

Modele symulacyjne do oceny rozkładu wskaźników niezawodności strukturalnej systemów zasilania

Streszczenie. Zaproponowano klasyfikację elementów układów zasilania na podstawie stanów awarii. Opisano algorytm tworzenia klas przekrojów jedno- i dwuelementowych. Przedstawiono metodę modelowania rozkładów czasu trwania stanów awarii systemów.

Abstract. The classification of power supply systems elements based on failure conditions is proposed. The algorithm for one and two element section classes generation is described. The method for modeling the distributions of the systems failure states duration is presented. (**Simulation models for assessment of structural reliability indicators distribution for power supply systems**).

Słowa kluczowe: Metody Monte Carlo, rozproszona symulacja komputerowa, niezawodność strukturalna systemów elektroenergetycznych, rozkład prawdopodobieństwa stanów, awaria aktywna.

Keywords: Monte Carlo methods, distributed computer simulation, structural reliability of electric power systems, probability distribution of states, active failure.

Wstęp

Do obliczenia niezawodności strukturalnej systemów zasilania tradycyjnie stosowane były metody analityczne [1-3]. Metody te opierają się na założeniu wykładniczej natury rozkładów zmiennych losowych. Znalezienie prawdopodobieństwa stanu ustalonego w ramach modeli Markowa funkcjonowania elementów sprowadza się do rozwiązywania układów równań liniowych, co wymaga stosunkowo niewielkiej liczby operacji matematycznych. Rozkład niektórych zmiennych losowych w rzeczywistych systemach, na przykład czasu przełączania operacyjnego, znacznie różni się od rozkładu wykładniczego. Zastąpienie nieznanego prawa rozkładu rozkładem wykładniczym może znacznie zmienić rozkład prawdopodobieństw stanu ustalonego przy zachowaniu wartości średnich.

Rozpowszechnienie technologii cyfrowej sprawiło, że zasoby komputerowe stały się dostępne, a operacje matematyczne tanie. Technologie wielordzeniowe i łączenie rozproszonych zasobów obliczeniowych w system z równoległą organizacją obliczeń doprowadziły do gwałtownego wzrostu wydajności systemów obliczeniowych. Tworzenie prostego klastra obliczeniowego jest bardzo szybkie i łatwe za pomocą dwóch (kilku) komputerów osobistych (istniejącej sieci komputerowej). Jeśli moc obliczeniowa skonfigurowanego klastra nie jest wystarczająca, można użyć mocniejszego klastra lub superkomputera. Wydajność obliczeniowa metod obliczeniowych przestaje odgrywać decydującą rolę.

W związku z tym metody modelowania symulacyjnego, które oceniają wskaźniki niezawodności za pomocą dość dużej serii testów [4-6], zaczynają nabierać praktycznego znaczenia w obliczeniach niezawodności strukturalnej systemów zasilania [7-9]. Metody te, wymagające znacznej liczby operacji matematycznych, mają kilka zalet. W szczególności można zastosować empiryczne prawa rozkładu zmiennych losowych oraz przeprowadzić obliczanie rozkładów czasu trwania stanów i ich agregatów.

Rozkład czasu trwania stanów awarii

Zbiór wszystkich stanów elementu (zbioru elementów L) tworzy przestrzeń stanów $\Omega = \Omega(L) = \{\omega\}$. Kryterium uszkodzenia układu elektrycznego pozwala nam jednoznacznie podzielić przestrzeń stanów układu elektrycznego na dwa podzbiory – pracy W i awarii F , ponadto $W \cup F = \Omega$, $W \cap F = \emptyset$.

Zadaniem oceny niezawodności układu elektrycznego za pomocą metody przestrzeni stanów jest określenie asymptotycznych wartości wskaźników niezawodności, a

mianowicie prawdopodobieństwa stanu awarii układu P_F i średniego parametru strumienia uszkodzeń układu f_F .

W metodach modelowania matematycznego przy użyciu wystarczająco dużej serii testów oceniane są wskaźniki niezawodności

$$(1) \quad P_F = T_F / T,$$

$$(2) \quad f_F = N_F / T,$$

$$(3) \quad T_F = \sum_{k=1}^{N_F} \tau_k^F,$$

$$(4) \quad T = \sum_{\omega \in \Omega} T_\omega,$$

gdzie T_F to całkowity czas przebywania systemu w stanie F , T to czas symulacji, N_F to liczba pobytów w F , τ_k^F to losowy k czas spędzony w F , T_ω to całkowity czas spędzony w stanie ω .

Uwzględnienie $t_0=0 < t_1 < t_2 < \dots < t_i < \dots < t_M = \infty$ pozwala nam rozdzielić stan awarii F na M podstanów zgodnie z czasem trwania awarii. Odpowiednio, wynikiem modelowania będzie wektor

$$(5) \quad \overline{T}_F = (T_F^1, T_F^2, \dots, T_F^M),$$

gdzie $T_F^i = \sum_{\tau_k^F \in [t_{i-1}, t_i)} \tau_k^F$, $i=1, 2, \dots, M$. Przy czym $T_F = \sum_{i=1}^M T_F^i$.

Jako ocenę wskaźników niezawodności rozważamy wektor

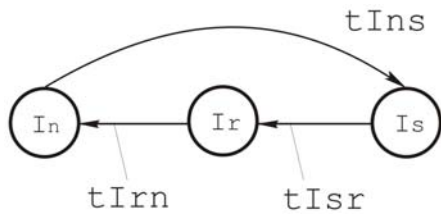
$$(6) \quad \overline{P}_F = (T_F^1, T_F^2, \dots, T_F^M) / T = \overline{T}_F / T,$$

podający rozkład czasu trwania stanów awarii. Przy czym

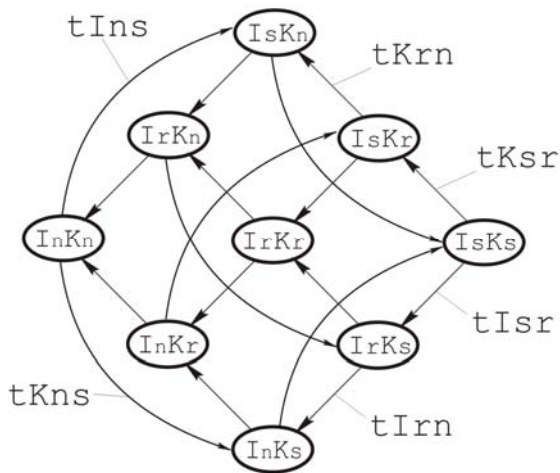
$$P_F = \sum_{i=1}^M P_F^i.$$

Model funkcjonowania systemu zasilania z punktu widzenia niezawodności

Każdy element E układu zasilania (transformator, wyłącznik, ...) może znajdować się w jednym z trzech stanów ω i może być scharakteryzowany przez strefę wpływu $Z_\omega \subseteq L$. Załóżmy, że E_n to stan normalnej pracy elementu ($Z_{E_n} = \emptyset$), E_s to stan między awarią elementu a zakończeniem przełączania operacyjnego ($Z_{E_s} \subseteq L$), E_r to stan awaryjnej naprawy elementu ($Z_{E_r} = \{E\}$); $t_{E_{xy}}$ [h] – losowy czas przejścia elementu E ze stanu E_x do stanu E_y . Schemat przejścia między stanami dla jednego i dwóch elementów przedstawiono odpowiednio na rys. 1 i rys. 2.



Rys.1. Schemat przejść między stanami dla jednego elementu



Rys.2. Schemat przejść między stanami dla dwóch elementów

Obecność elementu E w stanie remontu awaryjnego Er odpowiada usunięciu tego elementu układu zasilania (awaria typu „przerwa”). Znalazienie elementu E w stanie w odpowiada znalezieniu elementów ze strefy wpływu Z_w w stanie Er (usunięciu zbioru elementów Z_w).

Stan układu zależy od stanu elementów układu i można go opisać jako zestaw elementów $T_w \subseteq L$ w stanie remontu awaryjnego (awaria typu „przerwa”).

Kryterium uszkodzenia systemu elektrycznego definiuje się jako zbiór zestawów elementów (przekrojów)

$$(7) \quad R = \{r : r \subseteq L\} = \bigcup_n \{r_n : |r_n| = n\}.$$

Jednoczesna obecność elementów z zestawu $r \in R$ (przekroje) w stanie remontu awaryjnego (awaria typu „przerwa”) prowadzi do awarii systemu. Definiując system w postaci grafu jako r mogą występować przekroje grafu.

Obcięcie i klasyfikacja przestrzeni stanów awarii

Przebieg stanu F jest wystarczająco duża. Przy obliczaniu niezawodności brane są pod uwagę tylko najbardziej znaczące stany $\Gamma = \bigcup_l \gamma_l$, a pozostałe stany są

odrzucone. W tym przypadku $T_F \approx \sum_l T_{\gamma_l}$, $T_{\gamma_l} = \sum_{i=1}^M T_{\gamma_l}^i$,

$$T_{\gamma_l}^i = \sum_{\tau_k^{\gamma_l} \in [t_{i-1}, t_i)} \tau_k^{\gamma_l}.$$

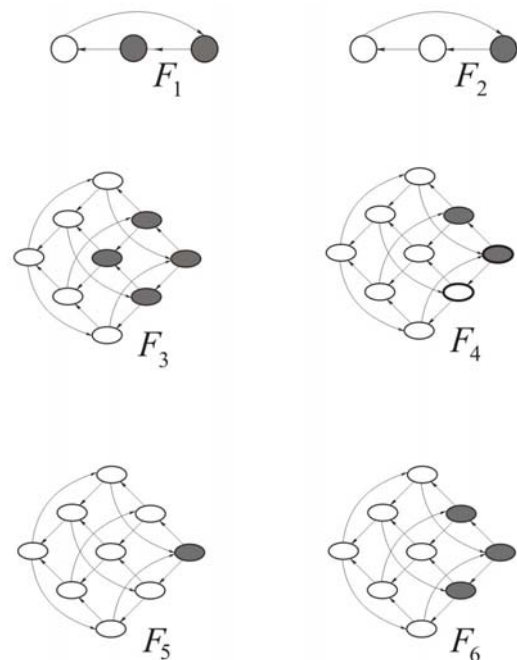
$$(8) \quad \overline{P}_F \approx \sum_l \overline{P}_{\gamma_l} = \sum_l (T_{\gamma_l}^1, T_{\gamma_l}^2, \dots, T_{\gamma_l}^M) / T.$$

Obliczenia niezawodności zwykle uwzględniają stany awarii jednego i dwóch elementów (stany Γ). Rozdzielenie stanów jednego i dwóch elementów systemu zasilania na podzbiór stanów pracy i awarii na podstawie przedstawionego kryterium (klasyfikacja elementów systemu zasilania na podstawie stanów awarii) podano w

tabeli 1 i na rys. 3. Rozróżnia się dwa przypadki awarii układu zasilającego z powodu awarii jednego elementu i cztery przypadki awarii układu zasilającego z powodu awarii dwóch elementów. Istnienie wyróżnionych stanów awarii ilustruje następujący przykład.

Tabela 1. Stany awarii dla jednego i dwóch elementów systemu zasilania energią elektryczną

No	Element(y)	Stany awarii	$F_i = \bigcup_l \gamma_l, l =$
i	M_i	F_i	
1	I	Ir, Is	1
2	I	Is	2
3	I, K	$IrKr, IsKr, IrKs, IsKs,$	3
4	I, K	$IsKr, IsKs$ ($IrKs, IsKs$)	4 (7)
5	I, K	$IsKs$	5
6	I, K	$IsKr, IrKs, IsKs$	6



Rys.3. Klasyfikacja elementów układu zasilania na podstawie stanów awarii

Przykład. Dane początkowe: zbiór elementów L , strefy wpływu Z_w , kryterium awarii R . Zbiory M_i .

1) $L = \{1,2\}$; $Z_{1r} = \{1\}$, $Z_{1s} = \{1,2\}$, $Z_{2r} = \{2\}$, $Z_{2s} = \{1,2\}$; $R = \{\{1\}\}$. $M_1 = \{1\}$, $M_2 = \{2\}$.

2) $L = \{1,2,3\}$; $Z_{1r} = \{1\}$, $Z_{1s} = \{1,3\}$, $Z_{2r} = \{2\}$, $Z_{2s} = \{2\}$, $Z_{3r} = \{3\}$, $Z_{3s} = \{3,1\}$; $R = \{\{1,2\}\}$. $M_3 = \{\{1,2\}\}$, $M_4 = \{\{2,2\}\}$.

3) $L = \{1,2,3,4\}$; $Z_{1r} = \{1\}$, $Z_{1s} = \{1,3\}$, $Z_{2r} = \{2\}$, $Z_{2s} = \{2,4\}$, $Z_{3r} = \{3\}$, $Z_{3s} = \{3,1\}$, $Z_{4r} = \{4\}$, $Z_{4s} = \{4,2\}$; $R = \{\{1,2\}\}$. $M_3 = \{\{1,2\}\}$, $M_5 = \{\{3,4\}\}$.

4) $L = \{1,2,3,4\}$; $Z_{1r} = \{1\}$, $Z_{1s} = \{1,3\}$, $Z_{2r} = \{2\}$, $Z_{2s} = \{2,4\}$, $Z_{3r} = \{3\}$, $Z_{3s} = \{3,1\}$, $Z_{4r} = \{4\}$, $Z_{4s} = \{4,2\}$; $R = \{\{1,2\}, \{3,2\}, \{1,4\}\}$. $M_3 = \{\{1,2\}, \{3,2\}, \{1,4\}\}$, $M_6 = \{\{3,4\}\}$.

Przedstawiona klasyfikacja z wykorzystaniem klasy M_6 precyzuje klasyfikację [2], w której rozpatrywane są awarie pasywne i aktywne.

Tabela 2 przedstawia stany i zestawy stanów γ_l , $l = 1, 2, \dots, 7$, które należy wziąć pod uwagę w modelowaniu komputerowym rozkładów czasu trwania stanów awarii.

Tabela 2. Stany i zestawy stanów uwzględniane podczas modelowania komputerowego

Symulowane stany i zestawy stanów awarii			
l	γ_l	l	γ_l
1	Ir, Is	5	$IsKs$
2	Is	6	$IsKr, IrKs, IsKs$
3	$IrKr, IsKr, IrKs, IsKs$	7	$IrKs, IsKs$
4	$IsKr, IsKs$		

Na podstawie symulacji rozkładów prezentowanych grup stanów uzyskuje się rozkłady klas przekrojów $F_i = \cup \gamma_i$ (Tabela 1).

Algorytm tworzenia klas przekrojów

Niech $B_{Is} = \{J : I \in Z_{Is}\}$ będzie zbiorem elementów, których obecność w stanie s pociąga za sobą przejście elementu I w stan r .

Rozważmy utworzenie klas przekrojów $M_i, i = 1, 2, \dots, 6$ (Tabela 1) na podstawie zbiorów $r_1 \cup r_2$ i $Z_{Is}, I \in L$,

$$M_1 = \{I (Ir \in \Omega_F) : \{I\} \in R\};$$

$$M_3 = \{ \{I, K\} (IrKr \in \Omega_F) : \{I, K\} \in R, I \neq K, I \notin M_1, K \notin M_1 \};$$

$$Q_2^1 = \{I : x \in M_1, I \in B_{xS}\};$$

$$Q_2^2 = \{I : \{x, y\} \in M_3, I \in B_{xS} \cap B_{yS}\};$$

$$M_2 = \{I (Is \in \Omega_F) : I \in Q_2^1 \cup Q_2^2, I \notin M_1\};$$

$$Q_4 = \{ (I, K) (IsKr \in \Omega_F) : \{x, K\} \in M_3, I \in B_{xS}, I \neq K, I \notin M_1, I \notin M_2, \{I, K\} \notin M_3 \};$$

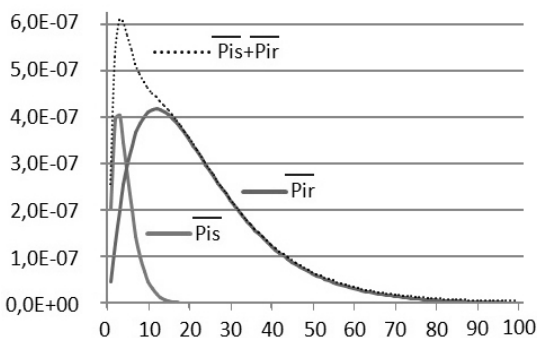
$$M_6 = \{ \{I, K\} (IsKr, IrKs \in \Omega_F) : (I, K) \in Q_4 \& (K, I) \in Q_4 \};$$

$$M_4 = \{ (I, K) (IsKr \in \Omega_F) : (I, K) \in Q_4 \& (K, I) \notin Q_4 \};$$

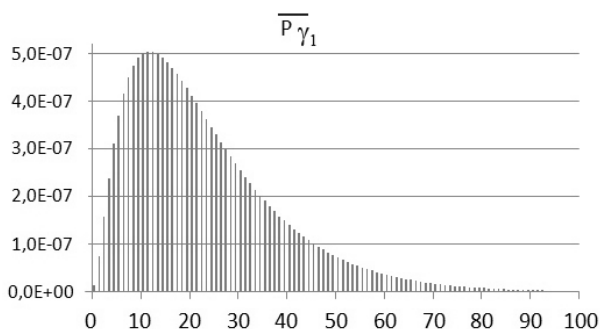
$$Q_5 = \{ \{I, K\} : \{x, y\} \in M_3, I \in B_{xS}, K \in B_{yS}, I \neq K \};$$

$$M_5 = \{ \{I, K\} (IsKs \in \Omega_F) : \{I, K\} \in Q_5, I \notin M_1, I \notin M_2, K \notin M_1, K \notin M_2, \{I, K\} \notin M_3, (I, K) \notin Q_4, (K, I) \notin Q_4 \};$$

$$\{I, K\} \notin M_3, (I, K) \notin Q_4, (K, I) \notin Q_4\};$$



Rys. 4. Rozkład czasu trwania stanów \overline{P}_{Is} i \overline{P}_{Ir}



Rys. 5. Rozkład czasu trwania \overline{P}_{γ_1}

Doświadczenie numeryczne

Testowe numeryczne wskaźniki niezawodności t_{Ex} elementu I systemu elektroenergetycznego przyjęto zgodnie z [3]: $t_{ms} = 1/0,01$ [rok] to średni czas przejścia elementu I ze stanu In do stanu Is ; $t_{sr} = 2/8760$ [rok]; $t_{rm} = 11,39/8760$ [rok]. Losowy czas przejścia między stanami opisuje się rozkładem wykładniczym.

Podczas obliczeń przeprowadzono rozproszone modelowanie funkcjonowania jednego elementu układu zasilania na podstawie zmodyfikowanych programów komputerowych [4,5] ($T=10^{11}$, błąd względny wyniku $<1\%$).

Uzyskane rozkłady czasu trwania stanów \overline{P}_{Is} i \overline{P}_{Ir} (a także wektora $\overline{P}_{Is} + \overline{P}_{Ir}$) przedstawiono na rys. 4.

Rysunek 5 pokazuje rozkład czasu trwania stanu \overline{P}_{γ_1} .

Na rys. 5 można zobaczyć, że zamiana rozkładu \overline{P}_{γ_1} na rozkład $\overline{P}_{Is} + \overline{P}_{Ir}$ wprowadza znaczny błąd w wynikowym rozkładzie czasu trwania stanu awarii.

Wnioski

Uzyskano klasyfikację jedno- i dwuelementowych przekrojów układu zasilania na podstawie stanów awarii, co pozwala sprowadzić obliczenia niezawodności układów zasilania do kombinatorycznego zadania tworzenia klas przekrojów.

Opracowano algorytm tworzenia klas jedno- i dwuelementowych przekrojów układów zasilania, który pozwala uzyskać inżynierską metodykę określania wskaźników niezawodności układów zasilania, która ma wiele zalet w porównaniu ze znanymi metodykami.

Opracowano program komputerowy, który realizuje obliczenia rozkładów czasu trwania stanów i zestawów stanów awarii metodami symulacji. Uzyskanie rozkładu czasu trwania stanu awarii systemu jest ważne zarówno przy analizie długoterminowych awarii systemu elektroenergetycznego mających poważne konsekwencje systemowe, jak i dla klientów komercyjnych z nieliniowymi funkcjami kosztów.

Autor: prof. dr hab. inż. Andrey Grishkevich, Uniwersytet w Bydgoszczy im. Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ul. Jana Karola Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz, E-mail: andreygrishkevich@ukw.edu.pl, grishkev.gmai@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Endrenyi J., Reliability Modeling in Electric Power Systems, John Wiley: New York, 1978
- [2] Billinton R., Allan R., Reliability Evaluation of Power Systems, Springer Science+Business Media: New York, 1996
- [3] Grishkevich A.A., Hudym V.I., Kruczynin A.M., Sawicki A., Zagadnienia energetyczne wybranych współczesnych urzędzeń i systemów elektrostalowniczych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej: Częstochowa, 2010
- [4] Marciniak L., Modeling of Digital Earth Fault Protection Using PSCAD, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. R85 (2009), nr. 3, 192-195
- [5] Borowik L., Sawicki A., Selected aspects of modeling the electric arc column in the gas at reduced pressure, *High Temperature Materials and Processes*, vol. 16 (2012), nr 4, 275-296
- [6] Prauzner T., Interactive computer simulation as a response to contemporary problems of technical education, in *Society, Integration, Education: Proceedings of the International Scientific Conference*, Latvia, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, vol. II (2016), 579-588
- [7] Grishkevich A., Simulation models using empirical statistical distributions to estimate structural reliability indices of electric power systems, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr.12, 103-106
- [8] Grishkevich A., Distributed simulation models to estimate indices of structural reliability of electric power systems, Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2017, 12.-14. 9. 2017, Stará Lesná, Slovak Republic, 422-427
- [9] Ge H., Asgarpoor S., Parallel Monte Carlo simulation for reliability and cost evaluation of equipment and systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 81(2011), 347-356