ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 189 Nr kol. 1629

Paweł SOWA
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

DYNAMICZNE UKŁADY ZASTĘPCZE DLA SYMULACJI ZJAWISK PRZEJŚCIOWYCH W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Streszczenie. W artykule przeanalizowano procedury wykorzystywane przy kreowaniu schematów zastępczych dla złożonych systemów elektroenergetycznych. Opisano podstawowe metody stosowane do poszukiwania tych schematów podczas analizy zjawisk przejściowych elektromagnetycznych i elektromechanicznych. Zaproponowano strategię wykorzystującą Sztuczne Sieci Neuronowe (SSN) do identyfikacji dynamicznych ekwiwalentów określonych obszarów systemu. Wyniki weryfikacji tej strategii pozwalają na określenie uniwersalnego ekwiwalentu mogącego mieć zastosowanie zarówno do badania przebiegów przejściowych elektromagnetycznych, jak i elektromechanicznych.

DYNAMIC EQUIVALENTS FOR SIMULATION OF TRANSIENTS IN POWER SYSTEM

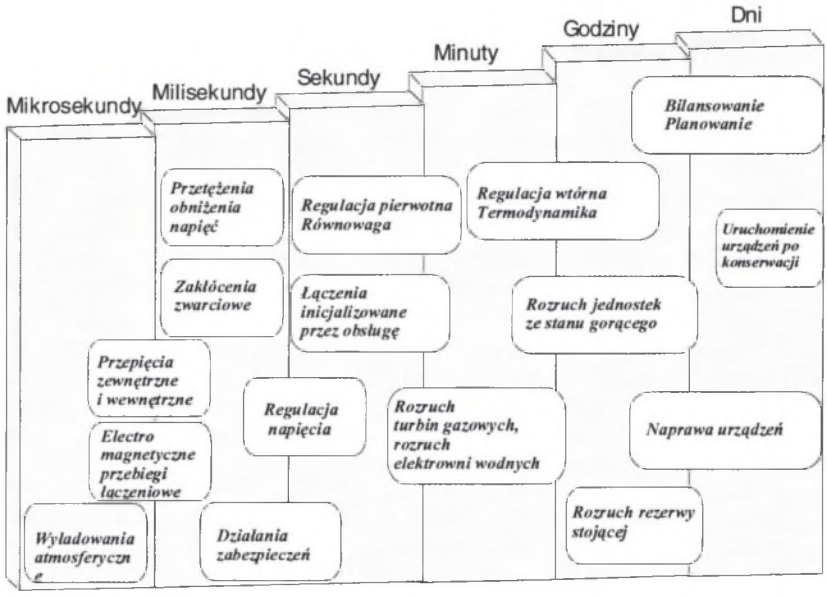
Summary. In the presented paper the procedures to create equivalent models of complex power systems are analysed. The methods are described for the search of equivalent systems during analyse of electromagnetic and electromechanical transients. The Artificial Neural Network (ANN) - based strategy is proposed for the identification of dynamic equivalents of determined areas of power system determined. The results of verification of proposed strategy allow for the determination of universal equivalent which can be use both for electromagnetic and electromechanical transient analysis.

1. WPROWADZENIE

Podczas zakłóceń (zwarciowych, łączeniowych itd.) w systemie elektroenergetycznym pojawiają się zjawiska przejściowe, których opis matematyczny w całym zakresie zmian – od początku powstania aż do ich wytłumienia - jest bardzo złożony. Istotnym czynnikiem utrudniającym wprowadzenie uniwersalnego modelu odwzorowującego system elektroenergetyczny podczas całego przebiegu przejściowego jest fakt, że poszczególne elementy systemu mają różną reprezentację matematyczną w zależności od analizowanego zjawiska. Jak wynika z pokazanego na rys. 1 umownego podziału procesów zachodzących w systemie elektroenergetycznym, zakres czasowy zjawisk jest bardzo szeroki – od mikrosekund do godzin a nawet dni. Dla każdego z tych zjawisk istnieją oddzielne modele reprezentujące poszczególne elementy systemu elektroenergetycznego. Przykładowo linia przesyłowa dla elektromagnetycznych zjawisk przejściowych musi odwzorowywać rozłożony (wzdłuż linii) charakter parametrów oraz zależność niektórych z nich od częstotliwości. Dodatkowo, podczas analizy bardzo szybkich zjawisk elektromagnetycznych występujących np. podczas wyładowań atmosferycznych, wymagane jest uwzględnienie nieliniowego charakteru

pojemności linii tzw. ulotu dynamicznego występującego po przekroczeniu tzw. napięcia krytycznego.

Z uwagi na fakt, że dla umownych zakresów czasu obowiązują odpowiednie modele elementów układu elektroenergetycznego, w praktyce nie przeprowadza się analizy teoretycznej dla całego czasu trwania zakłócenia. W zależności od zapotrzebowania na informacje o określonych wielkościach w systemie podczas zakłócenia analiza podlega ograniczeniu do odpowiedniego zakresu czasu, w którym ma być przeprowadzona. Oczywiście, podział stanów nieustalonych jest umowny zarówno pod względem częstotliwości granicznych, jak i przyporządkowania określonym stanom odpowiednich odwzorowań elementów układu.



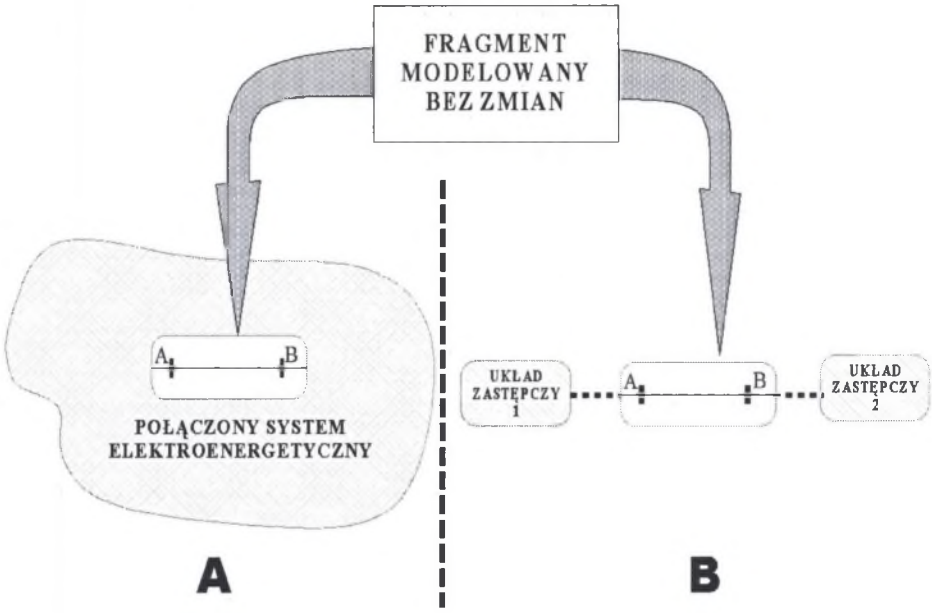
Rys. 1. Wybrane stany systemu elektroenergetycznego – podział umowny
Fig. 1. Conventional partition of states of power system

Podczas analizowania np. stanu systemu od początku trwania zakłócenia przez okres np. kilku sekund wymagana byłaby nagła zmiana modelu danego elementu w określonym punkcie czasowym, co stanowiłoby zarówno błąd merytoryczny, jak i przyczynek do otrzymywania niewiarygodnych wyników badań symulacyjnych. Aktualnie jest oczywiście możliwe zastosowanie pojedynczych modeli najbardziej złożonych, możliwych do wykorzystania podczas całego czasu trwania zakłócenia, jednak pod uwagę właściwości systemu elektroenergetycznego, ściślej zachowanie poszczególnych elementów podczas stanu nieustalonego, odwzorowanie uniwersalne systemu (wszystkich jego elementów) dla całego zakresu częstotliwości byłoby uciążliwe, a w niektórych przypadkach błędne.

Prowadzenie takich obliczeń zawsze będzie związane z wątpliwościami dotyczącymi celowości dokładnego modelowania każdego z elementów lub zakresu uproszczeń układu oraz ich wpływu na wiarygodność otrzymywanych wyników. Uproszczenia dotyczące poszczególnych modeli lub części systemu stosowane są powszechnie z uwagi na trudności dotyczące możliwości zebrania dokładnych parametrów wymaganych z punktu widzenia sposobu odwzorowania poszczególnych elementów układu.

Najczęściej stosowanym sposobem analizy zjawisk przejściowych w systemie elektroenergetycznym jest bardzo dokładne odwzorowanie danego (badanego) elementu oraz zastąpienie pozostałej części systemu za pomocą układów zastępczych (ekwiwalentów), tak jak to pokazano poglądowo na rys. 2. Należy jednak podkreślić, że taki stopień uproszczenia,

praktykowany przez wiele lat w niektórych badaniach (przy świadomości popełnianego błędu) jest przy obecnym stanie wiedzy niedopuszczalny. Układ pokazany w części B na rys. 2 może odwzorowywać tylko systemy pracujące oddzielnie np. system lokalny współpracujący z innym układem bądź z systemem krajowym.



Rys. 2. Postępowanie podczas badań symulacyjnych: A – układ oryginalny B – układ zastępczy
Fig. 2. Procedure of simulation investigation: A – original system, B – equivalent network

Problemem poszukiwania schematów zastępczych dla złożonego układu elektroenergetycznego zajmuje się od wielu lat szereg ośrodków naukowych na całym świecie [1, 2, 3, 4]. Wszystkie analizy ograniczają się jednak do wyznaczania układów ekwiwalentnych odpowiednich dla ściśle ograniczonego zakresu czasowego, np. dla badań zjawisk elektromagnetycznych lub elektromechanicznych. Jak dotychczas nie określono metody wyznaczania takich schematów dla szerszego zastosowania, obejmujących np. kilka etapów stanów przejściowych.

W niniejszym artykule zaprezentowano nową ideę wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do kreowania uniwersalnych schematów zastępczych mających zastosowanie zarówno dla badań stanów elektromagnetycznych jak i elektromechanicznych.

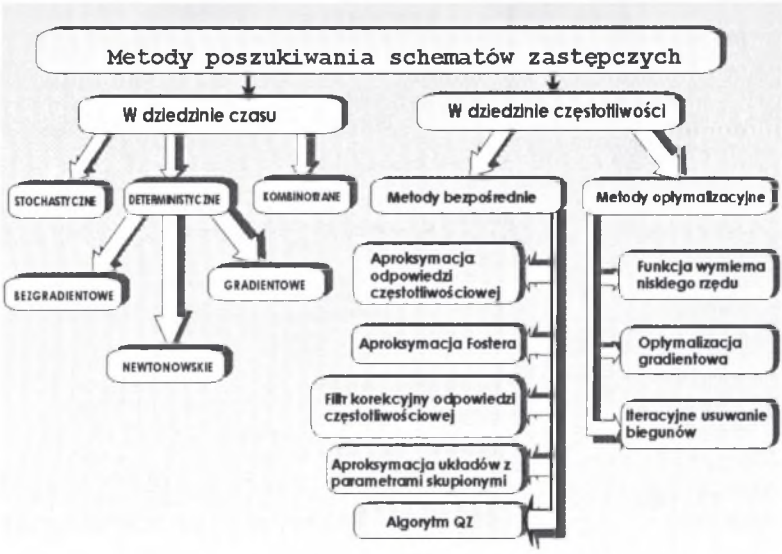
2. KONSTRUKCJA SCHEMATÓW ZASTĘPCZYCH DO ANALIZY ZJAWISK PRZEJŚCIOWYCH

2.1. Układy zastępcze do analizy przebiegów elektromagnetycznych

Pomimo wielu lat badań jak dotychczas nie znaleziono uniwersalnego układu zastępczego, który mógłby odwzorowywać wiernie zachowanie się systemu elektroenergetycznego podczas elektromagnetycznych stanów przejściowych. Badania przeprowadzane były i są w dziedzinie częstotliwości – w celu poszukiwania struktury układu zastępczego [5] oraz w dziedzinie czasu – dla identyfikacji parametrów schematu zastępczego [6]. Rozwiązaniem przynoszącym – jak dotychczas - najlepsze rezultaty było postępowanie dwuetapowe – w pierwszym wyznaczano

w dziedzinie częstotliwości strukturę schematu zastępczego, a następnie identyfikowano w dziedzinie czasu jego parametry.

Wśród wielu metod wyznaczania oraz optymalizacji struktury schematu zastępczego można wyróżnić dwie grupy: metody bezpośrednie oraz optymalizacyjne. W dziedzinie czasu wśród metod optymalizacyjnych znane są podejścia deterministyczne, probabilistyczne oraz mieszane. Dla analizy zjawisk elektromagnetycznych do wyznaczania ekwiwalentów przydatne są metody deterministyczne, w szczególności metody gradientowe, newtonowskie oraz bezgradientowe. Na rysunku 3 wyszczególniono najczęściej stosowane metody optymalizacyjne w dziedzinie czasu oraz częstotliwości.



Rys. 3. Metody poszukiwania schematów zastępczych
Fig. 3. Methods for searching of equivalent network

Należy podkreślić, że metody poszukiwania ekwiwalentów w dziedzinie częstotliwości nie mają nieograniczonego zastosowania do analizy zjawisk elektromagnetycznych. Szczególnie dyskusyjne jest ich wykorzystanie do badania zakłóceń niejednoczesnych oraz zawierających elementy nieliniowe. Z kolei identyfikacja parametrów odbywa się przy założeniu narzuconej struktury schematu zastępczego, co powoduje, że efektywność optymalizacji zależna jest od:

- złożoności struktury,
- liczby identyfikowanych parametrów,
- liczby pojawiających się minimum lokalnych funkcji celu,
- kroku czasowego (obliczeniowego).

Jeżeli identyfikacja parametrów określonego schematu zastępczego nie jest skuteczna – funkcja celu nie osiągnie wymaganego minimum - wówczas należy rozpocząć optymalizację od początku dla zmienionych wartości początkowych poszukiwanych parametrów. Gdy ten proces nie przyniesie pozytywnych skutków, konieczna będzie zmiana struktury schematu zastępczego wraz z ponowną identyfikacją parametrów.

Jak widać zatem dotychczas stosowane, dostępne metody poszukiwania i optymalizacji schematów zastępczych do symulacji elektromagnetycznych stanów przejściowych nie dają gwarancji otrzymania rezultatu, który mógłby zostać uogólniony na wszystkie badane rodzaje zakłóceń oraz topologie systemów. Dotychczasowe analizy wykazały wprawdzie większą przydatność pewnych metod oraz struktur układów zastępczych, jednak wyprowadzanie z tego uogólniających wniosków byłoby zbyt ryzykowne. Każdy układ zastępczy uzyskany (po identyfikacji jego parametrów) dla danego systemu elektroenergetycznego może być

wykorzystany do uzyskania wiarygodnych wyników - porównywalnych z otrzymywanymi w ukladzie oryginalnym tylko w tym konkretnym systemie.

W tej sytuacji sensowność zastępowania określonych części obszarów systemu elektroenergetycznego jest sensowne tylko wtedy, jeżeli nie mamy dostępu do informacji o parametrach elementów pracujących w tych obszarach.

2.2. Układy zastępcze do analizy przebiegów elektromechanicznych

Poszukiwanie układów zastępczych do zastosowania w analizie zjawisk elektromechanicznych odbywa się na innych zasadach w porównaniu z metodami podanymi w punkcie 2.1. Podstawą określania ekwiwalentów jest przeprowadzanie redukcji systemu oryginalnego. Jest to dopuszczalne z uwagi na fakt, że wszystkie elementy systemu mogą być odwzorowane za pomocą parametrów skupionych.

Zasadniczo metody redukcji systemu elektroenergetycznego do prostego schematu zastępczego można zgrupować w trzy podstawowe podejścia:

- analiza modalna
- metody koherentne,
- technika modalno-koherentna.

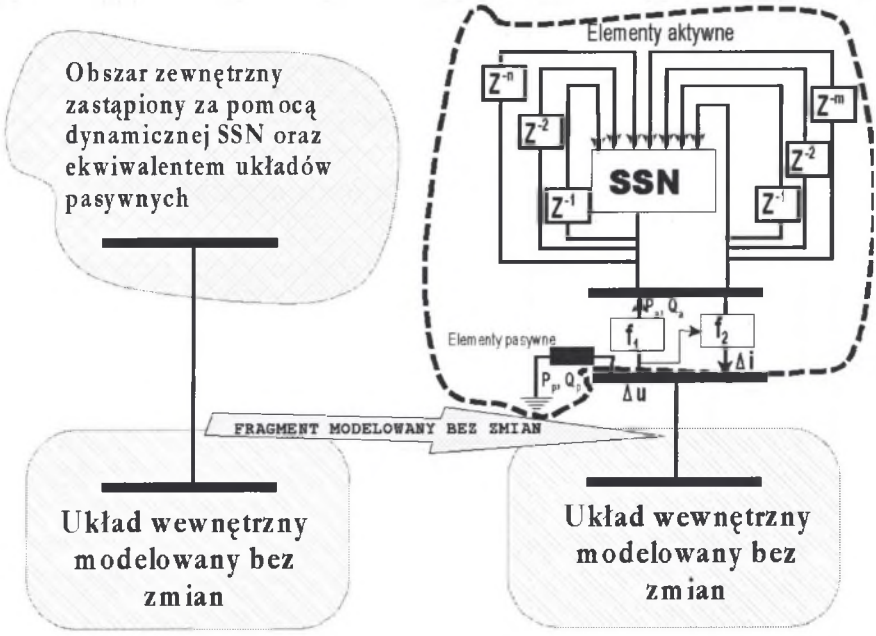
Generalnie poszukiwanie schematów zastępczych można odnieść oddzielnie dla układów zawierających lub nie elementy nieliniowe. Dla układów linowych zastępowanie części systemu odbywa się za pomocą metod opartych na analizie modalnej [7-10]. Dokładne wyniki można otrzymać tylko w otoczeniu punktu pracy, dla którego model został wyznaczony, w innym przypadku nie będzie stanowił adekwatnej reprezentacji redukowanego sytemu elektroenergetycznego. Dodatkowe ograniczenia występują w przypadku konieczności redukcji bardzo dużego systemu elektroenergetycznego [11].

Alternatywnym rozwiązaniem, mającym zastosowanie również do układów nieliniowych, są metody koherentne, gdzie następuje identyfikacja grup generatorów koherentnych oraz ich agregacja do pojedynczej maszyny zastępczej reprezentującej każdą z tych grup [12-14]. Taka maszyna jest opisana oczywiście za pomocą nowych parametrów, które mogą być identyfikowane przy wykorzystaniu znajomości czasowych przebiegów podczas zaburzeń w pracy generatora lub na podstawie wyznaczania wartości własnych systemu. Pierwszy sposób wymaga przeprowadzenia symulacji zakłóceń w pracy systemu, w drugim analiza modalna zastępuje identyfikację w dziedzinie czasu, dzięki czemu przeprowadzanie symulacji oraz definiowanie zaburzeń nie jest konieczne [7].

Wymienione metody, jak również ich kombinacje znalazły zastosowanie w kilku programach komputerowych użytkowych. Metoda koherentna została zaimplementowana do pakietu DYNRED [15], który jest wykorzystywany do konstrukcji dynamicznych ekwiwalentów dla bardzo dużych i złożonych systemów elektroenergetycznych. Kombinacja metody koherentnej oraz analizy modalnej znalazła zastosowanie w pakiecie oprogramowania EUROSTAG [16].

3. ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO WYZNACZANIA DYNAMICZNYCH EKWIWALENTÓW SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Podstawą proponowanej metody jest zastępowanie wszystkich aktywnych elementów w złożonym systemie zewnętrznym za pomocą dynamicznych SSN przyłączonych do określonych punktów sieci, do których jednocześnie podłączony jest zastępczy układ odwzorowujący obciążenia pasywne w obszarze zewnętrznym [17]. Zasada proponowanego podejścia jest pokazana na rys. 4.



Rys. 4. Zastosowanie SNN do ekwiwalentowania systemu elektroenergetycznego
Fig. 4. Application of ANN for equivalencing of power system

Wartość chwilowa napięcia "na zaciskach" układu zewnętrznego jest w każdym kroku czasowym wykorzystywana do obliczania znormalizowanych odchyleń napięcia (funkcja f_1 na rysunku 4). Stanowią one podstawę do obliczania bieżących wartości odchyleń prądu za pomocą SNN. Wartości znormalizowane prądu i napięcia obliczane są na podstawie ich wartości początkowych przy wykorzystaniu wzorów:

$$\Delta \underline{I}^{n}_{a,i} = \frac{\underline{I}_{a,i} - \underline{I}^{0}_{a,i}}{\underline{I}^{0}_{a,i}}, \tag{1}$$

$$\Delta \underline{U}^{n}_{i} = \frac{\underline{U}_{i} - \underline{U}^{0}_{i}}{\underline{U}^{0}_{i}}, \tag{2}$$

gdzie:

$\Delta \underline{I}^{n}_{a,i}$ - znormalizowane odchylenie wartości prądu wytwarzane lub pobierane przez element aktywny za zaciskach i,

$\underline{I}_{a,i}$ - prąd wytwarzany lub pobierany przez element aktywny na zaciskach i,

$\Delta \underline{U}^{n}_{i}$ - znormalizowane odchylenie wartości napięcia na zaciskach i,

U_i - napięcie na zaciskach i,

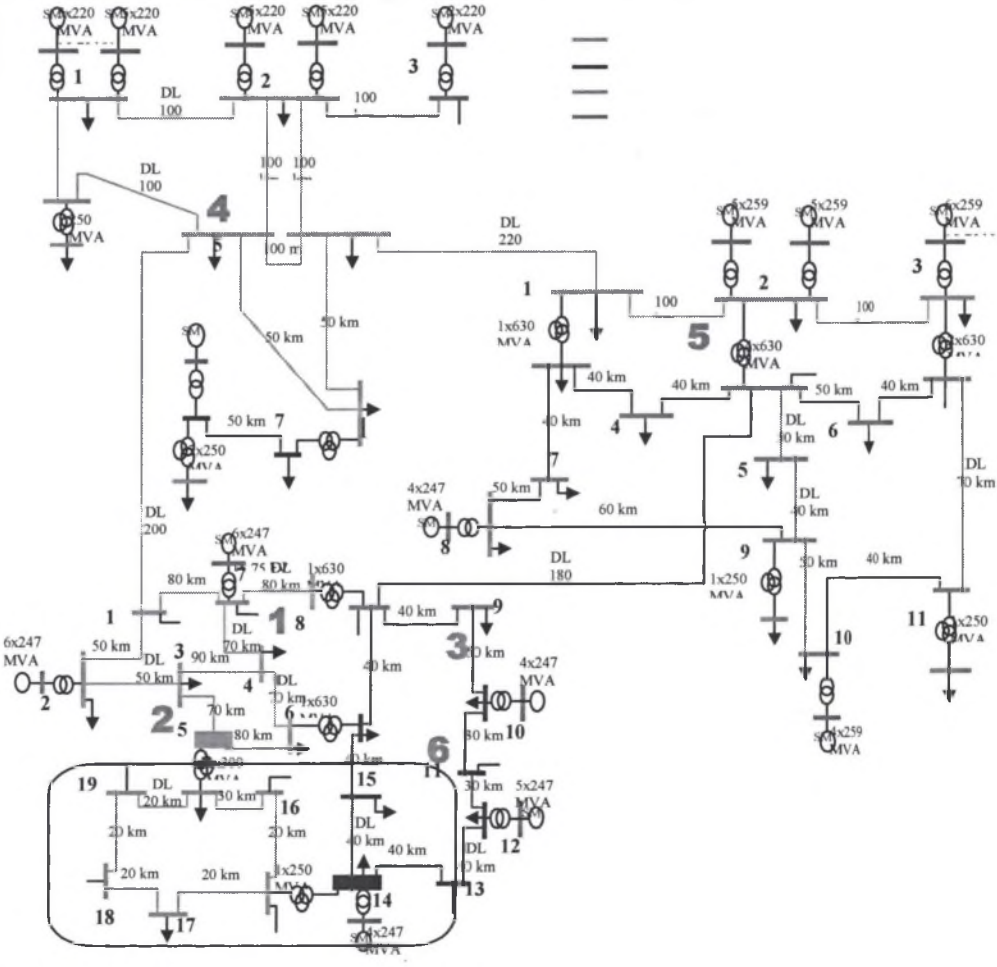
$\underline{I}^{0}_{a,i}, U^{0}_{i}$ - odpowiednio wartości początkowe prądu i napięcia.

Część rzeczywista i urojona $\Delta \underline{U}_i^n$ są wykorzystane jako oddzielne wejścia dla SSN, podczas gdy część rzeczywista i urojona $\Delta \underline{I}_{a,i}^n$ stanowią oddzielne wyjścia dla SSN. Aktualne wartości prądu są obliczane wewnątrz funkcji f_2 i podawane na zaciski wyjściowe. Wykorzystanie wartości prądów i napięć z poprzedniego kroku obliczeniowego na wejściu SSN stanowi podstawę do obliczania dynamicznego ekwiwalentu, który może mieć zastosowanie dla dowolnego systemu elektroenergetycznego zawierającego elementy nieliniowe.

4. TESTOWANIE METODY DO OBLICZANIA PRZEBIEGÓW PRZEJŚCIOWYCH

4.1. Symulacja zjawisk elektromechanicznych

Na rysunku 5 pokazano układ testowy PST16 [18], stanowiący podstawę do poszukiwania ekwiwalentu dla badania zjawisk przejściowych elektromechanicznych.

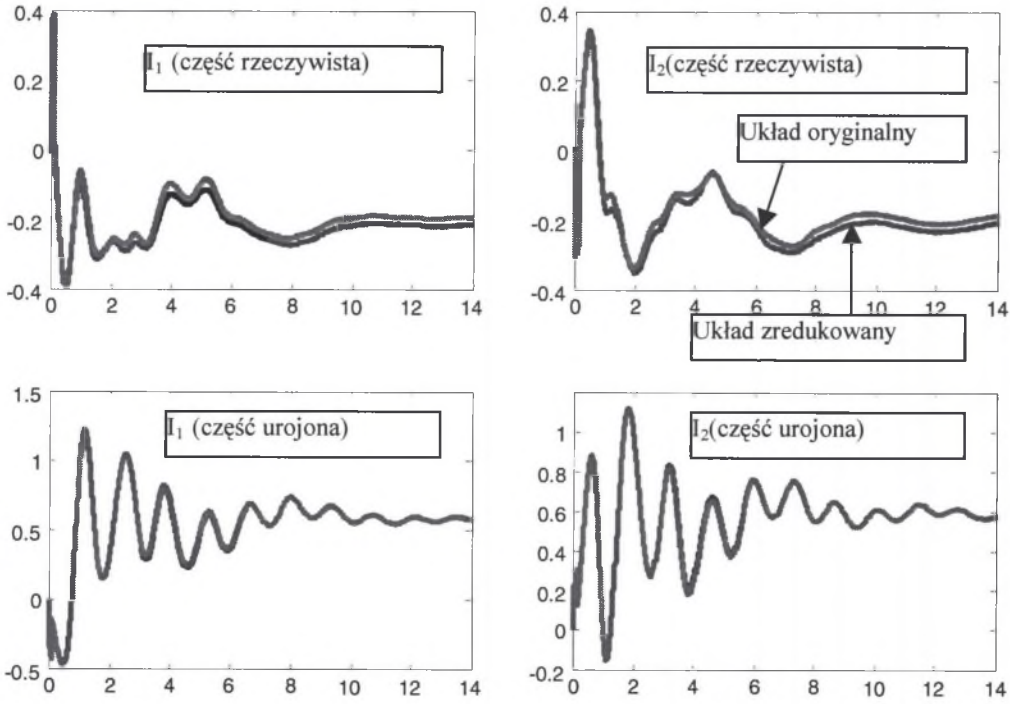


Rys. 5. Układ testowy do symulowania przebiegów elektromechanicznych
Fig. 5. Diagram of tested network for simulation of electromechanical transients

W sieci tej wybrano sześć punktów, w których symulowano trójfazowe zwarcia, zaś w dwóch punktach (węzeł 5 oraz 14) prowadzono badania porównawcze przebiegów przejściowych przed i po redukcji układu. Do obliczania chwilowych wartości prądów i napięć w systemie elektroenergetycznym wykorzystano program komputerowy *Power System Dynamics* (PSD), zaś do identyfikacji ekwiwalentu SNN wykorzystano program pomocniczy, który dysponował sześcioma algorytmami do testowania i trenowania sieci neuronowej. Po przeprowadzeniu odpowiednich prób stwierdzono, że najlepsze rezultaty można uzyskać z algorytmem uczenia opartym na wstecznej propagacji błędu (Online Backprop – Rand). Na rysunku 6 pokazano przykładowe rezultaty identyfikacji dynamicznego ekwiwalentu otrzymanego za pomocą SSN. Przebiegi przejściowe prądu – część rzeczywista i urojona – są obliczane i porównywane w układzie oryginalnym oraz zredukowanym dla przypadku symulacji zwarcia trójfazowego wymuszanego w punkcie 1.

Porównując otrzymane przebiegi stwierdzono bardzo dużą zbieżność otrzymanych rezultatów w układzie oryginalnym i zredukowanym. W niektórych przypadkach wyniki obliczeń są dla obu układów identyczne.

Należy stwierdzić, że proponowana metoda pozwala na określenie uniwersalnego, opartego na SSN ekwiwalentu danego systemu elektroenergetycznego, który może mieć zastosowanie również dla innych wartości początkowych spowodowanych zmianami w zewnętrznym systemie elektroenergetycznym. Najcenniejszą zaletą proponowanego podejścia jest fakt, że do określenia dynamicznego ekwiwalentu jest potrzebna znajomość wyłącznie wielkości zmiennych na zaciskach układu zastępczego.



Rys. 6. Porównanie wartości prądów w układzie oryginalnym oraz zredukowanym dla wymuszonego zwarcia trójfazowego w pkt.1

Fig. 6. Comparison of current values in original and reduced system during three-phase fault at point 1

4.2. Symulacja zjawisk elektromagnetycznych

Sukces poszukiwania uniwersalnego ekwiwalentu do badania zjawisk przejściowych elektromechanicznych stanowił podstawę do rozpoczęcia analiz poszukiwania takiego układu również dla przebiegów elektromagnetycznych. Szczególnie zachęcający był wniosek, że dla identyfikacji ekwiwalentu przy wykorzystaniu SSN wystarczy znajomość przebiegów prądów lub napięć na zaciskach układu zastępczego. Takie podejście jest szczególnie ważne przy konieczności zastępowania systemu zewnętrznego w stosunku do elementu dwustronnie zasilanego z systemów połączonych – jak to pokazano wcześniej na rys. 2A.

W celu zbadania możliwości wykorzystania proponowanej metody do zjawisk elektromagnetycznych przeprowadzono badania testowe wykorzystując do symulacji przebiegów przejściowych program MicroTran [19]. Podobnie jak to wykazano w punkcie 4.2, również dla zjawisk elektromagnetycznych uzyskano dużą zbieżność porównywanych wyników. Badania przeprowadzono dla zwarć symulowanych w kilku wybranych punktach systemu elektroenergetycznego. Oprócz porównywania rezultatów otrzymanych w układzie zredukowanym oraz oryginalnym dokonano analizy tych wyników biorąc pod uwagę wielkości pomierzone w rzeczywistym układzie elektroenergetycznym.

Z uwagi na ważność i złożoność tego zagadnienia rezultaty poszukiwania ekwiwalentów dla zjawisk elektromagnetycznych wraz z całokształtem analizy tego problemu zostaną zaprezentowane w oddzielnym artykule.

5. UWAGI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano nowe podejście w dziedzinie poszukiwania układów zastępczych uniwersalnych znajdujących zastosowanie zarówno do analizy zjawisk przejściowych elektromagnetycznych jak i elektromechanicznych. Proponowana metoda wykorzystuje możliwości, jakie stwarzają SSN. Dużą zaletą proponowanego rozwiązania jest fakt, że do identyfikacji określonego ekwiwalentu wystarczy znajomość zmiennych parametrów napięciowych i prądowych na zaciskach oddzielających układ redukowany od układu modelowanego bez zmian. Wszystkie przeprowadzone testy wykazały zaskakującą zbieżność rezultatów otrzymanych metodami konwencjonalnymi.

LITERATURA

1. Morched A.S. and.Brandwajn V.: Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transient Studies, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.PAS-102, No. 9, pp. 2984-2994, 1983.
2. .Do V.Q, Gavrilovic MM.: An Iterative Pole Removal Method for Synthesis of Power System Equivalent Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol.. PAS-103, No.8, 1994, pp.2065-2070.
3. Ibrahim A.I., Salama M.M.A.: Frequency Dependent Network Equivalent for AC Power System Using the QZ Algorithm, CCECE/CCGEI'95, Vol. No,3/4, 1995, pp 56-59
4. Kizilcay M.: Low-Order Network Equivalents for Electromagnetic Transients Studies, ETEP, Vol.3, No.2, 1993, pp.123-129.
5. Search of Optimum Equivalent Representation for Transient Investigations during non-Simultaneous Faults, P.Sowa, Proceedings of the IASTED, Int. Conference Modeling and Simulation, Pittsburgh, USA, 1998, IASTED/ACTA Press, ISBN: 0-88986-252-4, ISSN: 1021-818, pp.466-470.
6. Optimization of Equivalent Networks for Transient Simulation in H.V. Transmission Systems, P.Sowa, IASTED, International Conference - Modeling, Simulation and Optimization, Gold Coast, Australia, May. 6-9, Paper #: 242-205, 1996.

7. Sven Demmig, Habil Hans Pundt and István Erlich:"Identification of external system equivalents for power system stability studies using the software package MATLAB", 12 th power systems computation conference, Dresden, Germany, August 19-23, 1996.
8. Nojiri K., Suzaki S., Takenaka K. and Goto M.: "Modal reduced dynamic equivalent model for analog type power system simulator", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 12, Issue: 4, Nov. 1997, Page(s): 1518-1523.
9. Nojiri K., Suzaki S., Takenaka K. and Goto M.: "Modal reduced dynamic equivalent model for analog type power system simulator", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 12, Issue: 4, Nov. 1997, Page(s): 1518-1523.
10. De Oliveira S.E.M.,.Massaud A.G.: Modal dynamic Equivalent for Electric Power System", Part II, IEEE Trans on PS, Vol. 3, No. 4, November 1988, Page(s): 1731-1737.
11. Kim Jin-Yi, Dong-Jun Won, Seung-Il Moon.: "Development of the dynamic equivalent model for large power system", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Volume: 2, 15-19 July 2001, Page(s): 973-977 volume2.
12. Joo S. K., Liu C. C., Jones L. and Choe J. W.: Coherency techniques for dynamic equivalents incorporating rotor and voltage dynamics", Bulk Power Systems Dynamics and Control – V, Security and Reliability in a Changing Environment, Aug. 2001, Hiroshima, Japan.
13. Germond A.J., .Podmore R.: "Dynamic Aggregation of Generating Unit Models", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-97, No. 4, July/Aug.1978, Pages: 1060-1069.
14. Miah A. M.: "Simple Dynamic Equivalent for Fast Online Transient Stability Assessment", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Volume: 145, Issue: 1, January 1998, p. 49-55.
15. Rogers Wong, G.J., Ottevangers D.Y., Wang J., L.: "Dynamic reduction, Version 1.0", EPRI-TR-102234-Vol.1, Technical Report, 1993 Apr 01.
16. Meyer B. (EDF) and Stubbe M. (TRACTEBEL), "EUROSTAG - A Single Tool for Power System Simulation", TRANSMISSION & DISTRIBUTION International, March 1992.
17. Azmy A.M., Erlich I., Sowa P.: "Artificial Neural Network-Based Dynamic Equivalents for Distribution Systems Containing Active Sources", IEEE Power Systems, 2004 (w druku).
18. Test network, PST16,www.uni-duisburg.de/FB9/EAN/doku/teeuwsen/PST16.html
19. MicroTran, Transients Analysis Program for Personal Computers, MicroTran Power System Analysis Corporation, Published, June 1991, Vancouver, B.C., Canada.

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 maja 2004 r. Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski