



Zbigniew Gacek*, Tomasz Rusek*

METODA WYBORU OPTYMALNYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH PRZEWODÓW GIL

Streszczenie: W referacie przedstawiono metodę poszukiwania optymalnych parametrów konstrukcyjnych jednobiegunowych wysokonapięciowych gazoszczelnych przewodów szynowych (GIL). Omówiono krótko metodę hierarchiczną, wybraną do optymalizacji. Przedstawiono ogólny algorytm wyboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych przewodów GIL. Zaprezentowano wyniki analizy technicznej dla wybranych parametrów konstrukcyjnych i materiałowych jednobiegunowego przewodu szynowego 245 kV.

Słowa kluczowe: gazoszczelne przewody szynowe, optymalizacja, metoda hierarchiczna

1. Ogólna charakterystyka wymagań technicznych

Wysokonapięciowe przewody szynowe izolowane sprężonym sześćofluorkiem siarki (GIL — Gas Insulated Lines) należą do grupy niekonwencjonalnych urządzeń przesyłowo-rozdzielczych. Służą do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej w obrębie jednego lub kilku obiektów elektroenergetycznych,

Mimo swej niezbyt skomplikowanej budowy przewody GIL wymagają stosowania najlepszych materiałów przewodzących i izolacyjnych, a ponadto gwarancji dużej staranności wykonania oraz przestrzegania zasad kultury technicznej podczas montażu i eksploatacji. Zastosowanie takich przewodów stanowi niekiedy jedyną możliwość zmodernizowania lub rozbudowania fragmentu sieci, szczególnie w połączeniu z zainstalowaniem rozdzielnic gazoszczelnych.

* Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

Prawidłowo zaprojektowane przewody szynowe, podobnie jak wszystkie inne urządzenia elektryczne (elektroenergetyczne), muszą spełniać jednocześnie kilka często znacznie różniących się od siebie wymagań technicznych [3]. 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, nie przekroczenia poziomu natężenia pola elektrycznego uznawanego za dopuszczalny długotrwale, zapewnienia jak najmniej nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego oraz niedopuszczenia do powstawania jakichkolwiek form wyładowań niezupełnych.

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

Charakterystyczną cechą układów izolacji gazowej ciśnieniowej jest duża wytrzymałość elektryczna i 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.

2. Wybór metody optymalizacji

W celu optymalizacji przewodów GIL określony jest konkretny zbiór (dyskretne wartości) parametrów wynikający z ograniczeń wprowadzanych przez kryteria techniczne. W związku z tym rozważania należy prowadzić raczej w kierunku oceny konkretnych rozwiązań dopuszczalnych technicznie, a nie poszukiwania najlepszych wartości wybranych parametrów konstrukcyjnych i materiałowych. Poza tym praktycznie niemożliwe jest określenie wzajemnych współzależności między uwzględnianymi kryteriami lub gwarantowanymi współczynnikami wagowymi. Z tych względów zastosowana metoda powinna określać rozwiązanie najlepsze, spełniające jednocześnie wszystkie kryteria techniczne.

Pośród omówionych w [5] metod, do optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych przewodów GIL proponuje się zastosować metodę hierarchiczną, która wykorzystuje kolejność (ważność) poszczególnych kryteriów bez konieczności podawania wag kryteriów cząstkowych. Charakter metody hierarchicznej pozwala na oddzielne rozpatrywanie kryteriów optymalizacji, dzięki czemu kryteria nie muszą być normowane (czego wymagają inne metody). Dodatkową zaletą metody hierarchicznej jest ograniczony zakres obliczeń optymalizacyjnych poprzez zawężanie zbioru rozwiązań w kolejnych krokach procesu optymalizacji, a jednocześnie możliwość bieżącej modyfikacji procesu optymalizacji poprzez zmianę wskaźnika jakości dla danego kryterium.

Chcąc posługiwać się metodą hierarchiczną należy określić możliwie jednolity wskaźnik stopnia spełnienia wymagań znacznie zróżnicowanych kryteriów optymalizacyjnych. Możliwość takie daje opracowana przez H.C. Harringtona tzw. funkcja spełnienia wymagań, pozwalająca w jednolity liczbowy sposób ocenić zupełnie różniące się od siebie wymagania [1, 4].

3. Algorytm wyboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych przewodów GIL

Do optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych przewodów GIL należy wybrać te parametry konstrukcyjne i materiałowe, których zmiana ma wpływ na poprawność konstrukcji ze względu na stawiane wymagania techniczne i ekonomiczne. Parametrami wspólnymi opisującymi szynę prądową i osłonę zewnętrzną ze względu na podobieństwo kształtu są: promień zewnętrzny szyny prądowej, promień wewnętrzny osłony zewnętrznej, grubości ścianek szyny prądowej i osłony zewnętrznej, długość przedziału gazoszczelnego oraz materiał, z którego wykonano szynę prądową i osłonę zewnętrzną.

Parametrami opisującymi izolację stałą przewodów szynowych są rodzaj materiału zastosowanego do wykonania izolatorów grodziowych i odstępnikowych (jedną z miar jakości materiału jest współczynnik przenikalności elektrycznej względnej) oraz kształt tych izolatorów (dyskowe, kielichowe, trójelementowe). Spośród parametrów geometrycznych znaczący wpływ na izolację stałą mają: promienie szyny prądowej i osłony zewnętrznej oraz grubość izolatorów przy osłonie zewnętrznej. Kryterium mechaniczne wpływa istotnie na ilość izolatorów odstępnikowych w przedziale gazoszczelnym.

Wpływ na stan izolacji głównej (gazowej) ma ciśnienie robocze gazu oraz wymiennie wyżej parametry geometryczne przedziału gazoszczelnego. Na długość przedziału gazoszczelnego mają wpływ koszty transportu oraz koszty osprzętu, które zależą od ilości przedziałów gazoszczelnych. Pozostałe parametry konstrukcyjne i materiałowe, opisujące poszczególne elementy przewodu GIL, mają pomijalny wpływ na koszty całkowite i różnicowanie wariantów, a zatem nie powinny decydować o wyborze rozwiązania optymalnego.

Dla wszystkich parametrów konstrukcyjnych i materiałowych należy uwzględnić zakresy stosowania i ograniczenia, wynikające z kryteriów technicznych opisanych w [1, 2, 3]. W proponowanej metodzie wykorzystano programy komputerowe i procedury obliczeniowe opracowane w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Algorytm wyboru optymalnych parametrów konstrukcyjnych przewodów GIL zgodnie z metodą hierarchiczną przedstawia się następująco:

1. ustalenie kolejności kryteriów cząstkowych optymalizacji,
2. zebranie danych do przeprowadzenia optymalizacji,
3. wyznaczenie zbioru poprawnie zwymiarowanych pod względem elektrycznym rozwiązań (zbiór Ψ_0) — procedura IZOLACJA,

4. sprawdzenie wymagań niezawodnościowych (kryterium elektryczne) i zawężenie rozważań do zbioru rozwiązań Ψ_1 , spełniających kryterium elektryczne — procedura NIEZAWODNOŚĆ,
5. określenie maksymalnego ugięcia konstrukcji przewodu GIL (pierwsza grupa oddziaływań mechanicznych),
6. określenie maksymalnych przyrostów ciśnienia w warunkach zwarcia wewnętrzne-go i sprawdzenie naprężenia w izolatorach grodziowych (druga grupa oddziaływań mechanicznych) — procedury PRESSURE oraz DISCMECH lub KIELMECH,
7. stworzenie zbioru rozwiązań Ψ_2 spełniających kryteria elektryczne i mechaniczne,
8. wyznaczenie maksymalnych temperatur dla obciążenia znamionowego i zwarcio-wego (kryterium cieplne) — procedury NPS_JH1 i TORn,
9. określenie zbioru rozwiązań Ψ_3 spełniających wymagania wszystkich kryteriów technicznych,
10. określenie całkowitych kosztów rocznych poszczególnych rozwiązań i wybranie rozwiązań optymalnych.

Ogólny algorytm zaproponowanego powyżej postępowania przedstawiono na rys. 1.

4. Przykład wyboru optymalnych parametrów GIL

Na podstawie opisanego w rozdziale 3 algorytmu optymalizacji wielokryterialnej przeprowadzono obliczenia weryfikacyjne dla typowych rozwiązań przewodów GIL o napięciu roboczym 245 kV. Ze względu na brak dostępnych danych do obliczeń ekonomicznych wykonano jedynie obliczenia sprawdzające dla kryteriów elektrycznego, mechanicznego i cieplnego.

Do obliczeń przewodów GIL przyjęto następujące założenia ogólne:

- przewód szynowy jest wykonany w wersji jednobiegunowej,
- bieguny przewodu są ułożone w układzie płaskim,
- obudowy poszczególnych faz są połączone na obu końcach,
- przewód szynowy pracuje w warunkach napowietrznych,
- izolatorami grodziowymi są izolatory dyskowe,
- izolatorami odstępnikowymi są izolatory trójelementowe,
- szyna prądowa i osłona zewnętrzna są wykonane z aluminium,
- odcinki szyn są łączone poprzez docisk.

Dla przewodu 245 kV określono następujące dane ogólne:

- napięcie znamionowe $U_n = 220$ kV,
- prąd znamionowy $I_n = 1,6$ kA,
- największe dopuszczalne napięcie urządzenia $U_m = 245$ kV,
- znamionowe napięcie probiercze przemienne $U_{pr1} = 509$ kV,
- znamionowe napięcie probiercze udarowe piorunowe $U_{pr2} = 850$ kV,

- wartość najwyższego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola elektrycznego wewnątrz korpusu izolatora $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$,
- poziom prądu zwarciego w miejscu zainstalowania przewodu $I_k'' = 40 \text{ kA}$.

Dla wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych, których zmiana ma istotny wpływ na jakość konstrukcji przewodów GIL, przyjęto kilka wartości — uwzględniając ograniczenia i stosowane przedziały tych parametrów. W ten sposób powstała określona ilość kombinacji rozwiązań konstrukcyjnych poddanych analizie. Wybranymi parametrami oraz przyjętymi dla nich wartościami są:

- ciśnienie robocze gazu SF₆: $p = 0,15; 0,25; 0,4 \text{ MPa}$,
- długość przedziału gazoszczelnego i odległość pomiędzy izolatorami odstępnikowymi:

długość przedziału gazoszczelnego l (m)	15
odległość pomiędzy izolatorami odstępnikowymi l_o (m)	5
ilość trójelementowych izolatorów odstępnikowych (szt.)	2
- parametry geometryczne szyny prądowej i osłony zewnętrznej:

promień zewnętrzny szyny prądowej R_1 (mm)	50	70	90
grubość ścianki szyny prądowej g_{sz} (mm)	10	10	15
promień wewnętrzny osłony R_2 (mm)	180	200	220
grubość ścianki osłony g_{ek} (mm)	5	5	5

Tabela 1. Wyniki analizy technicznej

	R_1 (mm)	R_2 (mm)		
		180	200	220
$p = 0,15 \text{ MPa}$	50	0(e)	0(e)	0(m)
	70	0(e)	1	0(m)
	90	0(e)	0(e)	1
$p = 0,25 \text{ MPa}$	50	0(m)	0(m)	0(m)
	70	1	0(m)	0(m)
	90	1	1	1
$p = 0,4 \text{ MPa}$	50	0(m)	0(m)	0(m)
	70	1	0(m)	0(m)
	90	1	1	0(m)

Oznaczenia:

- 1 – rozwiązania dopuszczalne technicznie,
 0(e) – rozwiązania odrzucone przez kryterium elektryczne,
 0(m) – rozwiązania odrzucone przez kryterium mechaniczne.

Dla pozostałych parametrów przyjęto dane wynikające ze stosowanych materiałów, cech konstrukcyjnych i określonych zasad konstruowania przewodów GIL. Po wykonaniu obliczeń dla kryteriów elektrycznego, mechanicznego i cieplnego otrzymuje się zbiór rozwiązań dopuszczalnych technicznie. W tabeli 1 zestawiono końcowe wyniki analizy, po uwzględnieniu funkcji spełnienia wymagań dla wszystkich rozważanych kryteriów.

5. Wnioski

- Zaproponowana metodyka postępowania umożliwia wybór optymalnych parametrów konstrukcyjnych jednobiegunowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym sześćiofluorkiem siarki (GIL).
- Wykorzystanie metody hierarchicznej do optymalizacji przewodów GIL umożliwia uzyskanie cząstkowych wyników pośrednich, które mogą służyć do analizy wpływu parametrów konstrukcyjnych i materiałowych na wyniki optymalizacji.
- Prezentowana metoda umożliwia jednoznaczną i jednolitą ocenę na ogół niespójnych wymagań technicznych stawianych przewodom GIL, wynikających z kolejnych kryteriów cząstkowych (elektrycznego, mechanicznego i cieplnego).

Literatura

- [1] **Duda D., Gacek Z., Rusek T.:** *Ocena rozwiązań konstrukcyjnych GIL wspomagana komputerowo.* Mat. IV Konf. Nauk.-Techn.: „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice — ZKwE '99”, Poznań–Kiekrz 1999, ss. 301–304
- [2] **Gacek Z., Rusek T.:** *Geometrical Shaping of Spacers in High Voltage SF₆-Insulated Buses.* Proc. of 9th'ISH, vol. 2, paper 2274, Graz 1995
- [3] **Gacek Z., Rusek T.:** *Optimal SF₆-Insulated Buses Chosen in Respect of Technical Requirements.* „French-Polish Seminar”, Villeurbanne (France), 27–29 April 1998, pp. 128–133
- [4] **Harrington E. C. jr:** The Desirability Function. *Journal of American Society for Quality Control*, April 1965
- [5] **Osiński Z., Wróbel J.:** *Teoria konstrukcji.* Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1995

A SELECTION METHOD OF OPTIMAL PARAMETERS OF SF₆-INSULATED BUSES

The method used to selection of the optimal parameters of the SF₆-insulated buses is presented. The hierarchic method, proposed to selection of optimal parameters, is shortly described. The general algorithm to selection of the optimal parameters of the gas insulated lines (GIL) is presented. In order to illustrate the presented method, the computational example for the technical requirements of the unipolar busbar of highest operating voltage of 245 kV is made.