ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: ELEKTRYKA z. 153 Nr kol. 1325

Joachim BARGIEL
Wiesław GOC
Antoni PRZYGRODZKI

OCENA NIEZAWODNOŚCI PRACY TORU PRĄDOWEGO EKRANOWANEGO

Streszczenie. Przedstawiono rozwiązania torów prądowych ekranowanych (szynoprzewodów), które zostały wykonane w Polsce. Tory te służą do przesyłu dużych prądów, o wartościach kilku kA. Dokonano oceny niezawodnościowej tych torów prądowych i przedstawiono przykład obliczeniowy.

BUSWAY RELIABILITY EVALUATION

Summary. In the paper are presented some realizations of the shielded high-current bus solid conductor (busway) which were made in Poland. Such busways are used to the high current with values of several kiloamperes transmission. The reliability evaluation of thess busways is performed and a computational example is shown.

1. UKŁADY ZASILANIA STACJI TORAMI PRĄDOWYMI EKRANOWANYMI

Układy zasilania stacji torami prądowymi ekranowanymi, zwanymi też mostami szynowymi ekranowanymi lub skrótowo szynoprzewodami, stosuje się najczęściej w układach wy-prowadzenia mocy z zacisków generatorów do zacisków transformatorów blokowych. Rzadziej są stosowane jako połączenia rozdzielni średniego napięcia. Czynnikami wskazującymi potrzebę stosowania tego rodzju rozwiązań są: konieczność prowadzenia torami prądów o dużej wartości oraz niezawodność pracy układu. Rozwiązaniem alternatywnym są wiązki kablowe.

Prowadzenie prądów o wartości kilku kA wymaga stosowania odpowiednio dużych przekrojów kabli. Ze względu na zjawiska naskórkowości przekrój pojedynczej żyły kabla jest ograniczony, należałoby więc stosować wiązki kablowe. Stwarza to dodatkowe problemy z zabezpieczeniem prawidłowej pracy wiązki, równomierności przepływu prądów i niezawodności pracy wiązki kablowej.

Rozwiązania torów prądowych szynowych ekranowanych pozwalają na przesył dużych wartości prądów (do kilkunastu kA) jednym torem prądowym. W zależności od wartości prądu może być to wykonane przekrojem pełnym lub profilowym pozwalającym na zmniejszenie strat związanych ze zjawiskiem naskórkowości. Ekranowanie torów prądowych pozwala na uniknięcie strat w konstrukcjach stalowych znajdujących się w pobliżu torów prądowych związanych ze zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej i strumieniem rozproszenia. Zasadniczym efektem wskazującym na konieczność stosowania szynoprzewodów jest niezawodność pracy układów przesyłowych tego rodzaju. Na niezawodność pracy układów torów prądowych ma wpływ poprawność konstrukcji i wykonanie oraz montaż samego toru prądowego i izolacji tego toru, jak również utrzymanie wewnątrz ekranu suchego i czystego powietrza.

1.1. Rozwiązania konstrukcyjne

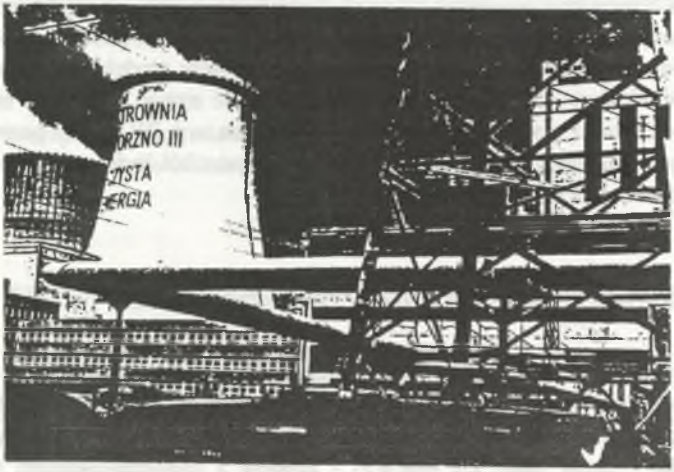
Konstrukcja i wykonanie ma wpływ na efekty związane z przyrostami temperatur poszczególnych elementów toru, a warunkiem poprawności rozwiązania jest niedopuszczenie do wzrostu temperatury powyżej stanu założonego w danych warunkach pracy toru. Tu należy dokonać analizy rozwiązań na przykładach osiągnięć i czasu pracy danego rozwiązania. Izolacja torów prądowych ma zasadniczy wpływ na długość czasu bezawaryjnej pracy szynoprzewodu. Tu należy wziąć pod uwagę rozwiązania konstrukcyjne, przeciwdziałające zjawiskom towarzyszącym stanom łączeniowym układu. Stosowanie typowej i sprawdzonej izolacji daje bardzo wysoką niezawodność pracy szynoprzewodów.

Rozwiązania konstrukcyjne torów prądowych są uzależnione od wartości prądów przesyłanych. Związane jest to w szynoprzewodach prądu przemiennego zarówno z nagrzewaniem się toru, jak i ze zjawiskami zaskórkowości. Najczęściej przyjmuje się rozwiązania w jednym ekranie trójfazowe dla prądu o wartości do 3000 A oraz trzech ekranów jednofazowych dla prądów większych. Jedno z rozwiązań przedstawiono na rys. 1.

Są jednak wyjątki, np.: wykonany w 1993 roku dla Elektrowni Łaziska trójfazowy tor prądowy na prąd 9000 A w jednym ekranie z izolacją separacyjną torów, który pracuje jako sprzęgło dla układu blok dowolny z dowolnym transformatorem. Charakteryzuje się on jednak stosunkowo dużymi wymiarami.

Do izolacji torów prądowych względem ekranów uziemionych stosuje się powszechnie typowe izolatory stacyjne wnętrzowe w zależności od wysokości napięcia znamionowego toru. W rozwiązaniach niektórych firm można spotkać rozwiązania nietypowej izolacji doziemnej wykonanej indywidualnie do przyjętej konstrukcji. Jako materiały izolacyjne stosuje się najczęściej izolatory żywiczne wsporcze z wypełniaczami kwarcowymi, lub dla warunków o specjalnych wymaganiach izolatory porcelanowe wsporcze. Sposoby mocowania torów do izolatorów oraz odległości między podporami są dobierane w zależności od warunków zwarciowych danego układu i wynikających z obliczeń, a sprawdzonych doświadczalnie, występujących sił dynamicznych podczas zwarć.

Jako izolację stosuje się powszechnie przestrzeń powietrzną występującą między torami, a odległości są obliczane zgodnie z przyjętymi normami i sprawdzane w warunkach rzeczywistych wg norm PN-88/E-05/55 oraz PN-88/E02000. Dla szynoprzewodów o napięciu powyżej 12 kV wymagane jest konstrukcyjnie sterowanie pola elektrycznego w układzie izolującym celem uniknięcia zjawisk wynikających z wyładowań niezupełnych w układzie.



Rys.1. Przykładowe rozwiązanie toru prądowego ekranowanego (6 kV, 3500 A)
Fig. 1. The example of a busway construction (6 kV, 3500 A)

W celu poprawienia warunków pracy szynoprzewodów i uczynienia jej wysoce niezawodną wymaga się utrzymania wewnątrz ekranu szynoprzewodu nadciśnienia suchego i czystego powietrza lub azotu w stosunku do otoczenia, niezależnie od warunków zewnętrznych. Wymaga to odpowiednich urządzeń o wysokiej niezawodności. Tak przystosowany do pracy szynoprzewód gwarantuje niezawodną i długą pracę.

1.2. Przegląd spotykanych rozwiązań

Powszechnie stosowane są rozwiązania wyprowadzeń mocy z zacisków generatorów do transformatorów blokowych jako jednofazowe z odpowiednimi odczepami do transformatorów potrzeb własnych i transformatorów wzbudzenia statycznego generatorów. Długości tych rozwiązań są rzędu do 50 m, a napięcia do 24 kV. Są one uznane powszechnie jako niezawodne. Stosowane są też jako układy do przesyłu mocy między rozdzielniami przy napięciu 6 kV i 20 kV w wykonaniu trójfazowym i wartościach prądów nominalnych do 3000 A. Długości tych szynoprzewodów są już znaczne - do kilkuset metrów, a nawet ponad 1000 m, najczęściej jako dwa tory oddzielne. Przykładem tu mogą być: Huta Łaziska (ok.430 m), Zakład Odsalania KWK Dębieńsko (ok.1700 m), ZA Włocławek, Huta Częstochowa (ok.800 m), Rafineria Gdańsk, Dziećkowice Jamnice (ok.175 m), Elektrownia Prużenow - Czechy (9673 m).

1.3. Warunki badań i odbioru

Przyjęta konstrukcja szynoprzewodu przechodzi badania w Instytucie Energetyki w Warszawie. Wykonywane w odcinkach szynoprzewody winny być poddawane próbom wyrobu w laboratorium. Wymagana jest ciągła kontrola jakości procesu produkcyjnego oraz okresowy nadzór zleceniodawcy. Zbadane elementy winny posiadać numer i protokół badań. Zmontowany szynoprzewód podlega odbiorowi technicznemu wg PN przez powołany zespół pomiarowy o odpowiednich uprawnieniach. Uzyskany protokół badań uprawnia do podania napięcia i dopuszczenie do pracy szynoprzewodu.

2. NIEZAWODNOŚĆ ZASILANIA SZYNOPRZEWODAMI

Niezawodnością układu szynoprzewodu nazwano tutaj tę jego właściwość, która określa zdolność do wykonania postawionego mu zadania w ustalonych warunkach eksploatacyjnych i w ustalonym czasie. Zadaniem szynoprzewodu jest zasilanie odbioru pobierającego prąd o dużej wartości - rzędu kilku kA (por.p.1) - zgodnie z zapotrzebowaniem tego odbioru w ustalonym czasie. Jako miary niezawodności dostosowane do tego zadania przyjęto:

λ - intensywność przerw zasilania w roku,

q - współczynnik zawodności,

między którymi istnieje przybliżona zależność:

$$q \approx \frac{\lambda t_s}{T}, \tag{1}$$

gdzie: t_s - średni czas przerwy zasilania,
T - okres pracy w roku, praktycznie T = 8760 h.

Układ szynoprzewodu z technicznego punktu widzenia jest konstrukcją złożoną. Dla celów analizy niezawodnościowej podzielono go na trzy części. Tak więc model niezawodnościowy układu szynoprzewodu stanowi:

1) szynoprzewód jako układ szeregowy n węzłów izolacyjnych,
2) ekran,
3) stacja filtrująca powietrze, która zapewnia nadciśnienie powietrza czystego o dopuszczalnej wilgotności we wszystkich warunkach atmosferycznych. Składa się ona z co najmniej dwóch układów rezerwujących się wzajemnie.

2.1. Układ *n* węzłów izolacyjnych

Szynoprzewód stanowi układ szeregowy *n* węzłów izolacyjnych wsporczych. Prawdopodobieństwo poprawnej pracy takiego układu [1, 2] określa zależność (2):

$$R(t) = R_1(t)\, R_2(t) \ldots R_n(t), \tag{2}$$

gdzie: t - czas, w ciągu którego określa się prawdopodobieństwo poprawnej pracy,
$R_i(t)$ - prawdopodobieństwo poprawnej pracy dla i-tego węzła izolacyjnego, i = 1,2... n,

$$R_i(t) = \exp\left(\int_0^T \lambda_i(t)\,dt\right), \tag{3}$$

gdzie: $\lambda_i(t)$ - intensywność uszkodzeń i-tego węzła izolacyjnego.
Intensywność uszkodzeń dla układu szeregowego *n* węzłów izolacyjnych wyznacza się z zależności:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \ldots + \lambda_n(t), \tag{4}$$

Przy stałej intensywności uszkodzeń poszczególnych węzłów izolacyjnych będzie dla układu *n* węzłów:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n, \tag{5}$$

a przy λ_w = const otrzymuje się:

$$\lambda = n\,\lambda_w. \tag{6}$$

Stwierdzono brak danych do określenia wartości wskaźników awaryjności dla układu szynoprzewodu [3, 4, 8, 9]. Również nie jest prowadzona statystyka awaryjności szynoprzewodów. Dlatego podjęto próbę oszacowania awaryjności szynoprzewodów w oparciu o dane dla podobnych elementów pracujących w innych układach. Dla izolatorów wykorzystano statystykę awaryjności energetyki zawodowej. Według tej statystyki awaryjności przyczynami uszkodzeń izolatorów są:

- wady fabryczne i materiałowe 17,2 %
- wyładowania atmosferyczne 32,8 %
- wichury i huragany 17,6 %
- zużycie materiału 27,6 %
- przepięcia łączeniowe i ziemnozwarciowe 1,7 %
- osoby postronne 1,7 %
- inne 2,3 %

Ze statystyki dla izolatorów wszystkich rodzajów otrzymujemy intensywność uszkodzeń λ'_i:

$$\lambda'_i = 6 \cdot 10^{-4}.$$

Wskaźnik ten należy zweryfikować kierując się ww. przyczynami. Zatem należy: pominąć wichury i huragany oraz wyładowania atmosferyczne, znacznie zmniejszyć udział wad fabrycznych i materiałowych, a pozostałe udziały przyjąć.

Wady fabryczne i materiałowe nie powinny przekraczać 5% ze względu na specjalny dobór. Tak więc intensywność uszkodzeń w przybliżeniu zmaleje do:

$$\lambda'_{\%} = 1{,}05\,(100 - 17{,}2 - 32{,}8 - 17{,}6) = 34{,}02\ \%,$$

czyli:

$$\lambda' \approx \frac{34{,}02}{100} 6 \cdot 10^{-4} = 2{,}1 \cdot 10^{-4} \text{ uszk/izolator/a}.$$

Tę wartość można przyjąć jako górną granicę średniorocznej intensywności uszkodzeń w przewidywanych warunkach pracy:

$$\lambda'_G = 2{,}1 \cdot 10^{-4}.$$

Według statystyk innych energetyk [8, 9]:

$$\lambda'_D = 0{,}7 \cdot 10^{-4},$$

którą przyjęto jako wartość dolną intensywności uszkodzeń izolatora.

Tak więc dla szynoprzewodu złożonego z *n* węzłów izolacyjnych:

$$\lambda_D < \lambda_S < \lambda_G, \tag{7}$$

gdzie:

$$\lambda_D = \lambda'_D n \quad \text{oraz} \quad \lambda_G = \lambda'_G n, \tag{8}$$

λ_S - intensywność uszkodzeń *n* węzłów izolacyjnych szynoprzewodu.

2.2. Ocena niezawodności układu szynoprzewodu

Intensywność przerw zasilania układu szynoprzewodu wyznacza się z zależności:

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_E + \lambda_F, \tag{9}$$

gdzie: λ_E - intensywność uszkodzeń ekranu, na rok,

λ_F - intensywność wypadkowa uszkodzeń stacji filtrującej powietrze, na rok.

W przypadku gdy stacja filtrująca składa się z dwóch układów o niezawodnościowej strukturze równoległej, o intensywności uszkodzeń jednego układu λ_f w roku i średnim czasie przerwy t_f otrzymuje się:

$$\lambda_F \approx \frac{2\lambda_f^2 t_f}{T}, \tag{10}$$

gdzie: T - roczny czas pracy, praktycznie T = 8760 h.

Odnośnie do intensywności uszkodzeń ekranu λ_E brak jest danych. Uważa się, że leży ona znacznie poniżej wartości λ_S i może być w praktycznych obliczeniach pominięta. Jednak decyduje ona o trwałości szynoprzewodu.

2.3. Przykład

Porównać z punktu widzenia niezawodności alternatywne rozwiązania układu zasilania stacji o napięciu 6 kV i obciążeniu 30 MV·A.

Alternatywa 1 polega na wybudowaniu dwóch torów, z których każdy jest szynoprzewodem trójfazowym ekranowanym. Do prawidłowej pracy wystarczy praca jednego toru.

Alternatywa 2 polega na wybudowaniu dwóch torów, z których każdy jest wiązką kablową.

Porównania wykonano: dla pojedynczego toru oraz dla obu torów równocześnie.

a) Obliczenia dla jednego toru

Alternatywa 1. O intensywności przerw zasilania toru decyduje praktycznie λ_S, bo $\lambda_1 = \lambda_S + \lambda_E + \lambda_F \approx \lambda_S$ oraz $\lambda'_S \in (\lambda'_D, \lambda'_G)$. Stąd dla n=1600 izolatorów w torze otrzymuje się:

$$\lambda_{1D} \approx \lambda'_D\, n = 0{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot 1600 = 0{,}112 \text{ przerw/a},$$

$$\lambda_{1G} \approx \lambda'_G\, n = 2{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot 1600 = 0{,}336 \text{ przerw/a},$$

czyli $\lambda_1 \in (0{,}112;\ 0{,}336)$. Na tej podstawie można wyznaczyć granice średniego okresu czasu między przerwami, spowodowanymi głównie uszkodzeniami izolatorów, mianowicie:

$$T_{mG} = \frac{1}{\lambda_{1D}}, \qquad T_{mD} = \frac{1}{\lambda_{1G}}.$$

Wynika stąd, że przerw zasilania jednego toru można spodziewać się w przedziale $T_m \in (9;3)$ lat, czyli od raz na 9 do raz na 3 lata. Oczekiwany czas jednej przerwy wynosi około t_1=100 h. Współczynnik zawodności:

$$q_1 \approx \frac{\lambda_1 t_1}{T} = 3{,}84 \cdot 10^{-3} \ \ldots\ 1{,}28 \cdot 10^{-3}.$$

Alternatywa 2. Prognozowana intensywność uszkodzeń kabla wynosi

$$\lambda'_k = (7 \ldots 12) \text{ uszk/100 km/a}.$$

Wiązka kablowa złożona jest z 9 kabli po 1,2 km każdy, zatem:

$$\lambda_2 = \lambda'_k\, l_k/100 = (7 \ldots 12) \cdot 9 \cdot 1{,}2/100 = (0{,}756 \ldots 1{,}296) \text{ przerw/a},$$

czyli przerwy jednego toru można spodziewać się raz na (1,3 ... 0,8) lat. Oczekiwany czas jednej przerwy jest ok. t = 60 h. Współczynnik zawodności wynosi:

$$q_2 \approx \frac{\lambda_2 t_2}{T} = 5{,}18 \cdot 10^{-3} \ \ldots\ 8{,}88 \cdot 10^{-3}.$$

b) Obliczenia dla obu torów

Równoczesne przerwy zasilania obu torów określają:

- intensywność równoczesnych przerw zasilania obu torów

$$\lambda_r = 2\,\lambda\,q + 2\,\lambda\,w\,, \tag{11}$$

gdzie: λ, q - wskaźniki dla jednego toru,

w - współczynnik współzależności; tutaj z przyczyn brakujących działań układów wyłączających i zabezpieczeń (przyjęto w=0,03),

- współczynnik zawodności

$$q_r \approx q^2 + \frac{2\,\lambda\,w\,f}{T}\,, \tag{12}$$

gdzie: f - czas przełączenia (przyjęto f=0,5 h).

c) Wyniki obliczeń podano w tablicy 1.

Tablica 1

Wyniki przykładowych obliczeń

Lp.	Wyszczególnienie	Jednostka	Alternatywa 1	Alternatywa 2
1.	Dla jednego toru:			
1.1	Intensywność przerw zasilania toru	przerw/rok	0,112 ... 0,336	0,756 ... 1,296
1.2	Współczynnik zawodności	-	$(1,28...3,84)\,10^{-3}$	$(5,18...8,88)\,10^{-3}$
2	Dla obu torów równocześnie przy współzależności zdarzeń			
2.1	Intensywność przerw zasilania obu torów	przerw/rok	$(7 ... 22,7)\,10^{-3}$	$(53,2...100,8)\,10^{-3}$
2.2	Współczynnik zawodności	-	$(2 ... 16)\,10^{-6}$	$(29,4 ... 82,3)\,10^{-6}$
3.	Dla obu torów równocześnie przy niezależności zdarzeń			
3.1	Intensywność przerw zasilania obu torów	przerw/rok	$(0,3 ... 2,6)\,10^{-3}$	$(7,8 ... 23,0\,10^{-3}$
3.2	Współczynnik zawodności	-	$(1,6 ... 14,7)\,10^{-6}$	$(26,8 ... 78,9)\,10^{-6}$

Z porównania wynika, że znacznie lepsza jest alternatywa 1.

3. PODSUMOWANIE

Rozwiązania zasilania torami prądowymi ekranowanymi, zwanymi skrótowo szynoprzewodami, są rozwiązaniami stosowanymi do przesyłu znacznych mocy. Są to rozwiązania estetyczne, które charakteryzują się dużą niezawodnością. Na pewność ich pracy istotny wpływ ma utrzymanie parametrów izolacji powietrznej. Rozwiązania z szynoprzewodami są z punktu widzenia niezawodności korzystniejsze od rozwiązań kablowych.

LITERATURA

1. Bobrowski D.: Wprowadzenie matematyczne do teorii niezawodności. Politechnika Poznańska, Poznań 1977.
2. Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego. WNT, Warszawa 1990.
3. Praca zbiorowa: Koncepcja gromadzenia danych o awaryjności elementów sieciowych 110-400 kV - aktualizacja wskaźników nieciągłości. zasilania. Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, Politechnika Śląska, Gliwice 1994.
4. Analizy awaryjności zakładów energetycznych południowej Polski za okres 1989 - 1993.
5. Goc W., Mrowiec H., Urban J.: Wskazówki obliczania wskaźników niezawodności przemysłowych sieci elektroenergetycznych. Elektroprojekt, Warszawa 1981.
6. Bartodziej G., Goc W., Kiś W., Przygrodzki A., Siwy E.: Optymalizacja przewodów szynowych do zasilania dużych odbiorów elektrotermicznych prądu stałego. ZN Pol. Śląskiej „Elektryka", z.127, Gliwice 1992.
7. Goc W., Bargiel J., Teichman B.: Ocena niezawodności schematu głównego stacji elektroenergetycznych. ZN Pol.Śląskiej „Elektryka", z.127, Gliwice 1992.
8. IEEE Commitee Report - Report on Reliability Survey of Industrial Plants. IEEE Trans. on Industrial Applications, 1974, Vol. IA-10, Nr 2.
9. Knothe S.: Sieci elektroenergetyczne przemysłowe. WNT, Warszawa 1980.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Kłos

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 listopada 1995 r.

Abstract

The busway allows a transmission of high currents on a high level of reliability. From a technical point of view the busway is a composed construction. In the reliability analysis it is divided into three elements:

1) the rigid busbars with *n* insulating nodes (i.e. every node consists of a three phase busbars isolators) co-operating in series,
2) the shield,
3) the air filter station.

The reliability of a busway depends mainly on an insulator failure rate.The reliability indices of the busway are:

λ - expected outage rate per year, see equation (9),

q - expected relative value of down-time (yearly), see equation (1).

In table 1 the result of a comparison of two alternatives for duplicate supply of a network substation are shown. The alternative 1 consists two busways and the alternative 2 - two cable bunches. The alternative 1 i.e. two busways feed is better from the reliability point of view.