ni}}{S_{\max}} \quad (1b)$$

$\Delta\omega_{ij}$, ΔV_{Tij} , ΔP_{ij} – deviations of the angular speed, generator voltage, and active power (instantaneous) of the i -th generating unit for short-circuit D1 (Fig. 2) at j -th time instants; n_i – number of generators in i -th unit; S_{Ni} – rated apparent power of a single synchronous generator in the i -th generating unit; S_{\max} – rated apparent power of the unit that generates the highest apparent power in the power system; n – number of generating units in the power system (in the CIGRE power system $n = 7$).

A genetic algorithm with floating-point encoding, multi-criteria tournament selection, modified simple crossover and non-uniform mutation developed for the purpose of the research was used for optimisation of the objective function (1a) [3]. Three components of the vector quality factor were assumed for the optimisation. Therefore the optimisation results are plotted as a 3D diagram (Fig. 3) and as projections of the points of the compromise set to the coordinate systems corresponding to particular pairs of the criteria (Fig. 4).

Impact of parameter uncertainty on the optimal solutions

A power system is a dynamic and non-stationary object, and changes in its parameters are often stochastic. Therefore, the power system performance analysis requires taking into account different sources of uncertainty occurring in the system [6]. One such source is the lack of reliable parameters of the mathematical models of system components. It is important for power system simulation tests, also for its polyoptimisation, to determine how this uncertainty affects power system stabilizers with optimised parameters, and more specifically – on the assumed quality criterion [4, 6].

In the general case, any change of the mathematical model parameters results in a change of the assumed criterion value. For the purpose of further analysis, there was introduced the concept of the compromise set deformation caused by the occurrence of uncertainty. The compromise set deformation is a measure of the impact of changes in model parameters (parameter uncertainty) on the assumed quality criterion. In order to determine the compromise set deformation, repeated simulations were performed of the analysed power system at constant parameters of the optimised power system stabilizers and changed other

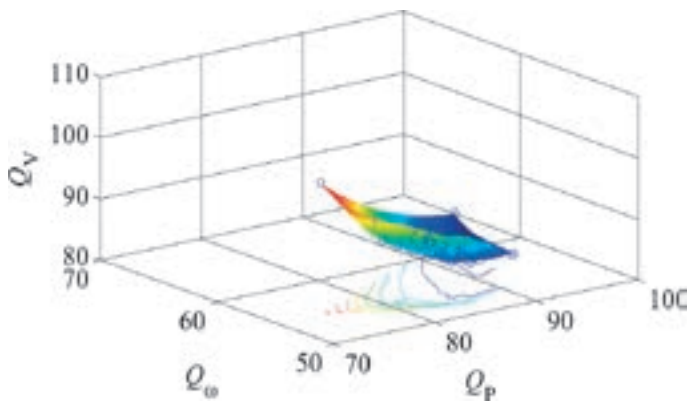


Fig. 3. The three-dimensional set of compromises

Fig. 5 shows the waveforms of instantaneous power, deviations of angular speed and terminal voltage in unit G6 (Fig. 2) at short-circuit D1 in transmission line L7. These waveforms refer to specific points of the compromise set, i.e. points A and B marked in Fig. 4.

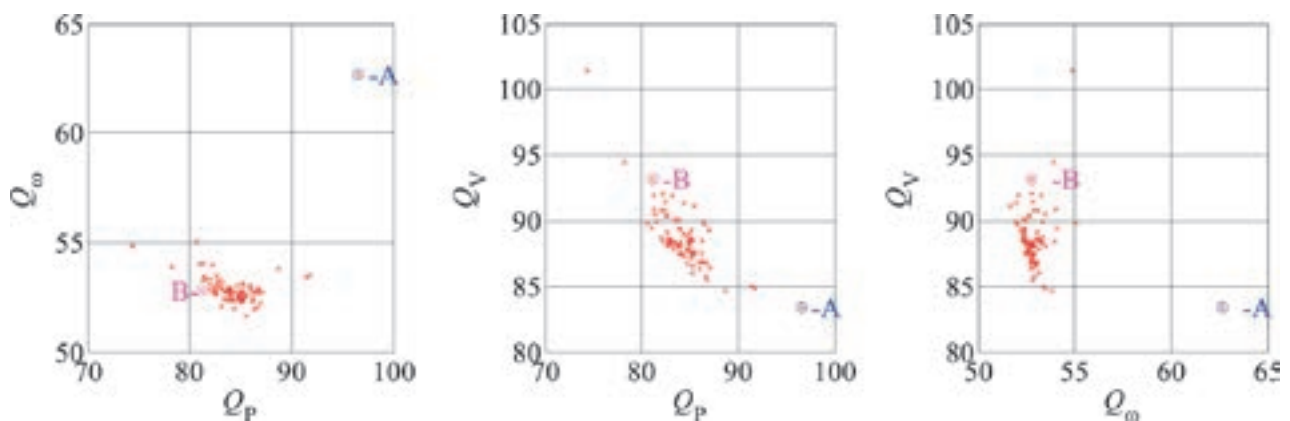


Fig. 4. Projections of the compromise set points on the planes of individual criteria

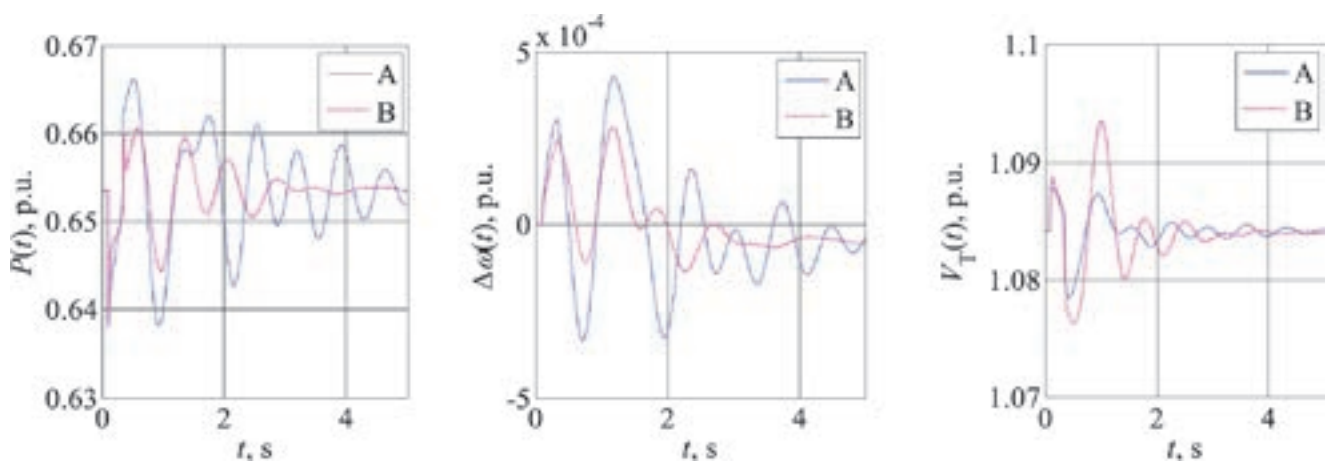


Fig. 5. Waveforms of instantaneous power, deviations of angular speed and terminal voltage in generating unit G6 for point A (solid line) and point B (dashed line) of the compromise set

parameters of the system. To simplify the analysis, it was assumed that the time constants of the generator model (selection was based on the sensitivity analysis [2]) changed (uncertainties) by $\pm 25\%$ of the value, for which the optimisation was carried out. An uncorrelated probability distribution of the parameter changes was also assumed.

For quantitative evaluation of the compromise set deformation caused by the parameter uncertainty, five factors were assumed for each i -th point of the compromise set. Factors (2) to (5) describe deformation of a single criterion, wherein statistical factors (2) and (3) are a measure of dissipation, while (4) and (5) are a measure of central tendency. Factor (6), based on a Euclidean measure, determines in a general way the change of all the criteria, without taking into account the direction of this change. All the analysed factors by means of their signs indicate whether the deformation is an improvement or deterioration of the stabilization quality, and a negative value means a quality improvement at the change in the parameters.

$$D_{1i} = \begin{bmatrix} D_{1(P)i} \\ D_{1(\omega)i} \\ D_{1(V)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11i} \\ D_{12i} \\ D_{13i} \end{bmatrix}, D_{1ki} = \text{std} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (2)$$

$$D_{2i} = \begin{bmatrix} D_{1(P)i} \\ D_{1(\omega)i} \\ D_{1(V)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{21i} \\ D_{22i} \\ D_{23i} \end{bmatrix}, D_{2ki} = \text{iqr} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (3)$$

$$D_{3i} = \begin{bmatrix} D_{1(P)i} \\ D_{1(\omega)i} \\ D_{1(V)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{31i} \\ D_{32i} \\ D_{33i} \end{bmatrix}, D_{3ki} = \text{mean} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (4)$$

$$D_{4i} = \begin{bmatrix} D_{1(P)i} \\ D_{1(\omega)i} \\ D_{1(V)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{41i} \\ D_{42i} \\ D_{43i} \end{bmatrix}, D_{4ki} = \text{median} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (5)$$

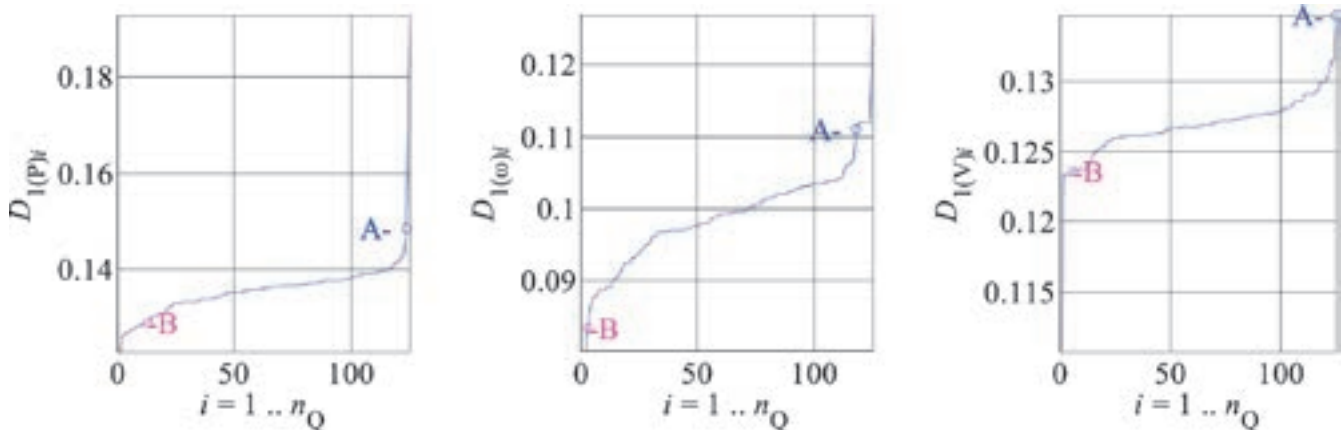


Fig. 6. Ranked (from lowest to highest) factor values (2)

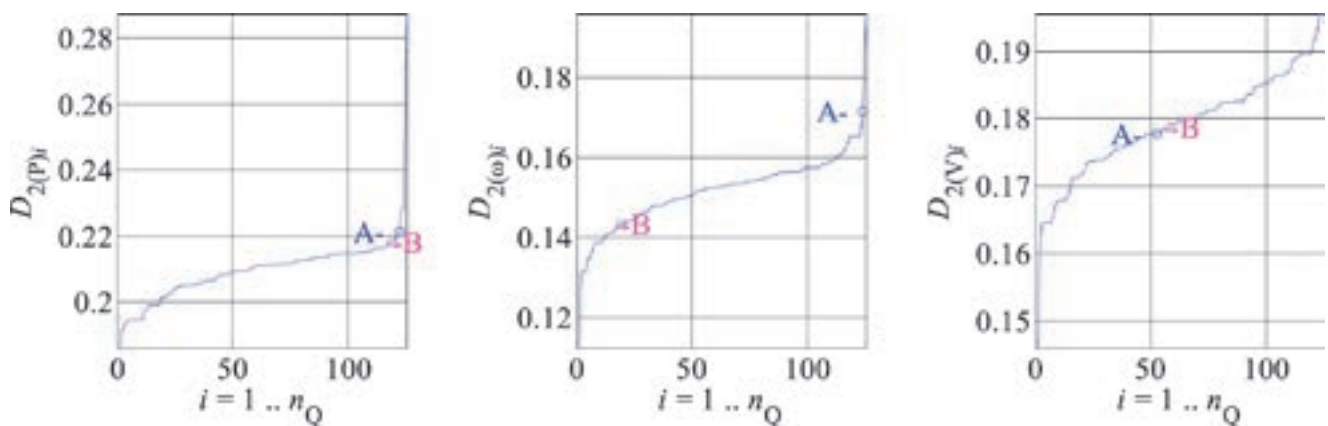


Fig. 7. Ranked (from lowest to highest) factor values (3)

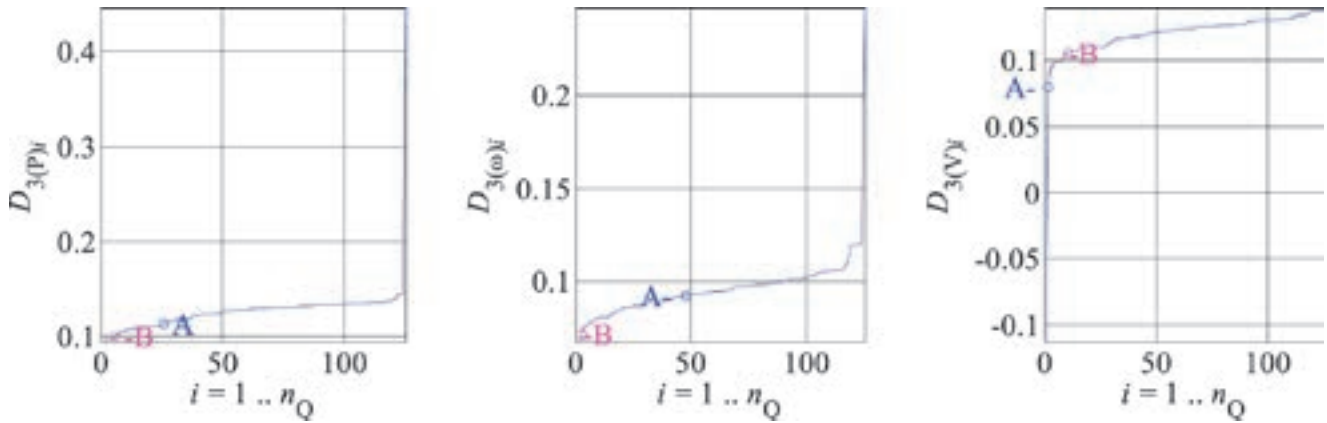


Fig. 8. Ranked (from lowest to highest) factor values (4)

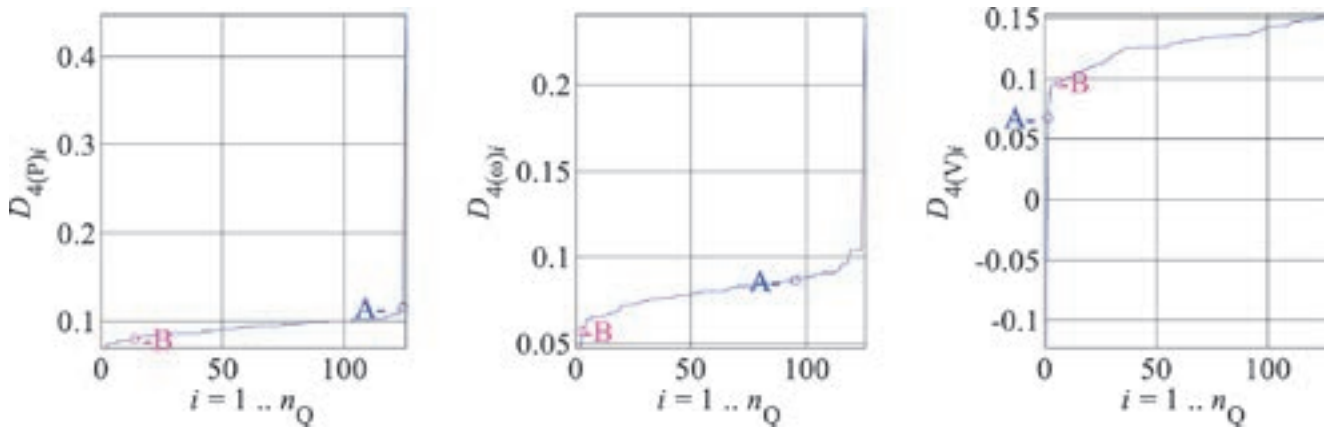


Fig. 9. Ranked (from lowest to highest) factor values (5)

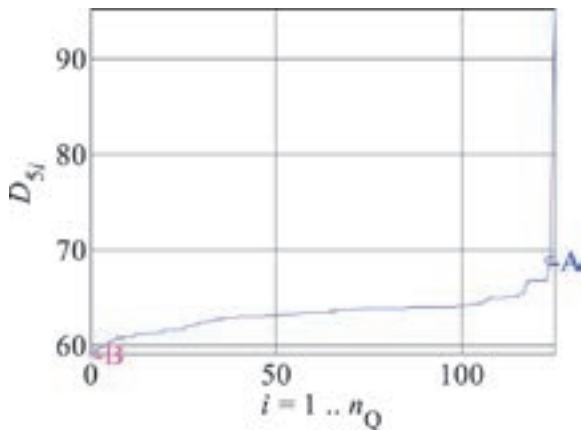


Fig. 10. Ranked (from lowest to highest) factor values (6)

$$D_{5i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left\{ \text{signum} \left(\frac{\sum_{k=1}^l Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \cdot \sqrt{\left(\mathbf{Q}_{ZK}^{(i)} - \mathbf{Q}_D^{(j)} \right)^T \left(\mathbf{Q}_{ZK}^{(i)} - \mathbf{Q}_D^{(j)} \right)} \right\} \quad (6)$$

where:

std – standard deviation, iqr – quartile deviation, mean – arithmetic average, median – median value, m – number of deformation points (number of random changes in generator models parameters), $l = 3$ – number of the optimised criteria, $Q_{ZKk}^{(i)}$ – value of the k -th criterion for the i -th point of the compromise set, $Q_{Dk}^{(j)}$ – value of the k -th criterion for the j -th deformation point. The calculated and ranked (from lowest to highest) factor values for all the points of the compromise set are shown in Figs. 6–10 (n_Q – number of the determined compromise set points).

Summary

On the basis of the analyses performed, the following general conclusions may be drawn:

- Electromechanical swings can be damped well by polyoptimisation of PSS2 stabilizer parameters, without significant deterioration of the generator terminal voltage waveforms.
- The criteria associated with electromechanical swings of individual generators have similar properties. In a system in which the instantaneous power is damped well, also well damped is the generator angular speed (criteria values for points A and B in Fig. 4 and the waveforms in Fig. 5).

- The criteria associated with generator terminal voltage deviations are usually contradictory to those associated with electromechanical swings. When electromechanical swings are well damped, usually generator terminal voltage deviations are significant, and vice versa (Figs. 4 and 5, points A and B).
- Despite the contradictions between individual criteria, it is possible to find in compromise sets the ranges for which big changes occur in criteria Q_p and Q_ω , with only small changes in criterion Q_v . Therefore one can find such PSS parameter values for which the damping of electromechanical swings increases significantly, with only slight worsening the generator voltage regulation waveforms.
- Power system stabilizer parameters can be selected so as to reduce their sensitivity to changes in power system parameters. To do this, such stabilizer parameter values should be considered, to which the lowest values of deformation factors correspond.
- Most of the deformation factors that determine changes of a single criterion for the selected optimal solutions are in line with the trend of factor (6) – deviations are noticeable for $D_{2(P)}$, $D_{2(V)}$, $D_{3(P)}$, $D_{3(V)}$, $D_{4(V)}$ (location of points A and B in Figs. 6–10).
- In the analysed case, the factors almost always take positive values for all the points of the compromise set (except for a few optimal solutions, for which factors $D_{3(V)}$, $D_{4(V)}$ take negative values, Figs. 8 and 9, at positive values of $D_{3(P, \omega)}$, $D_{4(P, \omega)}$). This is due to the fact that the stabilizer parameters at each point of the compromise set are optimal, and any change in power system parameters causes deterioration of the quality factors, and thus the deformation factor becomes positive.

The presented deformation factors differentiate the optimal solutions, due to different statistical description of deformation changes. However, all the factors are useful for evaluation of the impact of uncertainty resulting from stochastic phenomena (e.g. uncertainty of mathematical model parameters, power system load, etc. [6]).

The presented results of the analysis of the impact of uncertainty of power system mathematical model parameters on the optimal solutions can become the basis for the development of a method for selecting parameters of power system stabilizers (classical, such as PSS2, and robust [5]) to increase the effectiveness of the stabilizer performance in a real system. However, this requires further research relating to, among other things, the selection of appropriate disturbances (e.g. such that can particularly threaten the system stability) and including them in a vector objective function, as well as the selection of the most appropriate (differentiating the solutions) deformation factor.

REFERENCES

1. Machowski J., Bialek J., Bumby J., Power System Dynamics: Stability and Control, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2009.
2. Nocoń A., Paszek S., Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądowórczych z generatorami synchronicznymi [Polyoptimisation of voltage regulators in generation sets with synchronous generators], Gliwice 2008.
3. Paszek S., Nocoń A., Parameter polyoptimisation of PSS2A power system stabilizers operating in a multi-machine power system including the uncertainty of model parameters, Elsevier, Applied Mathematics and Computation (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.12.013>.
4. Paszek S., Nocoń A., Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany 2014.
5. Robak S., Dobór struktury, typu oraz parametrów odpornego stabilizatora systemowego urządzenia FACTS [Selection of the structure, type and parameters of resistant system stabilizer of FACTS device], Przegląd Elektrotechniczny 2009, No. 85 (8), pp. 76–79.
6. Robak S., Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych [Uncertainty sources in power system analysis], Przegląd Elektrotechniczny 2008, No. 84 (1), pp. 54–57.

Adrian Nocoń

Silesian University of Technology

e-mail: adrian.nocon@polsl.pl

Employed at the Institute of Electrical Engineering and Computer Science at the Silesian University of Technology.

Research interests: power system transients analysis, performance analysis of distributed on and off grid sources, optimisation and polyoptimisation methods using genetic algorithms, artificial intelligence methods. Author or co-author of 57 publications, incl. three monographies. Reviewer of several scientific papers, including some from the Philadelphia list.

Stefan Paszek

Silesian University of Technology

e-mail: stefan.paszek@polsl.pl

Director of the Institute of Electrical Engineering and Computer Science at the Silesian University of Technology.

Research interests: power system transients analysis, angular stability, optimisation and polyoptimisation of synchronous generator voltage stabilizers and regulators, parameter estimation of generation unit models. Author or co-author of 171 publications, incl. five monographies. Co-author of three academic textbooks. Promoter of 4 doctoral theses, reviewer of 3 habilitation and 6 doctoral dissertations, and of numerous scientific papers.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 48–53. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Ocena wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego systemu elektroenergetycznego na stabilizatory systemowe PSS2A

Autorzy

Adrian Nocoń
Stefan Paszek

Słowa kluczowe

system elektroenergetyczny, stabilizatory systemowe, polioptymalizacja, niepewność parametrów

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego systemu elektroenergetycznego na zoptymalizowane parametry stabilizatorów systemowych typu PSS2A. Do optymalizacji parametrów stabilizatorów systemowych zastosowano polioptymalizację (optymalizację wielokryterialną). Kryteria optymalizacyjne określono dla zakłóceń występujących w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym, biorąc pod uwagę przebiegi przejściowe związane z kołysaniami elektromechanicznymi (moc chwilowa, prędkość kątowna) i przebiegi napięcia zaciskowego generatorów. Do optymalizacji wykorzystano zmodyfikowany na potrzeby badań algorytm genetyczny z kodowaniem zmiennoprzecinkowym, selekcją turniejową, krzyżowaniem uśredniającym i mutacją perturbacyjną. Ocenę wpływu niepewności na jakość pracy stabilizatorów systemowych o zoptymalizowanych parametrach przeprowadzono z wykorzystaniem różnych wskaźników deformacji.

Wstęp

Stabilizatory systemowe mają za zadanie wytłumienie wolnozmiennych kołysań wirników generatorów synchronicznych (kołysania elektromechaniczne) [1, 3, 4]. Stabilizatory oddziałują tłumiąco na kołysania elektromechaniczne poprzez odpowiednie sterowanie napięciem wzbudzenia i pośrednio momentem elektromagnetycznym generatora synchronicznego [1, 4]. W artykule analizowano dwujęściowe stabilizatory systemowe PSS2A, rekomendowane przez komitet IEEE. Strukturę i właściwości tych stabilizatorów szerzej omówiono w pracy [4]. Schemat strukturalny stabilizatora przedstawiono na rys. 1.

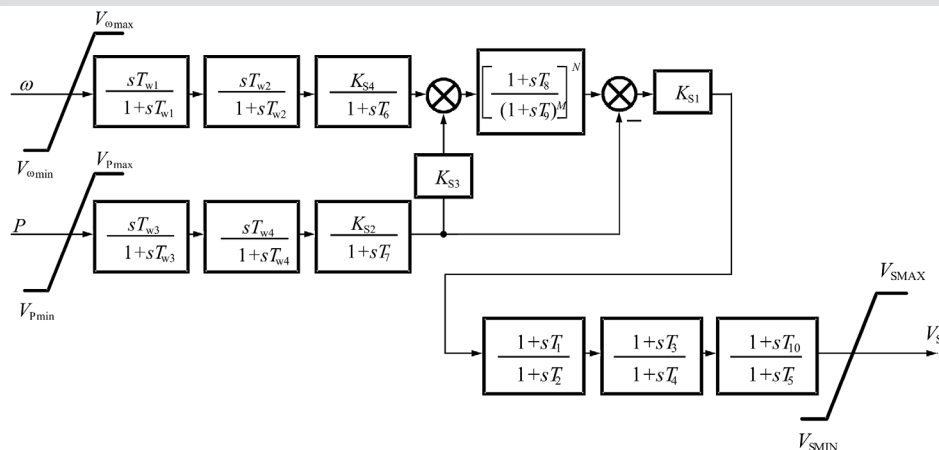
Badania przeprowadzono dla 7-maszynowego systemu elektroenergetycznego CIGRE przedstawionego na rys. 2. W systemie tym, przy przyjęciu odpowiednich modeli i wartości parametrów elementów SEE, okazało się, że układ jest niestabilny. Przy czym niestabilność ta wynika m.in. z zastosowania w układach regulacji napięcia generatorów synchronicznych (pracujących blisko stanu znamionowego) statycznych układów

wzbudzenia sterowanych za pośrednictwem szybkich regulatorów napięcia o dużym wzmocnieniu. W związku z tym założono, że w każdym zespole wytwórczym oddziałuje stabilizator systemowy.

Dla uproszczenia rozważań polioptymalizacji [2, 3, 4] poddano jedynie wzmocnienia K_{S1} wszystkich stabilizatorów. Pozostałe parametry przyjęto arbitralnie na podstawie analiz zawartych w pracach [3, 4]. Do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny z kodowaniem zmiennoprzecinkowym, wielokryterialną selekcją turniejową, zmodyfikowanym krzyżowaniem prostym i mutacją nierównomierną [2, 4]. Ponadto przeprowadzono analizę wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego systemu na jakość pracy zoptymalizowanych stabilizatorów. Ocenę wpływu niepewności badano dla wybranych parametrów modeli matematycznych dla wszystkich rozwiązań optymalnych, korzystając z opracowanych na potrzeby analizy wskaźników deformacji zbioru kompromisów [2].

Model matematyczny analizowanego systemu

Opracowano model matematyczny analizowanego wielomaszynowego SEE (rys. 2) w środowisku Matlab. W obliczeniach założono, że we wszystkich węzłach wytwórczych generatory synchroniczne są odwzorowane za pomocą nieliniowego modelu GENROU (z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego) [4]. Założono, że układy wzbudzenia są reprezentowane przez nieliniowy model polskiego, krajowego statycznego układu wzbudzenia [4]. Założono ponadto, że turbiny są reprezentowane przez model IEEE11 turbiny parowej [4]. Powiązanie równań stanu poszczególnych zespołów wytwórczych i równań napięciowo-prądowych sieci elektroenergetycznej otrzymano, stosując sieciowe wielkości względne dla równań stanu generatorów oraz poprzez transformację prądów i napięć stojana generatorów do wspólnego układu współrzędnych wirującego z prędkością kątowną, równą średniej elektrycznej prędkości kątownej wszystkich maszyn synchronicznych, w warunkach stanu ustalonego. Wielkości względne

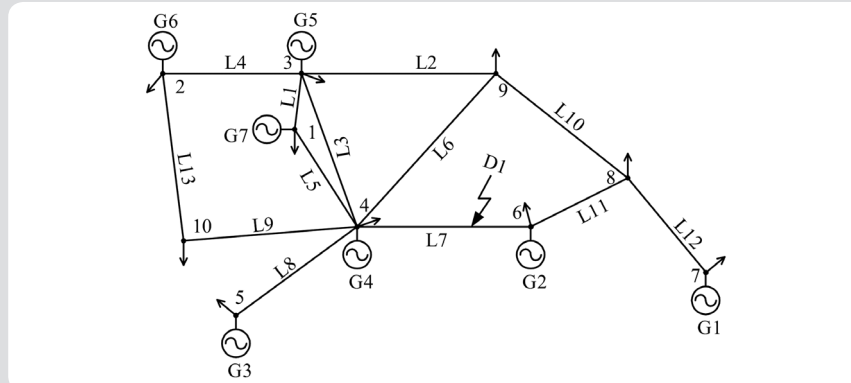


Rys. 1. Schemat strukturalny dwujęściowego stabilizatora systemowego PSS2A

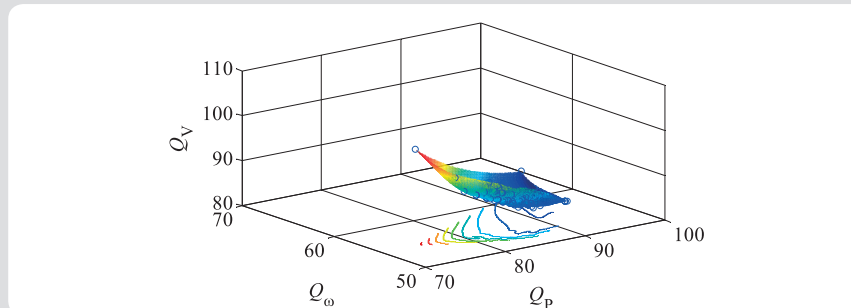
sieciowe są określone przy przyjęciu wspólnej mocy odniesienia (mocy bazowej) dla wszystkich zespołów wytwórczych $S_{ref} = 100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ [4].

Poliptymalizacja parametrów stabilizatora PSS2A
Ze względu na złożoność zjawisk występujących w SEE, proces optymalizacji

parametrów stabilizatorów systemowych powinien uwzględniać wiele, czasem sprzecznych kryteriów, związanych z tłumieniem kołysań elektromechanicznych oraz z ograniczeniem zmian napięcia w poszczególnych zespołach wytwórczych, w czasie różnych zakłóceń stanu ustalonego [3, 4]. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej [2, 4]. W poliptymalizacji występuje kryterium wektorowe (zamiast jednej funkcji celu), w którym można uwzględnić nie tylko różne wielkości kryterialne dla jednego wybranego stanu przejściowego (np. odchyłki mocy czy napięcia zaciskowego generatorów), ale również dodatkowe wielkości kryterialne dla różnych stanów przejściowych (np. przebiegi napięcia zaciskowego dla różnych miejsc zwarcia). Jednakże rozbudowywanie kryterium wektorowego zwiększa jego wymiar, a wynik staje się mniej czytelny. W związku z tym w niniejszym artykule ograniczono wymiar wskaźnika do 3 i analizowano stan przejściowy związany z jednym symetrycznym, przemiającym zwarcie o czasie trwania równym 0,25 s, występującym w linii L7 (oznaczenie D1 na rys. 2), przyjmując kryterium optymalizacji w następującej postaci:

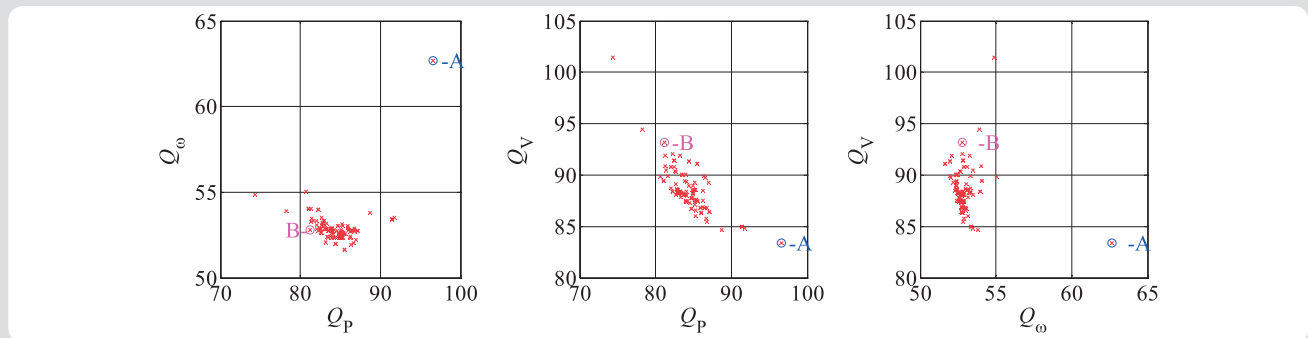


Rys. 2. Schemat 7-maszynowego systemu elektroenergetycznego CIGRE

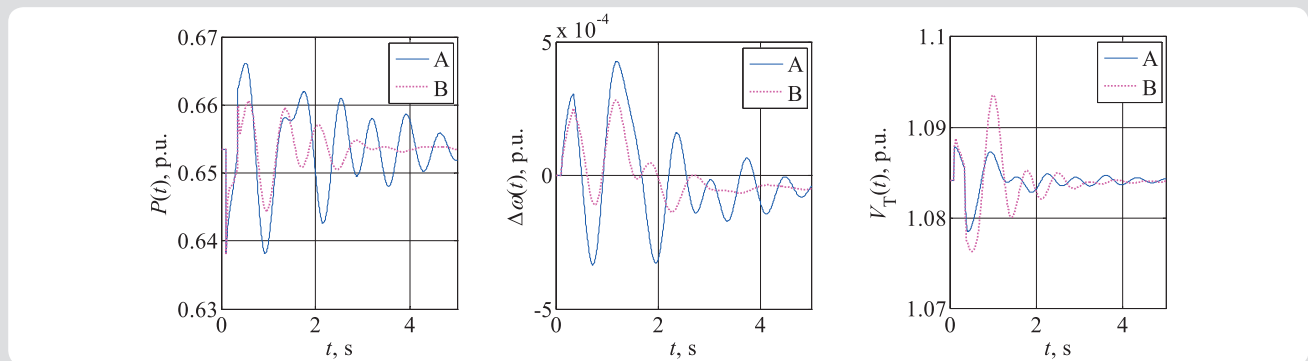


Rys. 3. Trójwymiarowy zbiór kompromisów

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_\omega \\ Q_V \\ Q_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta\omega_{ij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta V_{Tij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j w_{pi} |\Delta P_{ij}| \end{bmatrix} \quad (1a)$$



Rys. 4. Rzuty punktów zbioru kompromisów na płaszczyzny poszczególnych kryteriów



Rys. 5. Przebiegi mocy chwilowej, odchyłki prędkości kątowej i napięcia zaciskowego zespołu wytwórczego G6 dla punktu A (linia ciągła) i punktu B (linia przerywana) zbioru kompromisów

gdzie:

$$w_{pi} = \frac{n_i S_{Ni}}{S_{max}} \quad (1b)$$

$\Delta\omega_{ij}$, ΔV_{Tij} , ΔP_{ij} – odchyłki prędkości kątowej, napięcia generatora oraz mocy czynnej (chwilowej) dla i -tego zespołu wytórczego przy zwarciu D1 (rys. 2) w j -tych chwilach czasowych, n_i – liczba generatorów pracujących w i -tym zespole wytórczym, S_{Ni} – znamionowa moc pozorna pojedynczego generatora synchronicznego, pracującego w i -tym zespole wytórczym, S_{max} – znamionowa moc pozorna zespołu wytórczego, który generuje największą moc pozorną w SEE, n – liczba zespołów wytórczych w SEE (w SEE CIGRE $n = 7$).

Do optymalizacji funkcji celu (1a) wykorzystano opracowany na potrzeby badań algorytm genetyczny z kodowaniem zmiennooprzecinkowym, wielokryterialną selekcją turniejową, zmodyfikowanym krzyżowaniem prostym i mutacją nierównomierną [3].

W optymalizacji przyjęto trzy składniki wektorowego wskaźnika jakości, w związku z tym wyniki optymalizacji przedstawiono w postaci wykresu 3D (rys. 3) oraz w postaci rzutów punktów zbioru kompromisów na układy współrzędnych odpowiadające poszczególnym parom kryteriów (rys. 4).

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi mocy chwilowej, odchyłki prędkości kątowej i napięcia zaciskowego w zespole G6 (rys. 2), przy zwarciu D1 w linii przesyłowej L7. Przebiegi te odnoszą się do wybranych punktów zbioru kompromisów, tj. punktów A i B zaznaczonych na rys. 4.

Wpływ niepewności parametrów na rozwiązanie optymalne

SEE jest obiektem dynamicznym i niestacjonarnym, przy czym zmiany parametrów często mają charakter stochastyczny. W związku z tym analiza pracy systemu wiąże się z koniecznością uwzględnienia różnych źródeł niepewności występujących w SEE [6]. Jednym z takich źródeł jest brak wiarygodnych parametrów modeli matematycznych elementów systemu. W trakcie badań symulacyjnych SEE, także przy polioptymalizacji, ważne jest określenie, w jaki sposób niepewność ta wpływa

na stabilizatory systemowe o zoptymalizowanych parametrach, a ściślej – na przyjęte kryterium jakości [4, 6].

W ogólnym przypadku każda zmiana parametrów modelu matematycznego powoduje zmianę wartości przyjętego kryterium. Na potrzeby dalszej analizy wprowadzono pojęcie deformacji zbioru kompromisów pod wpływem występującej niepewności. Deformacja zbioru kompromisów jest miarą wpływu zmian parametrów modelu (niepewności parametrów) na przyjęte kryterium jakości. W celu wyznaczenia deformacji zbioru kompromisów przeprowadzono wielokrotne symulacje badanego SEE przy niezmiennych parametrach zoptymalizowanych stabilizatorów systemowych i zmieniających się innych parametrach systemu. Dla uproszczenia analizy przyjęto, że zmianom (niepewności) podlegają stałe czasowe modelu generatora (wyboru dokonano na podstawie analizy wrażliwości [2]) na poziomie $\pm 25\%$ w stosunku do wartości, dla której przeprowadzono optymalizację. Przy czym przyjęto nieskorelowany rozkład prawdopodobieństwa zmian parametrów.

Do ilościowej oceny deformacji zbioru kompromisów pod wpływem niepewności parametrów przyjęto pięć wskaźników dla każdego i -tego punktu zbioru kompromisów. Wskaźniki (2) do (5) są wskaźnikami opisującymi deformację pojedynczego kryterium, przy czym statystyczne wskaźniki (2) i (3) są miarą dyssypacji, a (4) i (5) są miarą tendencji centralnej. Natomiast wskaźnik (6), bazujący na mierze Euklidesowej, w sposób ogólny określa zmianę wszystkich kryteriów bez uwzględnienia kierunku tej zmiany. Wszystkie analizowane wskaźniki poprzez znak uwzględniają, czy deformacja jest poprawą, czy pogorszeniem jakości stabilizacji, przy czym wartość ujemna to poprawa jakości przy danej zmianie parametrów.

$$D_{li} = \begin{bmatrix} D_{l(p)i} \\ D_{l(\omega)i} \\ D_{l(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11i} \\ D_{12i} \\ D_{13i} \end{bmatrix}, D_{lki} = \text{std} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right)$$

(2)

$$D_{2i} = \begin{bmatrix} D_{l(p)i} \\ D_{l(\omega)i} \\ D_{l(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{21i} \\ D_{22i} \\ D_{23i} \end{bmatrix}, D_{2ki} = \text{iqr} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (3)$$

$$D_{3i} = \begin{bmatrix} D_{l(p)i} \\ D_{l(\omega)i} \\ D_{l(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{31i} \\ D_{32i} \\ D_{33i} \end{bmatrix}, D_{3ki} = \text{mean} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (4)$$

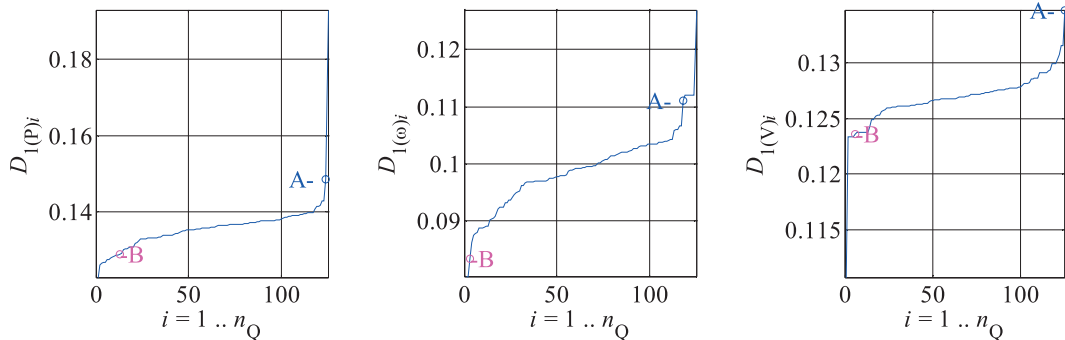
$$D_{4i} = \begin{bmatrix} D_{l(p)i} \\ D_{l(\omega)i} \\ D_{l(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{41i} \\ D_{42i} \\ D_{43i} \end{bmatrix}, D_{4ki} = \text{median} \left(\frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \quad (5)$$

$$D_{5i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left\{ \text{signum} \left(\sum_{k=1}^l \frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \right) \cdot \sqrt{(Q_{ZK}^{(i)} - Q_D^{(j)})^T (Q_{ZK}^{(i)} - Q_D^{(j)})} \right\} \quad (6)$$

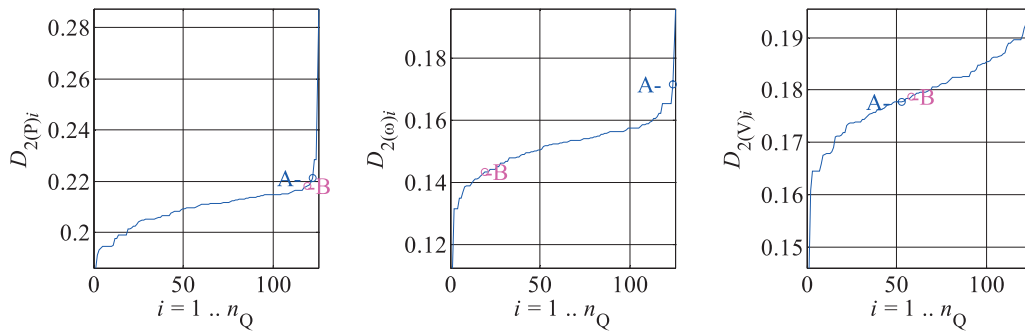
gdzie:

std – odchylenie standardowe, iqr – odchylenie ćwiartkowe, mean – średnia arytmetyczna, median – wartość mediany, m – liczba punktów deformacji (liczba losowanych zmian parametrów modeli generatorów), $l = 3$ – liczba zoptymalizowanych kryteriów, $Q_{ZKk}^{(i)}$ – wartość k -tego kryterium dla i -tego punktu zbioru kompromisów, $Q_{Dk}^{(j)}$ – wartość k -tego kryterium dla j -tego punktu deformacji.

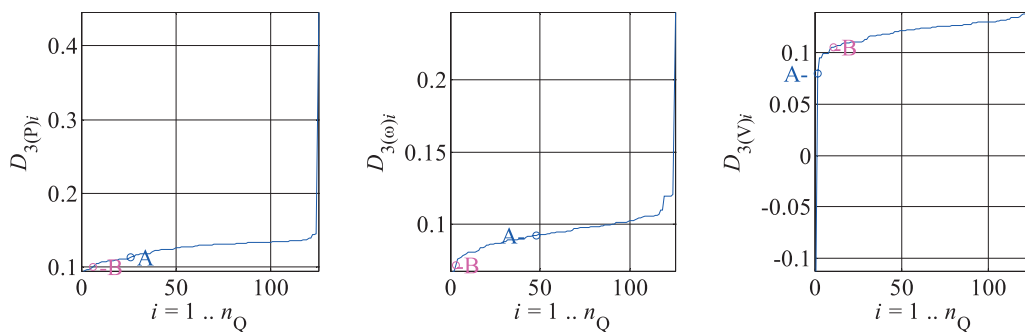
Obliczone i uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźników



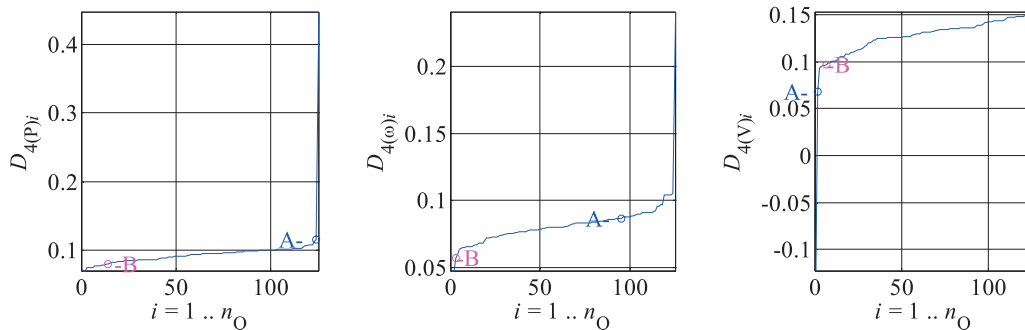
Rys. 6. Uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźnika (2)



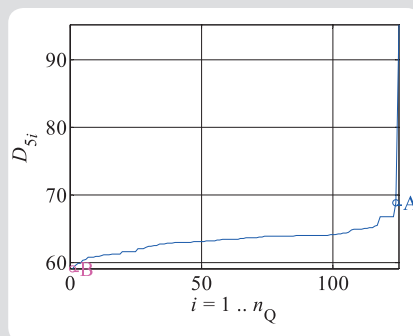
Rys. 7. Uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźnika (3)



Rys. 8. Uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźnika (4)



Rys. 9. Uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźnika (5)



Rys. 10. Uszeregowane (od najmniejszej do największej) wartości wskaźnika (6)

dla wszystkich punktów zbioru kompromisów przedstawiono na rys. 6–10 (n_Q – liczba wyznaczonych punktów zbioru kompromisów).

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

- Poprzez polioptymalizację parametrów stabilizatorów PSS2A można dobrze tłumić kołysania elektromechaniczne, bez znacznego pogorszenia przebiegów napięcia zaciskowego generatorów.
- Kryteria związane z kołysaniami elektromechanicznymi poszczególnych generatorów mają podobne właściwości. W układzie, w którym występuje duże tłumienie

mocy chwilowej, również prędkość kątowna generatorów jest dobrze tłumiona (wartości kryteriów dla punktów A i B na rys. 4 oraz przebiegi na rys. 5).

- Kryteria związane z odchyłkami napięcia zaciskowego generatorów są zwykle sprzeczne z kryteriami związanymi z kołysaniami elektromechanicznymi. W przypadku, gdy dobrze tłumione są kołysania elektromechaniczne, to zwykle występują znaczne odchyłki napięcia zaciskowego generatorów i odwrotnie (rys. 4 i 5, dla punktu A i B).
- Mimo sprzeczności poszczególnych kryteriów, w zbiorach kompromisów można znaleźć przedziały, dla których występują duże zmiany wartości kryteriów Q_P i Q_ω , przy tylko niewielkich

zmianach kryterium Q_v . Można więc znaleźć takie wartości parametrów PSS, przy których znacznie zwiększone jest tłumienie kołysań elektromechanicznych, przy tylko niewielkim pogorszeniu przebiegów regulacyjnych napięć generatorów.

- Istnieje możliwość doboru parametrów stabilizatorów systemowych w taki sposób, aby zmniejszyć jego podatność na zmiany parametrów SEE. W tym celu należy wziąć pod uwagę takie wartości parametrów stabilizatorów, którym odpowiadają najmniejsze wartości wskaźników deformacji.
- Większość wskaźników deformacji określających zmiany pojedynczego kryterium dla wybranych rozwiązań optymalnych jest zgodnych z tendencją wskaźnika (6) – odstępstwa zauważalne są dla $D_{2(P)}$, $D_{2(V)}$, $D_{3(P)}$, $D_{3(V)}$, $D_{4(V)}$ (położenie punktów A i B na rys. 6–10).
- W analizowanym przypadku wartości wskaźników prawie zawsze przyjmują wartości dodatnie dla wszystkich punktów zbioru kompromisów (wyjątkiem jest kilka rozwiązań optymalnych, dla których wskaźniki $D_{3(V)}$, $D_{4(V)}$ przyjmują wartości ujemne, rys. 8 i 9, przy dodatnich wartościach $D_{3(P, \omega)}$, $D_{4(P, \omega)}$). Wynika to z faktu, że parametry stabilizatorów w każdym z punktów zbioru kompromisów są optymalne i jakkolwiek zmiana parametrów

SEE powoduje pogorszenie wskaźników jakości, a tym samym wskaźnik deformacji staje się dodatni.

- Przedstawione wskaźniki deformacji różnicującą w różny sposób rozwiązania optymalne, co wynika z odmiennego opisu statystycznych zmian deformacji. Natomiast wszystkie wskaźniki przydatne są do oceny wpływu niepewności mającej swe źródło w zjawiskach stochastycznych (np. niepewności parametrów modelu matematycznego, stanu obciążenia SEE, idp. [6]).

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki analizy wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego SEE na rozwiązanie optymalne mogą stać się podstawą do opracowania metody doboru parametrów stabilizatorów systemowych (klasycznych takich jak PSS2A i stabilizatorów odpornych [5]) zwiększających skuteczność działania stabilizatorów w układzie rzeczywistym. Wymaga to jednak dalszych badań odnoszących się m.in. do wyboru odpowiednich zakłóceń (np. takich, które szczególnie mogą zagrozić stabilności systemu) i uwzględnienia ich w wektorowej funkcji celu oraz wyboru najbardziej miarodajnego (różnicującego rozwiązania) wskaźnika deformacji.

Bibliografia

- Machowski J., Bialek J., Bumby D.J., Power System Dynamics: Stability and Control, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2009.
- Nocoń A., Paszek S., Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądowców z generatorami synchronicznymi, Gliwice 2008.
- 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, 2014.
- Paszek S., Nocoń A., Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany 2014.
- Robak S., Dobór struktury, typu oraz parametrów odpornego stabilizatora systemowego urządzenia FACTS, *Przegląd Elektrotechniczny* 2009, nr 85 (8), s. 76–79.
- Robak S., Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2008, nr 84 (1), s. 54–57.

Adrian Nocoń

dr inż.

Politechnika Śląska

e-mail: adrian.nocon@polsl.pl

Pracuje w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej.

Zainteresowania badawcze: analiza SEE w stanach nieustalonych, analiza pracy źródeł rozproszonych on i off grid, metody optymalizacji i polioptymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych, metody sztucznej inteligencji. Autor lub współautor 57 publikacji, w tym 3 monografii. Recenzent kilku artykułów naukowych, w tym z listy filadelfijskiej.

Stefan Paszek

prof. dr hab. inż.

Politechnika Śląska

e-mail: stefan.paszek@polsl.pl

Dyrektor Instytutu Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej.

Zainteresowania badawcze: analiza SEE w stanach nieustalonych, stabilność kątowna, optymalizacja i polioptymalizacja stabilizatorów i regulatorów napięcia generatorów synchronicznych, estymacja parametrów modeli jednostek wytwórczych. Autor lub współautor 171 publikacji, w tym 5 monografii. Współautor 3 podręczników akademickich. Promotor 4 rozpraw doktorskich, recenzent 3 rozpraw habilitacyjnych, 6 doktorskich i wielu artykułów naukowych.