

A Method of Identifying Dynamic Parameters of Generating Units Based on Dynamic Response During Disturbances

Authors

Michał Bajor
 Michał Kosmecki
 Maciej Wilk

Keywords

genetic algorithm, dynamic equivalent, dynamic parameters identification

Abstract

Simulation of power system operation requires proper dynamic representation of power system components in the simulation software, i.e. correct structures and parameters of the models. However, in large, modern power systems, a lack of required information is often encountered. Identification is one of the ways to obtain the missing data. In this paper an identification method based on an implementation of genetic algorithm is proposed. Its prerequisite is the availability of the unit's response to the disturbance, for example obtained from transient fault recorders. The method is tested for a single unit, for which the response was obtained beforehand using the model with known parameters. The method can also be used to facilitate the creation of dynamic equivalents of larger parts of the power system, which is also presented in the paper.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013401

1. Introduction

Modern power systems (PS) cover huge terrains and consist of a very large number of elements, each of which is mapped by a corresponding dynamic model. Moreover, it is common for a single power system to be run by numerous operators. Performing research on the stability of such large systems presents difficulties both from the technical (complexity of calculations) and formal (difficulty of obtaining data describing particular system elements) point of view. Therefore, it is a common practice to replace some parts of the analysed system with various forms of equivalents aiming to model the behaviour of a replaced area as accurately as possible. The specific requirements for the equivalent depend on the character of the research. To conduct power flow calculations, an equivalent that models static behaviour of a reduced area is sufficient. However, in order to perform simulations regarding transient states it is necessary to use the equivalent providing accurate modelling of a dynamic behaviour of elements located within the replaced area.

The Research concerning creating dynamic equivalents has been conducted for many years. Some reasons underlining the importance of the subject are listed below:

- Increasing PS complexity – modern power systems may

include very large number of elements and a corresponding number of their dynamic models. E.g. there are approx. 480 generating units in the model of Polish power system (KSE) for the year 2011. Moreover, adding dynamic models of new elements having a significant impact on system operation (e.g. new large units, distributed generation, wind farms, power electronics, HVDC) further complicates dynamic calculations.

- Practical aspects – parts of the system areas distant (in the electrical sense) from the location of the analysed disturbance have a negligible impact on the dynamics of some phenomena (e.g. angle stability). Their detailed modelling is unjustified. This is particularly significant when the increasing extent of modern power systems is considered.
- Data accessibility – data necessary to create a full dynamic model of the synchronous power system is often very difficult to obtain. In the age of large interconnected systems of many countries (e.g. ENTSO-E CE, where power systems of 34 countries operate synchronously), collection of data is very difficult, not least due to the lack of common regulations regarding data accessibility and the format of models¹.
- Computational issues – dynamic calculations on extensive PS models are often conducted in many variants, which causes

¹ Situation may improve after development and implementation of the CIM standard for dynamics.

them to be time-consuming even considering the huge computational powers of modern computers. With such a great amount of data, mistakes and errors are commonly encountered. The larger the tested system, the harder it is to locate the error. Using equivalents enables a significant reduction of calculation time, which is important especially during multi-variant research.

- Software limitations – despite continuous development of hardware, most software packages simulating transient states in the power system are limited in terms of the maximum size of the analysed system. In most packages, such a limitation is hardware independent, and quite often the price of software license depends on the maximum size of the analysed power system. In addition, rapid development of modern systems is accompanied by the appearance of new elements, for which relevant models are not yet implemented in simulation software.

In order to ensure a proper behaviour of a reduced system model in states of different disturbances, the parameters of different components of a created equivalent generating unit need to be properly determined. Further in this paper, a method for determining parameters of a dynamic equivalent is proposed.

2. Method

One of the methods of determining the parameters of the equivalent unit is based on comparison of responses of a full model (before reduction) and a model in which an equivalent has replaced a part of the system. If the equivalent is large, this task becomes difficult. Solving such complex optimisation issues is the main area of application of non-deterministic algorithms, which are able to provide solutions for problems which are very difficult to solve using deterministic algorithms. The fact that in the case of a deterministic algorithm the initial data determines the obtained solution, in contrast to non-deterministic algorithms (different runs of a non-deterministic algorithm for the same set of initial data will result in obtaining different results), constitutes a fundamental difference between the two types of algorithms. For the purpose of solving the problem of determining parameters of dynamic models included in the equivalent, an implementation of the genetic algorithm has been applied.

Genetic algorithms, also called evolutionary algorithms, are one of the most frequently used types of non-deterministic algorithms. The workflow of genetic algorithm is based on simulating the process of natural evolution through modelling of naturally occurring phenomena, such as natural selection, crossbreeding or mutation. The area of application of genetic algorithms includes solving complex optimisation problems, similarly as in case of other non-deterministic algorithms.

The basic concept related to the genetic algorithm is a population. A population consists of specimens, each representing a single solution of a problem. Projecting this concept to the domain of determining parameters of equivalent dynamic models, a specimen is then modelled as a set of dynamic models included in the equivalent, together with values of particular parameters of each model, which are to be determined by the algorithm. All such specimens are potential solutions of the problem. An allowed range of values are a priori assigned to all particular parameters

of all models. Values of parameters which can be easily obtained through simple analysis (e.g. MVA) are not the subject of optimization, the assumption implemented by adopting identical values (equal to the previously determined correct value) for the lower and upper limits of the allowed range of parameter values.

Creation of the initial population of a set size is the first phase in the algorithm. Initial population is developed on a random basis to ensure the greatest possible diversification of individuals' features (i.e. parameter values – within the acceptable range). Initial population constitutes the initial point of the algorithm operation.

The course of an algorithm's iterations (also called "generations") is as follows: every specimen of a population is subject to evaluation, on the basis of which the best specimens that will constitute the source of new specimens through the crossover process are selected. New created specimens, after possible mutations, create a new population (generation) that will go through an analogous process in a new iteration. In this way, each population (except the initial one, which is developed randomly) is created based on the best (with regard to evaluation of a solution) specimens from a previous population, with the intention of keeping their desired features. The algorithm's operation ends after completion of a set number of iterations or with the moment of achieving a solution of satisfactory quality (this criterion has not been applied in this implementation due to relatively quick calculations).

The function crucial for the operation of the algorithm is the specimen (solution) quality evaluation function. It determines the possibility of passing specimens' features (i.e. parameter values) to generations in subsequent iterations. In the implemented solution, specimen evaluation is based on the comparison of the simulation results received for calculated parameters for a defined disturbance (or set of disturbances) with benchmark results. The evaluation mark is the average absolute error between the two compared simulation results. Depending on the type of the analysed variable, the error value concerns either the whole length of simulation (e.g. rotor angle) or only a part of it (e.g. voltage during disturbance and right after it).

After population evaluation, all specimens are sorted in a descending order according to the evaluation mark. The goal of a selection phase is to choose a set number (defined as a fraction of a general population size) of specimens with the best evaluation mark and reject others. The selected specimens form the basis for the next generation creation. Next, pairs of specimens are chosen randomly from a selected group in a number equal to the population size (which is constant during the iterations). Every new specimen comes into being as a result of the crossover of a drawn pair. Crossover is about passing features of both specimens "parents" onto a specimen "child" – in a described implementation, particular parameters of a new specimen adopt average values from relevant parameter values of both "parents". Every specimen created in such a way may be subject to a mutation process with a defined probability. The mutation process introduces random changes in values of some (also randomly selected) model parameters. In this way, a new population of specimens of the same size comes into being in each iteration. Then it is subject to an analogously performed process of evaluation, selection, crossover and mutation.

It should be emphasised that due to the non-deterministic character of the algorithm, the best specimen in any selected generation does not need to be characterised with higher quality in relation to the best specimen of a preceding generation. However, a general trend of quality improvement is observed in subsequent iterations of the algorithm. Fig. 1 presents an exemplary progress of algorithm performance (values of the evaluation function are dimensionless – the lower the value, the better the solution).

simulations necessary in the process of quality evaluation concerning specimens. Algorithm parameters include:

- population size
- fraction of a population chosen in the selection process and constituting the basis for the next generation creation
- mutation probability
- number of iterations (generations).

3. Testing

3.1. Test model

One of the publicly available IEEE test models [1] has been applied to conduct tests of the procedure of determining dynamic parameters with the proposed method. A distribution model, applied to conduct the grid reduction process, includes 39 nodes and 10 synchronous generators, as well as models of loads, transformers and transmission lines. The applied model is used in many scientific studies concerning research of power systems and is often described as the New England system. The IEEE test model did not include all the necessary information concerning its dynamic behaviour, so it was necessary to complete it with dynamic models (consistent with IEEE models) and then to verify their structures and parameters. All generating units were modelled by the synchronous generator model (genrou, gensal) and by its excitation system (exac4, exst1, exdc1, exac1). In addition, some of the generating units were equipped with the steam turbine model (ieeeg1, tgov1) and power system stabilisers (pss2a). Also, load modelling via constant active current and constant reactance

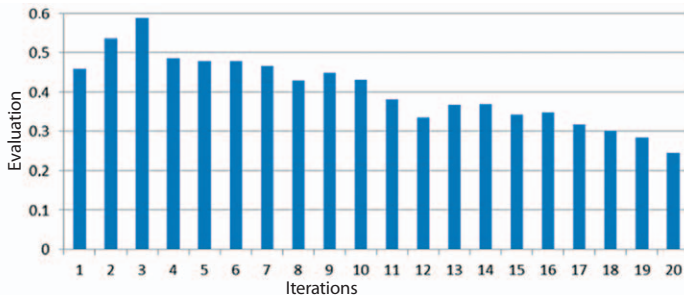


Fig. 1. Record of exemplary process of the genetic algorithm – visible trend of quality improvement of solutions

In this study, the software has been designed and implemented based on the above-described concept. This application uses an external calculation engine in order to conduct dynamic

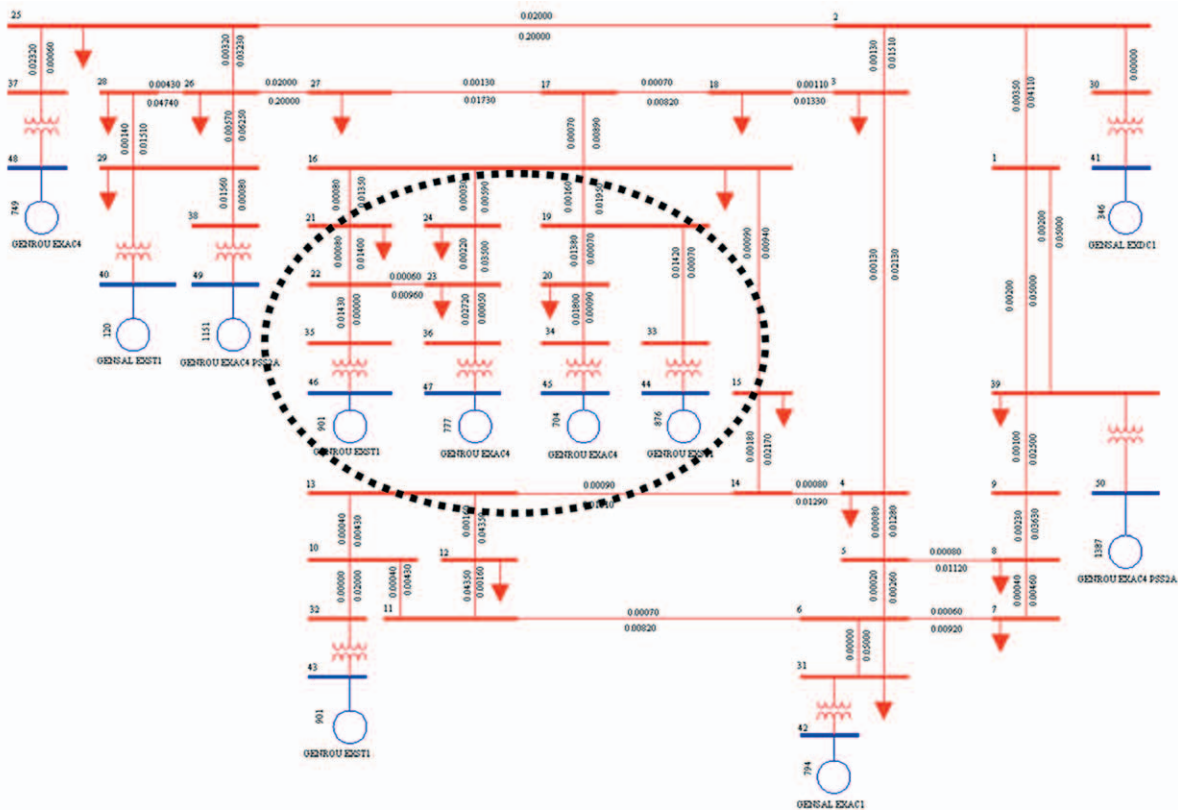


Fig. 2. Scheme of analysed grid together with information on the structure of dynamic models and system's division into internal (tested) and external (being reduced) system

was adopted. Fig. 2 presents the scheme of the analysed grid together with information on the applied structures of dynamic models. Red represents 400 kV voltage, while blue – 20 kV voltage. Numbers over symbols of transmission lines are the resistance and reactance expressed in per unit. Under the generating unit symbol, types of dynamic models were listed.

3.2. Selection of parameters of a generating unit model

A test with the use of a simplified problem was conducted to verify the correctness of genetic algorithm implementation. The test case consisted in selecting parameters of dynamic models of generators and excitation systems of a selected generating unit, analogously to the case of target algorithm application, however, with no system reduction and equivalent creation. Therefore, a model of the system which was used to generate the benchmark results and a model applied to assess solutions tested by the algorithm were identical. The response (rotor angle and generator voltage) of an indicated unit (generator attached to node 46) to large disturbances was analysed – close short circuit of 100 ms duration in node 2. Simulation time was equal to 20 s. The results (matched responses) for one of the analysed test cases are presented in figure 3 and 4. Red bold line designates benchmark processes, thinner blue line – processes obtained for parameters selected by the algorithm.

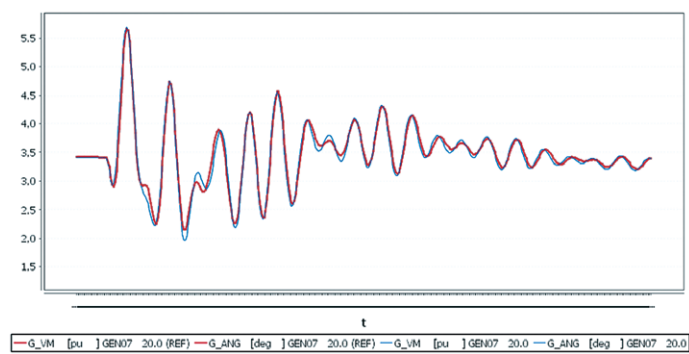


Fig. 3. Rotor angle response obtained for dynamic parameters determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark response (red curve)



Fig. 4. Generator terminal voltage response obtained for dynamic parameters determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark response (red curve)

The character of a dynamic response of the system with parameters obtained by the genetic algorithm in all analysed cases is very close to the response of the initial system. Recorded plots of rotor angles and generator voltage feature almost identical values of amplitudes and oscillation frequency. A phase shift between obtained plots was not observed. The results indicate the possibility of applying the designed algorithm to determine dynamic parameters of the equivalent.

3.3. Determination of the equivalent parameters

It is necessary to divide the analysed system into the internal system (tested) and external system (reduced) prior to commencement of relevant reduction process. For the needs of this paper, the system's part constituting the subject of reduction is marked with a dashed ellipse in Fig. 2. It includes four synchronous generators with diverse excitation systems, some transmission lines and transformers. Just as in test cases, parameters of dynamic models for the equivalent generator and excitation control unit were determined. The response (plots of rotor angles and generator voltage) of a generating unit close to the reduced system's part (generator attached to node 41) on near-to-generator short circuit lasting 100 ms in node 2. The duration of a single simulation came to 20 s.

Fig. 5 and Fig. 6 presents results obtained with the use of the parameters derived by genetic algorithm (matched plots). Plots obtained for dynamic parameters of the equivalent determined by the genetic algorithm (blue curve) against benchmark process (red curve).

Plots obtained during simulations conducted for parameters derived by the genetic algorithm are characterised by a very high level of consistence with benchmark processes, especially with regard to the most important specific values (e.g. the lowest noted voltage level, first rotor swing).

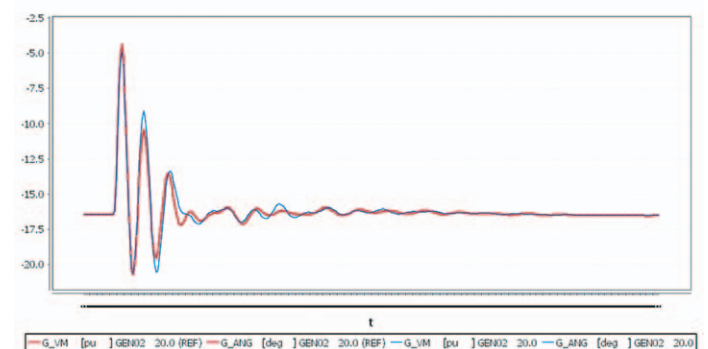


Fig. 5. Rotor angle response obtained for dynamic parameters determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark process (red curve)

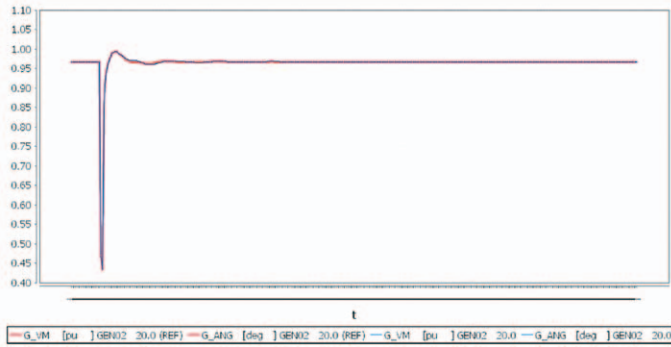


Fig. 6. Generator terminal voltage response obtained for dynamic parameters determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark process (red curve)

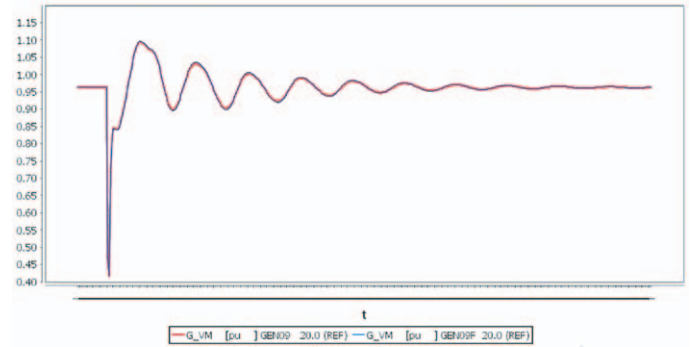


Fig. 8. Generator terminal voltage response obtained for dynamic parameters of the equivalent determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark process (red curve). Both disturbance and an observed unit are different from those applied to determined parameters

Thereby, the algorithm confirmed its usefulness in obtaining parameters of a dynamic model. It is worth mentioning that good adjustment of processes have already been observed after a dozen or so algorithm iterations.

Further simulation tests were conducted to verify additionally the usefulness of obtained parameters and to avoid the trick of conditioning results on a single disturbance, i.e. situation when determined parameters provide similar results only when exactly the same disturbance for which they were determined was analysed. The tests included comparison of results obtained for simulations on both system models (full model and reduced model including the equivalent previously parameterised by the algorithm). The parameters for the equivalent were determined for short circuit in node 41, whereas during the simulation the short circuit was applied to node 25 (observed generator attached to node 48). Fig. 7 and 8 presents obtained results. In this case again, very good coverage of results obtained during simulation on a full model and on a reduced model is observed.

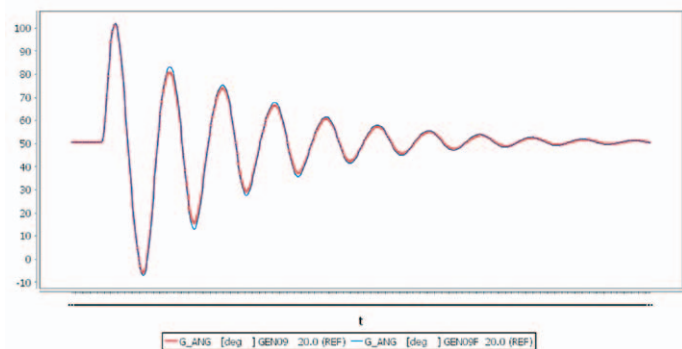


Fig. 7. Rotor angle response obtained for dynamic parameters of the equivalent determined by the genetic algorithm (blue curve) as against benchmark process (red curve). Both disturbance and an observed unit are different from those applied to determined parameters

4. Conclusions

In all analysed cases, obtained plots for rotor angles and generator terminal voltages have the same frequency of changes and approximate amplitudes, while the character of a dynamic response of the reduced system is approximate to a response of a system before reduction. The obtained results demonstrate that the reduced model is appropriate to test angular stability of a large disturbance with use of a proposed method. Conducted tests demonstrated that the character and specific values of model responses were similar also in the case when the disturbance used to determine parameters of equivalent was different from the one applied during test.

The equivalent created with the method presented in the paper may be used in many cases including dynamic analyses of power systems, i.e. during international cooperation, when the KSE dynamic model should be passed on to an international partner in a form that does not violate the operator data confidentiality policy, and at the same time enables conducting research where dynamic behaviour of a full system model is maintained. Another potential application of the algorithm is the issue of AC system model reduction for the needs of dynamic analyses of cooperation of HVDC links. These are currently being studied under numerous projects of interconnecting off-shore wind farms or developing new inter-area connections.

REFERENCES

1. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
2. Madajewski K., Modele dynamiczne systemu elektroenergetycznego do badania ukladow przesylowych prądu stalego [Dynamic Models of the Power System to Test Transmission System of Direct Current], Institute of Power Engineering, Warsaw 2003.
3. Machowski J., Bialek J., Rumbly J., Power system dynamics. Stability and control, John Wiley and Sons Ltd, 2008.
4. Electric Power Research Institute: Dynamic Reduction, Vol. 1: Final Report, April 1993.

Michał Bajor

Institute of Power Engineering Gdańsk Branch

e-mail: m.bajor@ien.gda.pl

Graduated from Gdańsk University of Technology, Department of Computer Architecture, specializing in distributed computing. Currently working as a Research Assistant in the Institute of Power Engineering in Gdańsk, Poland. Participated in numerous wind farm grid connection studies, as well as in other studies concerning wind farms impact on the electrical system and other types of grid studies. The main areas of his interest include probabilistic aspects of wind generation impact on the power system and non-deterministic computational methods of optimization of various aspects of grid operation.

Michał Kosmecki

Institute of Power Engineering Gdańsk Branch

e-mail: m.kosmecki@ien.gda.pl

He graduated from the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology. Currently he works as a Research Assistant in the Automatics and System Analysis Department in the Institute of Power Engineering, Gdańsk Branch. He co-authored analyses dedicated to various aspects of the power system operation, including interconnection of renewable energy sources, system stability and modelling, also for real-time simulation purposes. He is particularly interested in high voltage direct current transmission. He has written several papers about this topic.

Maciej Wilk

Institute of Power Engineering Gdańsk Branch, Gdańsk University of Technology

e-mail: m.wilk@ien.gda.pl

He graduated with a major in Electrotechnics at the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology. Currently he works in the Automatics and System Analyses Department of the Institute of Power Engineering, Gdańsk Branch. He is also a PhD student in his parent faculty. He has participated in numerous works concerning interconnection studies for wind generation to the grid and other analytical works related to power system dynamics. He represents the Institute of Power Engineering in the European Commission project eHighways2050.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4-9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Metoda identyfikacji parametrów dynamicznych jednostek wytwórczych na podstawie przebiegów pozakłóceniovych

Autorzy

Michał Bajor
Michał Kosmecki
Maciej Wilk

Słowa kluczowe

algorytm genetyczny, ekwiwalentowanie, identyfikacja parametrów dynamicznych

Streszczenie

W artykule zaproponowano wykorzystanie algorytmu genetycznego do identyfikacji parametrów dynamicznych jednostek wytwórczych lub ekwiwalentów zastępujących obszary systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem przebiegów pozakłóceniovych. Zamieszczono również wyniki dwóch rodzajów testów oprogramowania, stworzonego na podstawie opracowanej metody. Testy zostały wykonane poprzez dobór parametrów pojedynczej jednostki wytwórczej oraz dla jednostki zastępczej, mającej za zadanie odwzorowanie zachowania dynamicznego większego obszaru systemu.

1. Wprowadzenie

Współczesne systemy elektroenergetyczne obejmują swoim obszarem olbrzymie tereny i składają się z bardzo dużej liczby elementów, z których każdy odwzorowywany jest odpowiadającymi mu modelami dynamicznymi. Ponadto w ramach jednego systemu swoją działalność prowadzi często wielu operatorów. Prowadzenie badań nad stabilnością tak dużych systemów jest bardzo utrudnione zarówno z technicznego (złożoność obliczeń), jak i formalnego (trudność uzyskania danych opisujących poszczególne elementy systemu) punktu widzenia. W związku z tym powszechnie przyjętą praktyką jest zastępowanie pewnych części analizowanego systemu różnymi formami ekwiwalentów, które w możliwie dokładny sposób odwzorowują zachowanie zastępowanego obszaru. Wymagane właściwości użytego ekwiwalentu będą zależały od charakteru prowadzonych badań. Do prowadzenia obliczeń rozprężowych wystarczający będzie ekwiwalent odwzorowujący statyczne zachowanie zredukowanego obszaru. Do wykonywania symulacji obejmujących stany przejściowe konieczne będzie wykorzystanie ekwiwalentu charakteryzującego się możliwie dokładnym odwzorowywaniem zachowania dynamicznego poszczególnych elementów znajdujących się na zastępowanym obszarze.

Badania, których przedmiotem jest ekwiwalentowanie, prowadzone są od wielu lat. Poniżej zamieszczono przyczyny, dla których prace nad tym działem są szczególnie ważne:

- Wzrastająca złożoność SEE – współczesne systemy elektroenergetyczne mogą składać się z bardzo dużej liczby elementów, z których każdy odwzorowywany jest odpowiadającymi mu modelami dynamicznymi. Na przykład w modelu dla 2011 roku liczba generatorów w KSE wynosi ok. 480.

Uzupełnienie modelu dynamicznego tak dużych systemów o modele nowych elementów, mających duży wpływ na dynamikę systemu (na przykład nowe, duże bloki w KSE, generacja rozproszona, farmy wiatrowe, energoelektronika, HVDC), dodatkowo komplikuje i utrudnia prowadzenie obliczeń dynamicznych.

- Względy praktyczne – obszary systemu elektrycznie odległe od miejsca wystąpienia analizowanego zakłócenia mają pomijalny wpływ na dynamikę niektórych zjawisk (np. stabilność kątowna pierwszego wychylenia wirnika, szybkie stany przejściowe) i ich szczegółowe modelowanie jest nieuzasadnione. Ma to szczególne znaczenie, gdy weźmiemy pod uwagę fakt wzrastającej rozległości współczesnych systemów elektroenergetycznych.
- Dostępność danych – dane niezbędne do stworzenia pełnego modelu dynamicznego całego systemu pracującego synchronicznie są często bardzo trudne do zdobycia. W dobie połączonych systemów wielu krajów (np. ENTSO-E CE, w którym synchronicznie pracują systemy elektroenergetyczne 34 krajów) pozyskiwanie danych dotyczących wielkich SEE jest utrudnione, m.in. ze względu na brak jednolitych regulacji dotyczących udostępniania danych i sposobu opisu modeli¹.
- Trudności natury obliczeniowej – obliczenia dynamiczne na modelach rozległych SEE często prowadzone są wielowariantowo, co nawet przy uwzględnieniu potężnych mocy obliczeniowych współczesnych komputerów jest skomplikowane i czasochłonne. Przy tak dużym nagromadzeniu danych bardzo łatwo o pomyłkę lub błąd, który tym trudniej zlokalizować, im większy jest badany system. Ekwiwalentowanie umożliwia znaczące skrócenie czasu trwania

obliczeń, które istotne jest zwłaszcza podczas prowadzenia badań o charakterze wielowariantowym.

- Ograniczenia programowe – pomimo dynamicznego rozwoju sprzętu komputerowego większość pakietów oprogramowania do badania stanów nieustalonych w systemie elektroenergetycznym posiada ograniczenie do rozmiaru badanego systemu. Ograniczenie takie w przeważającej liczbie programów jest niezależne od uwarunkowań sprzętowych. Nierzadko też cena zakupu licencji na oprogramowanie zależy od rozmiaru możliwego do analizowania systemu. Dodatkowo, wraz z szybkim rozwojem współczesnych SEE, pojawiają się w nim nowe elementy, dla których odpowiednie modele nie są jeszcze zaimplementowane w używanym oprogramowaniu.

Chcąc zapewnić prawidłowe zachowanie modelu systemu w sytuacjach różnych zakłóceń po wykonaniu jego redukcji, elementy utworzonej jednostki wytwórczej, zastępującej ekwiwalentowaną część systemu, muszą zostać odpowiednio sparametryzowane. Propozycja metody wyznaczenia parametrów ekwiwalentu dynamicznego jest przedstawiona w dalszej części artykułu.

2. Metoda

Jedną z metod wyznaczenia parametrów układu zastępczego jest ich dobór na podstawie porównania odpowiedzi modelu pełnego (przed redukcją) i modelu, w którym część systemu została zastąpiona ekwiwalentem. Jeżeli wymiar ekwiwalentu jest duży, to mamy do czynienia z zadaniem, którego rozwiązanie nie jest proste.

Rozwiązywanie takich złożonych problemów optymalizacyjnych jest głównym obszarem zastosowania algorytmów niedeterministycznych, które pozwalają na znalezienie rozwiązań problemów bardzo trudnych do rozwiązania przez algorytmy

¹ Sytuacja może się poprawić po opracowaniu i wdrożeniu standardu CIM dla dynamiki.

deterministyczne. Fundamentalną różnicą pomiędzy tymi dwoma rodzajami algorytmów jest fakt, że w przypadku algorytmu deterministycznego (różne wykonania rozwiązania jest jednoznacznie determinowane przez dane wejściowe, przeciwnie niż ma to miejsce dla algorytmów niedeterministycznych (różne wykonania algorytmu niedeterministycznego dla tego samego zestawu danych wejściowych zostaną zakończone otrzymaniem różniących się wyników). Do rozwiązania problemu właściwego doboru parametrów modeli dynamicznych, wchodzących w skład ekwiwalentu, zastosowano implementację algorytmu genetycznego.

Algorytmy genetyczne, zwane również ewolucyjnymi, są jednymi z najczęściej wykorzystywanych rodzajów niedeterministycznych algorytmów.

Algorytm genetyczny działa na zasadzie symulacji naturalnego procesu ewolucji, poprzez modelowanie procesów zachodzących w przyrodzie, takich jak selekcja naturalna, krzyżowanie czy mutacja. Podobnie jak w przypadku wszystkich niedeterministycznych algorytmów, obszar zastosowania algorytmów genetycznych obejmuje przede wszystkim szukanie rozwiązań złożonych problemów optymalizacyjnych.

Podstawowym pojęciem związanym z algorytmem genetycznym jest populacja. Populacja składa się z osobników, z których każdy reprezentuje pojedyncze rozwiązanie problemu. W przełożeniu na zagadnienie doboru wartości parametrów modelu dynamicznych ekwiwalentu osobnik jest zamodelowany jako zbiór modeli wchodzących w skład ekwiwalentu, wraz z wartościami poszczególnych parametrów każdego modelu, których wyznaczenie jest zadaniem algorytmu. Każdy taki osobnik jest potencjalnym rozwiązaniem problemu. Poszczególnym parametrem wszystkich modeli zostają a priori przypisane dopuszczalne zakresy ich wartości. Wartości parametrów, które mogą zostać łatwo uzyskane na drodze analitycznej (np. MVA), nie są wyznaczane, techniczna realizacja tego założenia polega na przyjęciu identycznych wartości (równych wyznaczonej wcześniej prawidłowej wartości) dla dolnego i górnego ograniczenia zakresu dopuszczalnych wartości, które może przyjmować parametr w trakcie działania algorytmu.

Pierwszą czynnością algorytmu jest utworzenie populacji startowej o zadanej liczebności. Populacja startowa jest tworzona w sposób losowy, tak aby zapewnić jak największe zróżnicowanie cech osobników (czyli wartości parametrów – w dopuszczalnym zakresie). Populacja startowa jest punktem wyjścia działania algorytmu.

Przebieg poszczególnych iteracji algorytmu (spotykane jest również pojęcie „pokolenia”) jest następujący: każdy osobnik populacji poddawany jest ocenie, na jej podstawie selekcjonowane są najlepsze osobniki, które dadzą źródło nowym osobnikom poprzez proces krzyżowania. Stworzone nowe osobniki, po ewentualnych mutacjach, tworzą nową populację (pokolenie), która przejdzie następnie analogiczny proces w nowej iteracji. W ten sposób każda populacja (poza startową, tworzona losowo) jest tworzona na podstawie najlepszych (pod kątem oceny rozwiązania) osobników z poprzedniej populacji, z intencją przejęcia

ich pożądaných cech. Działanie algorytmu kończy się po wykonaniu zadanej liczby iteracji lub w momencie osiągnięcia rozwiązania o satysfakcjonującej jakości (z powodu stosunkowo szybkich obliczeń, w niniejszej implementacji to kryterium nie było stosowane).

Kluczowa dla działania algorytmu jest funkcja oceny jakości osobnika (rozwiązania), która decyduje o możliwości przekazania jego cech (czyli wartości parametrów) pokoleniom w kolejnych iteracjach. W zaimplementowanym rozwiązaniu ocena osobnika opiera się na porównaniu przebiegów otrzymanych dla wyznaczonych parametrów, dla określonego zdarzenia (zdarzeń) z przebiegami wzorcowymi. Wartość oceny jest średnim błędem bezwzględnym otrzymanego przebiegu w stosunku do przebiegu wzorcowego. W zależności od wielkości, której przebieg jest analizowany, wartość błędu dotyczy całej długości obserwowanego przebiegu (w przypadku kąta wychylenia wirnika generatora) lub tylko jego zdefiniowanej części (w przypadku przebiegu napięcia ocena koncentruje się na fragmencie spadku i odbudowy napięcia w trakcie i tuż po zakłóceniu).

Po dokonaniu oceny populacji wszystkie osobniki są sortowane zgodnie z malejącą wartością funkcji oceny ich jakości. Proces selekcji polega na wyborze zadanej liczby (określonej jako ułamek ogólnej liczebności populacji) osobników o najlepszej ocenie i odrzuceniu pozostałych. Wybrane osobniki stanowią podstawę tworzenia kolejnego pokolenia. W tym celu spośród wyselekcjonowanej grupy losowo wybierane jest dokładnie tyle par osobników, ile wynosi liczebność populacji (która nie zmienia się podczas przebiegu algorytmu). Każdy nowy osobnik powstaje w wyniku krzyżowania wylosowanej pary. Krzyżowanie polega na przekazywaniu osobnikowi „potomnemu” cech obu osobników „rodziców” – w opisywanej implementacji poszczególne parametry nowego osobnika przyjmują wartości średnie z odpowiednich wartości parametrów obu „rodziców”.

Każdy stworzony w ten sposób osobnik może z określonym prawdopodobieństwem zostać poddany procesowi mutacji. Wystąpienie mutacji polega na losowych zmianach wartości niektórych (również wybranych losowo) parametrów modelu.

W ten sposób w każdej iteracji powstaje

nowa populacja osobników o tej samej liczebności, która następnie poddawana jest w analogiczny sposób procesowi oceny, selekcji, krzyżowania i mutacji.

Należy podkreślić, że z powodu niedeterministycznego charakteru algorytmu najlepszy osobnik w dowolnie wybranym pokoleniu niekoniecznie musi charakteryzować się wyższą jakością w stosunku do najlepszego osobnika pokolenia poprzedzającego, obserwowany jest jednak generalny trend poprawy jakości w kolejnych iteracjach algorytmu. Przykładowy postęp wykonania algorytmu (wartości funkcji oceny najlepszych osobników kolejnych populacji są niemiernowane – im niższa wartość, tym lepsze rozwiązanie) przedstawiono na wykresie na rys. 1.

W ramach niniejszej pracy zaprojektowano i zaimplementowano oprogramowanie komputerowe bazujące na opisanej powyżej koncepcji. W celu wykonywania symulacji dynamicznych niezbędnych w procesie oceny jakości osobników, aplikacja korzysta z zewnętrznego silnika obliczeniowego. Parametrami algorytmu są:

- liczebność populacji
- ułamek populacji wybierany w procesie selekcji i stanowiący podstawę tworzenia kolejnego pokolenia
- prawdopodobieństwo wystąpienia mutacji
- liczba iteracji (pokoleń).

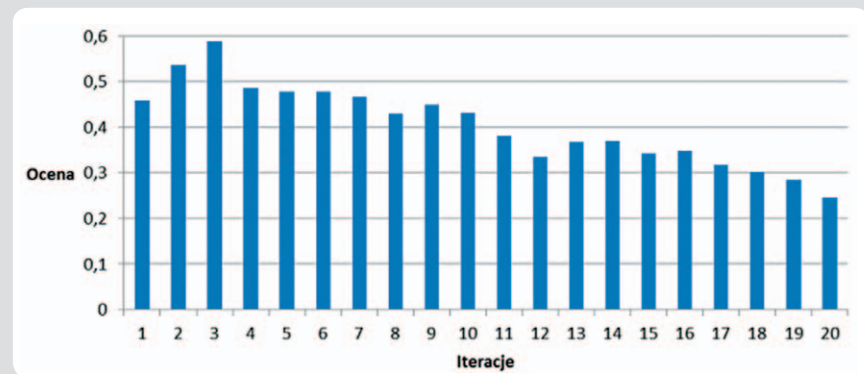
3. Testowanie

3.1. Model testowy

Do przeprowadzenia testów procedury wyznaczania parametrów dynamicznych przez zaproponowaną metodę wykorzystano jeden z publicznie dostępnych modeli testowych IEEE [1].

Model rozpyłykowy, wykorzystany do przeprowadzenia procesu redukcji, składa się z 39 węzłów oraz 10 generatorów synchronicznych, a także modeli odbiorów, transformatorów oraz linii przesyłowych. Użyty model jest wykorzystywany w wielu pracach naukowych dotyczących badania systemów elektroenergetycznych i często określany jest jako system Nowej Anglii.

Model testowy IEEE nie zawierał w sobie wszystkich niezbędnych informacji dotyczących jego zachowania dynamicznego, więc konieczne było uzupełnienie go o modele dynamiczne (zgodnie z modelami IEEE), a następnie weryfikacja ich struktur



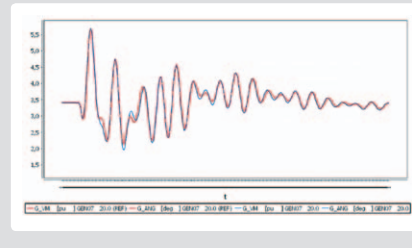
Rys. 1. Zapis przykładowego przebiegu algorytmu genetycznego – widoczny trend poprawy jakości rozwiązań

i parametrów. Wszystkie jednostki wytórcze zostały dokładnie odwzorowane poprzez model generatora synchronicznego (genrou, gensal) oraz jego układu wzbudzenia (exac4, exst1, exdc1, exac1). Dodatkowo część jednostek wytórczych wyposażono w model turbiny cieplnej (ieeeg1, tgov1) oraz model stabilizatora systemowego (pss2a). Dodatkowo przyjęto modelowanie odbiorów poprzez stały prąd czynny i stałą reaktancję. Schemat analizowanej sieci wraz z informacją o użytych strukturach modeli dynamicznych przedstawiony został na rys. 2. Kolor czerwony reprezentuje napięcie 400 kV, natomiast kolor niebieski napięcie 20 kV. Liczby nad symbolami linii przesyłowych oznaczają wartości rezystancji oraz reaktancji, wyrażone w jednostkach względnych. Pod symbolem jednostki wytórczej wymieniono typy modeli dynamicznych, które zostały wykorzystane do jej odwzorowania.

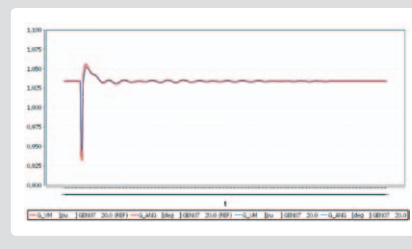
3.2. Dobór parametrów modelu jednostki wytórczej

Chcąc sprawdzić poprawność działania implementacji algorytmu genetycznego, przeprowadzono badania testowe z wykorzystaniem uproszczonego problemu. Przypadek testowy polegał na doborze wartości parametrów modeli dynamicznych generatora i regulatora wzbudzenia wybranej jednostki wytórczej, a więc analogicznie jak w przypadku docelowego zastosowania algorytmu, jednak bez redukcji systemu i tworzenia ekwiwalentu. Model systemu, na podstawie którego uzyskano przebiegi wzorcowe, oraz model używany do celów oceny rozwiązań badanych przez algorytm były zatem tożsame. Analizowano odpowiedź (przebiegi kąta wychylenia wirnika oraz napięcia na zaciskach generatora) wskazanej jednostki (generator przyłączony do węzła 46) na duże zakłócenie – bliskie zwarcie o czasie trwania 100 ms w węźle 2. Czas pojedynczej symulacji wynosił 20 s. Wyniki (dopasowane przebiegi) dla jednego z analizowanych przypadków testowych

przedstawiono na rys 3–4. Czerwoną pogrubioną linią oznaczone są przebiegi wzorcowe, cieńszą niebieską – przebiegi uzyskane dla parametrów dobranych przez algorytm.



Rys. 3. Przebieg kąta wychylenia wirnika uzyskany dla parametrów dynamicznych, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona)



Rys. 4. Przebieg napięcia na zaciskach generatora uzyskany dla parametrów dynamicznych, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona)

We wszystkich analizowanych przypadkach charakter odpowiedzi dynamicznej układu o parametrach dobranych przez algorytm genetyczny jest bardzo zbliżony do odpowiedzi układu wejściowego. Rejestrowane przebiegi kątów wirnika i napięcia generatorów charakteryzują się niemal identycznymi wartościami amplitudy i częstotliwości oscylacji. Nie zaobserwowano przesunięcia fazowego między otrzymanymi przebiegami. Uzyskane

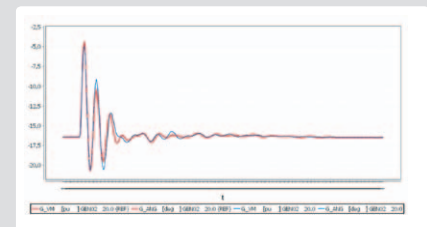
wyniki wskazują na możliwość zastosowania zaprojektowanego algorytmu do celów wyznaczania parametrów dynamicznych ekwiwalentu.

3.3. Wyznaczanie parametrów ekwiwalentu

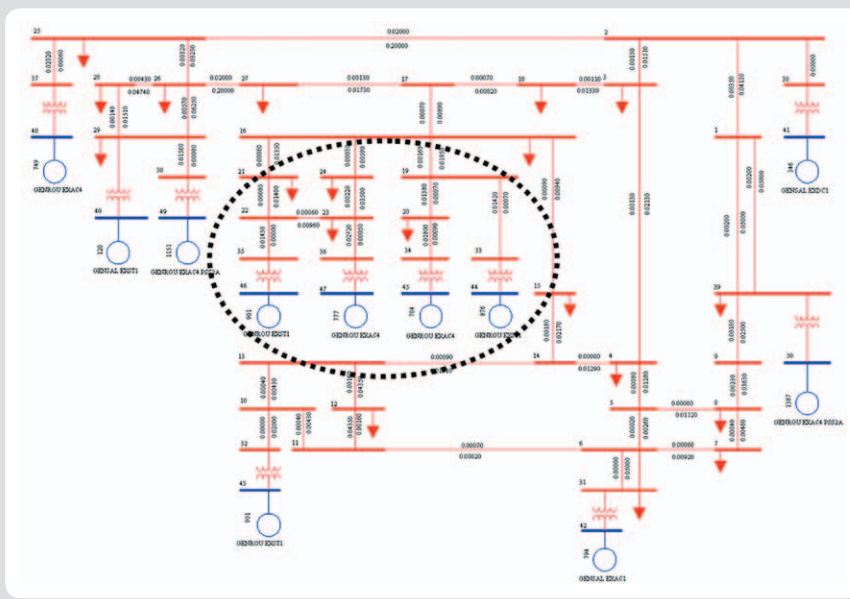
Przed przystąpieniem do właściwego procesu redukcji konieczne jest podzielenie analizowanego systemu na system wewnętrzny (badany) oraz zewnętrzny (redukowany). Na potrzeby niniejszej pracy część systemu podlegająca procesowi redukcji została oznaczona przerywaną elipsą na rys. 2. Składa się ona z czterech generatorów synchronicznych z różnorodnymi układami wzbudzenia oraz wielu linii przesyłowych i transformatorów.

Podobnie jak w przypadkach testowych, wyznaczone były wartości parametrów modeli dynamicznych generatora i regulatora wzbudzenia jednostki wytórczej, stanowiącej ekwiwalent zredukowanej części systemu. Analizowano odpowiedź (przebiegi kąta wychylenia wirnika oraz napięcia na zaciskach generatora) jednostki wytórczej, położonej w pobliżu zredukowanej części systemu (generator przyłączony do węzła 41), na bliskie zwarcie o czasie trwania 100 ms w węźle 2. Czas pojedynczej symulacji wynosił 20 s.

Uzyskane za pomocą algorytmu genetycznego wyniki (dopasowane przebiegi) przedstawiono na rys. 5. Przebieg kąta wychylenia wirnika uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona) Rys. 6. Przebieg napięcia na zaciskach generatora uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona) s. 5–6. Czerwoną pogrubioną linią oznaczone są przebiegi wzorcowe, cieńszą niebieską – przebiegi uzyskane dla parametrów dobranych przez algorytm. Przebiegi, uzyskane w trakcie symulacji wykonanych dla parametrów dobranych przez algorytm genetyczny, charakteryzują się bardzo wysokim stopniem zgodności z przebiegami wzorcowymi, szczególnie pod kątem najważniejszych wartości charakterystycznych (np. najniższy zanotowany poziom napięcia, pierwsze maksymalne wychylenie).



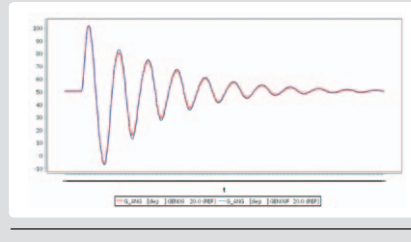
Rys. 5. Przebieg kąta wychylenia wirnika uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona)



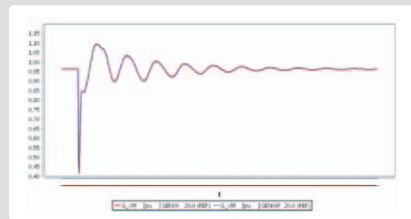
Rys. 2. Schemat analizowanej sieci wraz z informacją o użytych strukturach modeli dynamicznych oraz podziałem systemu na system wewnętrzny (badany) oraz zewnętrzny (redukowany)



Rys. 6. Przebieg napięcia na zaciskach generatora uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona)



Rys. 7. Przebieg kąta wychylenia wirnika uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona). Zakłócenie i obserwowana jednostka odmiennie niż użyte do wyznaczenia parametrów



Rys. 8. Przebieg napięcia na zaciskach generatora uzyskany dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu, wyznaczonych przez algorytm genetyczny (krzywa niebieska), w porównaniu z przebiegiem wzorcowym (krzywa czerwona). Zakłócenie i obserwowana jednostka odmiennie niż użyte do wyznaczenia parametrów

Algorytm potwierdził tym samym swoją przydatność do celów wyznaczania parametrów dynamicznych modeli. Warto wspomnieć, że dobre dopasowanie przebiegów obserwowano już po kilkunastu iteracjach algorytmu.

Chcąc dodatkowo zweryfikować poprawność uzyskanych wyników i uniknąć pułapki uzależnienia wyników od pojedynczego zdarzenia, tzn. sytuacji, kiedy dobrze parametry zapewnijają podobne przebiegi tylko w przypadku analizy dokładnie tego samego zdarzenia, dla którego zostały wyznaczone, przeprowadzono dalsze badania symulacyjne. Porównano podczas nich przebiegi otrzymane w wyniku symulacji na obu modelach systemu (pełnym i zawierającym ekwiwalent sparametryzowany uprzednio przez algorytm), dla odmiennego zakłócenia (zwarcie w węźle 25, obserwowany generator przyłączony do węzła 48) niż to, które posłużyło do wyznaczenia parametrów dynamicznych ekwiwalentu. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 7–8. W tym przypadku również widoczne jest bardzo dobre odwzorowanie przebiegów otrzymanych podczas symulacji na modelu pełnym poprzez przebiegi wynikowe symulacji na modelu zredukowanym.

4. Wnioski końcowe

We wszystkich analizowanych przypadkach rejestrowane przebiegi kątów wirnika i napięcia generatorów mają zbliżoną częstotliwość zmian oraz zbliżone amplitudy, a charakter odpowiedzi dynamicznej układu zredukowanego jest zbliżony do odpowiedzi układu przed redukcją. Z otrzymanych przebiegów wynika, że model, po

przeprowadzeniu procesu redukcji dynamicznej z wykorzystaniem zaproponowanej metody, jest odpowiedni do badania stabilności kątowej dużych zakłóceń.

Przeprowadzone testy wykazały, że charakter i wartości charakterystyczne odpowiedzi modelu zostały zachowane również w przypadku analizy zakłócenia odmiennego od tego, które posłużyło do wyznaczenia parametrów dynamicznych ekwiwalentu.

Stworzony za pomocą przedstawionej w artykule metody ekwiwalent może być wykorzystywany w wielu pracach obejmujących dynamiczne analizy systemów elektroenergetycznych, m.in. podczas współpracy międzynarodowej, gdy partnerowi zagranicznemu należy przekazać model dynamiczny KSE w takiej formie, aby nie naruszał polityki jawności danych operatorów, a jednocześnie umożliwiał prowadzenie badań, odwzorowując zachowanie pełnego modelu systemu. Inne potencjalne zastosowanie algorytmu to zagadnienie redukcji modelu systemu AC na potrzeby analiz dynamicznych współpracy układów HVDC z systemem elektroenergetycznym, aktualnie podejmowane w ramach licznych projektów przyłączania morskich farm wiatrowych lub tworzenia nowych połączeń międzysystemowych.

Bibliografia

1. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
2. Madajewski K., Modele dynamiczne systemu elektroenergetycznego do badania układów przesyłowych prądu stałego, Instytut Energetyki, Warszawa 2003.
3. Machowski J., Bialek J., Rummy J., Power system dynamics. Stability and control, John Wiley and Sons Ltd, 2008.
4. Electric Power Research Institute: Dynamic Reduction, Vol. 1: Final Report, April 1993.

Michał Bajor

mgr inż.

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

e-mail: m.bajor@ien.gda.pl

Absolwent Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Automatyki i Analiz Systemowych Instytutu Energetyki Oddział Gdańsk. Uczestnik licznych prac dotyczących zagadnień przyłączania generacji rozproszonej do sieci oraz innych prac analitycznych, związanych z pracą systemu elektroenergetycznego. Obszar jego zainteresowań obejmuje m.in. probabilistyczne aspekty wpływu generacji wiatrowej na system elektroenergetyczny oraz wykorzystanie niedeterministycznych metod obliczeniowych w analizach pracy sieci.

Michał Kosmecki

mgr inż.

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

e-mail: m.kosmecki@ien.gda.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Zakładzie Automatyki i Analiz Systemowych w Instytucie Energetyki Oddział Gdańsk. Współtworzył analizy poświęcone różnym aspektom pracy systemu elektroenergetycznego, m.in. przyłączaniu OZE, bezpieczeństwu pracy systemu oraz modelowaniu systemu, w tym na potrzeby symulacji w czasie rzeczywistym. Jest szczególnie zainteresowany tematyką układów przesyłowych prądu stałego, czemu poświęcił kilka publikacji.

Maciej Wilk

mgr inż.

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

e-mail: m.wilk@ien.gda.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, na kierunku elektrotechnika. Aktualnie jest zatrudniony w Zakładzie Automatyki i Analiz Systemowych Instytutu Energetyki Oddział Gdańsk, a także jest słuchaczem studiów doktoranckich organizowanych przez macierzysty wydział. Uczestniczył w licznych pracach dotyczących analiz przyłączeniowych generacji wiatrowej do sieci oraz innych pracach analitycznych, związanych z dynamiką systemu elektroenergetycznego. Reprezentuje Instytut Energetyki w projekcie Komisji Europejskiej eHigways2050.