ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Tomasz RUSEK

NIEZAWODNOŚĆ GAZOSZCZELNYCH JEDNOBIEGUNOWYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję oceny niezawodności przewodów szynowych. Zaproponowano model niezawodnościowy oraz scharakteryzowano dwuwykładniczy rozkład prawdopodobieństwa do oceny zawodności układu. Na tej podstawie przedstawiono metodykę wyznaczania niezawodności gazoszczelnych przewodów szynowych.

RELIABILITY OF UNIPOLAR GAS INSULATED LINES

Summary. A conception relating to assessment of SF_6-insulated buses reliability is presented. In order to evaluate probability of the failure, the reliability model is proposed and two-exponential function is characterized. On the basis of this model a methodology of GIL (Gas Insulated Lines) reliability calculations is presented.

1. WPROWADZENIE

Gazoszczelne przewody szynowe izolowane sprężonym sześciofluorkiem siarki (SF_6), określane w anglojęzycznej literaturze przedmiotowej mianem GIL (Gas Insulated Lines), służą do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej w obrębie jednego lub kilku obiektów elektroenergetycznych. Zastosowanie takich przewodów stanowi niekiedy jedyną możliwość zmodernizowania lub rozbudowania fragmentu sieci, szczególnie w połączeniu z zainstalowaniem importowanych rozdzielnic gazoszczelnych. W Polsce istnieje wiele obiektów, w których zastosowanie przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 pozwoliłoby rozwiązać problem zapewnienia niezawodnych połączeń elektroenergetycznych w trudnych warunkach technicznych i terenowych.

Gazoszczelne przewody szynowe wymagają stosowania najlepszych materiałów przewodzących i izolacyjnych, a ponadto gwarancji dużej staranności wykonania oraz przestrzegania zasad kultury technicznej podczas montażu i eksploatacji. Izolacja takich przewodów szynowych pracuje w dość nietypowych i trudnych warunkach eksploatacyjnych. Jedną z jej charakterystycznych cech jest duża wrażliwość na nierównomierność pola elektrycznego, na ogół znacznie silniejszego w porównaniu z tradycyjnymi układami izolacji powietrznej. Cecha ta narzuca konieczność szczególnie starannego doboru oraz wymiarowania izolacji gazowej i stałej, współdecydującej o niezawodności, masie, koszcie i warunkach montażu przewodu szynowego.

Prawidłowo zaprojektowane przewody GIL muszą spełniać jednocześnie kilka często znacznie różniących się od siebie wymagań technicznych. Wszystkie te wymagania można podzielić na cztery grupy dotyczące: wytrzymałości elektrycznej, wytrzymałości mechanicznej, odporności cieplnej i jakości wykonania.

Spełnienie wymagań elektrycznych sprowadza się w ogólnym ujęciu do doboru stosownej kombinacji skoordynowanych wymiarów geometrycznych, nieprzekroczenia dopuszczalnego długotrwale natężenia pola elektrycznego, zapewnienia jak najmniej nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego oraz niedopuszczenia do powstawania jakichkolwiek wyładowań niezupełnych w normalnych warunkach roboczych. Charakterystyczną cechą układów izolacji gazowej ciśnieniowej jest duża wytrzymałość elektryczna i wynikająca stąd niezawodność. Warunkiem koniecznym jest jednak spełnienie na ogół wysokich wymagań technicznych - w tym również w zakresie wykonawstwa i montażu elementów składowych przewodu. Wynika to stąd, że wytrzymałość elektryczna takich układów izolacyjnych zmniejsza się bardzo wyraźnie w przypadku wystąpienia nawet nieznacznych zanieczyszczeń i niedopuszczalnego zawilgocenia gazu.

Wymagania mechaniczne dotyczą zapewnienia ogólnie pojętej wytrzymałości mechanicznej elementów przewodu, nieprzekroczenia dopuszczalnego poziomu naprężeń oraz zapewnienia ochrony poszczególnych elementów konstrukcyjnych przed skutkami mechanicznymi w przypadku wystąpienia niektórych zakłóceń (narażeń). Wymagania cieplne obejmują dobór podstawowych parametrów geometrycznych i zapewnienia dostatecznej odporności cieplnej w warunkach pracy normalnej i warunkach zwarciowych.

2. MODEL NIEZAWODNOŚCIOWY UKŁADU

Niezawodność - jedna z ważniejszych właściwości urządzeń elektrycznych - polega na spełnieniu zadanych wymagań technicznych przez urządzenie pracujące w określonych warunkach i zadanym przedziale czasu [2]. Jedną z miar niezawodności jest prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy urządzenia w założonych warunkach eksploatacyjnych i zadanym przedziale czasu. Prawdopodobieństwo to wynika z funkcji niezawodności $R(x)$,

wyznaczającej stopień pewności poprawnego działania urządzenia w określonych warunkach pracy. Prawdopodobieństwo zakłócenia lub uszkodzenia definiuje się natomiast następująco:

$$F(x) = 1 - R(x). \tag{1}$$

Rozważając niezawodność całego układu zakłada się pewność działania ze względów mechanicznych i cieplnych, co wynika z zasad doboru parametrów konstrukcyjnych i materiałowych przedstawionych w [1]. Jako niezawodność całego układu traktuje się więc niezawodność przewodu GIL wyłącznie pod względem wytrzymałości elektrycznej jego izolacji. Wytrzymałość elektryczna nie jest jednak wielkością deterministyczną, dlatego też nie można jednoznacznie określić, czy dane rozwiązanie będzie charakteryzowało się wystarczającą niezawodnością.

Analizując niezawodność gazoszczelnych przewodów szynowych pod względem elektrycznym rozpatruje się prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w układzie izolacyjnym, traktowanym jako całość. W przypadku urządzeń o żądanej dużej niezawodności, do których należą m.in. przewody GIL, do określenia takiego prawdopodobieństwa można zastosować rozkład dwuwykładniczy o ogólnej postaci:

$$F(x) = \exp\left[-C\exp(-\alpha x)\right], \tag{2}$$

gdzie: $C > 0$, $\alpha > 0$.

Funkcję niezawodności w takim przypadku opisuje wzór:

$$R(x) = 1 - exp\left[-C exp(-\alpha x)\right]. \tag{3}$$

Według pracy [4], funkcję niezawodności układu izolacyjnego w postaci rozkładu dwuwykładniczego można wyrazić następująco:

$$R(E) = \exp\left(-\exp\left(\frac{E - E_{63}}{\gamma}\right)\right), \tag{4}$$

gdzie:

E - natężenie pola elektrycznego w układzie izolacyjnym (zmienna losowa),

E_{63} - 63- procentowe natężenie pola elektrycznego (wartość modalna),

γ - miara rozrzutu natężenia przeskoku.

Ryzyko przeskoku wynika więc ze wzoru:

$$F(x) = 1 - R(E) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{E - E_{63}}{\gamma}\right)\right). \tag{5}$$

Parametrami rozkładu dwuwykładniczego są: 63-procentowe natężenie przeskoku (E_{63}), czyli wartość modalna (moda) oraz miara rozrzutu natężenia przeskoku (γ), odpowiadające odchyleniu standardowemu. Obie wielkości są wyrażone w kV/mm i wyznaczane empirycznie. 63-procentowe natężenie przeskoku jest uzależnione od ciśnienia SF_6 (p), czasu trwa-

nia próby (t) oraz liczby jednorodnych odcinków przewodu (n), zgodnie z następującymi zasadami:

a) zależność od ciśnienia (p):

$$E_{63} = 98p \text{ dla udarów piorunowych,} \tag{6}$$

$$E_{63} = 93p \text{ dla udarów łączeniowych,} \tag{7}$$

b) zależność od czasu trwania próby (t):

$$E_{63} = k t^{-\frac{1}{300}}, \tag{8}$$

c) zależność od liczby odcinków (n) jednorodnych pod względem wytrzymałościowym:

$$E_{n63} = E_{63} - \gamma \ln(n). \tag{9}$$

Ponieważ izolacja przewodów GIL składa się z wielu współpracujących ze sobą elementów izolacji gazowej i stałej (w skład której wchodzą izolatory grodziowe i odstępnikowe), więc uszkodzenie choćby jednego z wymienionych elementów jest równoznaczne z uszkodzeniem całego przewodu. Oznacza to, że pod względem niezawodnościowym taki układ należy traktować jako strukturę szeregową, a jego niezawodność opisuje ogólny wzór:

$$R(x) = R_1(x) \cdot R_2(x) \cdot \ldots \cdot R_n(x) = \prod_{i=1}^{n} R_i(x), \tag{10}$$

gdzie $R_i(x)$ - prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy poszczególnych elementów składowych układu izolacyjnego dla parametru x.

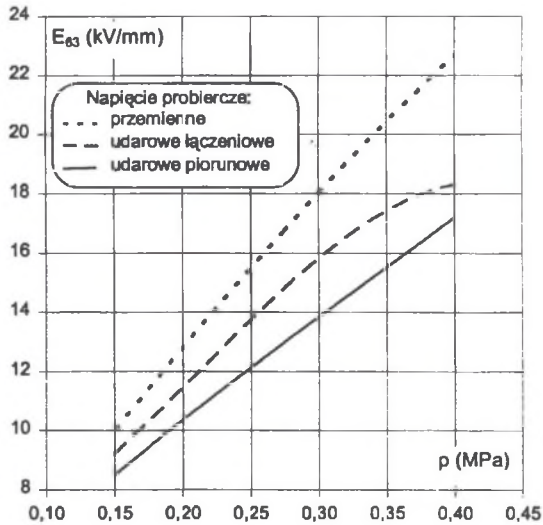
Gdy prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy jest jednakowe dla n elementów, wówczas prawdopodobieństwo uszkodzenia całego układu opisuje wzór:

$$F(x) = 1 - [R_i(x)]^n. \tag{11}$$

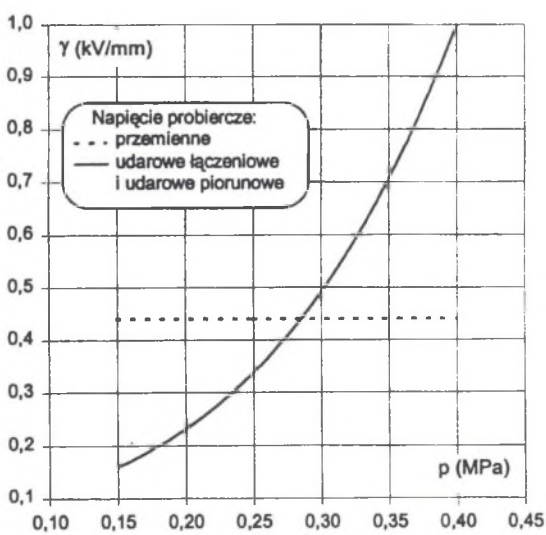
3. PARAMETRY ROZKŁADU DWUWYKŁADNICZEGO

Informacje o wyznaczaniu parametrów rozkładu dwuwykładniczego można znaleźć w literaturze przedmiotowej. W pracach [3, 4] dokonano oceny parametrów rozkładu dla układu walców współosiowych w środowisku SF_6, a zatem układu odpowiadającego przewodom szynowym jednobiegunowym. Dane dotyczą wszystkich typów napięć probierczych: przemiennego, udarowego łączeniowego i udarowego piorunowego.

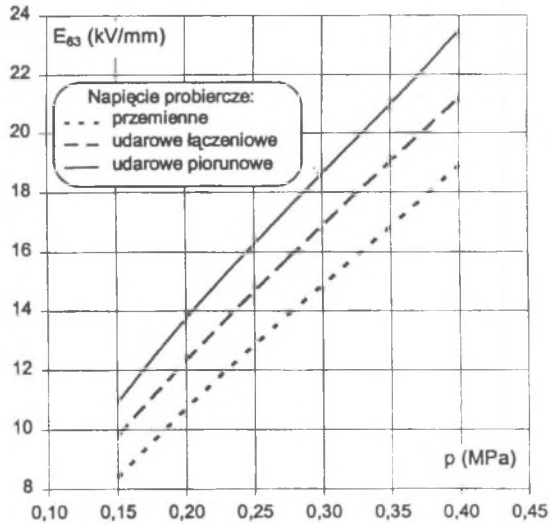
Na podstawie wyników pomiarów zamieszczonych w [3] opracowano zależności 63-procentowego natężenia przeskoku (E_{63}) i miary rozrzutu natężenia przeskoku (γ) w funkcji ciśnienia roboczego SF_6 (p). Dotyczą one wytrzymałości izolacji gazowej (rys. 1 i 2) oraz wytrzymałości powierzchniowej izolacji stałej (rys. 3 i 4) dla wszystkich typów napięć probierczych.



Rys. 1. Wartości 63-procentowego natężenia przeskoku (E_{63}) w izolacji gazowej (SF_6)
Fig. 1. 0.63-quantile of the electric stress (E_{63}) in gas insulation (SF_6)

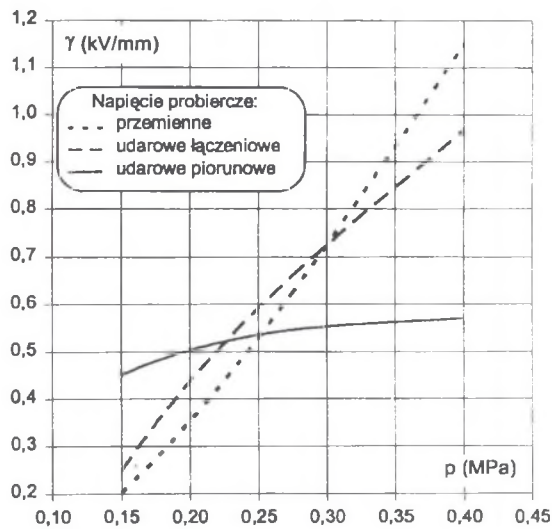


Rys. 2. Wartości miary rozrzutu natężenia przeskoku (γ) w izolacji gazowej (SF_6)
Fig. 2. A dispersion measure of the electric stress (γ) in gas insulation (SF_6)



Rys. 3. Wartości 63-procentowego natężenia przeskoku (E_{63}) w gazie (SF_6) przy powierzchni izolatora epoksydowego

Fig. 3. 0.63-quantile of the electric stress (E_{63}) near spacer's surface



Rys. 4. Wartości miary rozrzutu natężenia przeskoku (γ) w gazie (SF_6) przy powierzchni izolatora epoksydowego

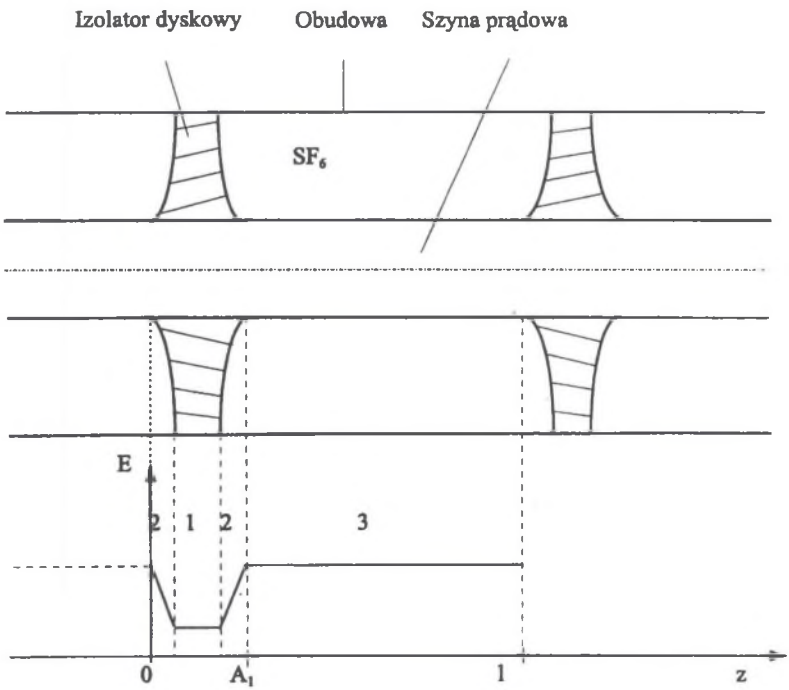
Fig. 4. A dispersion measure of the electric stress (γ) near spacer's surface

4. METODYKA WYZNACZANIA NIEZAWODNOŚCI PRZEWODÓW GIL

Gazoszczelny przewód szynowy można podzielić umownie na odcinki równoważne pod względem niezawodnościowym. Każdy z nich składa się z izolacji stałej, gazowej oraz strefy przejściowej pomiędzy dwoma rodzajami izolacji. Zatem dla jednego spośród n jednorodnych pod względem wytrzymałościowym odcinków można wyróżnić 3 składniki decydujące o prawdopodobieństwie jego bezawaryjnej pracy:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia izolatora,
- prawdopodobieństwo przeskoku powierzchniowego na granicy izolacji stałej i gazu,
- prawdopodobieństwo przeskoku w izolacji gazowej.

Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie model jednego charakterystycznego odcinka przewodu GIL do wyznaczania jego niezawodności. Niezawodność całego odcinka można wyznaczyć, uwzględniając wszystkie strefy wpływające na prawdopodobieństwo uszkodzenia. W takim odcinku można wyróżnić: strefę zajmowaną całkowicie przez izolację stałą (1), strefę przejściową pomiędzy izolacją stałą i gazową (2) oraz strefę, w której rolę izolacji pełni



Rys. 5. Szkic odcinka przewodu GIL jako modelu do rozważań niezawodnościowych oraz przybliżony wykres natężenia pola elektrycznego (E) wzdłuż osi przewodu (z)

Fig. 5. The sketch of busbar section as reliability model and approximate diagram of electric stress (E) along busbar axis (z)

wyłącznie SF_6 (3). Ze względu na brak wiarygodnych danych dotyczących strefy 1, strefy 1 i 2 są w dalszych obliczeniach uwzględniane łącznie. Do opisu powstałego w taki sposób wspólnego odcinka wykorzystuje się parametry rozkładu dwuwykładniczego, opisującego wytrzymałość powierzchniową izolacji stałej. Takie założenie upraszczające powoduje zaostrzenie wymagań niezawodnościowych.

Rozważając niezawodność układu w kierunku osi z przewód szynowy należy podzielić na n jednorodnych pod względem niezawodnościowym elementów [3]. Obliczeniową szerokość jednego elementu przyjęto równą grubości izolatora przy szynie prądowej (A_1). Prawdopodobieństwo uszkodzenia izolacji przedstawionego powyżej odcinka gazoszczelnego przewodu szynowego wskutek przyczyn elektrycznych (gdy największe natężenie pola elektrycznego nie przekracza wartości E) można obliczyć ze wzoru:

$$F(E) = 1 - \exp\left\{\frac{1}{A_1}\left[\int_0^{A_1}\left[-\exp\left(\frac{e_{iz}E - E_{63i}}{\gamma_i}\right)\right]dz + \int_{A_1}^{l}\left[-\exp\left(\frac{E - E_{63g}}{\gamma_g}\right)\right]dz\right]\right\}, \tag{12}$$

gdzie:

$$e_{iz} = \frac{E_{iz}}{E_{prz}} = \frac{\beta_{iz} R_1 \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{R_2 - R_1}$$ - parametr obliczeniowy,

E_{iz}, E_{prz} - największe natężenia pola elektrycznego odpowiednio wewnątrz izolatora i w gazowym odstępie izolacyjnym,

R_1, R_2 - odpowiednio promień zewnętrzny szyny prądowej i promień wewnętrzny obudowy,

E_{63i}, E_{63g} - 63-procentowe natężenie przeskoku odpowiednio w izolacji gazowej i przy powierzchni izolacji stałej,

γ_i, γ_g - miara rozrzutu natężenia przeskoku odpowiednio w izolacji gazowej i przy powierzchni izolacji stałej,

l - długość odcinka,

A_1 - grubość ścianki izolatora przy szynie prądowej,

β_{iz} - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego wewnątrz izolatora.

Po przekształceniu wzoru (12) otrzymuje się zależność dla układu trójfazowego:

$$F(E) = 1 - \left\{\exp\left[-\exp\left(\frac{e_{iz}E - E_{63i}}{\gamma_i}\right) - \left(\frac{l}{A_1} - 1\right)\exp\left(\frac{E - E_{63g}}{\gamma_g}\right)\right]\right\}^3. \tag{13}$$

Kolejne człony wzoru (13) opisują zawodność izolacji stałej i gazowej odcinka trójfazowego przewodu szynowego.

Z powyższych wzorów wynika, że prawdopodobieństwo uszkodzenia odcinka przewodu z przyczyn elektrycznych zależy od promienia zewnętrznego szyny i promienia wewnętrznego osłony (obudowy), a więc optymalizowanych parametrów przewodów GIL. Prawdopodo-

bieństwo to zależy ponadto od ciśnienia SF_6, które decyduje o wartościach 63-procentowego natężenia przeskoku E_{63} oraz miary rozrzutu γ.

5. PODSUMOWANIE

- Zaproponowana metodyka umożliwia określenie niezawodności gazoszczelnych jednobiegunowych przewodów szynowych. Obliczone w ten sposób wartości niezawodności są podstawą do: oceny stopnia spełnienia wymagań kryterium elektrycznego, wyznaczania ogólnego wskaźnika jakości układu oraz analizy ekonomicznej danego wariantu przewodu GIL (dana wejściowa dla kryterium ekonomicznego).
- Prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w układzie wymaga zastosowania rozkładu wartości ekstremalnych. Porównując pod tym kątem rozkład dwuwykładniczy z rozkładem Weibulla okazuje się, że dla wartości ciśnienia gazu odpowiadającemu zalecanemu przedziałowi ciśnień roboczych SF_6 w przewodach GIL (0,2÷0,4 MPa), rozkład dwuwykładniczy lepiej opisuje prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w układzie [4]. Z tego też względu do oceny niezawodności przyjęto dwuwykładniczy rozkład prawdopodobieństwa.
- Przedstawione parametry rozkładu dwuwykładniczego pozwalają na ocenę poziomu niezawodności układu przewodów GIL. Zależności te są bardzo wartościowe, gdyż przeprowadzenie badań konkretnego przewodu GIL pod kątem oceny niezawodności jest bardzo trudne i kosztowne.

LITERATURA

1. Rusek T.: Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych wysokonapięciowych gazoszczelnych przewodów szynowych. Praca doktorska, IEiSU, Gliwice, czerwiec 1999 (praca niepublikowana).
2. Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 1996.
3. Hauschild W., Mosch W.: Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. VEB Verlag Technik, Berlin 1979.
4. Hauschild W., Mosch W.: Statistick für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispilen aus der Hochspannungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1984.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Grzegorz Szymański

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 maja 2000 r.

Abstract

The paper presents the conception relating to assessment of GIL's reliability. According to principles concerned selection of constructional and material parameters [1] the construction of GIL is reliable for mechanical and thermal requirements. For this reason electrical reliability is taken as GIL reliability.

The reliability model is based on series reliability structure. In order to evaluate the probability of the failure for SF_6-insulated buses (characterized by high desired reliability) the two-exponential function is applied.

Based on bibliography [3, 4], the paper includes values of the two-exponential function parameters (E_{63} - 0.63-quatile of the electric stress and γ - a dispersion measure). These parameters for all kinds of test voltages and for different part of GIL (in gas insulation and near spacer's surface) is presented in Figures 1 - 4.

On the basis of reliability model and two-exponential function the methodology of GIL reliability calculations is presented.