

Departament Eksploatacji

**WYTYCZNE PROJEKTOWE –  
WSKAZÓWKI DLA PROJEKTANTÓW**

**Numer kodowy**

**PSE-  
WP.Dobór\_ograniczników\_  
żyła\_powrotna\_wskazówki/  
2015**

**TYTUŁ:**

**DOBÓR OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ  
INSTALOWANYCH NA ŻYŁACH POWROTNYCH KABLI  
ELEKTROENERGETYCZNYCH 110 kV, 220 kV i 400 kV**

**ZATWIERDZAM  
DO STOSOWANIA**

Z UPOWAŻNIENIA ZARZĄDU

**PSE S.A.  
DYREKTOR**

Departamentu Eksploatacji  
Grzegorz Tomasiak

23.12.2015r.

**Konstancin Jeziorna, grudzień 2015 r.**

## SPIS TREŚCI

1. Informacje ogólne .....	3
2. Zalecenia dotyczące doboru ograniczników przepięć chroniących osłony/powłoki kabli przy jednostronnym uziemieniu ekranów .....	4
2.1. Napięcie trwałej pracy .....	4
2.2. Znamionowy prąd wyładowczy .....	7
2.3. Napięcie obniżone .....	7
2.4. Wytrzymałość zwarciova .....	8
2.5. Graniczny prąd wyładowczy .....	8
2.6. Klasa rozładowania linii .....	8
2.7. Zdolność pochłaniania energii .....	8
2.8. Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy .....	8
2.9. Droga upływu osłony .....	8
3. Zalecenia dotyczące parametrów ograniczników przepięć w miejscu krzyżowania żył powrotnych (układy CB) .....	9
3.1. Napięcie trwałej pracy .....	9
3.2. Znamionowy prąd wyładowczy .....	14
3.3. Napięcie obniżone .....	14
3.4. Wytrzymałość zwarciova .....	14
3.5. Graniczny prąd wyładowczy .....	14
3.6. Klasa rozładowania linii .....	15
3.7. Zdolność pochłaniania energii .....	15
3.8. Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy .....	15
3.9. Droga upływu osłony .....	15
4. Zalecenia dodatkowe związane z instalowaniem ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN .....	16
5. Przykład doboru ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN .....	20
BIBLIOGRAFIA .....	22

## **1. Informacje ogólne**

Niniejsze opracowanie prezentuje niezbędne informacje umożliwiające dobór ograniczników przepięć służących do ochrony osłon kabli wysokiego napięcia (WN). Opracowanie to przeznaczone jest dla biur projektowych, zajmujących się projektowaniem linii kablowych WN. Szczegółowe informacje dotyczące problematyki doboru ww. ograniczników przepięć, oraz analizę teoretyczną zjawisk decydujących o ich parametrach zawiera opracowanie PSE S.A. „Wytyczne projektowe doboru ograniczników przepięć instalowanych na żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych 110 kV, 220 kV i 400 kV”,

## 2. Zalecenia dotyczące doboru ograniczników przepięć chroniących osłony/powłoki kabli przy jednostronnym uziemieniu ekranów

W warunkach propagacji przepięć istniejące w konstrukcjach kabli osłony mogą być poddawane oddziaływaniu dużych wartości napięcia (przepięć). Problem dotyczy szczególnie układów z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych (SPB), gdyż w takim przypadku na otwartym (nieuziemionym) końcu żył powrotnych wartości przepięć ulegają podwojeniu, co może stwarzać zagrożenie przebicia osłony. Stąd konieczność w układach SPB ochrony osłon przez instalowanie na otwartych końcach żył powrotnych ograniczników przepięć, możliwie blisko głowic. Wymaganie takie zawarto w normie [1]. W pkt. 6.3.4.2 tej normy zapisano, że osłony od strony nieuziemionych końców żył powrotnych kabla powinny być chronione przed przepięciami.

Należy podkreślić, że ograniczniki przepięć mają za zadanie ochronę osłon kabli WN przed przepięciami o charakterze udarowym (przepięcia piorunowe i łączeniowe), natomiast nie są w stanie bez zniszczenia chronić przed przepięciami o częstotliwości sieciowej występującymi np. podczas zwarc. Stąd konieczność doboru takich parametrów ograniczników, które zapewniają ich działanie dopiero po przekroczeniu maksymalnych wartości napięć w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna występujących podczas zwarc. Samo ograniczanie wartości maksymalnych napięć w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna powinno odbywać się na zasadzie doboru odpowiedniego układu połączeń i uziemień żył powrotnych i zastosowania odpowiedniego kabla lub kabli ECC.

### 2.1. Napięcie trwałej pracy

Według normy [1] wymaga się aby napięcie trwałej pracy  $U_c$  było wyższe od największej wartości napięcia indukowanego w układzie żyła powrotna – ziemia, przy maksymalnym prądzie zakłóceniovym. Najgorszym przypadkiem zakłócenia jest zwarcie jednofazowe zlokalizowane poza rozważaną linią kablową.

Można stwierdzić, że zapis normy [1] w zakresie napięcia trwałej pracy ograniczników instalowanych na otwartym (nieuziemionym) końcu żył powrotnych dotyczy tylko przypadku, gdy nie jest stosowany kabel ECC. W przypadku gdy kabel ECC jest stosowany, zapis w normie jest niestety nieprecyzyjny. Przyjęcie do doboru napięcia trwałej pracy ogranicznika jedynie napięcia indukowanego w żyłce powrotnej może prowadzić do niewłaściwego ich doboru. Gdy kabel ECC jest stosowany, maksymalne napięcie występujące na ogranicznikach przepięć wynika z napięcia indukowanego w żyłce powrotnej (niższego niż przy braku kabla ECC) podczas przepływu maksymalnego prądu zwarcia jednofazowego w żyłce roboczej kabla, **oraz ze straty napięcia na przewodzie ECC.**

**Warunek stanowiący podstawę doboru ograniczników pod kątem napięcia trwałej pracy przy braku kabla ECC powinien mieć postać:**

$$U_c \geq I \cdot \left| 0,049 + j0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \right| \cdot L \cong I \cdot 0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \cdot L, \quad (2.1)$$

gdzie:

$I$  – prąd płynący w kablu WN przy zwarciu 1-fazowym poza kablem,

$L$  – długość linii kablowej, w km.

$D_E = 93,1\sqrt{\rho_E}$  – odległości rozważanego przewodu izolowanego od fikcyjnego przewodu powrotnego znajdującego się w ziemi, w m,

$\rho_E$  – rezystywność gruntu, w  $\Omega \cdot m$ .

$d$  – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej (można przyjąć średnią wartość obliczoną z średnicy wewnętrznej i zewnętrznej żyły powrotnej), w m.

Mając na uwadze czasy trwania zwarć jednofazowych w sieciach WN, które dla sieci z uziemionym punktem neutralnym są stosunkowo krótkie, czasy utrzymywania się napięcia o częstotliwości sieciowej na zaciskach ogranicznika są również stosunkowo krótkie. Wykorzystuje się w tym przypadku możliwość pochłonięcia przez warystory ogranicznika określonej energii. W takim przypadku norma [1] dopuszcza określenie napięcia trwałej pracy z warunku:

$$U_c \geq \frac{I \cdot \left| 0,049 + j0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \right| \cdot L}{T} \cong \frac{I \cdot 0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \cdot L}{T}, \quad (2.2)$$

gdzie

$T$  – współczynnik TOV dla tlenkowych ograniczników przepięć.

Współczynnik TOV powinien być podawany przez producenta ograniczników w postaci charakterystyki lub odpowiedniej zależności. Do przypadku w warunku (2.2) powinien być wykorzystany współczynnik  $T_c$ . W przypadku gdy stosuje się automatykę SPZ odczytywana powinna być wartość  $T_c$  dla warystorów, które już zaabsorbowały określoną porcję energii.

**Warunek stanowiący podstawę doboru ograniczników pod kątem napięcia trwałej pracy w przypadku stosowania kabla ECC powinien mieć postać:**

$$U_c \geq |U_i| = \left| \left\{ -j0,145 \lg \frac{2S_{cf}}{d} \cdot I_f - \left[ R'_c + j0,145 \lg \frac{S_{cf}}{\gamma_c} \right] \cdot I_c \right\} \cdot L \right| \quad (2.3)$$

gdzie:

$I_f$  – prąd płynący w kablu fazowym linii WN przy zwarciu 1-fazowym poza kablem,

$I_c$  – prąd płynący w kablu ECC przy zwarciu 1-fazowym poza kablem,

$L$  – długość linii kablowej, w km.

$\gamma_c$  – geometryczny promień zastępczy żyły kabla ECC (w przybliżeniu jest równy  $0,75 \cdot$  średnica żyły kabla ECC / 2), w m,

$S_{cf}$  – średnia geometryczna odległość kabla fazowego (dotkniętego zwarciem) i kabla ECC), w m,

$d$  – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej (można przyjąć średnią wartość obliczoną z średnicy wewnętrznej i zewnętrznej żyły powrotnej), w m,

$R'_c$  – rezystancja jednostkowa żyły kabla ECC, w  $\Omega/km$ .

Można również skorzystać z uproszczonego wzoru (z założeniem, że praktycznie cały prąd powrotny przy zwarciu płynie przez kabel ECC, tj. że  $\underline{I}_c \approx \underline{I}_f$ ). Wzór (2.3) przybiera wtedy prostszą postać:

$$U_c \geq |\underline{U}_i| = \left| - \left[ R'_c + j0,145 \lg \frac{2S_{cf}^2}{d \cdot \gamma_c} \right] \cdot \underline{I}_f \cdot L \right|. \quad (2.4)$$

Również w tym przypadku można wykorzystać zdolność pochłonięcia przez warystory ogranicznika określonej energii. W takim przypadku norma [1] dopuszcza określenie napięcia trwałej pracy z warunku:

$$U_c \geq \frac{\left| \left\{ -j0,145 \lg \frac{2S_{cf}}{d} \cdot \underline{I}_f - \left[ R'_c + j0,145 \lg \frac{S_{cf}}{\gamma_c} \right] \cdot \underline{I}_c \right\} \cdot L \right|}{T}, \quad (2.5)$$

lub

$$U_c \geq \frac{\left| - \left[ R'_c + j0,145 \lg \frac{2S_{cf}^2}{d \cdot \gamma_c} \right] \cdot \underline{I}_f \cdot L \right|}{T}, \quad (2.6)$$

gdzie

$T$  – współczynnik TOV dla tlenkowych ograniczników przepięć.

Współczynnik TOV powinien być podawany przez producenta ograniczników w postaci charakterystyki lub odpowiedniej zależności. Do przypadku w warunku (2.2) powinien być wykorzystany współczynnik  $T_c$ . W przypadku gdy stosuje się automatykę SPZ odczytywana powinna być wartość  $T_c$  dla warystorów, które już zaabsorbowały określoną porcję energii.

Parametry ograniczników przepięć stosowanych do ochrony osłon kabli powinny być również dostosowane do poziomu wytrzymałości tej osłony. Osłona (powłoka) kabla nie pełni roli izolacji elektrycznej, a jedynie jest zabezpieczeniem przed wpływem czynników zewnętrznych na układ izolacyjny kabla, stąd nie podaje się dla niej parametrów związanych z wytrzymałością elektryczną (szczególnie w warunkach eksploatacyjnych). Trudno zatem określić maksymalną wartości napięcia trwałej pracy ogranicznika stosowanego do ochrony osłon kabli. Maksymalną wartość napięcia jakie może występować podczas zwarć w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna powinien określić producent kabla. Jeżeli nie ma informacji od producenta kabla, wskazówką do określenia maksymalnej wartości napięcia trwałej pracy ograniczników przepięć mogą być poziomy napięć używanych do prób szczelności osłon kabli WN. Jak podano m.in. w [5] oraz wg specyfikacji PSE S.A. dotyczących linii kablowych 110 kV, 220 kV i 400 kV, do prób napięciowych wykorzystuje się napięcie DC o wartości 4 kV na 1 mm grubości powłoki, przy czym napięcie to nie powinno przekraczać 10 kV. Takie napięcie stosuje się podczas odbioru linii kablowej a czas jego przyłożenia wynosi 5 minut. W eksploatacji próbę szczelności powłoki wykonuje się najczęściej napięciem o wartości 5 kV przykładanym na czas 1 minuty. Podane wartości napięć informują o wytrzymałości statycznej powłok takich kabli. Można zatem stwierdzić, że jeżeli

nie ma innych informacji dotyczących wytrzymałości osłon kabli WN, napięcia w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna podczas zwarć jednofazowych poza rozważaną linią kablową, przy maksymalnym prądzie zwarcia jednofazowego, nie powinny przekraczać 5 kV. Tym samym napięcia trwałej pracy ograniczników przepięć nie powinny przekraczać 5 kV. Zastosowanie ogranicznika o napięciu trwałej pracy wyższym powinno być związane z informacją o dopuszczalnym dla osłony poziomie napięć o częstotliwości sieciowej, podanym przez producenta kabla.

Jeżeli wyniki obliczeń projektowych wykażą, że przy proponowanym układzie uziemiania żył powrotnych i ułożeniu kabla ECC (kabli ECC), wartości napięć indukowanych są wyższe niż dopuszcza producent kabla (lub są wyższe od wartości napięć stosowanych przy próbach szczelności), należy podjąć działania mające na celu obniżenie wartości napięć indukowanych. Nie dopuszcza się stosowania ograniczników o wyższym napięciu trwałej pracy. Stosowanie ograniczników o wyższym napięciu trwałej pracy może bowiem nie zapewnić ochrony osłon przy przepięciach piorunowych i łączeniowych. W takich sytuacja może również dojść do przebicia osłon podczas zwarć jednofazowych wskutek napięć indukowanych 50 Hz.

## 2.2. Znamionowy prąd wyładowczy

Oprócz napięcia znamionowego ogranicznika i napięcia trwałej pracy przy doborze ograniczników chroniących powłoki kabli należy brać pod uwagę znamionowy prąd wyładowczy  $I_{wn}$ . Zgodnie z wymaganiami normy [1] prąd ten powinien być taki sam (lub większy) jak w przypadku ograniczników zainstalowanych na żyłach głównych kabli. Kierując się zatem wymaganiami specyfikacji PSE S.A. dotyczącymi ograniczników 110 kV, 220 kV oraz 400 kV o klasie rozładowania linii 3 ograniczniki przepięć chroniące osłony powinny spełniać warunek:

$$I_{wn} \geq 10 \text{ kA}, \quad (2.7)$$

Natomiast jeżeli izolacja główna kabli chroniona jest ogranicznikami o klasie rozładowania linii 4, ograniczniki do ochrony osłon powinny spełniać warunek:

$$I_{wn} \geq 20 \text{ kA}, \quad (2.8)$$

## 2.3. Napięcie obniżone

Kolejnym parametrem beziskiernikowych ograniczników przepięć jest napięcie obniżone przy znamionowym prądzie wyładowczym. Zgodnie z wymaganiami normy [1] poziom ochrony powinien być tak niski jak to jest możliwe, ponieważ wytrzymałość napięciowa osłony w czasie eksploatacji nie jest dobrze znana i nie jest sprawdzana w żadnych znormalizowanych badaniach. W związku z brakiem informacji o wytrzymałości udarowej powłok kabli należy zatem dobrać ograniczniki, które spełniając pozostałe kryteria, oferują jak najniższe wartości napięć obniżonych. Według [6] wytrzymałość udarowa osłon, powinna być uzależniona od poziomu wytrzymałości udarowej izolacji głównej kabli. Ograniczając się do najniższych poziomów wytrzymałości izolacji głównej, wytrzymałość udarowa osłon kabli 110 kV i 220 kV powinna wynosić ok. 37 kV, a dla kabli 400 kV ok. 47 kV.

## **2.4. Wytrzymałość zwarciowa**

Wytrzymałość zwarciową dobieranego ogranicznika, zapewniająca wytrzymywanie przepływu prądów zwarciovych bez gwałtownego rozerwania osłony, powinna być większa lub równa największej wartości prądu zwarcia jednofazowego w miejscu zainstalowania ogranicznika.

## **2.5. Graniczny prąd wyładowczy**

Graniczny prąd wyładowczy 4/10  $\mu$ s powinien być nie mniejszy niż 100 kA, co zgodnie z normą [1] powinny spełniać ograniczniki o klasie rozładowania linii od 1 do 5.

## **2.6. Klasa rozładowania linii**

Dla ograniczników klasy 2 i wyższych, prąd wyładowczy wynikający z klasy rozładowania używany jest w próbie działania do sprawdzenia stabilności termicznej po absorpcji energii. Żeby zatem móc wykorzystywać zależność (2.2), (2.5) lub (2.6) należy brać pod uwagę ograniczniki dla których została sprawdzona ww. stabilność termiczna. Zatem klasa rozładowania linii powinna być niemniejsza niż 2.

## **2.7. Zdolność pochłaniania energii**

Jak wynika z badań przedstawionych w [4], jako bezpieczną minimalną zdolność pochłaniania energii należy przyjmować nie mniej niż 2 kJ na 1 kV napięcia znamionowego.

## **2.8. Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy**

Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy (dla udaru prostokątnego o czasie trwania 2000  $\mu$ s) dla ograniczników o znamionowym prądzie wyładowczym 10 kA lub 20 kA należy przyjmować nie mniejszą niż 250 A.

## **2.9. Droga upływu osłony**

Jeżeli projektant przewiduje wykonanie napowietrzne ogranicznika, długość drogi upływu izolacji powinna być dostosowana do warunków zabrudzeniowych. Minimalną długość drogi upływu należy przyjmować na tym samym poziomie co długość drogi upływu ograniczników chroniących izolację główną. Zgodnie z [10] powinna ona wynosić 25 mm/kV, a w sytuacjach wyjątkowych (dawna IV strefa zabrudzeniowa) 31 mm/kV. Ograniczniki przepięć chroniące osłony kabli mogą być także zainstalowane w specjalnych skrzynkach połączeniowych tzw. link boxach. Eliminuje się przez to narażenia środowiskowe oddziałujące na ograniczniki. W takim przypadku kryterium minimalnej drogi upływu może (ale nie musi) być pominięte.

### 3. Zalecenia dotyczące parametrów ograniczników przepięć w miejscu krzyżowania żył powrotnych (układy CB)

Ograniczniki przepięć instalowane w miejscach krzyżowania żył powrotnych kabli WN pełnią główną rolę jako ochrona przekładek izolacyjnych w specjalnych mufach przystosowanych do tego typu połączeń. Ich instalacja w układzie uziemionej gwiazdy dodatkowo pełni rolę ochrony osłon kabli.

Ograniczniki w układach CB powinny być zainstalowane jak najbliżej muf. Zwykle instaluje się je wraz z łącznikami do krzyżowania ekranów w specjalnych skrzynkach, umieszczanych w studzienkach kablowych dostępnych dla obsługi. Połączenia krzyżujące wykonuje się kablami koncentrycznymi o małej impedancji falowej i obciążalności zwarciowej dostosowanej do spodziewanych prądów zwarcia w miejscu zainstalowania ograniczników.

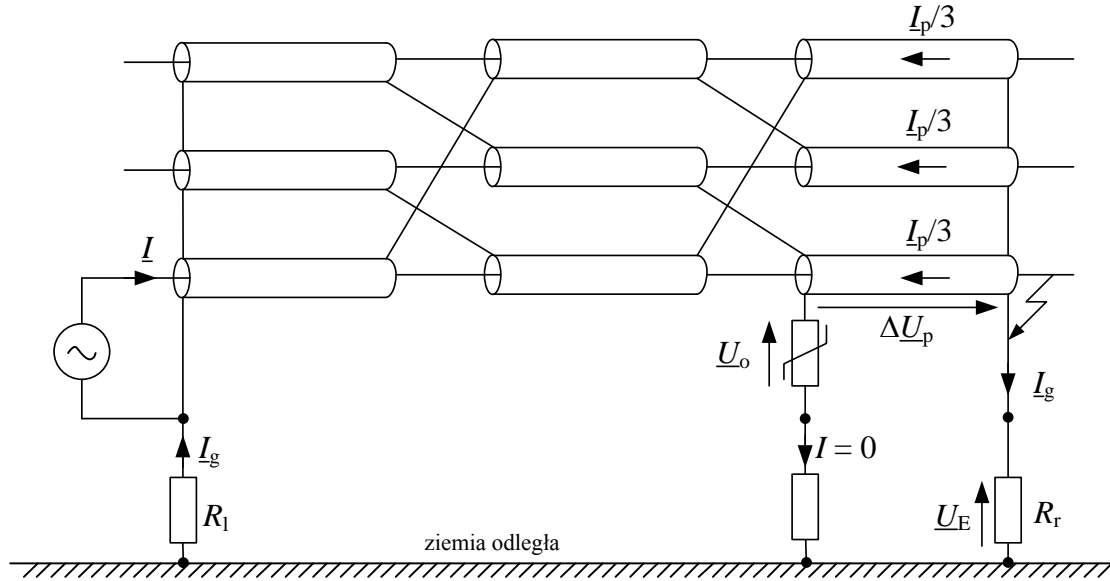
#### 3.1. Napięcie trwałej pracy

Przy wykorzystaniu *cross bondingu* na ogranicznikach przepięć instalowanych w miejscach krzyżowania powłok występują napięcia w układach żyła powrotna ziemia, oraz między końcami żył powrotnych, uzależnione od rodzaju zwarcia. Jeżeli rozważa się ochronę osłon kabli, ograniczniki przepięć powinny być połączone w uziemioną gwiazdę. W taki przypadku na ogranicznikach przepięć występują zawsze napięcia w układzie żyła powrotna ziemia. W przypadku układów CB, do określenia napięcia trwałej pracy, należy określić maksymalną wartość napięcia jaka występuje na pojedynczym ograniczniku uzależnioną od rodzaju stanu zakłóceniewego (zwarcia jednofazowego lub trójfazowego). Przy doborze ograniczników należy wybrać miejsce i rodzaj zwarcia, przy którym napięcia w miejscu zainstalowania ograniczników będą osiągać największe wartości.

#### Zwarcie jednofazowe

W przypadku zwarcia jednofazowego napięcie na ograniczniku zależy od napięcia uziomowego  $\underline{U}_E$  oraz straty napięcia na żyły powrotnej kabla dotkniętego zwarcie. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.1, napięcie w układzie żyła powrotna - ziemia lokalna, występujące podczas zwarcia jednofazowego na ogranicznikach przepięć zainstalowanych w miejscu krzyżowania żył powrotnych, wynosi [8]:

$$\underline{U}_o = \underline{U}_E - \Delta \underline{U}_p. \quad (3.1)$$



Rys. 3.1. Schemat linii kablowej w układzie CB podczas zwarcia jednofazowego

Dla linii w układzie CB, 3 ekrany kabli jednożyłowych są połączone równolegle na końcach linii o długości  $L$  (rys. 3.1) i tworzą zastępczy pojedynczy przewód charakteryzujący się impedancją jednostkową własną  $\underline{Z}'_{3Es}$  i impedancją jednostkową wzajemną z żyłą kabla ze zwarcie  $\underline{Z}'_{L3E}$ . Dla takiego układu, czyli dla linii zawierającej 3 sekcje *cross-bondingowe* (każda o długości  $L/3$ ), napięcie uziomowe  $\underline{U}_E$  wg [7] jest określone zależnością:

$$\underline{U}_E = I_{1f} \cdot R_r \frac{(\underline{Z}'_{3Es} - \underline{Z}'_{L3E}) \cdot L}{\underline{Z}'_{3Es} \cdot L + R_r + R_1}, \quad (3.2)$$

gdzie:

$I_{1f}$  – prąd zwarcia jednofazowego,

$L$  – długość linii kablowej,

$R_r, R_1$  – rezystancje uziemień na prawym i lewym końcu linii kablowej,

$\underline{Z}'_{3Es}$  – impedancja jednostkowa własna zastępczego przewodu, utworzonego przez 3 ekrany kabli w układzie CB,

$\underline{Z}'_{L3E}$  – impedancja jednostkowa wzajemna żyły kabla ze zwarcie i zastępczego przewodu.

Impedancje  $\underline{Z}'_{3Es}$  oraz  $\underline{Z}'_{L3E}$  wyznacza się z następujących zależności:

$$\underline{Z}'_{3Es} = \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}'_{EE} + 2\underline{Z}'_{m1} - 2 \frac{(\underline{Z}'_{m1} - \underline{Z}'_{EE}) \cdot (\underline{Z}'_{m2} - \underline{Z}'_{m1})}{3(\underline{Z}'_{EE} - \underline{Z}'_{m1}) + (\underline{Z}'_{m2} - \underline{Z}'_{m1})} \right], \quad (3.3)$$

$$\underline{Z}'_{L3E} = \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}'_{LE} + 2\underline{Z}'_{m1} - 2 \frac{(\underline{Z}'_{m1} - \underline{Z}'_{EE}) \cdot (\underline{Z}'_{m2} - \underline{Z}'_{m1})}{3(\underline{Z}'_{EE} - \underline{Z}'_{m1}) + (\underline{Z}'_{m2} - \underline{Z}'_{m1})} \right], \quad (3.4)$$

gdzie:

$\underline{Z}'_{EE}$  – impedancja jednostkowa własna pojedynczego ekranu:

$$\underline{Z}'_{EE} = R'_p + 0,049 + j0,145 \cdot \lg \frac{2D_E}{d},$$

$\underline{Z}'_{LE}$  – impedancja jednostkowa wzajemna ekran – żyła:  $\underline{Z}'_{LE} = 0,049 + j0,145 \cdot \lg \frac{2D_E}{d}$ ,

$D_E$  – odległości rozważanego przewodu izolowanego od fikcyjnego przewodu powrotnego znajdującego się w ziemi, w m (patrz wzór 1.1),

$R'_p$  – rezystancja jednostkowa ekranu (żyły powrotnej) w  $\Omega/\text{km}$ ,

$d$  – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej (można przyjąć średnią wartość obliczoną z średnicy wewnętrznej i zewnętrznej żyły powrotnej),

$\underline{Z}'_{m1}$  – impedancja wzajemna między kablem skrajnym i środkowym:

$$\underline{Z}'_{m1} = 0,049 + j0,145 \cdot \lg(D_E / S_{L1L2}),$$

$\underline{Z}'_{m2}$  – impedancja wzajemna między kablami skrajnymi (dla układu trójkątnego

$$\underline{Z}'_{m2} = \underline{Z}'_{m1} = \underline{Z}'_m): \underline{Z}'_{m2} = 0,049 + j0,145 \cdot \lg(D_E / S_{L1L3}),$$

$S_{L1L2}, S_{L1L3}$  – odległość odpowiednio między osiami kabli faz L1 i L2 lub L1 i L3.

Dla układu trójkąta równobocznego wzory (3.3) i (3.4) znacznie się upraszczają:

$$\underline{Z}'_{3Es} = \frac{1}{3} [\underline{Z}'_{EE} + 2\underline{Z}'_m], \quad (3.3a)$$

$$\underline{Z}'_{L3E} = \frac{1}{3} [\underline{Z}'_{LE} + 2\underline{Z}'_m]. \quad (3.4a)$$

Występujące w powyższych wzorach trzy impedancje jednostkowe są obliczane ze wzorów:

$$\underline{Z}'_{LE} = 0,049 + j0,145 \cdot \lg(2D_E / d), \quad \underline{Z}'_{EE} = R'_p + 0,049 + j0,145 \cdot \lg(2D_E / d) \quad \text{oraz}$$

$\underline{Z}'_m = 0,049 + j0,145 \cdot \lg(D_E / S)$ . W efekcie dla układu trójkątnego otrzymuje się dwa końcowe wzory na impedancje:

$$\underline{Z}'_{3Es} = \frac{1}{3} R'_p + 0,049 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_E}{r_{zast}}, \quad (3.3b)$$

$$\underline{Z}'_{L3E} = 0,049 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_E}{r_{zast}}, \quad (3.4b)$$

w których  $r_{zast}$  jest promieniem zastępczym trzech równoległe połączonych ekranów kabli w układzie trójkątnym:

$$r_{zast} = \sqrt[3]{\frac{d}{2} \cdot S^2},$$

gdzie  $S$  – odległość między osiami kabli w układzie trójkątnym.

Ze wzoru (3.2) wynika, że prąd  $I_g$  płynący przez ziemię wynosi:

$$I_g = I_{1f} \cdot \frac{(\underline{Z}'_{3Es} - \underline{Z}'_{L3E}) \cdot L}{\underline{Z}'_{3Es} \cdot L + R_r + R_1}, \quad (3.5)$$

a łączny prąd w 3 ekranach (żyłach powrotnych) kabli:

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{lf} - \underline{I}_g. \quad (3.6)$$

Prąd w ekranach dla symetrycznego układu trójkątnego dzieli się równo na trzy żyły powrotne, a więc w żyłę powrotnej każdego kabla płynie prąd  $\underline{I}_p/3$ . Przepływający przez żyłę roboczą kabla prąd zwarciovowy  $\underline{I}_{lf}$  indukuje w żyłę powrotnej każdego kabla SEM, a przepływający przez żyłę powrotną prąd  $\underline{I}_p/3$  powoduje stratę napięcia. Wypadkową stratę napięcia dla symetrycznego układu trójkątnego, dla żyły powrotnej kabla ze zwarcieciem w trzeciej sekcji określa wzór (rys. 3.1):

$$\Delta \underline{U}_p = \frac{\underline{I}_p}{3} (\underline{Z}_{EE} + 2\underline{Z}_m) - \underline{I}_{lf} \underline{Z}_{LE} = \underline{I}_p \cdot \underline{Z}'_{3Es} \cdot \frac{L}{3} - \underline{I}_{lf} \cdot \underline{Z}'_{LE} \cdot \frac{L}{3}. \quad (3.7)$$

Zatem uwzględniając wcześniej podane wzory otrzymuje się dla trójkątnego ułożenia kabli:

$$\Delta \underline{U}_p = \underline{I}_p \left( \frac{1}{3} R'_p + 0,049 + j0,145 \lg \frac{D_E}{\sqrt[3]{\frac{d}{2} \cdot S^2}} \right) \frac{L}{3} - \underline{I}_{lf} \left( 0,049 + j0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \right) \frac{L}{3}. \quad (3.8)$$

Dla układu płaskiego w przypadku kabla środkowego wartość straty napięcia będzie wynosić:

$$\Delta \underline{U}_p = \underline{I}_p \left( \frac{1}{3} R'_p + 0,049 + j0,145 \lg \frac{D_E}{\sqrt[3]{\frac{d}{2} \cdot S_{L1L2}^2}} \right) \frac{L}{3} - \underline{I}_{lf} \left( 0,049 + j0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \right) \frac{L}{3}, \quad (3.9)$$

a dla kabli skrajnych:

$$\Delta \underline{U}_p = \underline{I}_p \left( \frac{1}{3} R'_p + 0,049 + j0,145 \lg \frac{D_E}{\sqrt[3]{d \cdot S_{L1L2}^2}} \right) \frac{L}{3} - \underline{I}_{lf} \left( 0,049 + j0,145 \lg \frac{2D_E}{d} \right) \frac{L}{3}. \quad (3.10)$$

Przedstawiony przypadek dotyczy połączenia np. dwóch stacji wykonanego linią kablową z krzyżowaniem żył powrotnych. W praktyce występują również np. wstawki do linii napowietrznych lub wyprowadzenia ze stacji na linię napowietrzną. Jeżeli zatem koniec linii stanowią linie napowietrzne, zamiast rezystancji  $R_r$ ,  $R_l$  lub ich obu, we wzorach (3.2) i (3.5) należy użyć wypadkowych impedancji systemu uzemień, obejmujących rezystancję uzimienia słupa kablowego, pozostałych słupów w linii oraz impedancje linek odgromowych, jako elementów obwodu ziemnopowrotnego lub skorzystać z gotowych zależności podanych w [7]. Napięcie uziomowe  $\underline{U}_E$  osiąga w tych przypadkach znacznie większe wartości.

### Zwarcie trójfazowe

Podczas zwarc trójfazowych w miejscach krzyżowania żył powrotnych, a więc na końcach sekcji, występują w stosunku do ziemi napięcia. Wartości tych napięć mogą osiągać

duże wartości z racji wartości prądów zwarciovych. Przy połączeniu ograniczników w gwiazdę (a tylko w takim przypadku realizowana jest ochrona przeciwprzebieciowa osłon kabli), na każdym ograniczniku występują napięcia wyidukowane w sekcjach w stosunku do ziemi lokalnej. Dla linii ułożonej w układzie płaskim największe wartości osiągają napięcia indukowane w kablach skrajnych:

$$\underline{U}_o = -jI_{3f} \cdot 0,145 \left( -\frac{1}{2} \lg \frac{S_{L1L2}}{d} \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \lg \frac{4S_{L1L2}}{d} \right) \cdot \frac{L}{3}, \quad (3.11)$$

a w układzie trójkątnym:

$$U_o = I_{3f} \cdot 0,145 \cdot \left( \lg \frac{2S}{d} \right) \cdot \frac{L}{3}. \quad (3.12)$$

gdzie:

$I_{3f}$  – prąd zwarcia trójfazowego,

$S_{L1L2}$  – odległość między osiami kabli faz L1 i L2 w układzie płaskim,

$S$  – odległość między osiami kabli w układzie trójkątnym,

$d$  – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej (można przyjąć średnią wartość obliczoną z średnicy wewnętrznej i zewnętrznej żyły powrotnej)

$L$  – długość linii kablowej,

Pierwszą czynnością przy doborze napięcia trwałej pracy ogranicznika stosowanego w układzie z krzyżowaniem żył powrotnych jest określenie dla projektowanego przypadku (rodzaju ułożenia, parametrów kabli, rezystancji uziemień itd.) największego napięcia występującego na ogranicznikach w układzie żyła powrotna-ziemia lokalna  $|\underline{U}_o|_{\max}$  (analiza zwarcia trójfazowego i jednofazowego). Napięcie trwałej pracy powinno spełniać warunek:

$$U_c \geq |\underline{U}_o|_{\max}, \quad (3.13)$$

Mając na uwadze stosunkowo krótkie czasy trwania zwarć wielkoprądowych, czasy utrzymywania się napięcia o częstotliwości sieciowej na zaciskach ogranicznika są również stosunkowo krótkie. Wykorzystuje się w tym przypadku możliwość pochłonięcia przez warystory ogranicznika określonej energii. W takim przypadku norma [1] dopuszcza określenie napięcia trwałej pracy z warunku:

$$U_c \geq \frac{|\underline{U}_o|_{\max}}{T}, \quad (3.14)$$

gdzie

$T$  – współczynnik TOV dla tlenkowych ograniczników przepięć.

Współczynnik TOV powinien być podawany przez producenta ograniczników w postaci charakterystyki lub odpowiedniej zależności. Do przypadku w warunku (3.14) powinien być wykorzystany współczynnik  $T_c$ . W przypadku gdy stosuje się automatykę SPZ odczytywana powinna być wartość  $T_c$  dla warystorów, które już zaabsorbowały określoną porcję energii.

Jeżeli chodzi o maksymalną wartość napięcia trwałej pracy ograniczników, to należy się kierować tymi samymi zasadami co dla ograniczników stosowanych w układach SPB

(z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych). Również tym przypadku maksymalne napięcie jakie może wystąpić w układzie żyła powrotna-ziemia powinien określić producent kabla, lub powinno ono wynikać z napięć probierczych stosowanych przy próbach szczelności osłon. W układach CB napięcie to dotyczy nie całej linii ale jednej sekcji. Jeżeli obliczone napięcia przekraczają wartości dopuszczalne, można podzielić linię na większą liczbę sekcji lub zastosować dodatkowo przewód ECC.

### 3.2. Znamionowy prąd wylądowczy

Oprócz napięcia znamionowego ogranicznika i napięcia trwałej pracy przy doborze ograniczników chroniących powłoki kabli należy brać pod uwagę znamionowy prąd wylądowczy  $I_{wn}$ . Zgodnie z wymaganiami normy [1] prąd ten powinien być taki sam (lub większy) jak w przypadku ograniczników zainstalowanych na żyłach głównych kabli. Kierując się zatem wymaganiami specyfikacji PSE S.A. dotyczącymi ograniczników 110 kV, 220 kV oraz 400 kV o klasie rozładowania linii 3 ograniczniki przepięć chroniące osłony powinny spełniać warunek:

$$I_{wn} \geq 10 \text{ kA.} \quad (3.15)$$

Natomiast jeżeli izolacja główna kabli chroniona jest ogranicznikami o klasie rozładowania linii 4, ograniczniki do ochrony osłon powinny spełniać warunek:

$$I_{wn} \geq 20 \text{ kA.} \quad (3.16)$$

### 3.3. Napięcie obniżone

Kolejnym parametrem beziskiernikowych ograniczników przepięć jest napięcie obniżone przy znamionowym prądzie wylądowczym. Zgodnie z wymaganiami normy [1] poziom ochrony powinien być tak niski jak to jest możliwe, ponieważ wytrzymałość napięciowa osłony w czasie eksploatacji nie jest dobrze znana i nie jest sprawdzana w żadnych znormalizowanych badaniach. W związku z brakiem informacji o wytrzymałości udarowej osłon kabli należy zatem dobrać ograniczniki, które spełniając pozostałe kryteria, oferują jak najniższe wartości napięć obniżonych. Według [6] wytrzymałość udarowa osłon, powinna być uzależniona od poziomu wytrzymałości udarowej izolacji głównej kabli. Ograniczając się do najniższych poziomów wytrzymałości izolacji głównej, wytrzymałość udarowa osłon kabli 110 kV i 220 kV powinna wynosić ok. 37 kV, a dla kabli 400 kV ok. 47 kV.

### 3.4. Wytrzymałość zwarciowa

Wytrzymałość zwarciową dobieranego ogranicznika, zapewniająca wytrzymywanie przepływu prądów zwarciowych bez gwałtownego rozerwania osłony, powinna być większa lub równa największej wartości prądu zwarcia jednofazowego w miejscu zainstalowania ogranicznika.

### 3.5. Graniczny prąd wylądowczy

Graniczny prąd wylądowczy 4/10  $\mu\text{s}$  powinien być nie mniejszy niż 100 kA, co zgodnie z normą [1] powinny spełniać ograniczniki o klasie rozładowania linii od 1 do 5.

### **3.6. Klasa rozładowania linii**

Dla ograniczników klasy 2 i wyższych, prąd wyładowczy wynikający z klasy rozładowania używany jest w próbie działania do sprawdzenia stabilności termicznej po absorpcji energii. Żeby zatem móc wykorzystywać zależność (3.14) należy brać pod uwagę ograniczniki dla których została sprawdzona ww. stabilność termiczna. Zatem klasa rozładowania linii powinna być nie mniejsza niż 2.

### **3.7. Zdolność pochłaniania energii**

Jak wynika z badań przedstawionych w [4], jako bezpieczną minimalną zdolność pochłaniania energii należy przyjmować nie mniej niż 2 kJ na 1 kV napięcia znamionowego.

### **3.8. Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy**

Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy (dla udaru prostokątnego o czasie trwania 2000  $\mu$ s) dla ograniczników o znamionowym prądzie wyładowczym 10 kA lub 20 kA należy przyjmować nie mniejszą niż 250 A.

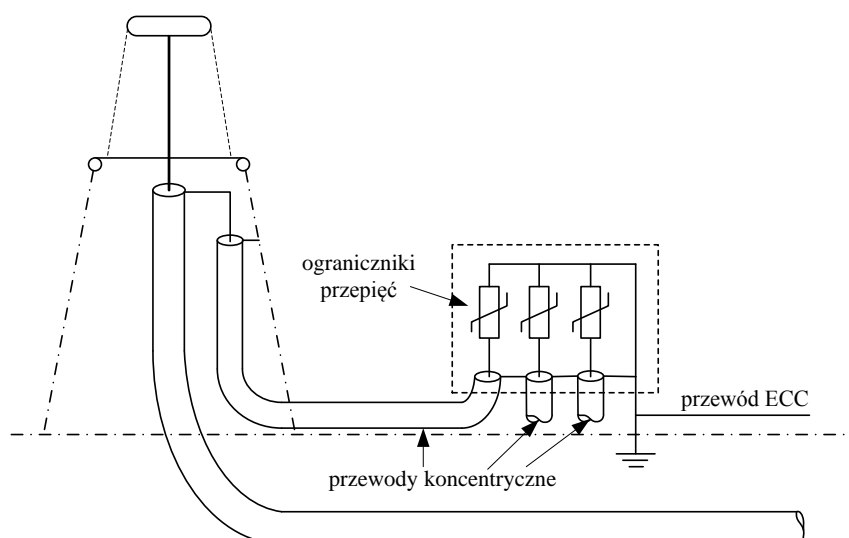
### **3.9. Droga upływu osłony**

Jeżeli projektant przewiduje wykonanie napowietrzne ogranicznika, długość drogi upływu izolacji powinna być dostosowana do warunków zabrudzeniowych. Minimalną długość drogi upływu należy przyjmować na tym samym poziomie co długość drogi upływu ograniczników chroniących izolację główną. Zgodnie z [10] powinna ona wynosić 25 mm/kV, a w sytuacjach wyjątkowych (dawna IV strefa zabrudzeniowa) 31 mm/kV. Ograniczniki przepięć chroniące osłony kabli mogą być także zainstalowane w specjalnych skrzynkach połączeniowych tzw. link boxach. Eliminuje się przez to narażenia środowiskowe oddziałujące na ograniczniki. W takim przypadku kryterium minimalnej drogi upływu może być pominięte.

#### 4. Zalecenia dodatkowe związane z instalowaniem ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN

W [4] można znaleźć także praktyczne wskazówki dotyczące ochrony powłok kabli instalowanych w układach z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych (SPB) lub ich uziemieniem w środku długości kabli z zastosowaniem przewodu ECC.

Ograniczniki przepięć przyłączone do żył powrotnych powinny być połączone w takich układach między nieziemiony koniec żył powrotnych kabli i przewód ECC (rys. 4.1). Nieziemione końce ekranów kablowych na końcach kabli, ze względu na różne napięcia indukowane w poszczególnych fazach, muszą być od siebie odizolowane. Zaleca się łączenie ograniczników z żyłami powrotnymi kabli możliwie krótkimi przewodami. Jeśli trzy ograniczniki są umieszczone razem, tworząc zespół połączeń, ograniczniki te powinny być połączone z żyłami powrotnymi kabli przewodami koncentrycznymi o małej impedancji falowej, odpowiedniej obciążalności i o długości 2 do 3 m. Ekran przewodu koncentrycznych powinny być połączone ze sobą oraz z uziemieniem ograniczników.



Rys. 4.1. Zalecane wykonanie połączeń w obrębie skrzynki z ogranicznikami przepięć w układzie SPB wg [6]

Zalecany w [6] sposób wykonywania połączeń żył powrotnych kabli WN do skrzynki z ogranicznikami przepięć w układzie SPB (rys. 4.1) z użyciem przewodów koncentrycznych nie znajduje na razie potwierdzenia w nowszych opracowaniach CIGRE, czyli w publikacjach: [4] z 2005 r., [7] z 2008 r. i [11] z 2013 r. Potrzebę stosowania przewodów ekranowanych należy więc na razie traktować jako sprawę otwartą, wymagającą potwierdzenia w dalszych badaniach. **Z powyższego względu, obok zalecanego w [6] wykorzystania przewodów koncentrycznych, dopuszcza się stosowanie przewodów bez ekranów, czyli izolowanych linii miedzianych.**

Zwykle możliwy jest wybór, na którym końcu linii kablowych należy uziemić żyły powrotne, a na którym zainstalować na żyłach powrotnych ograniczniki. Ogólną zasadą jest uziemianie żył powrotnych z tej strony kabli, z której mogą docierać większe przepięcia. Na wybór miejsca uziemienia mogą mieć również wpływ inne czynniki:

- a) W przypadku, gdy rezystancja uziemienia jest znacznie mniejsza na jednym z końców układu, zaleca się uziemienie w tym właśnie miejscu.
- b) Jeżeli kabel jest podłączony bezpośrednio do rozdzielnicy hermetyzowanej może prowadzić to do występowania bardzo stromych przepięć i korzystne jest wtedy uziemienie od strony tej rozdzielnicy, stosując jak najkrótsze połączenia. Jeśli ograniczniki muszą być połączone z rozdzielnicą hermetyzowaną powinny być bezpośrednio podłączone do kołnierza przepustu, przy zastosowaniu jak najkrótszych połączeń.
- c) Dla ułatwienia eksploatacji i ze względów bezpieczeństwa zaleca się (o ile to możliwe) instalować ograniczniki w stacji, a nie w miejscach ogólnodostępnych.

W wielu przypadkach może występować konflikt między wymienionymi czynnikami i wybór konkretnego rozwiązania musi być dokonany z uwzględnieniem istotności powyższych czynników w konkretnym zastosowaniu.

Należy w tym miejscu przypomnieć, że w przypadku jednostronnego uziemiania żył powrotnych kabli, ograniczniki przepięć na nieuziemionym końcu żył powrotnych powinny być zawsze połączone w gwiazdę, a punkt gwiazdowy połączony z uziemionym kablem przeciwwagi (ECC).

Z zapisu w normie [1] wynika, że prawidłowo dobrane i zainstalowane ograniczniki powinny chronić osłony kabli bez względu na źródło i rodzaj przepięć występujących w układzie żyła powrotna ziemia oraz być odporne na narażenia zarówno środowiskowe jak i eksploatacyjne. Narażenia środowiskowe ogranicza się zamykając ograniczniki w specjalnych skrzynkach połączeniowych tzw. *link boxach*.

*Link boxy* mają izolację powietrzną, która musi podlegać zasadom koordynacji. Podstawą do prawidłowej koordynacji izolacji jest znajomość wytrzymałości elektrycznej odstępów powietrznych i układów izolacyjnych przy różnych przepięciach z uwzględnieniem warunków środowiskowych eksploatacji. Czyli krótko mówiąc, celem koordynacji izolacji w przypadku *link box'a* jest zapobieganie przeskokom w powietrzu lub po powierzchni obudowy, które mogą przekształcić się w łuk elektryczny. A zatem *link box* powinien być tak zaprojektowany, wykonany i zainstalowany aby wyeliminować lub znacznie zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowania zupełnego w jego elementach, a gdy takie wyładowanie nastąpi zminimalizować skutki wyładowania.

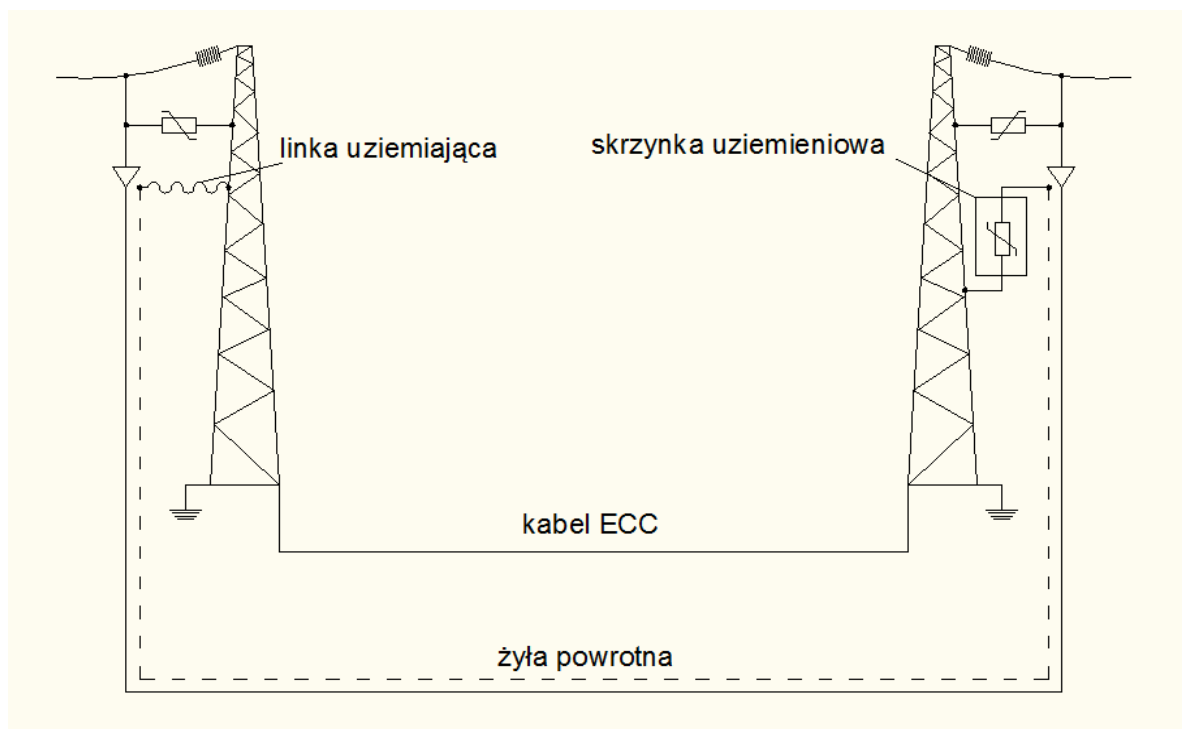
Newralgicznym elementem układu izolacyjnego *link box* jest niewątpliwie odstęp powietrzny między zaciskami przyłączowymi. Izolacja powietrzna i po powierzchni obudowy między zaciskami musi być w stanie wytrzymać napięcia z dodatkowym marginesem bezpieczeństwa uwzględniającym m.in. starzenie się izolacji podczas eksploatacji. Sugeruje się przyjmować współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 25%:

1. napięcia stałego wykorzystywanego do badania technicznego izolacji osłon kablowych, zwykle maksymalnie 10 kV DC;
2. najwyższej wartości napięcia indukowanego o częstotliwości 50 Hz, występującego między powłokami podczas awarii (zwarcia);
3. maksymalnej wartości napięć obniżonych przez ograniczniki przepięć przy próbach ograniczników. Należy zauważyć, że jeśli ograniczniki są połączone w gwiazdę poziom ochronny musi być podwojony z uwagi na fakt, że pomiędzy każdą parą osłon kabli połączone są szeregowo dwa ograniczniki.

Zazwyczaj, jeśli konstrukcja *link box'a* jest zwymiarowana tak, żeby spełnione było kryterium 3, pozostałe napięcia będą również wytrzymywane.

Powyższe warunki dotyczą wszystkich odstępów powietrznych oraz odstępów wzdłuż powierzchni obudowy w *link box'ach*, a zatem także odstępów między połączeniem kabla uziemiającego i połączeniem żyły powrotnej kabla. Wytrzymałość elektryczna tego odstępów nie może być gorsza niż pozostałych odstępów. Instalując ograniczniki można również zastosować osobną osłonę dla każdego ogranicznika. Zwiększa się wtedy odstępów między ogranicznikami zmniejszając ryzyko przeskoku.

Przy wykonywaniu połączeń kablowych pomiędzy dwoma słupami linii napowietrznej stosuje się układ połączeń jak na rys. 4.2. Pod głowicę należy wtedy wykonać specjalną konstrukcję wsporczą na słupie, aby zapewnić możliwość odpowiedniego montażu. Sama głowica powinna być umocowana na izolatorach wsporczych, zaś żyły powrotne kabli mogą być wyprowadzone np. na podstawę izolacyjną głowicy kablowej. Stąd wykonywane są izolowanymi przewodami (lub przewodami koncentrycznymi) połączenia do skrzynki z ogranicznikami chroniącymi osłonę kabli od przepięć. Skrzynka ta powinna być umieszczona jak najbliżej głowicy kablowej.

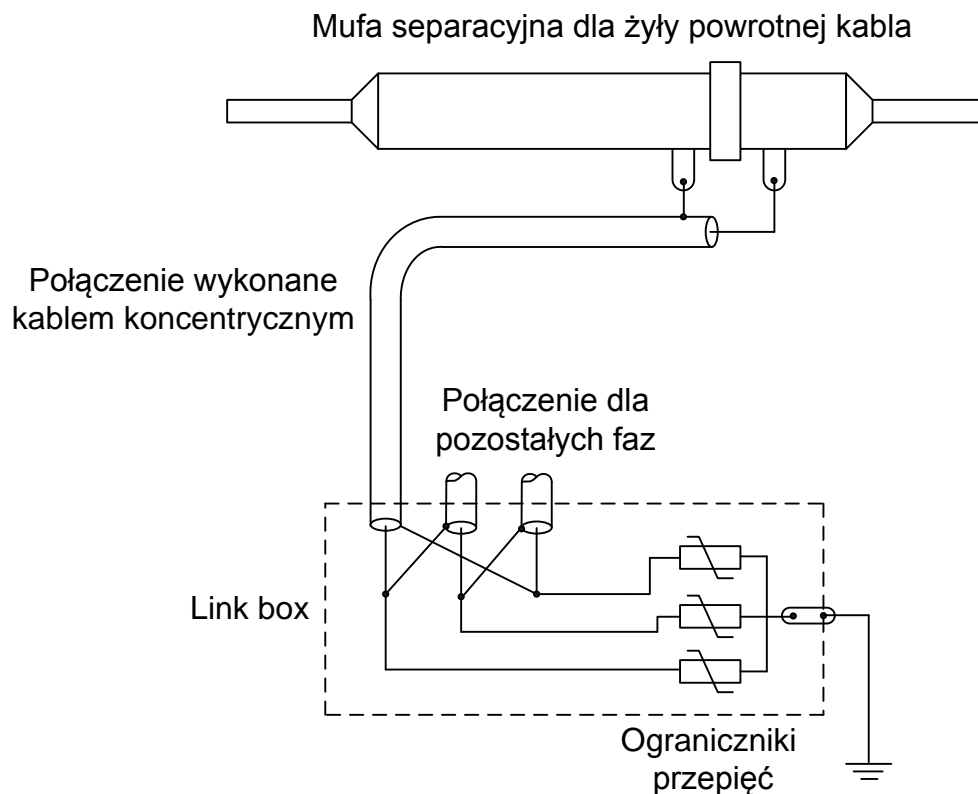


Rys. 4.2. Układ połączeń jednej fazy kabla 110 kV w układzie SPB (wstawka kablowa w linii napowietrznej)

Z drugiej strony linii kablowej WN żyły powrotne można podłączyć do zacisku na konstrukcji słupa za pomocą giętkiej linki miedzianej. Musi to być połączenie odłączalne co jest konieczne do badań szczelności powłoki kabla.

W układach CB ze wzrostem odległości od końców linii kablowej, po przejściu przez kilka stanowisk krzyżujących ekrany, wartość szczytowa fali przepięciowej maleje do wartości niezagrażającej kablom i elementom muf. Z tego powodu w układach CB zaleca się stosowanie ograniczników w miejscach krzyżowania ekranów:

- ✓ za głowicami kablowymi od strony linii napowietrznych, na trzech pierwszych stanowiskach krzyżowania powłok metalowych,
- ✓ za rozdzielniami wewnętrznymi na dwóch pierwszych stanowiskach krzyżowania.



Rys. 4.3. Zalecane wykonanie połączeń w obrębie skrzynki z ogranicznikami przepięć w układzie CB wg [6]

W układzie z krzyżowaniem powłok metalowych chronionym ogranicznikami przepięć (rys. 4.3), wymagana wytrzymałość udarowa przekładki izolującej żyły powrotne w mufach zależy od długości przewodów łączących końce żył powrotnych w mufach i ograniczniki przepięć. Im dłuższe przewody łączące tym wymagana wytrzymałość musi być większa. Zaleca się zatem wykonywanie jak najkrótszych połączeń. Taką samą wytrzymałość udarową jak wytrzymałość przekładki izolującej w mufach powinna mieć izolacja kabli koncentrycznych wykorzystywanych do połączeń krzyżujących. Wytrzymałość udarowa zewnętrznej osłony tych kabli i osłony muf może być o 50% mniejsza.

Rozwiązaniem redukującym wartości napięć żyła powrotna-ziemia w układach CB może być zastosowanie również w tych układach przewodu ECC.

## 5. Przykład doboru ograniczników przepięć do ochrony osłon kabli WN

Należy dobrać ograniczniki przepięć dla wstawki kablowej (linii kablowej wstawionej w ciąg linii napowietrznej), w której zastosowano układ z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych i przewodem ECC YAKY 1x185/16 mm<sup>2</sup> 3,6/6 kV. Średnica żyły powrotnej zastosowanych we wstawce kabli wynosi 75,6 mm. Odległość między ekranem skrajnego kabla a przewodem ECC wynosi 600 mm. Długość wstawki kablowej wynosi 0,8 km. Maksymalny prąd zwarcia jednofazowego jaki może wystąpić w układzie wynosi 12 kA. Do zastosowania przewidziano ograniczniki typu X lub Y.

Dane niezbędne do wyznaczenia napięcia trwałej pracy ogranicznika:

maksymalna wartość prądu płynącego w kablu WN przy zwarciu 1-fazowym poza kablem

$$I_f = 12 \text{ kA},$$

długość linii kablowej, w km

$$L = 0,8 \text{ km},$$

geometryczny promień zastępczy żyły kabla ECC

$$\gamma_c = 0,788 \cdot \sqrt{\frac{185}{\pi}} = 6 \text{ mm}$$

średnia geometryczna odległość kabla fazowego (dotkniętego zwarcie) i kabla ECC),

$$S_{cf} = 600 \text{ mm}$$

średnia geometryczna średnica żyły powrotnej

$$d = 75,6 \text{ mm}$$

rezystancja jednostkowa żyły kabla ECC

$$R'_c = \frac{1000}{33 \cdot 185} = 0,164 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

$$U_i = \left| \left[ R'_c + j0,1451 \lg \frac{2S_{cf}^2}{d \cdot \gamma_c} \right] \cdot I_f \cdot L \right|$$

Napięcie indukowane na żyłach powrotnych kabli wynosi zatem wg wzoru (2.4):

$$U_i = \left| \left[ 0,164 + j0,1451 \lg \frac{2 \cdot 600^2}{75,6 \cdot 6,0} \right] \cdot 12 \cdot 0,8 \right| = 4,72 \text{ kV}.$$

Obliczone napięcie indukowane stanowi podstawę do doboru napięcia znamionowego ogranicznika zatem:

$$U_c \geq 4,72 \text{ kV}.$$

Warunek ten spełniają na przykład ograniczniki: X o napięciu znamionowym 6 kV ( $U_c = 4,8 \text{ kV}$ ) oraz Y o napięciu znamionowym 6,3 kV ( $U_c = 5 \text{ kV}$ ). Poniżej dla porównania zestawiono parametry obu ograniczników.

Tabela 5.1

Zestawienie parametrów przykładowych ograniczników przepięć potrzebnych do doboru

Parametr	X	Y
Napięcie znamionowe $U_r$	6 kV	6,3 kV
Napięcie trwałej pracy $U_c$	4,8 kV	5 kV
Znamionowy prąd wyładowczy $I_n$ 8/20 $\mu$ s	10 kA	20 kA
Napięcie obniżone $U_{res}$ przy prądzie wyładowczym	10 kA	16,5 kV
	20 kA	18,3 kV
Wytrzymałość zwarciowa	20 kA	63 kA
Zdolność pochłaniania energii w próbie działania	3,5 kJ/kV $U_c$	13,5 kV/kV $U_c$
Prąd graniczny 4/10 $\mu$ s	100 kA	100 kA
Klasa rozładowania linii	1	4
Wytrzymałość na długotrwały prąd udarowy	250 A	1350 A
Droga upływu	262 mm	318 mm

Z porównania parametrów obu ograniczników z wytycznymi podanymi w rozdziale 2 wynika, że ogranicznik typu X nie spełnia warunku związanego z klasą rozładowania linii. Ogranicznik Y spełnia wszystkie wymagania. Ponadto ogranicznik ten zapewnia również korzystniejszy poziom ochrony (niższe w stosunku do X napięcia obniżone).

## BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 60099-5:2014-01 Ograniczniki przepięć - Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania
2. PN-EN 60099-4:2015-01 Ograniczniki przepięć - Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego.
3. PN-EN 60071-1:2008 Koordynacja izolacji – Definicje, zasady i reguły.
4. Special bonding of high voltage power cables. Technical Brochure No. 283, Working Group B1.18 CIGRE, October 2005.
5. Maintenance for HV cables and accessories. Technical Brochure No. 279, Working Group B1.04 CIGRE, August 2005.
6. Guide to the protection of specially bonded systems against sheath overvoltages. Paper presented by Working Group 07 Study Committee no.21. Electra No.128, 1990.
7. Earth potential rises in specially bonded screen systems. Technical Brochure No. 347, Task Force B1.26 CIGRE, June 2008.
8. Żmuda K.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze – wybrane zagadnienia z przykładami. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014 r.
9. Duda D., Gacek Z.: Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych i ochrona przed przepięciami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015 r.
10. Specyfikacja techniczna „Ograniczniki przepięć 110 kV, 220 kV i 400 kV” PSE-ST.Ograniczniki\_110\_220\_400kV/2014.
11. Cable system electrical characteristics. Technical Brochure No. 531, Working Group B1.30 CIGRE, April 2013.