

NIEPEWNOŚĆ PARAMETRÓW MODELI MATEMATYCZNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH ŹRÓDEŁ ROZPROSZONYCH

Adrian NOCON¹, Piotr BIAŁKIEWICZ², Łukasz MAJKA³

1. Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32-237-12-29, e-mail: adrian.nocon@polsl.pl,
2. Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32-237-12-29, e-mail: p.bialkiewicz@gmail.com,
3. Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32-237-12-29, e-mail: lukasz.majka@polsl.pl

Streszczenie: Badając elektromechaniczne stany nieustalone źródeł rozproszonych może pojawić się problem braku wiarygodnych parametrów modeli matematycznych źródeł nowoprojektowanych i już działających w systemie elektroenergetycznym. Problem ten można rozwiązać uwzględniając niepewność parametrów w badaniach symulacyjnych. Niepewność tę można uwzględnić stosując symulację Monte Carlo. Jednym z warunków uzyskania wiarygodnych wyników metodą Monte Carlo jest wykorzystanie odpowiednio dobranych zakresów zmian niepewnych parametrów modeli matematycznych. W tym celu w artykule przeprowadzono analizę kart katalogowych różnych producentów generatorów synchronicznych stosowanych w źródłach rozproszonych. Dokonano analizy statystycznej parametrów i porównano je z parametrami zawartymi w literaturze i programach symulacyjnych.

Słowa kluczowe: modelowanie matematyczne, niepewność parametrów, metoda Monte Carlo.

1. WPROWADZENIE

Badania elektromechanicznych stanów nieustalonych źródeł rozproszonych mogą ujawnić problem braku wiarygodnych parametrów modeli matematycznych dla źródeł nowoprojektowanych i już działających w systemie elektroenergetycznym (SEE). Brak wiarygodnych parametrów modeli matematycznych może być traktowany jako ich niepewność redukowalna [1].

Niepewność parametrów modeli matematycznych może być uwzględniona w badaniach symulacyjnych. Jedną z metod jej uwzględnienia jest symulacja metodą Monte Carlo [2, 3, 4, 5]. Warunkiem uzyskiwania wiarygodnych wyników wskazaną metodą jest wykorzystanie odpowiednio dobranych zakresów zmian niepewnych parametrów modeli matematycznych [3, 5]. W tym celu zebrano dane zawarte w kartach katalogowych różnych producentów generatorów synchronicznych stosowanych w źródłach rozproszonych [6]. Na ich podstawie określono rozkłady częstości wybranych parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego.

Alternatywnym źródłem nieznanymi (niepewnymi) parametrów modeli matematycznych generatorów synchronicznych może być literatura naukowo-techniczna jak np. [7, 8] lub systemy pomocy programów do badań

symulacyjnych, np. PSLF firmy GE [9] albo przyborek Matlab SimPowerSystems [10]. W tym celu porównano wartości parametrów modeli matematycznych uzyskanych z analizy kart katalogowych z parametrami prezentowanymi w literaturze i proponowanymi w programach do symulacji elektromechanicznych stanów nieustalonych.

Wyznaczone zakresy zmian parametrów modeli matematycznych zweryfikowano przeprowadzając badania symulacyjne elektromechanicznego stanu nieustalonego generatorów synchronicznych pracujących w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia.

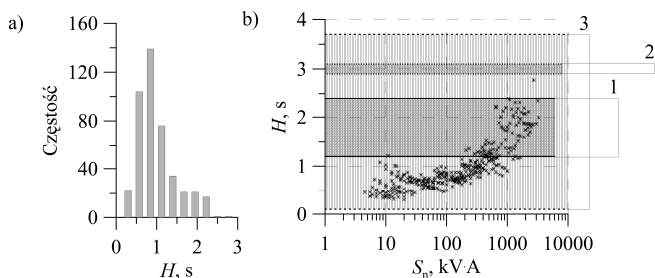
2. ANALIZA PARAMETRÓW MODELI MATEMATYCZNYCH

Założono, że analizowane będą dane generatorów przeznaczonych do pracy w sieciach dystrybucyjnych. W związku z tym przyjęto, że zbierane dane dotyczyć będą maszyn trójfazowych jedno- lub dwubiegunów, o częstotliwości znamionowej równej 50 Hz i napięciu znamionowym równym 400 V. Dla tak przyjętych ograniczeń zebrano dane z 429 kart katalogowych siedmiu producentów generatorów synchronicznych [6]. Moce znamionowe S_n analizowanych maszyn wynosiły od 4,5 do 3300 kV·A. Górna wartość mocy znamionowych generatorów wynika z przyjęcia ograniczenia napięcia znamionowego.

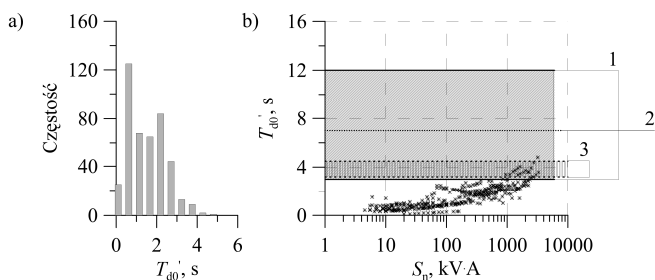
Dostępne karty katalogowe zawierają różne parametry modeli matematycznych. W związku z tym, w przeprowadzanej analizie wzięto pod uwagę tylko te parametry modeli matematycznych, które występowały we wszystkich zebranych kartach katalogowych, to jest:

- stała czasowa inercji mechanicznej (H), której wartość wyznaczono na podstawie wartości momentu bezwładności,
- stała czasowa przejściowa w osi wzdłużnej dla otwartego obwodu twornika (T_{d0}'),
- reaktancja synchroniczna w osi wzdłużnej (X_d),
- reaktancja synchroniczna w osi poprzecznej (X_q),
- reaktancja przejściowa w osi wzdłużnej (X_d'),
- reaktancja podprzejściowa w osi wzdłużnej (X_d'').

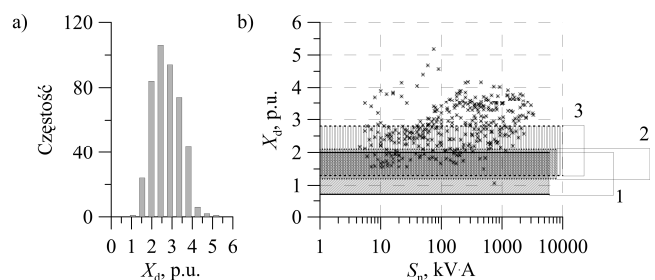
Na podstawie danych, zebranych z kart katalogowych wyznaczono rozkłady częstości poszczególnych parametrów modeli matematycznych. Rozkłady te przedstawiono na rysunkach od 1 do 6 i oznaczono je literą (a). Na rysunkach od 1 do 6 oznaczonych literą (b) przedstawiono zaś porównanie wartości parametrów modeli matematycznych generatorów synchronicznych zawartych w poszczególnych kartach katalogowych z zakresami zmian tychże parametrów prezentowanymi w literaturze i oprogramowaniu do badań symulacyjnych elementów SEE. Na rysunkach zakresy zmian oznaczono odpowiednio: 1 – dla danych z literatury [7, 8], 2 – wg programu PSLF [9], 3 – wg programu SimPowerSystems [10].



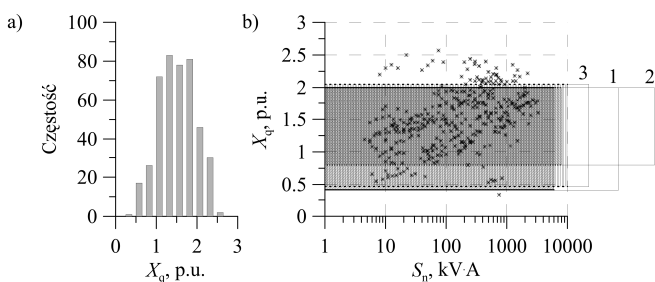
Rys. 1. Rozkład częstości (a) i wartości (b) stałej czasowej inercji mechanicznej generatora synchronicznego



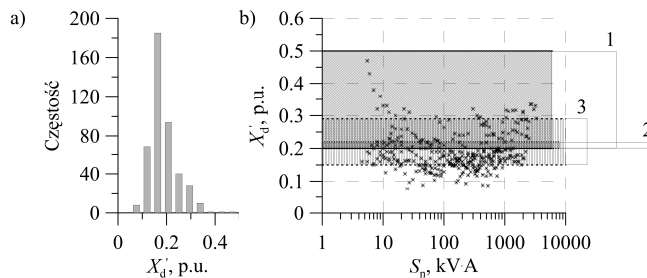
Rys. 2. Rozkład częstości (a) i wartości (b) stałej czasowej przejściowej w osi wzdłużnej dla otwartego obwodu twornika



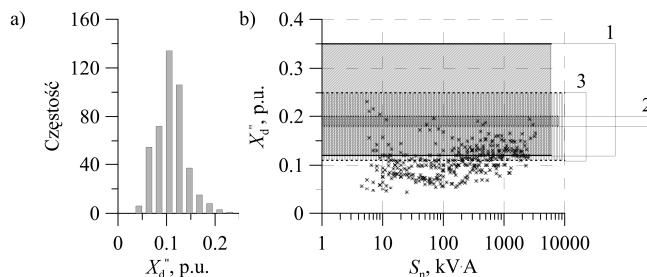
Rys. 3. Rozkład częstości (a) i wartości (b) reaktancji synchronicznej w osi wzdłużnej



Rys. 4. Rozkład częstości (a) i wartości (b) reaktancji synchronicznej w osi poprzecznej



Rys. 5. Rozkład częstości (a) i wartości (b) reaktancji przejściowej w osi wzdłużnej

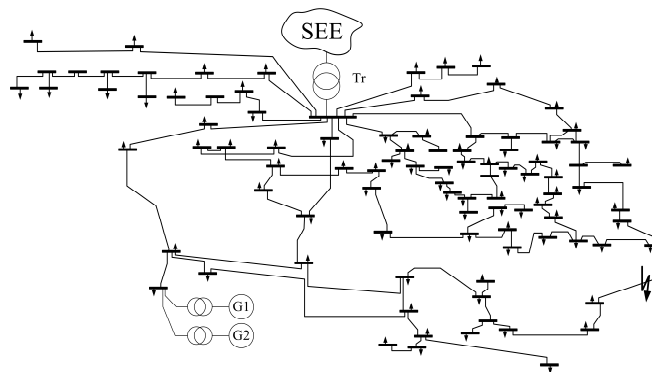


Rys. 6. Rozkład częstości (a) i wartości (b) reaktancji podprześciowej w osi wzdłużnej

3. BADANIA SYMULACYJNE Z UWZGLĘDNIENIEM NIEPEWNOŚCI PARAMETRÓW

Badania wpływu niepewności na przebiegi w stanie nieustalonym przeprowadzono na przykładzie analizy oddziaływania nowoprojektowanego źródła na istniejącą sieć elektroenergetyczną.

W badaniach symulacyjnych rozważono sieć dystrybucyjną o napięciu znamionowym 15 kV z zainstalowanymi dwiema jednostkami wytwórczymi G1 i G2 [11, 12]. Założono, że jednostka wytwórcza G1 jest źródłem istniejącym, a G2 jest źródłem nowoprojektowanym. Strukturę sieci przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Struktura analizowanego fragmentu sieci terenowej

Na analizowaną sieć elektroenergetyczną składa się 191 linii kablowych i napowietrznych o łącznej długości 60 km oraz 181 węzłów, w tym 85 węzłów odbiorczych. W głównym punkcie zasilania sieci zainstalowany jest transformator Tr o mocy 16 MV·A. Przyjęto, że w analizowanym fragmencie SEE pracują dwa generatory synchroniczne o mocy 500 kW każdy i są zainstalowane w biogazowni. Generator G2 stanowi część nowoprojektowanego źródła wytwórczego.

Na potrzeby prowadzonych badań symulacyjnych linie napowietrzne zamodelowano z pominięciem gałęzi poprzecznych, natomiast w liniach kablowych uwzględniono pojemności doziemne. Wartości impedancji wzdłużnych i pojemności doziemnych wyznaczono na podstawie danych o przekrojach i długościach poszczególnych odcinków linii dostarczonych przez operatora dystrybucyjnego analizowanego fragmentu sieci.

Założono, że SEE (rys. 7) stanowi sieć sztywną. Źródło napięcia reprezentujące SEE przyłączone od strony wysokiego napięcia transformatora Tr reprezentowanego modelem obwodowym z pominiętą gałęzią magnesowania.

We wszystkich węzłach odbiorczych zamodelowano odbiorniki kompleksowe stanowiące odwzorowanie przyłączonych w tych węzłach transformatorów SN/nN, sieci dystrybucyjnych i odbiorników niskiego napięcia. Pominięto właściwości dynamiczne odbiorników, które były reprezentowane impedancjami o stałej wartości wyznaczonymi na podstawie mocy pobieranej w danym węźle.

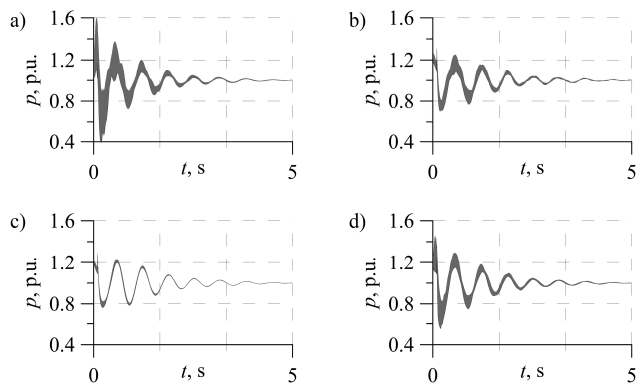
W modelach źródeł wytwórczych pominięto oddziaływanie biogazowych silników spalinowych. Generatory synchroniczne zamodelowano za pomocą modelu GENROU [9]. Przyjęto, że uzwojenia magnesnic generatorów zasilane są przez elektromaszynowe układy wzbudzenia z regulatorami napięcia typu PI.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla elektromechanicznego stanu nieustalonego wywołanego przemijającym symetrycznym zwarcie o czasie trwania równym 150 ms. Miejsce zwarcia zaznaczono na rysunku 7.

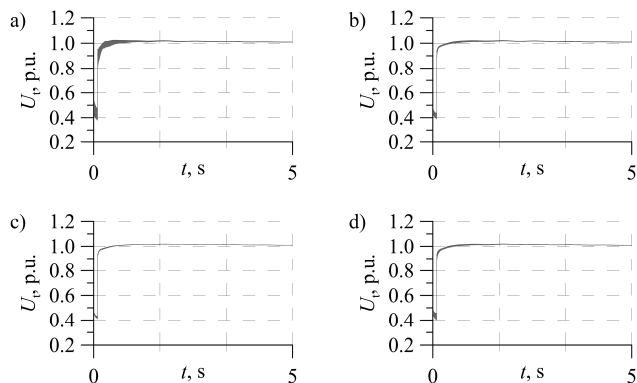
W badaniach symulacyjnych uwzględniono niepewność parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego G2. Niepewność uwzględniono wykorzystując metodę Monte Carlo. Wynikiem badań symulacyjnych prowadzonych tą metodą jest zbiór rozwiązań prawdopodobnych – rodzina przebiegów np. napięć, mocy chwilowych. Rodzina ta jest wynikiem symulacji wielokrotnej. W każdej z symulacji następuje losowa zmiana wartości parametrów, dla których uwzględniana jest niepewność, przy niezmiennych pozostałych parametrach. Wyznaczona w ten sposób rodzina przebiegów ograniczona jest przebiegami skrajnymi (górnym – maksymalnym i dolnym – minimalnym), wyznaczanymi dla każdej chwili czasu t . Obszar pomiędzy przebiegami skrajnymi można określić mianem pasma przebiegów [2].

Przyjęto, że niepewnymi parametrami modelu matematycznego są wybrane parametry generatora G2 nowoprojektowanego źródła wytwórczego, tj.: stała czasowa inercji mechanicznej (H), stała czasowa przejściowa w osi wzdłużnej dla otwartego obwodu twornika (T_{d0}), reaktancje synchroniczne w osi wzdłużnej i poprzecznej (X_d , X_q), reaktancja przejściowa w osi wzdłużnej (X_d') oraz reaktancja podprzejściowa w osi wzdłużnej (X_d'').

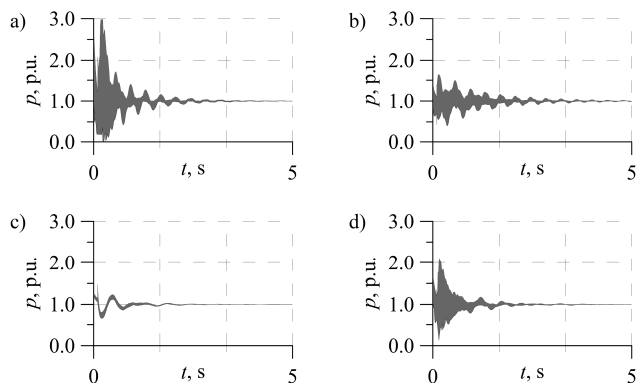
Wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych metodą Monte Carlo zaprezentowano na rysunkach od 8 do 11. Przedstawiono pasma przebiegów mocy chwilowych p i napięcia twornika U_t generatorów G1 i G2. Rozważono cztery różne zakresy zmienności parametrów niepewnych (por. rys od 1 do 6) wyznaczone na podstawie: kart katalogowych (rys. od 8 do 11 a), literatury (rys. od 8 do 11 b) oraz systemów pomocy programów symulacyjnych takich jak PSLF (rys. od 8 do 11 c) i SimPowerSystems (rys. od 8 do 11 d).



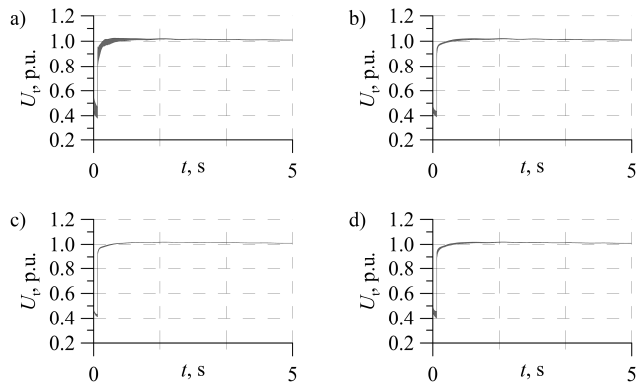
Rys. 8. Pasma przebiegów mocy chwilowych generatora G1



Rys. 9. Pasma przebiegów napięcia twornika generatora G1



Rys. 10. Pasma przebiegów mocy chwilowych generatora G2



Rys. 11. Pasma przebiegów napięcia twornika generatora G2

4. PODSUMOWANIE

Z przedstawionych wyników analizy danych zawartych w kartach katalogowych wynika, że rozkłady częstości poszczególnych parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego nie mają charakteru rozkładu normalnego. Ponadto parametry zmieniają się wraz ze zmianą mocy znamionowej, przy czym każdy z parametrów wykazuje inny rodzaj zmiany.

Uwzględnienie niepewności parametrów modelu matematycznego w badaniach symulacyjnych wymaga dokładnej analizy jej przyczyn i ustalenia zakresów zmienności parametrów niepewnych. Różne zakresy zmienności (np. określona na podstawie kart katalogowych lub literatury) wykorzystane w symulacji Monte Carlo prowadzą do różnych wyników (rys. 8 do 11). W związku z tym, błędnie wyznaczone zakresy zmienności mogą być przyczyną braku wiarygodności uzyskanych wyników. W konsekwencji mogą prowadzić do błędnych wniosków, np. odnośnie wpływu nowoprojektowanych jednostek wytwórczych na istniejące elementy SEE.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych zawartych w kartach katalogowych mogą posłużyć do przeprowadzenia wiarygodnych badań symulacyjnych metodą Monte Carlo, w szczególności poprzez [4]:

- określenie granic przedziałów zmian parametrów modelu matematycznego,
- określenie rozkładów prawdopodobieństwa wartości parametrów w ich przedziałach zmienności, tzn. modelu niepewności poszczególnych parametrów,
- określenie korelacji pomiędzy zakresem zmian parametrów a mocą znamionową.

Zaproponowana metoda symulacji Monte Carlo zastosowana do badań symulacyjnych stanów nieustalonych rozproszonych źródeł energii elektrycznej cechuje się następującymi zaletami:

- prostotą pojęciową,
- łatwością implementacji w programach symulacyjnych,
- łatwością interpretacji uzyskanych wyników,
- możliwością stosowania dowolnych rodzajów modeli (w tym modeli nieliniowych), łącznie z modelami zaimplementowanymi w programach symulacyjnych.

Jej wadą jest konieczność przeprowadzania wielokrotnych badań symulacyjnych. Należy przy tym podkreślić, że im więcej zostanie przeanalizowanych wariantów – zestawów parametrów modeli matematycznych – tym bardziej wiarygodny wynik zostanie osiągnięty.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Robak S.: Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008, Nr 1, s. 54-57.
2. Nocoń A.: Analiza stanów nieustalonych systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo, 40th Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory. SPETO 2017, Gliwice - Ustroń, 17-20.05.2017. Eds. Holajn P., Sztymelski K., Wegiera G., Gliwice: 2017, s. 67-68.
3. Kalos M. H., Whitlock P. A., Monte Carlo methods, WILEY Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2008.
4. Raychaudhuri S.: Introduction to Monte Carlo simulation, in Mason S. J., Hill R. R., Mönch L., Rose O., Jefferson T., Fowler J. W. (eds): Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 978-1-4244-2708-6/08/\$25.00 ©2008 IEEE, pp. 91–100
5. Nocoń A.: Analiza stanów nieustalonych w sieci elektroenergetycznej z uwzględnieniem działania samoczynnego częstotliwościowego odciążenia, W: Aktualne problemy w elektroenergetyce. Konferencja APE'17, Jastrzębia Góra, 7-9 czerwca 2017. Z. 1. Gdańsk, 2017, s. 257-263.
6. Dokumentacja techniczna generatorów synchronicznych firm: Leroy Somer, Mirelli Motori, Stamford, Mecc Alte, Linz Electric, WEG Electronic Corp., DBT S.A. – Cramaco, dostęp on-line 12.2018 r.
7. Krause P.C.: Analysis of electric machinery. McGraw-Hill Book Company, New York 1986.
8. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998
9. Dokumentacja techniczna programu PSLF firmy GE.
10. Dokumentacja techniczna programu Matlab – Powersys Toolbox.
11. Kacejko P., Adamek S., Pijarski P.: Ocena oddziaływania generacji rozproszonej na statyczne wskaźniki jakości napięcia w terenowych sieciach rozdzielczych, APE'09, materiały konferencyjne, tom IV, s. 87 – 96.
12. Nocoń A.: Stabilizacja pracy źródeł rozproszonych w sieci dystrybucyjnej z wykorzystaniem wiatrowo-gazowej elektrowni hybrydowej. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 nr 9a/2012, s. 42-45.

UNCERTAINTY OF MATHEMATICAL MODEL PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM

During the analysis of an electromechanical transient state of a distributed power system, a problem with reliable values of the parameters of a mathematical model of a newly designed or operating sources may occur. Solution to this problem is to include parameters' uncertainty into the simulation process, using the Monte Carlo method. To obtain a trustworthy results of the Monte Carlo simulation, a properly selected range of the parameters' values is a key requirement. For this purpose, statistical analysis of the data sheets of various manufacturers' synchronous generators has been carried out. Afterwards, the data sheet parameters were compared to the parameters in technical literature and simulation programs, such as SimPowerSystems and PSLF.

Keywords: mathematical modeling, parameter uncertainty, Monte Carlo method.