

SYMULACJE KOMPUTEROWE W STATYSTYCZNEJ OCENIE NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKICH I NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ

Wiesław NOWAK, Rafał TARKO

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: (12) 617 36 53 fax: (12) 634 57 21 e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl; rafal.tarko@agh.edu.pl

Streszczenie: Zastosowanie procedur statystycznych w koordynacji izolacji napowietrznych linii elektroenergetycznych wymaga znajomości statystycznych rozkładów narażeń przepięciowych. W artykule przedstawiono metodykę probabilistycznych symulacji rozkładów statystycznych przepięć łączeniowych. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań przepięć związanych z załączeniami linii 400 kV.

Słowa kluczowe: układy elektroenergetyczne, przepięcia łączeniowe, symulacje komputerowe

1. WPROWADZENIE

W koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych stosowane są dwie grupy procedur. Pierwsza z nich – *procedury deterministyczne* – w ogólnym ujęciu bazuje na koncepcji marginesu koordynacyjnego, będącym w istocie różnicą poziomu wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego i poziomu ochrony przepięciowej. Druga grupa – *procedury statystyczne* – bazuje na koncepcji ryzyka, będącym prawdopodobieństwem uszkodzenia układu izolacyjnego pod wpływem działania narażeń przepięciowych [1]:

$$R = \int_0^{\infty} f(U)G(U)dU \quad (1)$$

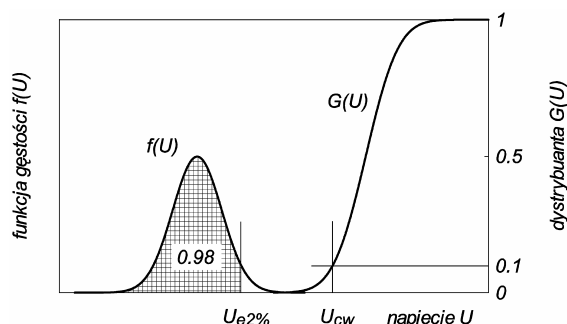
gdzie: R – ryzyko uszkodzenia, $G(U)$ – dystrybuanta wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, $f(U)$ – funkcja gęstości rozkładu wartości przepięć.

Stosowane są również uproszczenia, np. metoda proponowana w normie [1], w której prawdopodobieństwo uszkodzenia układu izolacyjnego, określone jest pośrednio przez statystyczny współczynnik koordynacyjny K_{cs} :

$$K_{cs} = \frac{U_{cw}}{U_{e2\%}} \quad (2)$$

gdzie: U_{cw} – koordynacyjne napięcie wytrzymałowe, $U_{e2\%}$ – przepięcie statystyczne.

Z matematycznego punktu widzenia, koordynacyjne napięcie wytrzymałowe U_{cw} jest kwantylem rzędu 0,1 wytrzymałości elektrycznej, natomiast przepięcie statystyczne $U_{e2\%}$ jest kwantylem rzędu 0,98 wartości szczytowych przepięć – rysunek 1.



Rys. 1. Interpretacja przepięcia statystycznego $U_{e2\%}$ i koordynacyjnego napięcia wytrzymałowego U_{cw}

Procedury statystyczne są stosowane między innymi w wymiarowaniu minimalnych odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych o napięciu powyżej 45 kV [2]. Ich zastosowanie wymaga znajomości rozkładów statystycznych narażeń przepięciowych. Rozkłady te oraz wartości liczbowe ich parametrów, mogą być otrzymane dzięki modelowaniu matematycznemu, symulacjom komputerowym oraz odpowiednim badaniom i analizom statystycznym.

2. KOORDYNACJA ODSTĘPÓW IZOLACYJNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Niezawodna i bezpieczna eksploatacja napowietrznych linii elektroenergetycznych uwarunkowana jest zapewnieniem, odpowiednich wewnętrznych i zewnętrznych odstępów izolacyjnych [2]. Wymiarowanie tych odstępów wymaga uprzedniego rozwiązania zadania koordynacji izolacji, efektem którego jest określenie tzw. odstępów minimalnych (tab. 1), zapewniających wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego linii w określonych warunkach narażeń napięciowych.

Tablica 1. Odstępy izolacyjne umożliwiające uniknięcie przesko- ku według normy PN-EN 50341-1:2005 [2]

Odstęp	Pomiędzy	Stosowany do	Rodzaj narażeń
D_{el}	przewodami fazo- wymi a obiektami o potencjale ziemi	izolacji zewnętrznej oraz izolacji wewnętrznej	przebiecia o stro- mym czole, przebiecia o łagodnym czole
D_{pp}	przewodami fazo- wymi		
$D_{50Hz-p-e}$	przewodami fazo- wymi a obiektami o potencjale ziemi	izolacji wewnętrznej	napiecie o czę- stotliwości sie- ciowej (w ekstre- malnych warunkach wiatrowych)
$D_{50Hz-p-p}$	przewodami fazo- wymi		

Statystyczna metoda określania minimalnych odstę- pów izolacyjnych [2] oparta jest na dokumentach PN-EN 60071 [1] oraz Raportie Nr 72 CIGRE [3]. Jej podstawą jest określenie dla danego rodzaju narażeń, koordyna- cyjnego napięcia wytrzymywanego U_{cw} oraz przebiecia reprezentatywnego U_{rp} – tablica 2. Jako minimalne odstępy D_{el} i D_{pp} oraz D_{50Hz} przyjmowane są wartości odstępow d , spełniające równanie:

$$U_{cw} = U_{rp} \quad (3)$$

Koordinacyjne napięcia wytrzymywane dla przebiec o stromym i łagodnym czole, są kwantylami $x_{0,1}$ rzędu 0,1

Tablica 2. Koordinacyjne napięcia wytrzymywane i przebiecia reprezentatywne według [2]

Rodzaj narażeń	Koordinacyjne napięcie wytrzymywane U_{cw} w [kV]	Przebiecie reprezentatywne U_{rp}	
		faza – ziemia	faza - faza
Przebiecia o stromym czole	$K_a K_z K_{g-ff} \cdot 530d$	$U_{90\%-ff-is}$	$1,2U_{90\%-ff-is}$
Przebiecia o łagodnym czole	$K_a K_z K_{g-sf} \cdot 1080 \ln(0,46d + 1)$	$K_{cs} U_{e2\%-sf}$	$1,4K_{cs} U_{e2\%-sf}$
Napięcie o częstotliwości sieciowej	$K_a K_z K_{g-pf} \cdot 750 \sqrt{2} \ln(0,55d^{1,2} + 1)$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_s$	$\sqrt{2} U_s$

K_a – współczynnik poprawkowy na wysokość, K_z – współczynnik odchylenia, K_{g-ff} , K_{g-sf} , K_{g-pf} – współczynniki przerwy iskrowej, d – odstęp izolacyjny wyrażony w metrach, K_{cs} – statystyczny współczynnik koordynacyjny, $U_{90\%-ff-is}$ – 90-procentowe wytrzymywane napięcie udarowe piorunowe łańcuchów izolatorów zamontowanych na linii, $U_{e2\%-sf}$ – przebiecie o łagodnym czole, którego wartość może być przekroczona z prawdopodobieństwem 2%, U_s – najwyższe napięcie sieci

3. METODYKA SYMULACYJNYCH BADAŃ NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH

Podstawowe rodzaje przebiec o łagodnym czole, które istotne są dla linii napowietrznych [2], to przebiecia łączeniowe przy załączaniu i powtórny załączaniu linii oraz przebiecia ziemnozwarciowe. Przebiecia łączeniowe mają na ogół kształt wieloczęstotliwościowych tłumionych oscylacji, zależnych od często nieliniowych pojemności, indukcyjności i rezystancji układu elektroenergetycznego. Oprócz narażenia izolacji fazowej i międzyfazowej, przebiecia łączeniowe mogą powstawać również na izolacji wzdluznej przerw międzystrykowych łączników.

Załączeniu linii elektroenergetycznej towarzyszą przebiecia łączeniowe, których parametry zależne są od stopnia i rodzaju obciążenia linii, długości linii oraz mocy

statystycznych rozkładów wytrzymałości elektrycznej. Przy założeniu względnego odchylenia standardowego $z = 0,03$ dla przebiec o stromym czole oraz $z = 0,06$ dla przebiec o łagodnym czole, współczynniki odchylenia K_z wynoszą odpowiednio 0,961 oraz 0,922. Dla napięc o częstotliwości sieciowej, U_{cw} jest kwantylem x_0 rzędu zero (100-procentowym napięciem wytrzymywanym), który jest wartością lewostronnego ucięcia rozkładu wytrzymałości elektrycznej. Przy założeniu względnego odchylenia standardowego $z = 0,03$, współczynnik odchylenia K_z dla napięcia o czę- stotliwości sieciowej, wynosi więc 0,91.

Przebiecia reprezentatywne również są wielkościami losowymi. Dla narażeń o stromym czole, przebiecia repre- zentatywne określane są na podstawie wartości $U_{90\%-ff-is}$, będącej 90-procentowym wytrzymywanym napięciem uda- rowym piorunowym łańcuchów izolatorów zamontowa- nych na linii.

Dla narażeń o łagodnym czole, przebiecia reprezen- tywne określane są na podstawie wartości $U_{2\%-sf}$, która może być przekroczona z prawdopodobieństwem 2%. Wartość $U_{2\%-sf}$ jest według [1] przebieciem statystycznym, które z formalnego punktu widzenia jest kwantylem rzędu 0,98 rozkładu wartości szczytowych przebiec o łagodnym czole. Ustalenie typu rozkładu, jak i estymacja wartości liczbowych jego parametrów, możliwa jest na drodze modelowania matematycznego układów elektroenergetycz- nych w warunkach łączeniowych przebiegów przejścio- wych, komputerowych symulacji typu Monte Carlo oraz odpowiednich badań i analiz statystycznych.

zwarciowej układu elektroenergetycznego, a także od losowości czasu (fazy) uzyskania styczności styków wyłącznika. Tym samym, poziom przebiec łączeniowych jest zmienną losową [4, 5], która może być scharakteryzowana odpowiednim rozkładem i parametrami statystycznymi.

Rozkłady statystyczne wartości szczytowych przebiec otrzymane są na podstawie symulacji probabilistycznych z zastosowaniem odpowiednich programów komputerowych. Obecnie, wykorzystywany jest przede wszystkim program *EMTP-ATP* [6, 7], w którym zaimplementowana jest analiza statystyczna układów elektroenergetycznych. Jednym z podstawowych elementów układu jest wówczas wyłącznik statystyczny, którego zamknięcie, jak i otwarcie, może odbywać się w sposób losowy. Czas zamknięcie (otwarcia) wyłącznika jest zmienną losową z rozkładu

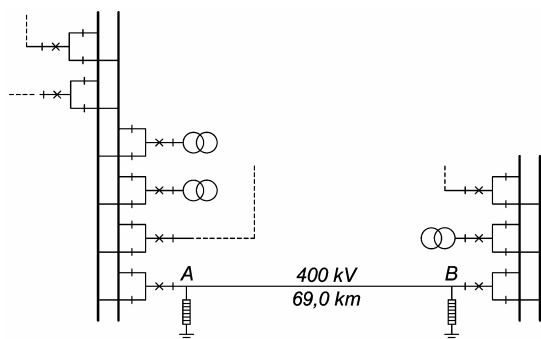
jednostajnego albo normalnego, o wartości oczekiwanej T i odchyleniu standardowym Dev . Ponadto wyłącznik może działać niezależnie (tryb *Independent*) lub może być uzależniony od innego wyłącznika (tryb *Master* lub *Slave*).

Proces symulacji układu jest przeprowadzony N -krotnie, przy czym w kolejnym i -tym cyklu ($i = 1, \dots, N$), wykonywana jest niezależna symulacja układu dla wylosowanych parametrów wyłączników statystycznych. Po każdym i -tym cyklu wyprowadzane są między innymi ekstrema globalne obserwowanych przebiegów oraz odpowiadające im czasy wystąpienia.

W celu otrzymania rozkładów statystycznych wartości szczytowych napięć, zalecenia normatywne [1] proponują dwie metody postępowania. W pierwszej, zwanej metodą fazowej wartości szczytowej, z każdej symulacji operacji łączeniowej do analizy statystycznej brane są trzy wartości, będące największymi wartościami szczytowymi napięcia na izolacji faza-ziemia, faza-faza oraz na izolacji wzdłużnej. Otrzymany w ten sposób rozkład jest stosowany jako identyczny dla każdego rodzaju izolacji. W metodzie drugiej, zwanej metodą zdarzeniowej wartości szczytowej, dla izolacji faza-ziemia, faza-faza oraz dla izolacji wzdłużnej otrzymywane są trzy rozkłady na podstawie największych w danej symulacji wartości napięć.

3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Przedmiotem analizy był układ elektroenergetyczny o napięciu 400 kV (rys. 2), w którym stację A i stację B połączyć ma jednotorowa linia o długości 69 km.



Rys.2. Układ elektroenergetyczny 400 kV

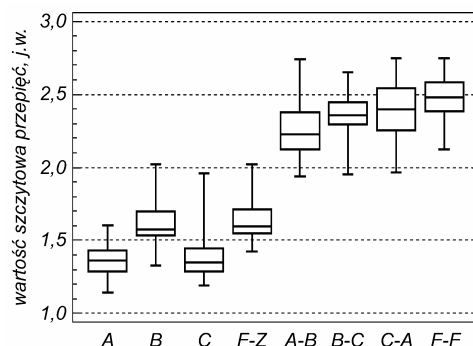
W celu wyznaczenia statystycznych rozkładów wartości szczytowych napięć, powstających w wyniku procesów łączeniowych w linii AB , układ ten odwzorowano w programie *EMTP-ATP*, z wykorzystaniem między innymi zasad przedstawionych w publikacji [8]. Przeprowadzone wstępne symulacje deterministyczne wykazały, że najmniej korzystne, z punktu widzenia poziomu generowanych napięć, czasy (fazy) załączenia zasilania:

$$\begin{cases} e_A(t) = E_m \cos(100\pi t) \\ e_B(t) = E_m \cos(100\pi t - 2\pi/3) \\ e_C(t) = E_m \cos(100\pi t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

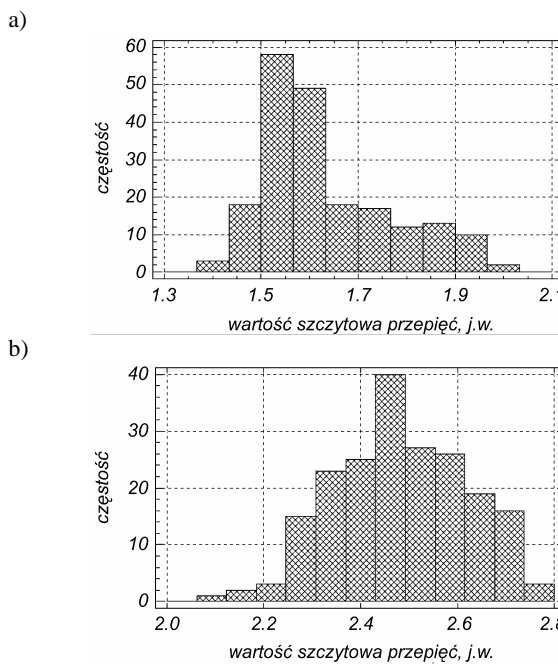
wynoszą: $t_{fz} = 6 \cdot 10^{-3} + k \cdot 10^{-3}$ (s) dla izolacji faza-ziemia oraz $t_{ff} = 3 \cdot 10^{-3} + k \cdot 10^{-3}$ (s) dla izolacji faza-faza, przy czym $k = 0, 1, 2 \dots$

W analizie statystycznej założono, że czas zamknięcia wyłącznika jest zmienną losową z rozkładu normalnego o wartości oczekiwanej $T = 0,016$ ms dla symulacji narażeń izolacji faza-ziemia oraz wartości oczekiwanej $T = 0,013$ ms dla symulacji narażeń izolacji faza-faza. Ponieważ rozpatrywane wyłączniki są w rzeczywistości konstrukcjami jednobiegowymi, to przyjęto tryb *Independent* ich funkcjonowania w programie *EMTP-ATP*. Ponadto, przy założonym największym czasie niejednoczesności zamykania biegunów wynoszącym 5 ms, odchylenie standardowe rozkładu czasu zamknięcia wynosiło $6 \cdot Dev = 5$ ms, stąd $Dev = 0,00083$ s.

Na rys. 3 przedstawiono w postaci wykresów typu *Box-and-Whisker*, przykładowe wizualizacje rozkładów statystycznych napięć na końcu linii od strony rozdzielni B , otrzymane w wyniku symulacji $N = 200$ załączeń linii w rozdzielni A . Wykresy te ilustrują podstawowe deskryptory: wartość najmniejszą, kwartył dolny, medianę, kwartył górny oraz wartość największą.



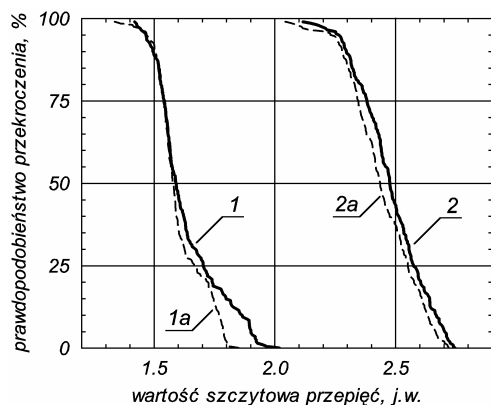
Rys. 3. Wykresy *Box-and-Whisker* narażeń napięciowych; 1 j.w. = 342,9 kV



Rys. 4. Histogramy częstotliwości narażeń napięciowych izolacji faza-ziemia (a) oraz faza-faza (b); 1 j.w. = 342,9 kV
Pudełka "A, B, C" dotyczą narażeń izolacji faza-ziemia, „pudełka” A-B, B-C, C-A - izolacji faza-faza, natomiast „pudełka” F-Z oraz F-F – wypadkowych rozkładów dla

izolacji faza-ziemia oraz faza-faza, otrzymanych z wykorzystaniem metody zdarzeniowej wartości szczytowej. Histogramy częstości rozkładów $F-Z$ oraz $F-F$ przedstawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono krzywe obrazujące prawdopodobieństwo przekroczenia wartości szczytowej napięcia łączeniowych dla izolacji faza-ziemia (krzywa 1) oraz faza-faza (krzywa 2). Odpowiadające wartości 2% napięcie $U_{2\%-sf}$ wynosi 1,93 j.w. (661,2 kV) dla izolacji faza-ziemia oraz 2,73 j.w. (934,8 kV) dla izolacji faza-faza, przy współczynniku $\alpha = 0,56$, określającym udział składowej ujemnej. Stosunek tych wielkości kształtuje się na poziomie 1,41 i jest zbliżony z wartością 1,4 zawartą w tab. 2.



Rys. 5. Krzywe prawdopodobieństwa przekroczenia wartości szczytowej napięcia: 1 – izolacja faza-ziemia; 2 – izolacja faza-faza; 1a, 2a – wpływ ograniczników napięcia; 1 j.w. = 342,9 kV

Na rys. 5 przedstawiono również, wpływ ograniczników napięcia na zmianę poziomu napięcia łączeniowych (krzywe 1a i 2a). W prezentowanym przypadku łączeniowy poziom ochrony ograniczników wynosi 1,96, co powoduje zmniejszenie wartości $U_{2\%}$ z wartości 1,93 do 1,80 dla izolacji faza-ziemia oraz z wartości 2,73 do 2,70 dla izolacji faza-faza.

4. PODSUMOWANIE

Realizacja podstawowego celu koordynacji izolacji uwarunkowana jest szeregiem czynników, wśród których szczególnie miejsce zajmuje doskonalenie metod badań narażeń napięciowych oraz poszukiwanie nowych algorytmów ich numerycznej identyfikacji. Metody teoretyczne analizy napięć, wykorzystujące modele matematyczne tych zjawisk wraz z zastosowaniem komputerowej techniki obliczeniowej, są obecnie obszarem intensywnie rozwijanym.

Zastosowanie procedur statystycznych w koordynacji izolacji napowietrznych linii elektroenergetycznych, wymaga znajomości rozkładów statystycznych narażeń oraz wiarygodnych wartości ich parametrów. Ustalenie zarówno typu rozkładu, jak i estymacja wartości liczbowych jego parametrów, może być otrzymana dzięki modelowaniu matematycznemu, komputerowym symulacjom oraz odpowiednim badaniom i analizom statystycznym. Rozwój procedur i metod badań numerycznych dla statystycznej oceny narażeń napięciowych, ma istotne znaczenie dla uściślenia procedur projektowania oraz eksploatacji układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć.

6. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 60071-1:2006 (U) Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły; PN-EN 60071-2:2000 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania.
2. PN-EN 50341-1:2005 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
3. CIGRÈ Working Group 33-07 of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation. CIGRÈ Technical Brochure No. 72, 1992.
4. Yu C., Petcharaks N., Panprommin C.: The statistical calculation of energization overvoltages, case of EGAT 500 kV lines. Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Jan. 2000, IEEE Volume 4, pp. 2705 – 2709.
5. Martinez J.A., Natarajan R., Camm E.: Comparison of statistical switching results using Gaussian, uniform and systematic switching approaches. Power Engineering Society Summer Meeting, 16-20 July 2000, IEEE Volume 2, pp. 884 – 889
6. Electromagnetic Transients Program. Theory Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995.
7. Alternative Transients Program. Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987–92.
8. CIGRÈ Working Group 33-02 of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): Guidelines for representation of network elements when calculating transients. CIGRÈ Technical Brochure No. 39, 1990

COMPUTER SIMULATIONS FOR STATISTICAL ESTIMATION OF HIGH- AND EXTRA HIGH ELECTRICAL POWER SYSTEMS

The application of statistical procedures in the insulation coordination of high voltage overhead lines requires knowledge of statistical distributions of overvoltage risks. The probabilistic simulations methodology of statistical distributions of switching overvoltages is presented in this paper. Exemplary results of research of overvoltages caused by switching the line 400 kV are also presented.