

METODA IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW DYNAMICZNYCH JEDNOSTEK WYTWÓRCZYCH NA PODSTAWIE PRZEBIEGÓW POZAKŁÓCENIOWYCH – REFERAT KONFERENCYJNY

Michał BAJOR¹, Michał KOSMECKI¹, Maciej WILK¹

1. Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, ul. Reja 27, 80-870 Gdańsk
tel: (58 349 81 85) fax (58 341 76 85) e-mail: m.bajor@ien.gda.pl

Streszczenie: W artykule zaproponowano wykorzystanie algorytmu genetycznego do identyfikacji parametrów dynamicznych jednostek wytwórczych lub ekwiwalentów zastępujących obszary systemu elektroenergetycznego w oparciu o przebiegi pozakłócenia. W artykule 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.

Słowa kluczowe: algorytm genetyczny, ekwiwalentowanie, identyfikacja parametrów dynamicznych

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 w wielu przypadkach 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 zależą od charakteru prowadzonych badań. Do prowadzenia obliczeń rozpliwowych 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. Do niektórych powodów, dla których prace nad tym działem są szczególnie ważne,

należą: wzrastająca złożoność SEE, problemy z dostępnością danych, trudności natury obliczeniowej oraz ograniczenia programowe.

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

2. METODA

Jedną z metod wyznaczania parametrów układu zastępczego jest ich dobór na podstawie porównania odpowiedzi modelu pełnego 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 deterministyczne. Do rozwiązania problemu właściwego doboru parametrów modeli dynamicznych wchodzących w skład ekwiwalentu zastosowano implementację algorytmu genetycznego.

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, składająca się z osobników, z których każdy reprezentuje pojedyncze rozwiązanie problemu. W przełożeniu na zagadnienie doboru wartości parametrów modeli dynamicznych ekwiwalentu, osobnik jest zamodelowany jako zbiór modeli wchodzących w skład ekwiwalentu wraz z wartościami poszczególnych

parametrów każdego modelu, których wyznaczenie jest zadaniem algorytmu. Poszczególnym parametrom 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.

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).

Przebieg poszczególnych iteracji algorytmu jest następujący: każdy osobnik populacji poddawany jest ocenie, na podstawie której 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, tworzoną losowo) jest tworzona na podstawie najlepszych osobników z poprzedniej populacji. Działanie algorytmu kończy się po wykonaniu zadanej liczby iteracji.

Kluczowa dla działania algorytmu funkcja oceny jakości osobnika, która decyduje o możliwości przekazania jego cech w kolejnych iteracjach, w zaimplementowanym rozwiązaniu 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 tyle par osobników, ile wynosi liczebność populacji (niezmienna 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 modeli.

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.

W ramach niniejszej pracy zostało zaprojektowane i zaimplementowane oprogramowanie komputerowe bazujące na opisaną powyżej koncepcji. Dla celów wyko-

nywania symulacji dynamicznych niezbędnych w procesie oceny jakości osobników, aplikacja korzysta z zewnętrznego silnika obliczeniowego.

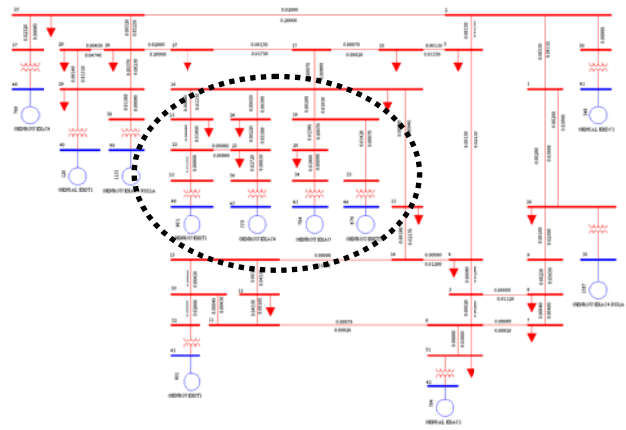
3. TESTOWANIE

3.1. Model testowy

Do przeprowadzenia testów procedury wyznaczania parametrów dynamicznych przez zaproponowaną metodę wykorzystano jeden z publicznie dostępnych modeli testowych IEEE [1], składający się z 39 węzłów oraz 10 generatorów synchronicznych, a także modeli odbiorów, transformatorów oraz linii przesyłowych.

Model testowy IEEE nie zawierał w sobie wszystkich niezbędnych informacji dotyczących jego zachowania dynamicznego, więc konieczne było uzupełnienie go o modele dynamiczne (zgodne z modelami IEEE), a następnie weryfikacja ich struktur i parametrów. Wszystkie jednostki wytwórcze zostały dokładnie odwzorowane poprzez model generatora synchronicznego (genrou, gensal) oraz jego układu wzbudzenia (exac4, exst1, exdc1, exac1). Dodatkowo część jednostek wytwórczych 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 rysunku 1. 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 wytwórczej wymienione zostały typy modeli dynamicznych, które zostały wykorzystane do jej odwzorowania.



Rys. 1 Schemat analizowanej sieci wraz z informacją o użytych strukturach modeli dynamicznych oraz podziałem systemu na system wewnętrzny (badany) oraz zewnętrzny (redukowany)

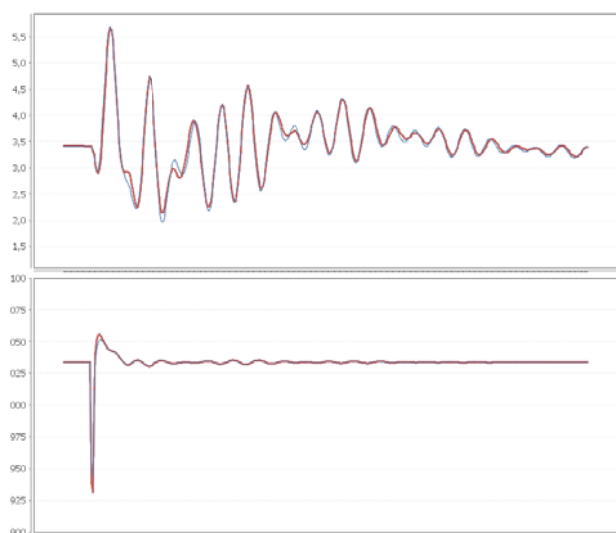
3.2. Dobór parametrów jednostki wytwórczej

Aby 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 wytwórczej, 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 rysunku 2. Czerwoną pogrubioną linią oznaczone są przebiegi wzorcowe, cieńszą niebieską - przebiegi uzyskane dla parametrów dobranych przez algorytm.

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.



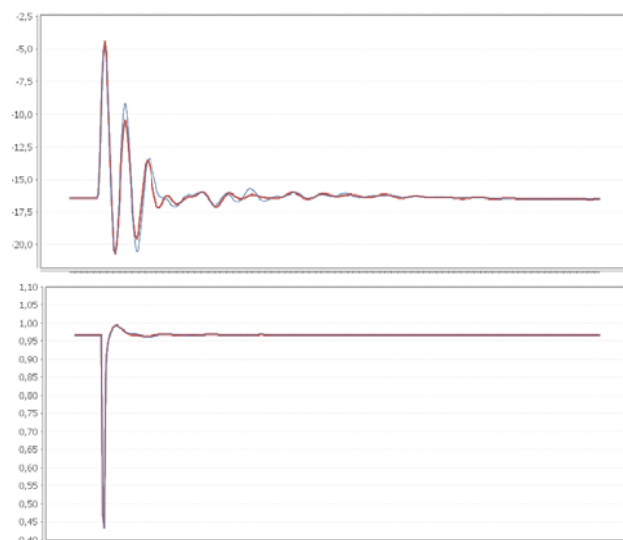
Rys. 2 Przebiegi kąta wychylenia wirnika i napięcia na zaciskach generatora uzyskane dla parametrów dynamicznych wyznaczonych przez algorytm genetyczny oraz przebiegi wzorcowe

3.3. Wyznaczanie parametrów ekwiwalentu

Przed przystąpieniem do właściwego procesu redukcji konieczne jest podzielnie analizowanego systemu na system wewnętrzny (badany) oraz zewnętrzny (redukowany). Na potrzeby niniejszej pracy część systemu podlegająca procesowi redukcji oznaczona została przerywaną elipsą na rysunku 1. Składa się ona z czterech generatorów synchronicznych z różnorodnymi układami wzbudzenia oraz szeregu linii przesyłowych i transformatorów.

Podobnie jak w przypadkach testowych, wyznaczone były wartości parametrów modeli dynamicznych generatora i regulatora wzbudzenia jednostki wytwórczej stanowiącej ekwiwalent zredukowanej części systemu. Analizowano odpowiedź (przebiegi kąta wychylenia wirnika oraz napięcia na zaciskach generatora) jednostki wytwórczej 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.

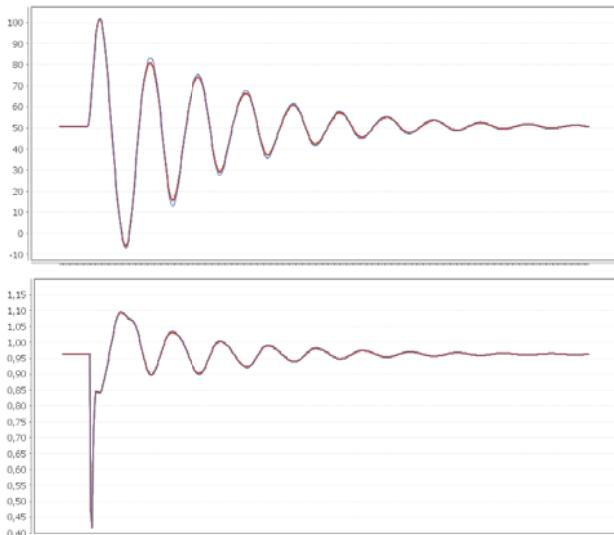
Uzyskane przy pomocy algorytmu genetycznego wyniki (dopasowane przebiegi) przedstawiono na rysunku 3. Czerwoną pogrubioną linią oznaczone są przebiegi wzorcowe, cieńszą niebieską - przebiegi uzyskane dla parametrów dobranych przez algorytm.



Rys. 3 Przebiegi kąta wychylenia wirnika i napięcia na zaciskach generatora uzyskane dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu wyznaczonych przez algorytm genetyczny oraz przebiegi wzorcowe

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).

Aby dodatkowo zweryfikować poprawność uzyskanych wyników i uniknąć sytuacji, w której dobrane parametry zapewniają podobne przebiegi tylko w przypadku analizy dokładnie tego samego zdarzenia, dla którego zostały wyznaczone, przeprowadzono dalsze badania symulacyjne, podczas których porównano przebiegi otrzymane w wyniku symulacji na obu modelach systemu 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 rysunku 4. W tym przypadku również widoczne jest bardzo dobre odwzorowanie przebiegów otrzymanych podczas symulacji na modelu pełnym poprzez przebiegi wynikowe symulacji na modelu zredukowanym.



Rys. 4 Przebiegi kąta wychylenia wirnika i napięcia na zaciskach generatora uzyskane dla parametrów dynamicznych ekwiwalentu wyznaczonych przez algorytm genetyczny oraz przebiegi wzorcowe. Zakłócenie i obserwowana jednostka odmiennie niż użyte do wyznaczenia parametrów

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

A METHOD OF DETERMINING GENERATING UNITS DYNAMIC PARAMETERS BASED ON DYNAMIC RESPONSE DURING DISTURBANCES – CONFERENCE PAPER

Key-words: genetic algorithm, dynamic equivalent, dynamic parameters identification

In large, modern electroenergetic systems there is often a lack of full information about structures and parameters of dynamic models of generating units. Thus it is important to be able to identify them basing on their dynamic response recorded after disturbances. Having knowledge on identifying those parameters will also enable to efficiently create dynamic equivalents which can be used for substituting whole areas of the system. In the paper, a method based on an implementation of genetic algorithm is proposed to identify parameters of the dynamic model basing on the analysis of disturbance response. The method is tested by identifying parameters of the single generating unit (for which measurements were known) and then by identifying parameters of the equivalence unit, that is used to replace a certain area of the system.

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 szeregu prac obejmujących dynamiczne analizy systemów elektroenergetycznych, m.in. w przypadku 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, a więc odwzorowywał 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 przyłączenia morskich farm wiatrowych lub tworzenia nowych połączeń międzysystemowych.

5. BIBLIOGRAFIA

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