

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Walidacja wybranych modeli symulacyjnych środowiska Matlab/Simulink z wykorzystaniem sprzętowego symulatora systemu elektroenergetycznego

Michał Brodzicki, Arkadiusz Frącz, Maciej Klebba

Katedra Elektrotechniki Okrętowej, Akademia Marynarki Wojennej
email: m.brodzicki@amw.gdynia.pl, a.fracz@amw.gdynia.pl, m.klebba@amw.gdynia.pl

STRESZCZENIE: Elektroenergetyka jest dziedziną zajmującą się szeroko rozumianymi zagadnieniami związanymi z urządzeniami o znacznych mocach, rzędu co najmniej dziesiątek kilowatów. Specyfika tych urządzeń sprawia, że ich analiza w warunkach rzeczywistych jest znacznie utrudniona, przez co konieczne jest stosowanie oprogramowania umożliwiającego ich modelowanie i badanie w warunkach symulacyjnych. Jednym ze środowisk dających takie możliwości, jest Matlab/Simulink, wyposażony w biblioteki dedykowane modelowaniu układów elektroenergetycznych, których wykorzystanie odnotowane jest w szeregu publikacji. Jednakże, obecnie dostępne są także coraz bardziej rozbudowane sprzętowe symulatory systemów elektroenergetycznych, które umożliwiają przeprowadzanie badań na modelach bazujących na rzeczywistych podzespołach elektrycznych. Celem artykułu jest porównanie wyników badań sieci w układzie promieniowym skonfigurowanej na symulatorze sprzętowym z wynikami uzyskanymi z symulacji modeli opracowanych w Simulinku. W zarysie artykułu przedstawiono wybrane wyniki dotychczas przeprowadzonych analiz oraz płynące z nich wnioski. Konkluzje te są zarazem wskazaniem kierunku dalszych badań najefektywniejszego sposobu modelowania w Simulinku, które zostaną zaprezentowane w jego finalnej wersji.

SŁOWA KLUCZOWE: elektroenergetyka, regulacja napięcia, analiza rozptylowa, rozptył mocy biernej, modelowanie matematyczne

1. Wstęp

System elektroenergetyczny, jako zbiór urządzeń do wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i odbioru energii elektrycznej jest silnie rozbudowanym i wielokrotnie rozgałęzionym obwodem elektrycznym, w którym następuje ciągły przepływ mocy o znacznych wartościach, najczęściej na poziomie napięcia powyżej 1 kV. Z uwagi na specyfikę tych obiektów, ich analiza silnie polega na modelowaniu komputerowym układów rzeczywistych, do których dostęp w zakresie szczegółowych pomiarów czy rekonfiguracji jest prawie niemożliwy. [1-2]

Jednym z podstawowych zagadnień w tym obszarze są analizy rozptylowe, które pozwalają określać przepływy mocy w rozbudowanych systemach elektroenergetycznych oraz wynikające z nich wartości kluczowych parametrów określających stan pracy systemu. Z uwagi na brak możliwości dowolnej rekonfiguracji systemów w celach badawczych, która powodowałaby problemy z dostarczaniem energii elektrycznej do odbiorców, analizy rozptylowe bazują na wykorzystywaniu modeli symulacyjnych oferowanych przez oprogramowanie komputerowe. Z ich wykorzystaniem możliwe jest odwzorowywanie obiektów rzeczywistych i następnie analiza ich zachowania w różnych stanach pracy. Jednym ze środowisk pozwalających na analizę takich układów jest Matlab/Simulink. [3-6]

Nieco odmiennym sposobem przeprowadzania analiz rozptylowych jest wykorzystanie sprzętowych symulatorów systemów elektroenergetycznych. Ich niewątpliwą zaletą, w porównaniu do modeli komputerowych, jest odwzorowywanie typowych urządzeń

elektroenergetycznych poprzez ich odpowiedniki, które podczas analiz znajdują się pod napięciem, a na skutek przepływających prądów występują w nich zjawiska pojawiające się również w obiektach rzeczywistych, które niejednokrotnie nie są uwzględniane w modelach komputerowych. [7]

Celem artykułu jest analiza porównawcza modelu prostego systemu elektroenergetycznego na symulatorze sprzętowym oraz jego odpowiedników opracowanych w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem dwóch dostępnych bibliotek. Analiza obejmuje typowy proces obliczeniowy dla sieci pracującej w układzie promieniowym.

2. Metodologia badań

Model testowy skonfigurowany na symulatorze sprzętowym odwzorowuje typowy układ sieci promieniowej, stanowiącej tor zasilany jednostronnie. Cechą takiego układu jest jednokierunkowy przepływ mocy czynnej, od punktu zasilającego stanowiącego początek toru, do poszczególnych węzłów. Schemat ideowy modelu przedstawia rys. 1.



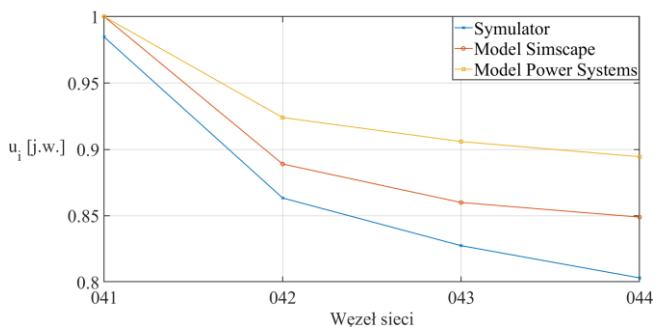
Rys. 1. Schemat ideowy modelu sieci

Modele opracowane w środowisku Matlab/Simulink są identyczne pod względem struktury i zostały sparametryzowane na podstawie modeli źródeł, linii i odbiorników w symulatorze sprzętowym. Linie L0412 i L0434 stanowią modele linii o długości 360 km, natomiast linia L0423 jest modelem linii o długości 110 km. W modelach Simscape i Specialized Power Systems zastosowano dedykowane modele linii odwzorowujące komplet parametrów podłużnych i poprzecznych, definiowanych na etapie parametryzacji. Odbiór O043 stanowi szeregowy odbiornik RL o regulowanej rezystancji i indukcyjności, natomiast odbiorem O044 jest zestaw żarówek metalohalogenowych.

Procedura badawcza polega na analizie rozplywu mocy i rozkładu napięcia wzdłuż sieci dla poszczególnych nastaw odbioru O043 z pominięciem stanu jałowego. Badania przeprowadzono przy założeniu idealnej symetrii układu i dla układu niesymetrycznego. W każdym przypadku badano układ dla trzech wariantów modeli linii: bez pojemności, z uwzględnieniem pojemności doziemnych i z uwzględnieniem pojemności doziemnych i międzyprzewodowych.

3. Wyniki badań przy założeniu symetrii układu

Poniższe rysunki przedstawiają porównanie rozkładów napięcia wzdłuż analizowanego toru uzyskane na drodze pomiarów na symulatorze oraz symulacji przeprowadzonych na modelach opracowanych w modułach Simscape i Specialized Power Systems. Rysunek 2 ilustruje rozkłady napięcia przy braku pojemności doziemnych linii (w modelach, z uwagi na brak możliwości wprowadzenia zerowej wartości, przyjęto najmniejszą możliwą dla poprawności obliczeń, tj. 1 nF), zaś rys. 3. ilustruje rozkłady z uwzględnieniem pojemności doziemnych linii.

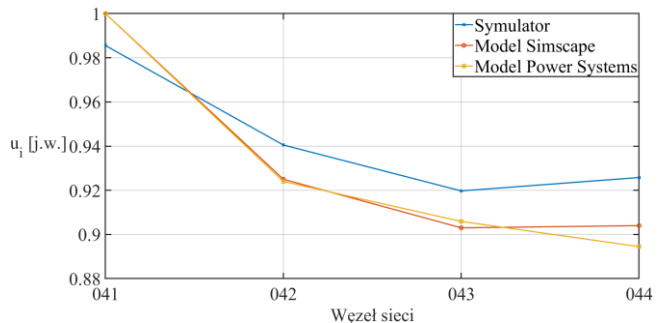


Rys. 2. Porównanie rozkładów napięcia w sieci przy braku pojemności doziemnych

Uzyskane wyniki wskazują, że model opracowany z wykorzystaniem modułu Simscape w analizowanym przypadku lepiej odwzorowuje układ skonfigurowany na symulatorze sprzętowym. Ogólny trend zmian poziomów napięcia wzdłuż sieci jest bliższy kształtem, a uzyskane wartości liczbowe również są zbliżone. W najdalszym końcowym punkcie sieci różnica poziomów napięć wynosi około 5% w przypadku modelu Simscape, podczas gdy w przypadku modelu Specialized Power Systems jest blisko dwukrotnie większa.

Uwzględnienie pojemności doziemnych zaowocowało podobnymi rezultatami, jak poprzednio. Ponownie model

opracowany z wykorzystaniem Simscape wierniej odwzorowuje układ symulatora sprzętowego. Należy również odnotować fakt, że uzyskane wartości poziomu napięcia w końcowym punkcie różnią się o około 3%, co również stanowi poprawę.



Rys. 3. Porównanie rozkładów napięcia w sieci przy uwzględnieniu pojemności doziemnych

Co więcej, wyniki uzyskane z modelu Specialized Power Systems są niezmiennie w porównaniu z poprzednim przypadkiem, co sugeruje brak wpływu obecności pojemności doziemnych na pracę układu. W pozostałych przypadkach poziomy napięć w poszczególnych węzłach uległy podniesieniu, co stanowi główny skutek obecności pojemności doziemnych, kompensujących straty mocy biernej powstające na reaktancji linii.

4. Podsumowanie

Dotychczas przeprowadzone badania wskazują, że w przypadku zastosowania różnych bibliotek środowiska Matlab/Simulink uzyskane wyniki różnią się w stosunku do układu skonfigurowanego na symulatorze sprzętowym. Najistotniejszymi wnioskami jak dotąd są:

- 1) lepsze odwzorowanie kształtu rozkładu napięcia wzdłuż toru zasilanego jednostronnie w modelu opracowanym w Simscape
- 2) brak zauważalnego wpływu uwzględnienia pojemności doziemnych na wyniki uzyskiwane z modelu Specialized Power Systems i prawidłowa reakcja modelu Simscape na wprowadzenie pojemności doziemnych linii.

Prowadzone będą dalsze badania uwzględniające również obecność pojemności międzyprzewodowych linii oraz ich korelację ze zmianami obciążenia w obrębie sieci.

Literatura

- [1] Kundur P.: *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc., United States of America, 1994.
- [2] Machowski J., Lubośny Z.: *Stabilność systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
- [3] Bozin A.S.: *Electrical power systems modeling and simulation using Simulink*, IEE Colloquium on the use of systems analysis and modeling tools: experiences and applications, London, UK, 1998.
- [4] Chengaiah Ch., Satyanarayana R.V.S: *Power flow assessment in transmission lines using Simulink Model with UPFC*, 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), Nagercoil, India, 2012.
- [5] Anand R., Balaji V.: *Power Flow Analysis of Simulink IEEE 57 Bus Test System Model using PSAT*, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8(23), September 2015.
- [6] Okakwu I.K., Ogujor E.A., Oriafio P.A.: *Load flow assessment of the Nigeria 330 kV power system*, American Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 4, 2017, s. 159-165.
- [7] *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. Praca zbiorowa pod redakcją S. Kujszczyka, t. 11 t. II*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.