

ZAGROŻENIE PIORUNOWE LINII KABLOWYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Henryk BORYŃ

Politechnika Gdańska, emeryt
e-mail: h.boryn@wp.pl

Streszczenie: Wskazano zasadnicze źródła zagrożenia piorunowego linii kablowych wysokiego napięcia eksploatowanych w systemach przesyłowym i dystrybucyjnym. Omówiono zjawiska falowe zachodzące w wyniku wyładowań atmosferycznych w różnych układach linii elektroenergetycznych i ich wpływ na wartości powstających przepięć. Przedstawiono rolę koordynacji izolacji w ochronie urządzeń wysokonapięciowych przed skutkami przepięć.

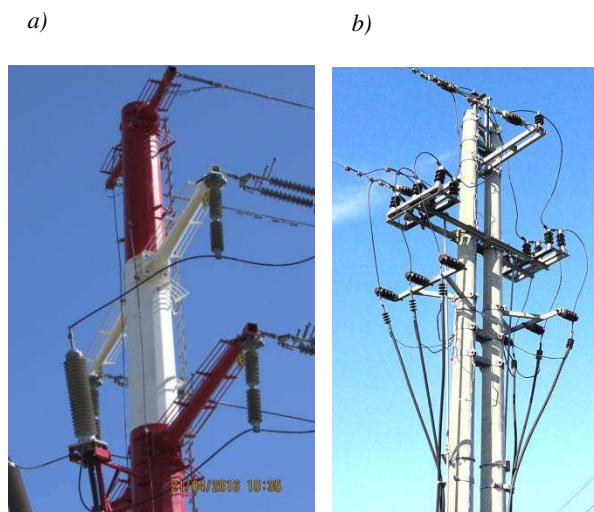
Słowa kluczowe: zagrożenie przepięciowe, fale przepięciowe, linie kablowe, linie napowietrzne.

1. WPROWADZENIE

Wysokonapięciowe linie kablowe są ważnym i jednocześnie szeroko stosowanym elementem systemu elektroenergetycznego. Takie linie kablowe buduje się najczęściej bezpośrednio pomiędzy istniejącymi odcinkami linii napowietrznych lub pomiędzy linią napowietrzną a polem liniowym lub transformatorowym w stacji elektroenergetycznej zarówno w sieciach przesyłowych WN jak i sieciach dystrybucyjnych SN. Połączenia linii kablowych z napowietrznymi realizuje się zwykle na słupach kablowych (rys. 1). Natomiast w polach liniowych bądź transformatorowych stacji stosuje się odpowiednie konstrukcje wsporcze umożliwiające przyłączenie kabla elektroenergetycznego. Do budowy każdej linii kablowej musi być stosowany właściwy osprzęt kablowy, czyli głowice kablowe na końcach kabli przy ich łączeniu z innym elementem systemu oraz mufy kablowe przy łączeniu kolejnych odcinków fabrykacyjnych kabla tworzącego linię kablową o wymaganej długości.

Kable wysokich napięć oraz ich osprzęt, podobnie jak wszystkie pozostałe urządzenia elektroenergetyczne zainstalowane i eksploatowane w sieci, są narażone na działanie przepięć zewnętrznych atmosferycznych oraz wewnętrznych łączeniowych i zakłóceń. Występowanie przepięć w sieci elektroenergetycznej to zjawisko nieuniknione [1], które jest istotnym zagrożeniem dla układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych pracujących w sieci. Działanie przepięć na izolację urządzeń wiąże się z negatywnymi skutkami w postaci możliwości wystąpienia:

- przebicia zupełnego izolacji roboczej, czyli całkowitej utraty właściwości izolacyjnych urządzenia, konieczności wyłączenia układu i naprawy uszkodzonego elementu,



Rys. 1. Przykłady konstrukcji słupów kablowych w sieciach o napięciach nominalnych: a - 110 kV, b - 15 kV

- przebicia częściowego izolacji roboczej i powstania warunków sprzyjających przebiciu zupełnemu przy działaniu kolejnego przepięcia na izolację,
- przeskoków na izolacji powierzchniowej urządzeń lub odstępach izolacyjnych powietrznych, które mogą rozwinąć się w łuk zwarciowy i być przyczyną działania układu SPZ lub całkowitego wyłączenia linii,
- zakłóceń elektromagnetycznych, które z kolei mogą zakłócać pracę urządzeń elektronicznych, które zainstalowano w systemie jako urządzenia sterujące lub pomiarowe.

Ze względów ekonomicznych i technicznych nie projektuje się urządzeń, w których układ izolacyjny miałby tak dużą wytrzymałość izolacji roboczej, aby wytrzymywała wartości wszystkich możliwych w eksploatacji przepięć. Rodzaje przepięć oraz ich spodziewane wartości szczytowe i czasy oddziaływania na izolację urządzeń systemu elektroenergetycznego, według ustaleń normy [2], pokazano na rysunku 8 (wykres 1). Jak widać z rysunku szczególnie duże niebezpieczeństwo dla izolacji urządzeń sieciowych stanowią przepięcia atmosferyczne (głównie bezpośrednie) o możliwych bardzo dużych wartościach szczytowych i stromościach narastania napięcia i prądu. Działanie innych rodzajów przepięć z uwagi na niższe wartości szczytowe jest znacznie łagodniejsze.

Zagrożenia wynikające z oddziaływania przepięć na układy izolacyjne urządzeń zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym zmuszają do stosowania urządzeń o odpowiednio zaprojektowanych układach izolacyjnych i wystarczająco dużej wytrzymałości elektrycznej oraz dodatkowo instalowania specjalnych środków ochrony przeciwprzepięciowej. Środki te powinny zmniejszać amplitudę przepięć powstających w systemie oraz neutralizować działanie przepięć o zbyt wysokich wartościach z punktu widzenia eksploatowanych urządzeń. W tym celu stosuje się rozbudowany, kompleksowy system ochrony przeciwprzepięciowej [3], na który składają się następujące działania:

- uzyskanie wymaganych wytrzymałościowych parametrów układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych zastosowanych w systemie [4], zgodnych z zasadami koordynacji izolacji zawartymi w normach [2, 5] – zadanie do realizacji przez producentów urządzeń,
- zainstalowanie odpowiednio zaprojektowanych i zbudowanych systemów osłonowych, czyli przewodów odgromowych w sieciach przesyłowych oraz układów ochrony przed wyładowaniami piorunowymi bezpośrednimi w stacjach WN [1] – zadanie do realizacji przez wykonawców napowietrznych sieci przesyłowych i stacji WN,
- instalowanie w pobliżu elementów linii kablowych wysokiego napięcia, które wymagają szczególnej ochrony przeciwprzepięciowej ograniczników przepięć, czyli urządzeń ograniczających amplitudę przepięć działających na te obiekty – zadanie do realizacji przez projektantów i wykonawców linii kablowych.

2. PRZEPĘCIA ATMOSFERYCZNE W LINIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Jak wspomniano wcześniej szczególnie niebezpieczeństwo dla urządzeń zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym WN przedstawiają przepięcia powstające przy wyładowaniach atmosferycznych. Prawidłowe przeciwdziałanie skutkom tych wyładowań wymaga przeprowadzenia wnikliwej analizy zagrożenia piorunowego budowanego systemu elektroenergetycznego wysokiego napięcia, szczególnie w odniesieniu do projektowanych linii napowietrznych, co w konsekwencji ma również pozytywny wpływ na zmniejszenie takiego zagrożenia dla współpracujących z nimi linii kablowych.

Zasady takiej analizy były przedmiotem prac Flisowskiego [1] oraz Gacka [6], w których autorzy wskazali szczegółowy tok postępowania w celu określenia ilościowego poziomu zagrożenia piorunowego dla linii napowietrznych WN o konkretnej lokalizacji, co daje w efekcie możliwość oceny skuteczności zastosowanej w linii ochrony odgromowej. Poziom zagrożenia piorunowego zależy nie tylko od intensywności burzowej charakterystycznej dla danego obszaru (mierzonej poziomem izokeraunicznym, gęstością wyładowań piorunowych oraz ich przeciętnymi parametrami), ale również od konstrukcji linii i zastosowanych środków ochrony odgromowej (wytrzymałości elektrycznej izolacji linii, sposobu montażu przewodów odgromowych, parametrów uziemienia konstrukcji wsporczych oraz zastosowanych układów automatyki SPZ). Dzięki analizie można wyznaczyć wartości: **wskaźnika uderzeń piorunów w linię** oraz

wskaźnika wyłączeń linii, które dają jednoznaczną ocenę skuteczności ochrony odgromowej.

Wyróżnia się dwa podstawowe przypadki uderzenia pioruna w linię:

- bezpośrednie – w konkretny element konstrukcyjny linii, przy którym powstają w linii zarówno przepięcia bezpośrednie w elemencie uderzonym jak i przepięcia indukowane w pozostałych elementach linii (rys. 2), które w postaci fal przepięciowych wędrują w przewodach w kierunku obu krańców linii,
- pobliskie – obok linii w ziemię lub inny obiekt naziemny, przy którym powstają w elementach linii tylko przepięcia indukowane (rys. 3).

Wartość **przepięć bezpośrednich** zależy od konstrukcji linii napowietrznej WN i od rodzaju uderzonego elementu. Należy rozpatrywać trzy przypadki (rys. 2a c). Można je analizować z pominięciem przepięć indukowanych, gdyż w liniach WN ich amplituda jest mała w porównaniu z amplitudą przepięć bezpośrednich.

Wartość przepięcia w przypadku uderzenia pioruna w przewód roboczy linii o impedancji Z (rys. 2a), kiedy prąd pioruna I_p dzieli się na dwie równe części, można wyrazić zależnością:

$$U = 0,5 Z I_p \quad (1)$$

co przy realnych technicznie wartościach, np. $Z = 500 \Omega$ i $I_p = 25 \text{ kA}$ (przeciętna wartość prądu piorunowego występującego w warunkach krajowych), daje $U = 6,25 \text{ MV}$, a więc brak jakichkolwiek możliwości technicznych, aby izolacja systemu mogła wytrzymać takie napięcie.

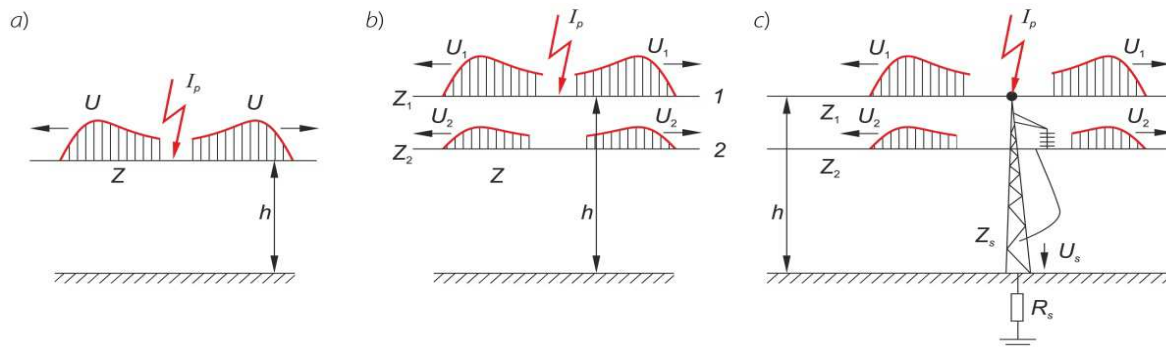
W drugim przypadku (rys. 2b) piorun trafia w przewód odgromowy o impedancji falowej Z_1 daleko od słupa. Podobnie jak poprzednio na przewodzie odgromowym powstaje przepięcie bezpośrednie $U_1 = 0,5 Z_1 I_p$, a na równoległym przewodzie roboczym przepięcie indukowane $U_2 = k U_1$. Napięcie na izolacji linii U_{12} jest więc równe różnicy tych napięć, czyli:

$$U_{12} = (k - 1) U_1 \quad (2)$$

gdzie k jest współczynnikiem sprzężenia między przewodami odgromowym i roboczym linii zależnym od wymiarów linii i promieni przewodów [1]. Ostatecznie fala przepięciowa U_1 dochodzi do najbliższego słupa, następuje nowy podział prądu i inne sprzężenie z przewodem roboczym linii – tak jak to wynika z analizy przypadku trzeciego. Jeżeli napięcie na izolacji linii będzie większe niż jej wytrzymałość, to nastąpi przeskok odwrotny, np. na łańcuchu izolatorów.

W trzecim przypadku (rys. 2c) piorun trafia w słup przewodzący linii z przewodem odgromowym. Prąd pioruna I_p ulega podziałowi na dwa równe prądy w przewodzie odgromowym o impedancji falowej Z_1 oraz prąd w słupie o impedancji falowej Z_s . Sytuacja znacznie się skomplikuje, jeżeli do uderzonego słupa dojdą fale odbite od jego końca oraz od końców przęsła przewodu odgromowego. Stosując jednak dopuszczalne uproszczenia można wykonać odpowiednie obliczenia [1], np. metodą 1-słupową lub dokładniejszą 3-słupową przy znanych parametrach konstrukcyjnych i elektrycznych systemu i wyznaczyć wartość przepięcia na izolacji linii.

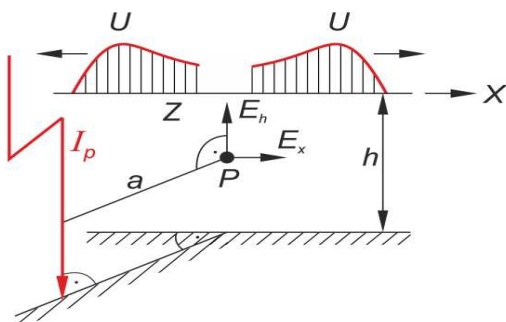
Przeprowadzone obliczenia pozwalają na sformułowanie dwóch ważnych wniosków:



Rys. 2. Fale przepięciowe powstające przy trafieniu pioruna: a – w pojedynczy przewód linii napowietrznej, b – w przewód odgromowy linii, c – w słup przewodzący z przewodem odgromowym linii, Z – impedancja falowa przewodu, I_p – wartość szczytowa prądu piorunowego, h – wysokość przewodu linii nad ziemią [1]

- zastosowanie przewodu odgromowego przyczynia się nie tylko do ochrony przewodów linii przed bezpośrednim uderzeniem pioruna, ale również daje zmniejszenie napięcia na wierzchołku słupa oraz ograniczenie przepięcia indukowanego w przewodzie roboczym linii,
- można wyznaczyć graniczną wartość rezystancji uziemienia słupa, przy której nie wystąpi jeszcze przeskok odwrotny na izolacji linii o konkretnej wytrzymałości udarowej.

Przepięcia indukowane powstają w znacznie łagodniejszych warunkach przy trafieniu pioruna w pobliżu linii (przy $a > 3h$) w obiekt naziemny lub w ziemię (rys. 3). W liniach WN przesyłowo-rozdzielczych i przesyłowych zagrożenie spowodowane takimi wyładowaniami jest praktycznie pomijalne w porównaniu z zagrożeniem przy wyładowaniach bezpośrednich [6]. Natomiast w liniach dystrybucyjnych SN przepięcia indukowane są zasadniczym zagrożeniem dla układów izolacyjnych urządzeń. Wartość przepięć indukowanych zależy od konstrukcji linii napowietrznej, a w szczególności charakterystyczny jest bardzo silny spadek ich amplitudy wraz ze wzrostem odległości a (rys. 3) między kanałem wyładowania a poziomym rzutem przewodu linii napowietrznej.



Rys. 3. Fale przepięciowe powstające przy trafieniu pioruna obok linii napowietrznej, Z – impedancja falowa przewodu, I_p – wartość szczytowa prądu piorunowego, d – odległość linii napowietrznej od kanału pioruna, h – wysokość przewodu linii nad ziemią, E_h , E_x – odpowiednio składowe pionowa i pozioma natężenia pola elektrycznego w przestrzeni pod linią (punkt P) w wyniku działania prądu pioruna [1]

Przepięcia indukowane są efektem sumowania się dwu stanów linii napowietrznej, które następują po sobie w czasie formowanie się wyładowania piorunowego [7]. Pierwszy

stan to okres, kiedy linia znajduje się pod wpływem chmury burzowej ukształtowanej nad nią i w linii indukuje się znaczny ładunek elektryczny w wyniku działania pola elektrycznego chmury. Drugi natomiast, to moment przepływu ładunku elektrycznego w kanale wyładowania piorunowego, kiedy gwałtownie zanika pole elektryczne chmury, a zaindukowany ładunek dzieląc się na pół odpływa w postaci dwu fal prądowych w obu kierunkach linii. W przestrzeni pod linią pojawia się zmieniające się pole elektryczne oraz działające równocześnie pole elektromagnetyczne wywołane przez prąd kanału pioruna. Sumując oba oddziaływania można, przy założeniu, że kanał jest wystarczająco odległy od przewodu linii, obliczyć wartość składowej E_h natężenia pola elektrycznego w punkcie P pod linią (rys. 3).

W dalszym etapie obliczeń można oszacować wartość przepięcia indukowanego w linii napowietrznej [1] jako:

$$U = 30 k_v I_p h/a \quad (3)$$

w której: k_v – współczynnik (równy 1,07 – 1,2) zależny od prędkości v fali indukowanej w linii.

W dokładniejszych, lecz bardziej skomplikowanych, obliczeniach wartości przepięcia indukowanego w linii napowietrznej należy uwzględnić dodatkowo działanie w punkcie P składowej poziomej E_x natężenia pola elektrycznego, równoległej do osi przewodu [1]. Wartości amplitudy przepięć indukowanych powstających w takich warunkach w liniach przesyłowo-rozdzielczych i przesyłowych rzadko przekraczają 200 kV [1].

Fale przepięciowe wędrują wzdłuż linii napowietrznej ulegając odkształceniom na skutek tłumienia [7]:

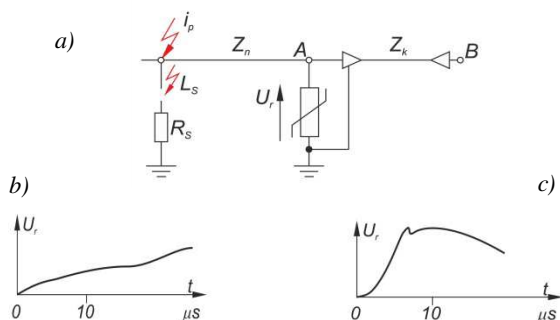
- oporowego wynikającego z rezystancji przewodów i gruntu oraz zjawiska naskórkowości,
- izolatorowego związanego z ładowaniem pojemności izolatorów liniowych,
- ulotowego na skutek ulotu występującego na elementach systemu.

W efekcie tych zjawisk następuje wyraźne zmniejszenie amplitudy fali oraz stromości jej czoła wraz ze wzrostem odległości od miejsca uderzenia pioruna, czyli w sumie są to naturalne efekty, bardzo korzystne dla ochrony przeciwprzepięciowej elementów linii elektroenergetycznej.

Podobnie, zjawisko tłumienia fal przepięciowych, czyli zmniejszanie stromości czoła i wartości szczytowej fali, występuje w liniach kablowych [7, 8], przy czym przyczyną są w tym wypadku straty energii w elementach

wewnętrznych kabla. Nasilenie zjawiska tłumienia występuje przy wyższym napięciu fali i zwłaszcza przy krótkim czasie trwania przepięcia. Naturalne tłumienie fali daje wyraźny efekt dopiero przy odpowiednio długich odcinkach kabli, np. fale o czasie trwania rzędu kilkudziesięciu mikrosekund wymagają drogi znacznie dłuższej niż 1 km.

W przypadku linii kablowych zbudowanych w systemie elektroenergetycznym należy zauważyć, że z punktu widzenia oceny ich zagrożenia przepięciowego, ważna jest nie tylko wartość amplitudy przepięcia, ale również odległość miejsca uderzenia pioruna od węzła, w którym kabel łączy się z linią napowietrzną. Szczególne niebezpieczeństwo dla linii kablowych przedstawiają przepięcia powstające przy uderzeniu pioruna w pobliżu (< 100 m) miejsca A połączenia linii napowietrznej z kablową (rys. 4), ponieważ w tym wypadku znaczna część prądu pioruna wpływa do kabla, a wzrost napięcia na głowicy kablowej jest bardzo stromy (rys. 4c) i zadziałanie ogranicznika chroniącego głowicę kablową następuje w ciągu bardzo krótkiego czasu, zwykle na czole fali przepięciowej. W wypadku uderzenia dalekiego (> 300 m), w przewodnik linii Z_n na skutek wymienionych wcześniej zjawisk tłumienia przepięć, prąd dochodzący do kabla jest wyraźnie ograniczony, a wzrost napięcia na głowicy kablowej ma małą stromość (rys. 4b).



Rys. 4. Uderzenie pioruna w linię napowietrzną Z_n połączoną z linią kablową Z_k chronioną ogranicznikiem przepięć, a – schemat zastępczy układu, b, c – przebiegi napięcia U_r na ograniczniku odpowiednio w przypadku uderzenia dalekiego lub bliskiego

3. FALE PRZEPIĘCIOWE W LINIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Kolejne zjawisko związane z wędrowką fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych, w istotny sposób wpływające na stopień zagrożenia linii kablowych, to zmiany amplitudy i stromości czoła fal w tych miejscach (węzłach) sieci, w których następuje zmiana impedancji falowej linii, np. na skutek połączenia dwu różnych rodzajów linii, czy przyłączenia do linii elementu o stałych skupionych. Na przykład, amplituda fali U_{np} biegnącej linią napowietrzną o impedancji Z_n (rys. 5a) wchodząc do węzła A, w którym ta linia łączy się z linią kablową¹ o impedancji Z_k ulega (przy braku zadziałania ogranicznika przepięć) zjawisku odbicia i w efekcie powstają ujemna fala odbita U_{no} , która wraca do linii napowietrznej oraz fala przechodząca U_{kp} biegnąca w kierunku końca linii kablowej. Wartość fali przechodzącej ulega zmianie (w tym wypadku zmniejszeniu) według zależności:

¹Przy założeniu, że jest to długi odcinek linii kablowej, czyli o długości większej niż długość fali przepięciowej biegnącej linią.

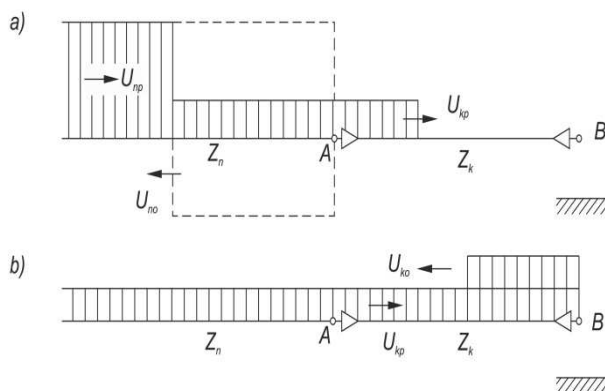
$$U_{kp} = \frac{2Z_k}{Z_n + Z_k} U_{np} = \alpha U_{np} \quad (4)$$

w której U_{np} – napięcie fali padającej, U_{kp} – napięcie fali w węźle A (napięcie fali przepuszczonej do kabla), Z_n – impedancja falowa linii napowietrznej zwykle równa 350500 Ω , Z_k – impedancja falowa linii kablowej, zależnie od konstrukcji kabla równa 15 75 Ω , α – współczynnik przejścia równy:

$$\alpha = \frac{2Z_k}{Z_n + Z_k} \quad (5)$$

W wypadku typowych wartości, np. $Z_n = 500 \Omega$ i $Z_k = 50 \Omega$ współczynnik $\alpha = 0,18$, czyli fala przepięciowa wchodząca do kabla ulega znacznemu obniżeniu, do zaledwie 18% amplitudy fali przepięciowej padającej U_{np} . W identycznym stopniu ulega również obniżeniu stromość czoła fali napięciowej, np. z 500 kV/ μ s do 90 kV/ μ s.

Przy przeciwnym układzie wartości impedancji falowych, kiedy mamy do czynienia z impedancją falową za węzłem większą niż przed węzłem, będziemy mieli przypadek odwrotny, czyli powstanie fali odbitej dodatniej i spiętrzenie napięcia w analizowanym węźle – tak jak to ma miejsce w węźle B na rysunku 5b.



Rys. 5. Rozkład fal wędrownych przy połączeniu linii napowietrznej Z_n z linią kablową Z_k

Rozkład napięcia fal przepięciowych w trakcie dalszej wędrowki wzdłuż linii pokazano na rysunku 5b. Fala U_{kp} po dojeździe do węzła B na końcu kabla, w którym następuje zmiana impedancji falowej na Z_B (np. połączenie z następną linią napowietrzną, transformatorem lub otwartym odłącznikiem), ulega odbiciu ze współczynnikiem odbicia β , a amplitudę fali odbitej U_{ko} wyznacza zależność:

$$U_{ko} = \frac{Z_B - Z_k}{Z_B + Z_k} U_{kp} = \beta U_{kp} \quad (6)$$

w której U_{kp} – napięcie fali padającej, U_{ko} – napięcie fali odbitej w węźle B, Z_B – impedancja falowa za węzłem B, czyli w przypadku linii napowietrznej 350500 Ω , czy transformatora ok. 1000 Ω lub otwartego odłącznika $Z_B = \infty$, Z_k – impedancja falowa linii kablowej 15 75 Ω , β – współczynnik odbicia równy:

$$\beta = \frac{Z_B - Z_k}{Z_B + Z_k} \quad (7)$$

Tak więc, najbardziej niekorzystny wypadek podwojenia napięcia w węzle B w wyniku sumowania fali padającej i odbitej występuje na końcu otwartym, czyli przy $Z_B = \infty$, co przy przyjętych wcześniej przykładowych wartościach obliczeniowych dałoby 36% napięcia U_{np} (wracając do pierwotnej wartości przebiegu U_{np} wędrującego linią napowietrzną z rysunku 5a). Prawie takie samo spiętrzenie napięcia wystąpi przy załączonym na końcu linii kablowej transformatorze, który w warunkach udarowych może być traktowany w przybliżeniu jak otwarty koniec linii kablowej. Przy przejściu fali z linii kablowej z powrotem do linii napowietrznej o $Z_B = 500 \Omega$ spiętrzenie będzie mniejsze i wyniesie 33% napięcia U_{np} . W sumie można powiedzieć, że przejście fali padającej z linii napowietrznej przez długi odcinek linii kablowej i ponowne jej wejście do linii napowietrznej nie wiąże się ze zwiększeniem zagrożenia przepięciowego – spiętrzenie napięcia nie przekracza pierwotnej wartości fali padającej.

Inna sytuacja (rys. 6) występuje, gdy linia kablowa jest krótkim odcinkiem, czyli odcinkiem o długości znacznie krótszej niż długość biegnącej w nim fali, przy dodatnim całkowitym współczynniku odbicia fali $\beta = \beta_1\beta_2$ o wartości znacznie mniejszej od 1. Fala o amplitudzie $U\alpha_1$ dociera do węzła B , gdzie następuje jej odbicie ze współczynnikiem β_2 i powrót do węzła A , w którym również fala odbija się ze współczynnikiem β_1 w kierunku węzła B – w ten sposób proces kolejnych odbić rozwija się dalej i prowadzi do ustalenia się napięć w węzłach A i B pokazanych na rysunku 6b. Korzystne oddziaływanie linii kablowej na wartość przepięcia (opisane wcześniej) zostało więc wyeliminowane – wartości napięć na obu końcach linii kablowej A i B wynikają wyłącznie z wartości impedancji falowych linii Z_1 i Z_2 . Szczególnie niebezpieczna sytuacja występuje wtedy, gdy linia kablowa w węzle B jest otwarta (rys. 6c). Wartość napięcia ustalonego na tym końcu linii kablowej wzrasta do podwójnej wartości amplitudy fali padającej z linii napowietrznej. W sumie zjawisko odbicia wielokrotnego występującego przy krótkich odcinkach linii kablowej połączonych szeregowo z linią napowietrzną wyraźnie zwiększa zagrożenie przepięciowe dla tych linii kablowych.

Podsumowując należy zauważyć, że zjawiska związane z powstawaniem fal przepięciowych i ich wędrowką w liniach elektroenergetycznych wiążą się ze znacznym niebezpieczeństwem dla linii kablowych zainstalowanych w systemie. Jednak z uwagi na specyfikę oddziaływania kabli na zjawiska falowe można wskazać zarówno pozytywne jak i negatywne skutki obecności kabla w systemie z punktu widzenia ochrony przeciwprzepięciowej – każdy przypadek zastosowania linii kablowej powinien być szczegółowo analizowany pod tym względem.

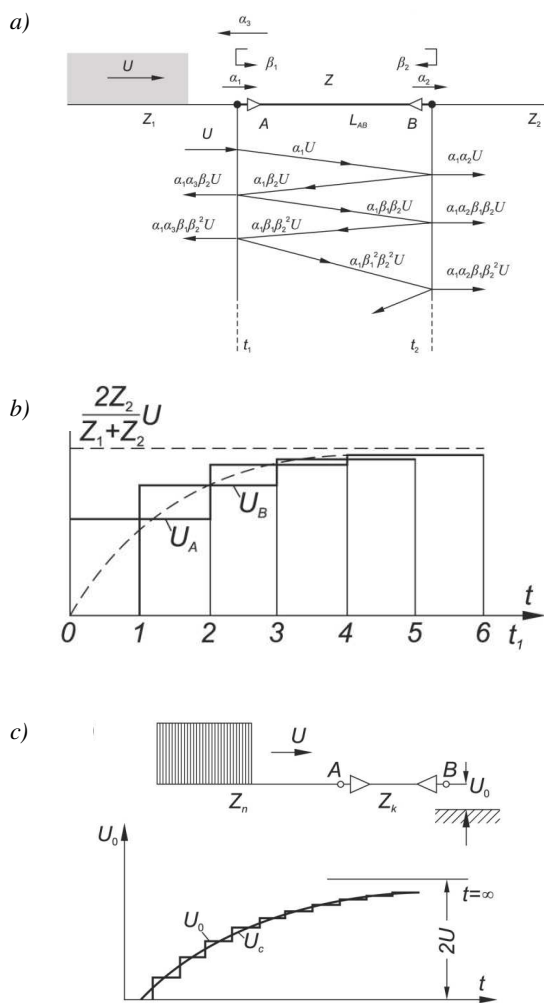
4. PRZEPIĘCIA W LINIACH Z KABLAMI JEDNOŻYŁOWYMI

Nowoczesne elektroenergetyczne linie kablowe wysokiego napięcia buduje się najczęściej z jednożyłowych kabli o izolacji roboczej z tworzyw sztucznych i z żyłą powrotną izolowaną od ziemi izolacyjną powłoką zewnętrzną. Powłoka ta izoluje wprawdzie żyłę powrotną od ziemi, ale przede wszystkim jej zasadniczym zadaniem jest ochrona wnętrza kabla przed negatywnym wpływem czynników środowiskowych, głównie wilgoci. Wytrzymałość elektryczna udarowa powłoki zwykle nie jest znana – wiadomo, że przeprowadza się próby jej szczelności napięciem probierczym stałym o wartości nie większej niż

10 kV zależnie od grubości powłoki. Uzyskanie informacji o jej rzeczywistej wytrzymałości udarowej wymaga kontaktu z producentem kabla.

W kablach jednożyłowych przy przepływie prądu obciążenia w warunkach roboczych, w żyłach powrotnych i ewentualnie w innych dodatkowych powłokach metalowych zainstalowanych w kablu indukuje się napięcie [8]. W wypadku połączenia lub uziemienia metalowych powłok na obu końcach linii kablowej płyną w nich prądy powodujące straty, a więc możliwe jest istotne obniżenie obciążalności linii kablowej. Przeciwdziałanie negatywnym skutkom tych zjawisk polega na zastosowaniu odpowiedniego układu połączeń powłok metalowych w poszczególnych odcinkach fabrykacyjnych kabla. Mogą to być układy, w których powłoki metalowe są:

- uziemione tylko jednostronnie – nie występują straty, ale w warunkach zwarciovych wartość napięcia indukowanego może być niebezpieczna dla obsługi,
- uziemione obustronnie – występują straty, ale brak niebezpieczeństwa porażenia obsługi,
- krzyżowane w kolejnych odcinkach linii kablowej,
- krzyżowane w kolejnych odcinkach linii kablowej z jednoczesnym przeplotem żył roboczych tych odcinków (układ stosowany szczególnie przy płaskim ułożeniu kabli fazowych).



Rys. 6. Zjawiska falowe w wypadku krótkiego odcinka linii kablowej Z położonego między liniami napowietrznymi Z_1 i Z_2 – proces powstawania odbić wielokrotnych, b – przebieg napięć na końcach krótkiego odcinka kabla, c – przebieg napięcia na krótkim odcinku kablowym przy otwartym jego końcu [7]

Wyczerpującą analizę teoretyczną wspomnianych zjawisk indukowania się napięć w powłokach metalowych kabli jednożyłowych oraz szczegółowe informacje techniczne na temat budowy takich linii kablowych zawiera monografia [8].

Problemy techniczne wynikające z konstrukcji jednożyłowych kabli z izolacyjną powłoką zewnętrzną dotyczą nie tylko spraw związanych z napięciami i prądami indukowanymi w warunkach roboczych, ale również wprowadzają kolejne źródło zagrożenia przepięciowego linii kablowych. Należy bowiem w tym wypadku, zjawiska falowe powstające po uderzeniu pioruna rozpatrywać w rzeczywistym układzie trójfazowym linii kablowej, a nie w układzie jednofazowym z wieloma uproszczeniami, tak jak to miało miejsce wcześniej.

Dokładnie rzecz biorąc opisywany kabel elektroenergetyczny składa się z dwu obwodów o koncentrycznym układzie elektrod:

- żyła robocza – powłoka metalowa,
- powłoka metalowa – ziemia,

o wyraźnie różnych impedancjach falowych. Ich wartości można ocenić, pomijając ich zależność od częstotliwości i przyjmując gładką powłokę metalową, według zależności:

$$Z = 60 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_i}} \ln \frac{r_{iz}}{r_{iw}} \quad (8)$$

w której, ϵ_i – względna przenikalność elektryczna materiału izolacyjnego układu koncentrycznego (izolacji roboczej kabla lub powłoki izolacyjnej), r_{iz} – zewnętrzny promień materiału izolacyjnego, r_{iw} – wewnętrzny promień materiału izolacyjnego.

Obliczone wartości impedancji falowych dla typowych materiałów izolacyjnych stosowanych w kablach wysokiego napięcia dają wyniki: dla pierwszego układu wartości od 10 Ω do 30 Ω , natomiast drugiego od 2,5 Ω do 5 Ω .

O przebiegu wędrownych fal przepięciowych wnikających do obu wskazanych kablowych układów elektrod decydują nie tylko te różne impedancje falowe, ale również zastosowany w linii układ połączeń metalowych powłok kabli.

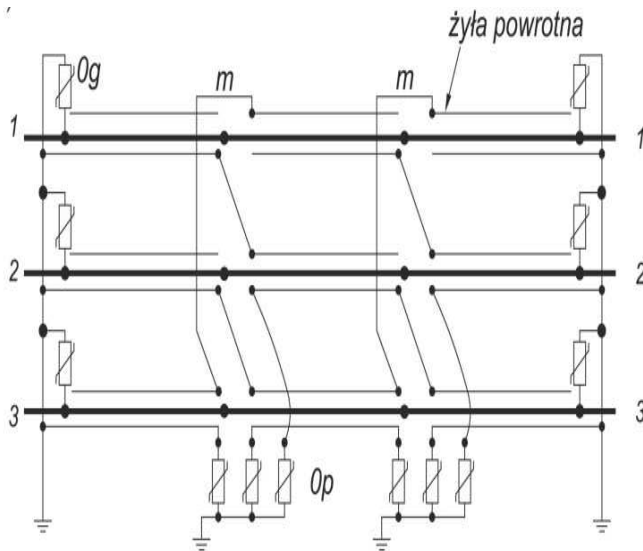
Stosunkowo proste, przebiegi falowe w układzie jednofazowym, omówione wcześniej (pokazane na rysunkach 4-6), ulegają w linii kablowej trójfazowej, a w szczególności w linii ze skrzyżowanymi powłokami znacznemu skomplikowaniu, ponieważ trzeba tutaj rozpatrywać jednocześnie, następujące fale przepięciowe:

- * wewnątrz kabla w układzie żyła robocza – powłoka metalowa, czyli na izolacji głównej, podobnie jak w układzie jednofazowym,
- * na zewnątrz kabla w układzie powłoka metalowa – ziemia, gdzie sumuje się oddziaływanie pól magnetycznych wszystkich 3 faz linii kablowej, oraz
- * fale odbite na węzłach występujących w linii (skrzyżowaniach powłok i końcach kabli).

W wyniku tych zjawisk powstają fale składowe o różnych wartościach napięć i prądów oraz różnych prędkościach przebiegów. W sumie należy uwzględnić działanie przepięć występujących na izolacji głównej kabla, na izolacji powłoki metalowej kabla oraz na elementach izolacyjnych w mufach między krzyżowanymi odcinkami powłok metalowych tej samej fazy.

Dokładne obliczenia wartości przepięć działających na powłokę izolacyjną linii kablowej są bardzo skomplikowane, prowadzono więc odpowiednie badania w eksploatowanych liniach trójfazowych uzyskując wyniki potwierdzające

rezultaty takich obliczeń [8]. W wypadku linii kablowych ułożonych bezpośrednio w ziemi, napięcia powłoka – ziemia osiągają wartości 20 \pm 30% napięcia fali padającej, natomiast napięcia między krzyżowanymi odcinkami powłok tej samej fazy są rzędu 30 \pm 50%. Te same napięcia w liniach ułożonych w kanałach kablowych są prawie dwukrotnie większe. Naturalne tłumienie fal przepięciowych w kablu jest niewystarczające w takich przypadkach i należy stosować w miejscach krzyżowania powłok dodatkowe ograniczniki przepięć (rys. 7).



Rys. 7. Linia kablowa w układzie z krzyżowaniem powłok, m – mufy separacyjne dla żył powrotnych, Og – ograniczniki przepięć do ochrony głowic kablowych, Op – ograniczniki przepięć do ochrony powłok izolacyjnych kabli

5. KOORDYNACJA IZOLACJI

Parametry techniczne układów izolacyjnych kabli oraz osprzętu kablowego, zastosowanych do budowy linii kablowych wysokiego napięcia, zgodnie z wymaganiami normy [9] charakteryzuje się poziomem izolacji, czyli szeregiem wartości znamionowych napięć: najwyższego napięcia urzędowania, napięć probierczych – o częstotliwości sieciowej oraz udarowego piorunowego zestawionych w tabeli 1. Dobór właściwego zestawu napięć probierczych jest przedmiotem koordynacji izolacji [4, 10]², czyli mówiąc w dużym uproszczeniu – zagwarantowania wymaganego stopnia pewności pracy układu elektroenergetycznego przy możliwie najmniejszych kosztach wykonania i ochrony układu izolacyjnego zainstalowanych urządzeń.

Na rysunku 8 pokazano prawidłowe uszeregowanie poziomów wytrzymałości elektrycznej (reprezentowanej przez charakterystyki udarowe napięciowo-czasowe) urządzeń elektroenergetycznych oraz elementów ochronnych zainstalowanych w systemie, których parametry dobrano tak, aby zagwarantować wymagany stopień pewności pracy układu w wyniku spełnienia podstawowych zasad koordynacji izolacji. Różne rodzaje przepięć, ich wartości szczytowe³ oraz czasy oddziaływania na izolację elementów

²Dla napięć nominalnych powyżej 220 kV określa się znamionowe wytrzymywane napięcie udarowe łączeniowe.

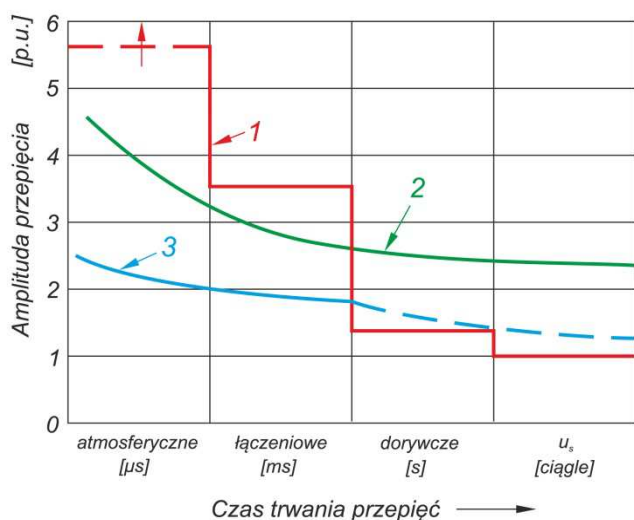
³Jako krotność wartości najwyższego napięcia roboczego U_s systemu, przy czym 1 p.u. = $\sqrt{2} U_s / \sqrt{3}$

systemu reprezentuje linia 1. Wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych urządzeń pracujących w systemie wskazuje charakterystyka udarowa 2 – jak widać wytrzymałość urządzeń jest wyraźnie mniejsza niż amplituda przepięć atmosferycznych i łączeniowych, natomiast z powodzeniem przekracza poziom przepięć dorywczych i najwyższego napięcia roboczego. Charakterystyka udarowa 3 dotyczy elementów ochronnych zainstalowanych w celu ochrony urządzeń sieciowych. Leży ona w całym zakresie czasu poniżej wytrzymałości urządzeń wskazując zastosowany w systemie margines koordynacyjny.

Tabela 1. Znormalizowane poziomy izolacji z zakresu I według [9] dla wybranych napięć nominalnych sieci stosowanych w Polsce

Napięcie nominalne sieci U_n	Znormalizowany poziom izolacji		
	Najwyższe napięcie urządzenia U_m	Znamionowe wytrzymałwane napięcie krótkotrwałe o częstotliwości sieciowej	Znamionowe wytrzymałwane napięcie udarowe piorunowe 1,2/50 μ s
kV*	kV*	kV*	kV**
10	12	28	60 75 95
15	17,5	38	75 95
20	24	50	95 125 145
110	123	185 230	450 550
220	245	325 360 395 460	750 850 950 1050

* - wartość skuteczna, ** - wartość szczytowa



Rys. 8. Podstawowe zasady koordynacji izolacji systemu elektroenergetycznego, 1 – rodzaje przepięć działających na urządzenia, 2 – typowa charakterystyka udarowa układów izolacyjnych urządzeń pracujących w systemie, 3 – charakterystyka udarowa elementów ochronnych urządzeń sieciowych [2]

Sprawdzenie poprawności konstrukcji i wykonania kabla oraz osprzętu przeznaczanego do niego przeprowadza

się zgodnie z zaleceniami normy [9] wykonując odpowiednie znormalizowane próby napięciami probierczymi. Spełnienie tych wymagań zapewnia zatem właściwą wytrzymałość elektryczną linii kablowej, czyli jej odporność na działanie napięcia roboczego oraz różnych przepięć:

- dorywczych (o częstotliwości sieciowej) powstających przy zwarcjach doziemnych i nagłych zmianach obciążeń,
- łączeniowych powstających przy wyłączaniu prądów indukcyjnych i pojemnościowych,
- piorunowych odległych, powstających przy dalekich uderzeniach piorunów w linii napowietrznej,
- piorunowych bezpośrednich, powstających przy bliskich uderzeniach piorunów w linii napowietrznej i inne urządzenia sieci przesyłowej,
- piorunowych indukowanych, powstających w liniach przy bliskich uderzeniach piorunów w ziemię lub obiekty w sąsiedztwie sieci przesyłowych,

których amplituda nie przekracza wartości odpowiadających im napięć probierczych. Odporność układu izolacyjnego linii kablowej na działanie przepięć o większych wartościach uzyskuje się dzięki zainstalowaniu w zalecanych miejscach odpowiednio dobranych ograniczników przepięć.

6. PODSUMOWANIE

Powstawanie przepięć w sieci elektroenergetycznej jest procesem naturalnym, wynikającym z działania wyładowań atmosferycznych oraz innych zjawisk fizycznych zachodzących w czasie eksploatacji sieci związanych z jej normalnym działaniem lub zdarzającymi się awariami.

Przepięcia są zjawiskiem naturalnym o możliwych bardzo negatywnych skutkach, którego nie da się wyeliminować, a jedynie ograniczyć skutki jego działania.

Z ekonomicznych i technicznych powodów nie wykonuje się urządzeń zainstalowanych w sieci o tak wysokim poziomie wytrzymałości napięciowej, aby wytrzymał powstające przepięcia – należy jednak ograniczać ich amplitudę do poziomu dopuszczalnego dla eksploatowanych układów izolacyjnych, na przykład kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 2005. ISBN 83-204-3077-7.
2. PN-EN 60071-2:2000 (wersja polska). Koordynacja izolacji -- Część 2: Przewodnik stosowania.
3. Arciszewski J., Komorowska I.: Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć. Wskazówki wykonawcze. Wyd. PTPiREE, Poznań 1999. ISBN 83-90307303-2.
4. Olesz M.: Ochrona przed przepięciami instalacji elektroenergetycznych o napięciu znamionowym powyżej 1 kV. Seminarium Norma PN-E-05115 w teorii i praktyce. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Oddział Gdańsk, Gdańsk 2004 r. s. 67-76. ISBN 83-89786-10-9.
5. PN-EN 60060-1:2011 (wersja angielska). Wysokonapięciowa technika probiercza -- Część 1: Ogólne definicje i wymagania probiercze.
6. Gacek Z.: Zagrożenie piorunowe linii napowietrznych przesyłowo-rozdzielczych i przesyłowych. Automatyka Elektroenergetyczna, nr 4/2002.

7. Szpor S.: Ochrona odgromowa. Tom 1. Wiadomości podstawowe. WNT, Warszawa 1973.
8. Włodarski R., Bucholc J.: Linie kablowe bardzo wysokich napięć. Projektowanie i budowa. WNT, Warszawa 1979. ISBN 83-204-0094-5.
9. PN-EN 60071-1:2008 (wersja polska). Koordynacja izolacji -- Część 1: Definicje, zasady i reguły
10. Kosztaluk R.: Koordynacja izolacji sieci elektrycznych. Część 5 – sieci rozdzielcze i przesyłowe. INPE nr 56/2004. ISSN 1234-0081.

LIGHTNING HAZARD OF HIGH VOLTAGE POWER CABLE LINES

The work defines the main sources of overvoltage hazard of cable lines operated in the transmission system. We discussed the wave phenomena occurring at atmospheric discharges in different systems of power lines and their impact on the value of the overvoltages. The role of insulation coordination in protecting against overvoltages of HV devices have been presented.

Keywords: overvoltage hazard, overvoltage waves, cable lines, overhead line.