

# Osprzęt kablowy wysokiego napięcia – stan aktualny i trendy

## Streszczenie

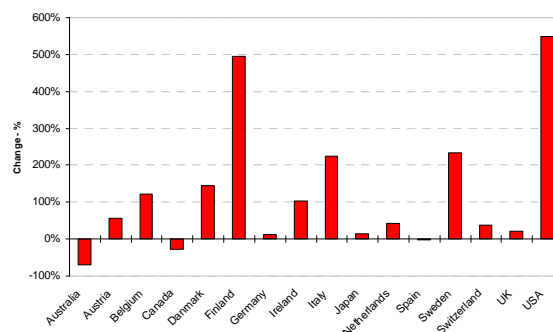
We wszystkich nowych liniach kablowych stosowane są przeważnie kable elektroenergetyczne o izolacji wytłaczanej. W związku z powyższym rozwój technologii osprzętu kablowego wysokiego napięcia koncentruje się na układach izolacyjnych związanych z dielektrykiem stałym. Aktualną ofertę głównych grup osprzętu kablowego (mufy i głowice) można uznać za kompleksową. Uwzględnia ona postęp, jaki dokonał się w ostatnich latach. W artykule omówiono technologie osprzętu, kablowych złączy metalowych i skrzynek połączeniowych. Przedstawiono również trendy rozwojowe wyrobów.

## 1. Wstęp

Pierwsze rozwiązania (około roku 1920) sterowania pola elektrycznego w osprzęcie wykorzystywały technologię nawijania. Taśmy z papieru przewodzącego były nawijane na stożek wykonany z obwoju taśm papieru izolacyjnego w strefie zakończenia ekranu izolacji kabla. Od kształtu stożka zależy reaktancja pojemnościowa tej strefy pomiędzy powłoką metalową kabla (żyłą powrotną) i żyłą roboczą. Dzięki zmianie reaktancji następuje redukcja naprężeń elektrycznych do bezpiecznych wartości. Technologia ta jest stosowana do dzisiaj w przypadku kabli o warstwowej izolacji z płynnym lub gazowym medium pod ciśnieniem.

Polietylen usieciowany (XLPE) jest aktualnie materiałem dominującym jako izolacja kabli wysokiego napięcia do 219 kV [11]. Na rysunku 1 pokazano zmiany procentowe długości kabli o izolacji XLPE w 1996 i 2006 roku w różnych krajach [2]. Technologie osprzętu kablowego konsekwentnie śledziły zmiany rodzaju izolacji kabli. Do kabli o izolacji XLPE w osprzęcie kablowym stosowane są kauczuki etylenowo-propylenowe (EPR) i kauczuki silikonowe (SIR) [1]. Dzięki ich właściwościom szeroko wdrożono prefabrykację podstawowych elementów osprzętu. Prefabrykacja ma przewagę nad technologią nawijania:

- Jakość elementu prefabrykowanego jest niezależna od umiejętności montera;
- Każdy element jest sprawdzany w ramach 100% badania wyrobu;
- Geometria prefabrykatów jest narzucona w fabryce;
- Uproszczenie montażu.



Rysunek 1: Zmiana procentowa długości kabli o izolacji XLPE w 1996 i 2006 roku na napięcie od 110 do 219 kV [2].

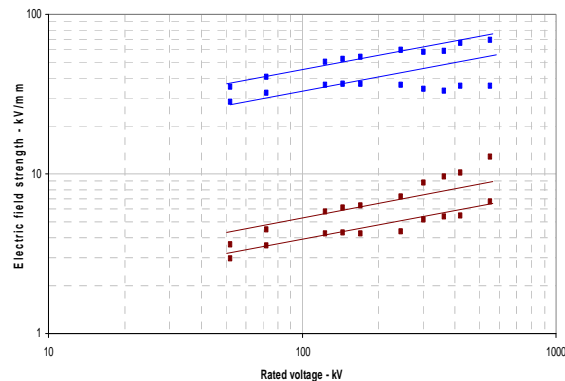
## 2. Aktualne rozwiązania osprzętu

Osprzęt dzielimy na trzy główne grupy:

- Głowice
- Głowice wtykowe do rozdzielnic GIS i transformatorów
- Mufy

Głowice kablowe pełnią funkcję zakończenia kabla i wyprowadzenia jego żyły roboczej. Ich otoczeniem jest zawsze powietrze lecz miejscem ich zainstalowania może być otwarta przestrzeń lub pomieszczenie wewnętrzne. Dlatego można je podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne. Jeśli głowica znajduje się wewnątrz transformatora lub rozdzielnicy to nazywamy ją głowicą aparatuową lub wtykową. Mufa, oprócz podstawowej funkcji łączenia dwóch kabli, może służyć również do zmiany konfiguracji układu elektrycznego linii kablowej.

Jedną z najważniejszych części osprzętu jest element sterujący pole elektryczne. Dla napięć maksymalnych powyżej 72 kV możliwe jest stosowanie wyłącznie techniki sterowania geometrycznego za pomocą stożka [3]. Ten element zapewnia utrzymanie poziomu naprężeń elektrycznych poniżej dopuszczalnych wartości nie tylko przy napięciach roboczych, lecz również zakłóceńowych i probierczych w tym udarowych.



Rysunek 2: Naprężenia elektryczne w izolacji

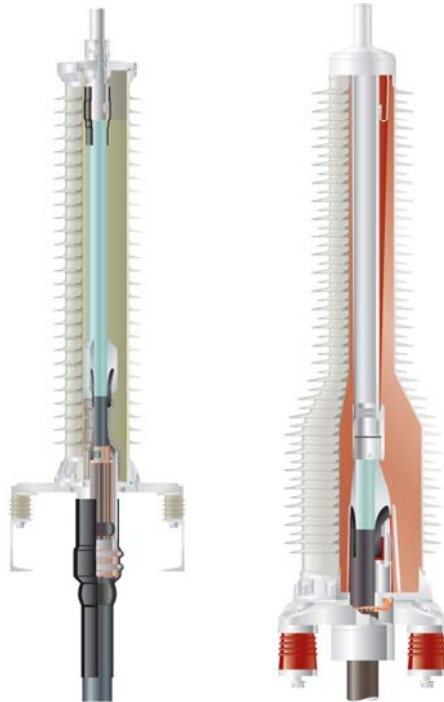
Na rysunku 2 pokazano wartości naprężeń elektrycznych w izolacji, z jakimi należy liczyć się przy projektowaniu układu sterującego. Podano wartości na powierzchni ekranu żyły roboczej i na powierzchni izolacji. Czerwone punkty odpowiadają napięciom o częstotliwości sieciowej, zaś niebieskie napięciom udarowym. Wartościami krytycznymi w osprzęcie kablowym są naprężenia elektryczne na powierzchni izolacji przy napięciach udarowych. Ich poziom służy do projektowania stożka sterującego. Należy również uwzględnić trend zmniejszania grubości izolacji kabli elektroenergetycznych przez ich producentów. Dotyczy to w szczególności tak zwanych kabli „high stress”. W kablach tych w zakresie napięć maksymalnych 123 – 170 kV występują naprężenia typowe dla „klasycznych” kabli 500 kV.

Oczywiście osprzęt kablowy musi pasować do konstrukcji kabli, zależnej od konkretnej aplikacji w zakresie żył roboczych, ekranów przewodzących, materiałów izolacyjnych, budowy powłok metalowych, żył powrotnych, pancerzy i osłon zewnętrznych.

Konstrukcje kabli nie są standaryzowane. Osprzęt dobierany jest indywidualnie na podstawie danych technologicznych producenta kabla. Jednocześnie można zaobserwować zerwanie ze zwyczajem zamawiania kabli i osprzętu u tego samego producenta. Od producenta osprzętu wymaga to projektowania coraz bardziej uniwersalnych konstrukcji.

## 2.1. Głowice

W większości przypadków głowice instalowane są na zewnątrz budynków. Warunki otoczenia muszą być uwzględniane przy ich doborze. Izolatory głowic różnią się materiałem osłony, drogą upływu, drogą przeskoku itd... Drogę upływu dobiera się w zależności od warunków zabrudzeniowych i możliwości samoczyszczenia [5]. Zasady doboru izolatorów kompozytowych uległy modyfikacji w 2008 roku. Klasyfikacja stref od „I-IV” została zastąpiona klasyfikacją „a-e” (od strefy bardzo lekkiej do strefy bardzo ciężkiej). Oczywiście parametry osłony zastosowanego izolatora zależą również od wymaganego udarowego poziomu izolacji (BIL) i wysokości zainstalowania nad poziomem morza [6]. Dostępne są głowice z izolatorem porcelanowym lub kompozytowym. Oba rodzaje spełniają wymagania, lecz trend w kierunku izolatorów kompozytowych jest coraz silniejszy. Wynika to z bezpieczeństwa w eksploatacji, łatwiejszego montażu i krótszych terminów dostaw.



Rysunek 3: Głowice kablowe zewnętrzne wykorzystujące izolatory wsporcze kompozytowe.

W przypadku głowic „mokrych” wewnątrz izolatora wsporczego wypełnione jest olejem silikonowym, który eliminuje wyładowania powierzchniowe wewnątrz izolatora i utrzymuje niski poziom wilgotności.

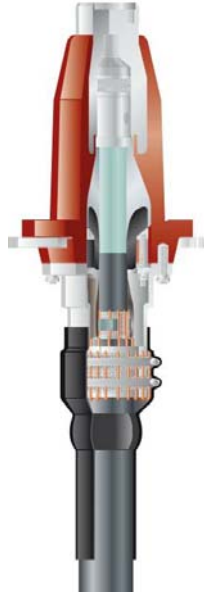
W klimatach charakteryzujących się dużymi wahaniami temperatury, olej silikonowy przeciwdziała zjawisku kondensacji wilgoci, która może być przyczyną przebicia.

Głowice „suche” nie wymagają wypełniania olejem silikonowym, żelem itd. W tym przypadku stożek sterujący, zainstalowany na izolacji kabla, jest wciskany w odpowiednio ukształtowane gniazdo izolatora wsporczego. Wewnątrz połączenie elektryczne toru prądowego zapewnia złącze wtykowe wyposażone w układ sprężynujący. Gniazdo izolatora wykonane jest z żywicy, gwarantując całej konstrukcji odpowiednią sztywność. Głowice „suche” mogą być instalowane pod różnymi kątami.

## 2.2. Głowice do GIS i głowice transformatorowe – głowice wtykowe

Ten typ głowic jest stosowany w przypadku podłączania do aparatów. Podobnie jak w głowicach, stosowany jest stożek sterujący. Jednak stożek wtykany jest w gniazdo izolatorowe o ściśle zdefiniowanym kształcie. Gniazdo wykonane jest z żywicy izolacyjnej. Jego zewnętrzny kształt wynika z wymagań normy IEC 62271-209. Gwarantuje to możliwość jego zabudowy w każdym transformatorze lub rozdzielniczy zgodnymi z tą normą.

Istnieją dwie wersje konstrukcyjne głowic wtykowych - „mokra” i „sucha”. Obie mają tę samą aplikację, lecz wersja „sucha” nie zawiera płynu, jest rozłączalna i łatwiejsza w montażu. Dlatego udział w rynku wtykowych głowic suchych wykazuje nieodwracalną tendencję wzrostową.



Rysunek 4: Głowica wtykowa „sucha”

Stożek sterujący „suchej” głowicy wtykowej ma specjalny kształt. Jest on dobrany do kształtu wewnętrznej powierzchni gniazda izolatora żywicznego. Podczas montażu stożek jest dociskany do tej powierzchni z odpowiednią siłą wywoływaną przez specjalny system sprężynowy. Docisk eliminuje z interfejsu wtrąciny powietrzne, które mogłyby prowadzić do zapłonu wyładowań niepełnych. Jest to jeden z warunków osiągnięcia wymaganej trzydziestoletniej trwałości połączenia. Stożek sterujący musi dokładnie pasować do gniazda izolatora żywicznego. Wobec tego należy stosować oba elementy pochodzące od tego samego dostawcy.

## 2.3. Mufy

Mufy przelotowe występują w dwóch wersjach konstrukcyjnych. W wersji trójmodularnej i wersji jednomodularnej. W mufach jednomodularnych (Rysunek 5, strona lewa) stożki sterujące i izolacja główna są zintegrowane fabrycznie w jednym prefabrykacie. Zmniejsza to ilość powierzchni stykowych koniecznych do kontrolowania podczas montażu. Jednakże, w porównaniu z mufami trójmodularnymi, siły potrzebne do nasunięcia korpusu są większe, co powoduje konieczność stosowania narzędzia specjalnego. Mufy trójmodularne (Rysunek 5, strona prawa) mają dwa oddzielne stożki sterujące i jeden korpus izolacji głównej. Instalowanie tych elementów nie wymaga narzędzia specjalnego. Jednak ma to miejsce w przypadku

instalacji do napięć rzędu 170 kV. Wielkość sił docisku występujących przy instalacjach na napięcia wyższe jest zbyt duża [7].

Dwa różne stożki sterujące umożliwiają wykonanie muf przelotowych kabli o różnych przekrojach znamionowych (np. 300 mm<sup>2</sup> i 630 mm<sup>2</sup>). Również długość montażowa w przypadku muf trójmodularnych jest mniejsza, a elementy sterujące (stożki) nie muszą być parkowane na osłonach kabli.



Rysunek 5: Mufy jednomodularne (z lewej) i trójmodularne (z prawej).

## 2.4. Złącza

Osprzęt kablowy ma zawsze jeden wspólny element, którym jest złącze do żył roboczych. Jest to złączka lub końcówka kablowa. Aktualnie najpowszechniej stosowanymi technologiami złącz są: połączenia prasowane, połączenia mechaniczne (śrubowe) i spawanie. Złącze zapewnia przepływ prądów roboczych i zakłóceń (zwarciovych) oraz musi być kompatybilne z konkretnym typem osprzętu. Temperatura złącza we wszystkich przypadkach powinna być niższa od temperatury żyły kabla. Złącze powinno mieć niską rezystancję stykową i eliminować zjawisko płynięcia aluminium. Zapewnia to jego wymaganą jakość i trwałość.

Do każdej żyły roboczej można aktualnie zastosować wiele różnych typów złącz. Powoduje to wzrost kosztów produkcji, magazynowania i instalowania. Dlatego producenci dążą do technologii uniwersalnych, takich, aby jedno złącze nadawało się do różnych materiałów (miedź, aluminium), konstrukcji żyły (wielodrutowa, pełna, typu Milliken) w dużym zakresie przekrojów. Przy złączach spawanych i prasowanych, kształt złącza przed i po zainstalowaniu różni się, co w wielu przypadkach wymaga dodatkowego ekranowania (metalowa klatka Faradaya). Wydaje się, że najbardziej obiecująco wygląda technologia złącz mechanicznych (śrubowych), gdyż wiele z problemów technicznych zostało już rozwiązanych.

## 2.5. Skrzynki połączeniowe

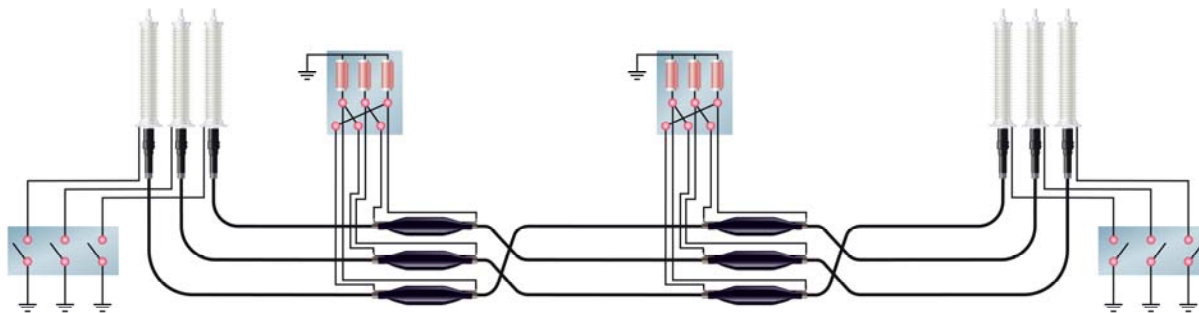
Prąd przemienny płynący żyłą roboczą, indukuje siły elektromotoryczne w powłokach metalowych i/lub żyłach powrotnych. W zależności od sposobu uziemienia może ona powodować przepływ prądów, co prowadzi do dodatkowych strat cieplnych i obniżenia obciążalności linii. Istnieje wiele metod ograniczania tych strat. Do podstawowych należą: zmiany konfiguracji kabli wzdłuż trasy linii (układ trójkątny, układ

płaski, zmiana odległości osi kabli), uziemienie jednostronne powłok metalowych/żył powrotnych, dodatkowe uziemienie w środku odcinka linii, zmiana sprzężeń elektromagnetycznych (cross-bonding) i cross-bonding z jednoczesną zmianą ułożenia faz kabla (transpozycja). Wyboru optymalnego rozwiązania należy dokonywać dla konkretnej linii.

Większość z powyższych rozwiązań wymaga stosowania skrzynek połączeniowych, w których można dokonywać przełączeń (uziemień) wyprowadzonych z mufy przewodów od powłok metalowych/żył powrotnych tak, aby zredukować lub wyeliminować prądy indukowane. Prawidłowy projekt, oprócz warunków ustalonych, powinien uwzględniać warunki zakłóceń - w szczególności zwarcia [9].

Od wartości prądu w żyłach roboczych zależy poziom napięć indukowanych. Poziom ten należy uwzględnić przy doborze odpowiedniego ogranicznika przepięć. Dobór jest zazwyczaj prowadzony przy pomocy programów symulacyjnych takich jak ETP, Cymcap [10].

Skrzynki połączeniowe, oprócz wymagań wynikających z parametrów elektrycznych osłon kabli, muszą również spełniać wymagania związane ze środowiskiem w jakim są instalowane (np. stopień IP, odporność mechaniczna itp.).



**Rysunek 6:** Schemat przykładowej linii kablowej z zastosowaniem skrzynek połączeniowych

### 3. Podsumowanie

Pole elektryczne w konstrukcjach kabli WN wykazuje tendencję wzrostową. Osprzęt kablowy, oprócz konieczności sprostania tym tendencjom, musi uwzględniać fakt pojawiania się nowych firm montujących osprzęt, nie zawsze o najwyższej fachowości. Wymaga to nieustającego rozwijania i potwierdzania właściwości proponowanych rozwiązań. Aktualnie Tyco Electronics Raychem może zaproponować osprzęt kablowy na napięciu do 170 kV i szeroką gamę skrzynek połączeniowych. Kolejnym planowanym etapem rozwoju jest osprzęt kablowy na napięciu 245 kV. Planowane jest również poszerzenie oferty narzędzi, skrzynek połączeniowych i złączy do żył. Tyco Electronics oferuje również ograniczniki przepięć, izolatory kompozytowe i osprzęt stacyjny do urządzeń WN. Jest więc w stanie zaoferować rozwiązania techniczne do indywidualnych potrzeb każdego odbiorcy.

### 4. Literatura

- [1] J. Kindersberger, "Silikonelastomere für Kabel-garnituren, Isolatoren und Überspannungsablei-tern – Profil einer Werkstofffamilie", ETG-Fachtagung „Silikonelastomere“, 2003, pp. 1–9.
- [2] CIGRE working group B1.07, "Statistics of AC underground cables in power networks", De-cember 2007, ISBN 978-2-85873—026-1
- [3] Eigner A., Semino S.: "Feldsteuertechnologien bei Kabelgarnituren – Überblick und Stand der Technik ", Elektrizitaetswirtschaft, Heft 15/2008, Seite 56 - 58, Germany
- [4] J. Kaumanns and Gero Schröder "Bedeutung von Grenzflächen bei Design, Entwicklung, Prü-fung und Inbetriebnahme von Hochspannungs-Kabelgarnituren", ETG-Fachtagung „Grenzflä-chen in elektrischen Isoliersystemen“, 2005, pp. 201–206, ISBN 3-8007-2879-6.

- [5] IEC Standard 60815-3, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems", October 2008, ISBN 2-8318-1015-6
- [6] IEC Standard 60071, "Insulation co-ordination", December 1996, CEI/IEC 71-2: 1996
- [7] A. Eigner and S. Semino "Ermittlung des Anpressdrucks von Silikonisierungen und dessen Einfluss auf das Isoliervermögen von Grenzflächen", ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen“, 2008, pp. 193–196, ISBN 978-3-8007-3116-9.
- [8] IEC Standard 61238-1, "Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 1: Test methods and requirements", May 2003, ISBN 0-580-42751
- [9] IEC Standard 60287-1, "Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses General – Part 1", November 2001, ISBN 2-8318-5992-1
- [10] J.R. Riba Ruiz<sup>1</sup> and X. Alabern Morera, "Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line", International conference on renewable energies and power quality, 2006, Palma de Mallorca.
- [11] A. Rakowska, Światowe doświadczenia z eksploatacji linii kablowych, VII Konf. Naukowo-Techniczna Elektroenergetyczne linie kablowe, stan obecny i nowe techniki, Toruń 13-14.10.2009.