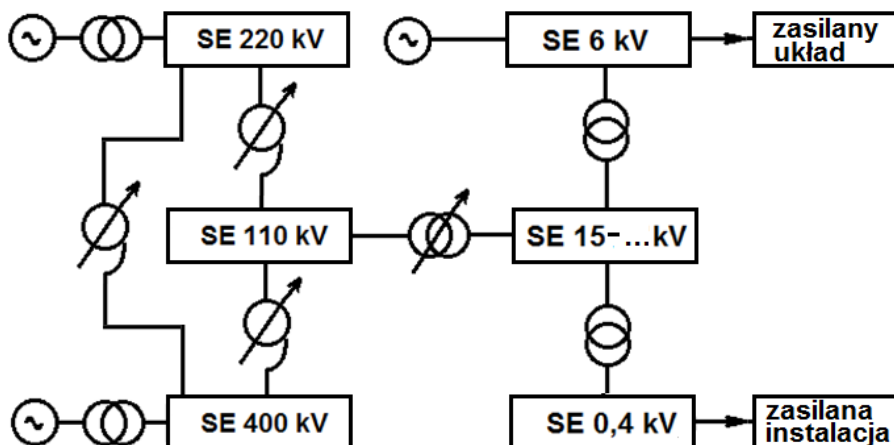


Identyfikacja i łagodzenie szkodliwych efektów inicjowanych przez wyładowania piorunowe w sieciach rozdzielczo-zasilających

Zdobysław Flisowski, Politechnika Warszawska

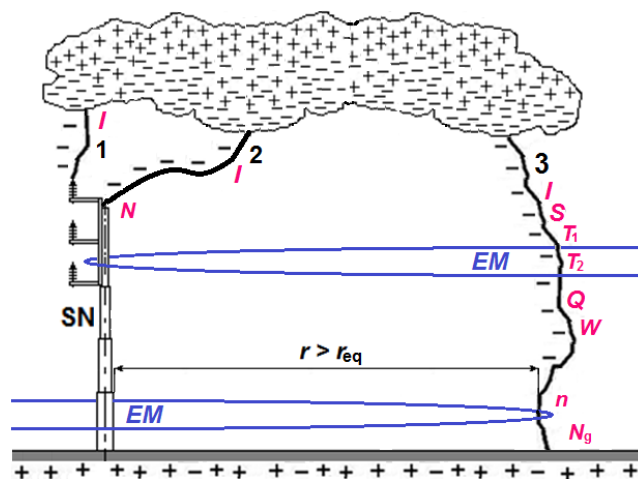
1. Wprowadzenie

Każda sieć elektroenergetyczna występuje w środowisku piorunowym i w aktywnych okresach tego środowiska jest narażona na szkodliwe efekty jego oddziaływań. Efekty te zależą oczywiście od parametrów zjawisk piorunowych, ale bardzo istotne, a często nawet decydujące, są tu indywidualne właściwości i warunki narażonego fragmentu sieci przesyłowo-rozdzielczej, przedstawionej na rys. 1. W sieci tej – jak wiadomo [7] – wyróżnia się ogólnokrajową część przesyłową na napięcie znamionowe $U_n \geq 220$ kV, część przesyłowo-rozdzielczą na napięcie znamionowe $U_n = 110$ kV i część - najbardziej narażoną na szkodliwe efekty piorunowe - rozdzielczo-zasilającą z zakresu napięć średnich (SN) i napięć niskich (nn).

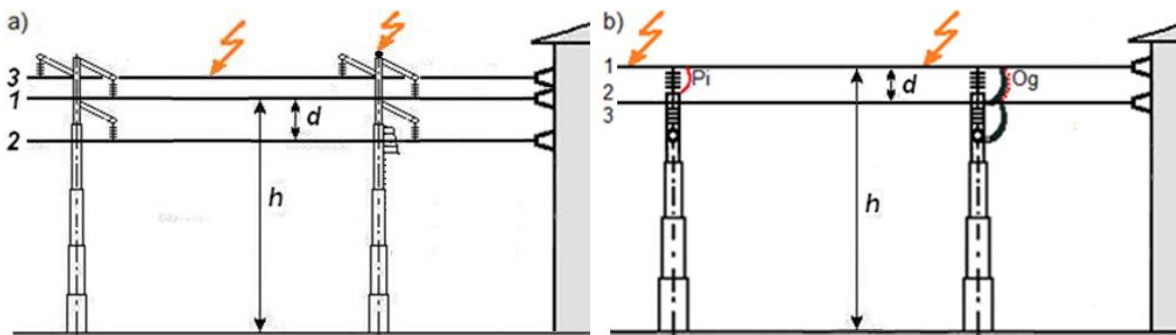


Rys. 1. Ogólnokrajowa struktura układu przesyłowo-rozdzielczego sieci elektroenergetycznych (SE)

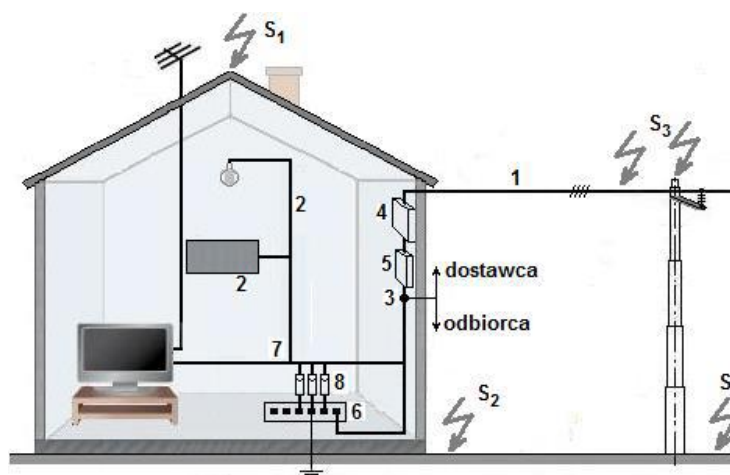
Rozmiary szkodliwych efektów zależą istotnie od właściwości i warunków lokalnych, odnoszących się do rozpatrywanej części układu sieciowego, jej struktury i środowiska, a narażonej na oddziaływanie piorunowe, no i oczywiście od intensywności tych oddziaływań. Oznacza to, że efekty te powinny być rozpatrywane w sposób zindywidualizowany, przy koncentracji uwagi na poszczególne przypadki oddziaływań piorunowych o krytycznych wartościach ich parametrów [4]. Mogą to być, na przykład, oddziaływanie prądowe przy bezpośrednich wyładowaniach w przewód linii lub w wierzchołek jej słupa oraz oddziaływanie elektromagnetyczne przy wyładowaniach pobliskich, jak na rys. 2. Mogą to być też bezpośrednie oddziaływanie na określone odcinki linii z przewodami gołymi, jak na rys. 3a), lub wyposażonymi w powłokę izolacyjną z odpowiednimi środkami ochronnymi, jak na rys. 3b). Najczęściej może być to końcowy fragment linii niskiego napięcia z przyłączoną do niej elektryczną instalacją obiektu, jak na rys. 4.



Rys. 2. Ilustracja odgórnych wyładowań bezpośrednich i pobliskich w linię z symbolami ich parametrów [4]: I – prądu, EM – impulsu elektromagnetycznego, S – stromości czoła udaru, T_1 - czasu trwania czoła, T_2 - czasu do pół szczytu na grzbiecie, Q – przenieszonego ładunku, W/R – energii właściwej, n – liczby udarów w wyładowaniu, N – liczby trafień w obiekt, N_g – powierzchniowej gęstości wyładowań.



Rys. 3. Odcinek linii SN z przewodami: a) niez izolowanymi, b) izolowanymi; P_1 - przeskok iskrowy; O_g – ogranicznik wieloelektrodowy



Rys. 4. Obiekt z instalacją zasilaną z napowietrznej linii nn: 1 – linia zasilająca, 2 – instalacja z urządzeniami odbiorczymi, 3 - punkt zmiany zakresu odpowiedzialności, 4 – złącze, 5 – licznik (rozdzielnica), 6 – szyna wyrównawcza, 7 – rozgałęzienie, 8 – SPD, $S_{1,2,3,4}$ – miejsca trafienia [5].

Struktura układu zasilania, jego źródła, konstrukcje, oprzewodowanie/okablowanie i osprzęt, determinuje warunki zwarciove i sprzężeniowe, a dotyczy to w szczególności mocy i impedancji zwarciovej oraz stanu, w jakim znajdują się punkty neutralne układu, a więc czy i jak

są one uziemione. Wszystko to może mieć wpływ na rozptył prądu piorunowego i na wartości przepięć atmosferycznych oraz na ich skutki w postaci przeskoków iskrowych i zapłonów łuku elektrycznego. Nie bez znaczenia jest też stan aktywności energetycznej rozpatrywanej części układu w chwili oddziaływania nań wyładowań piorunowych. Część ta może być odłączona od źródła zasilania i wówczas efekty są wyłącznie piorunowe, a może być ona zasilana i wówczas efekty są uzależnione od mocy źródła i od impedancji pętli zwarciowej, uaktywnionej inicjacją piorunową. Inicjacja ta nie może być rozpatrywana z pominięciem warunków środowiskowych, gdyż zagrożona część układu może być otoczona wysokimi drzewami/obiektami, jak na rys. 5a), może być odizolowana od nich, jak na rys. 5b) i może być eksponowana lub ukrywana ukształtowaniem terenu, jak na rys. 5c).



Fot.1. Ilustracja warunków środowiskowych linii: a) osłoniętej drzewami, b) odosobnionej na równinie, c) eksponowanej na wzgórzu [8]

Efekty trafień piorunowych w linie powinny być rozpatrywane w powiązaniu z podstawową ich lokalizacją [5], ze zwróceniem uwagi na fakt, że trafienia:

- w wierzchołek słupa powodują wzrost napięcia w jego wierzchołku, przeskok odwrotny na izolatorze i odpowiedni rozptył prądu;
- w przewód roboczy powodują rozptył w nim prądu, efekty sprzężeniowe w sąsiednich przewodach, przeskok iskrowy na izolatorze i zmianę w rozptywie prądu;
- w pobliżu linii powodują napięcia indukowane w jej przewodach z pewnym odsetkiem przeskoków iskrowych na izolatorach i ze spadkiem napięcia na słupie.

Skutki przeskoków iskrowych zależą, jak już wspomniano, od parametrów piorunowych, a po zaniku prądu piorunowego, to jest po czasie $t \leq 1s$, od następczego prądu przerywanych zwarc łukowych, powodujących efekty:

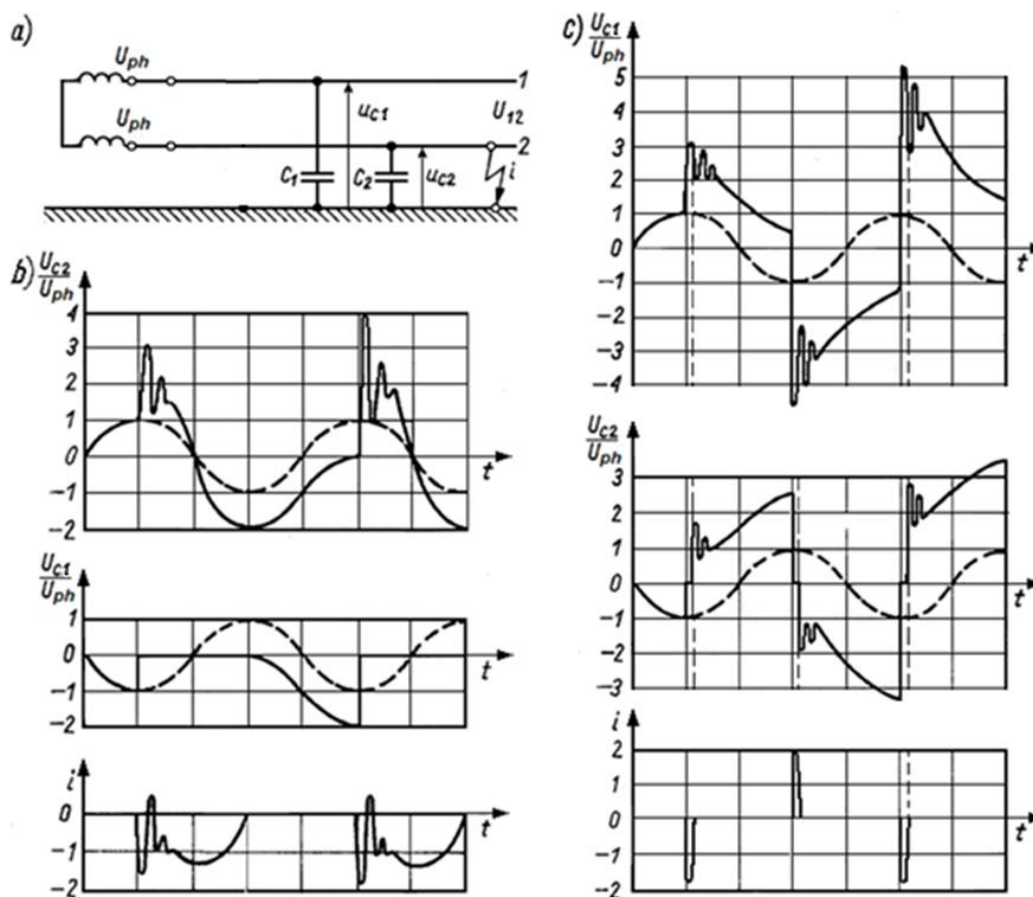
- napięciowe (cykliczne narastanie przepięć),
- prądowe (uszkodzenia izolatorów, wyłączenia linii),
- napięciowo-prądowe (zwarcia międzyfazowe).

Przyczyny i następstwa omawianych zjawisk mają zwykle charakter losowy i ich prawidłowa ocena wymaga ujęcia probabilistycznego, a często też niezbędne jest określenie ryzyka ich występowania z konsekwencjami, co w szczególności może dotyczyć m. in.:

- zjawisk przepięciowych w linii,
- zaistnienia przeskoku na jej izolatorze,
- przejścia przeskoku w zwarcie,
- liczby lub częstości wyłączeń linii.

2. Efekty przeskoków iskrowych

Efektom napięciowym przeskoku iskrowego może być, na przykład, przekształcenie się przepięcia atmosferycznego w szybkozmienne przepięcie łączeniowe, o amplitudzie cyklicznie narastającej z oscylacjami po każdym przerywaniu łuku, tj. po przejściu przez zero pojemnościowego prądu następczego. Oczywiście, prąd następczy powinien mieć wartość umożliwiającą przerywanie łuku – przy każdym przejściu przez zero - w celu ponownego doładowania zwartej uprzednio pojemności i ponownego zapłonu łuku. Jak pokazano na rys. 5, zwierzana jest, na przykład, pojemność C_2 w układzie przewodu 2 z powierzchnią ziemi, a zwarciu temu towarzyszą oscylacje napięciowe na przewodach sąsiednich. Wskutek tego przez zero może przechodzić i ulegać przerywaniu zarówno prąd źródłowy wolnozmienny, zgodnie z mechanizmem Petersa i Slepiana (rys. 5b) [2], jak i prąd oscylacyjny szybkozmienny, zgodnie z mechanizmem Petersena (rys. 5c). Oceniając efekty tych mechanizmów, można stwierdzić, że przerywanie prądu szybkozmiennego prowadzi do większych wartości przepięć łączeniowych.



Rys. 5. Układ dwufazowy z włączonymi przewodami i z łukowym zwarcie doziemnym: a) schemat układu; b) przebiegi napięcia i prądu wg mechanizmu Petersa i Slepiana, c) przebiegi napięcia i prądu wg mechanizmu Petersena [2].

Z kolei efektem prądowym przeskoku iskrowego na izolatorze jest otwarcie drogi dla przepływu tam nie tylko udarowych prądów piorunowych, ale i następczych prądów zwarciovych, których przepływ może powodować m.in. uszkodzenia elementów układu, np. izolatorów pokazanych na Fot. 2. lub wyłączenia linii.



Fot. 2. Uszkodzone izolatory ŚN [6].

Uszkodzenia izolatorów są bardziej prawdopodobne w pobliżu źródła zasilania, a więc tam gdzie prądy zwarciove uzyskują większe wartości. O stopniu zagrożenia decyduje energia przenoszona przez te prądy zwarciove, która może osiągać wartości rzędu 100 kW i zwykle jest ona większa przy prądach zwarciove niż przy piorunowych. Nie ulega więc wątpliwości, że pioruny są na ogół tylko powodem przeskoków na izolatorach, a za ich uszkodzenie ponoszą winę prądy zwarciove, jeżeli sprzyjają temu warunki, w jakich te prądy powstają. W sieciach ŚN, gdzie punkt neutralny jest zwykle uziemiony przez znaczącą impedancję lub izolowany, mogą występować groźne prądy zwarciove, ale zwykle tylko wtedy, gdy zwarcie występuje między przewodami linii blisko źródeł zasilających. Źródłami tymi mogą być np. generatory i silniki indukcyjne, przyłączone bezpośrednio lub przez transformatory do miejsca zwarcia, ale decydujące znaczenie mają małe impedancje tych połączeń. Ocena zagrożenia natrafia tu zwykle na poważny problem, związany z ustaleniem wiarygodnych danych niezbędnych do określenia ryzyka:

- przeskoku na izolatorze,
- wyłączenia linii (z ew. uszkodzeniem jej izolatorów) po przejściu przeskoku w zwarcie.

Przekroczenie tolerowanej wartości ryzyka wymaga właściwego doboru środków ochrony, którymi w danym przypadku mogą być środki służące redukcji napięć.

3. Ryzyko przeskoku iskrowego i wyłączenia linii

Na ryzyko przeskoku iskrowego R_{pi} , występującego na izolatorze linii, składają się trzy komponenty wynikające z różnych lokalizacji i oddziaływań piorunowych, a mianowicie:

R_{spi} - komponent związany z trafieniami w słup;

R_{ppi} - komponent związany z trafieniami w przewód linii;

R_{ipi} - komponent związany z przepięciami indukowanymi.

Wzajemne powiązanie tych komponentów umożliwia typowa zależność probabilistyczna:

$$R_{pi} = 1 - (1 - R_{spi}) (1 - R_{ppi}) (1 - R_{ipi}) \quad (1)$$

której poszczególne wielkości wynikają z podstawowego wzoru na ryzyko [2], [5] o postaci:

$$R = 1 - \exp[- NP] \quad (2)$$

W relacji do każdego z wyszczególnionych komponentów przekształca się on do postaci:

$$R_{spi} = 1 - \exp[- N_g A_{seq} P(U_{ws} \geq U_w)] \quad (2a)$$

$$R_{ppi} = 1 - \exp[- N_g A_{peq} P(U_p \geq U_w)] \quad (2b)$$

$$R_{ipi} = 1 - \exp[- N_g A_{ieq} P(U_i \geq U_w)] \quad (2c)$$

których symbole mają następujące znaczenie: N_g - gęstość wyładowań piorunowych na danym terenie, A_{seq} - powierzchnia równoważna dla trafień w słup, A_{peq} - powierzchnia równoważna dla trafień w przewód, A_{ieq} - powierzchnia równoważna dla wyładowań pobliskich, $P(U_{ws} \geq U_w)$, $P(U_p \geq U_w)$ i $P(U_i \geq U_w)$ - prawdopodobieństwa przekroczenia napięcia wytrzymywanego odpowiednio przy trafieniach w słup i w przewód linii oraz przez napięcia indukowane.

Przyporządkowane tym symbolom wartości wynikają z następujących zależności:

$N_g \approx 0,1$ $N_d = 2$ wyładowania na rok i na km^2 (przy $N_d = 20$ dni burzowych w roku);

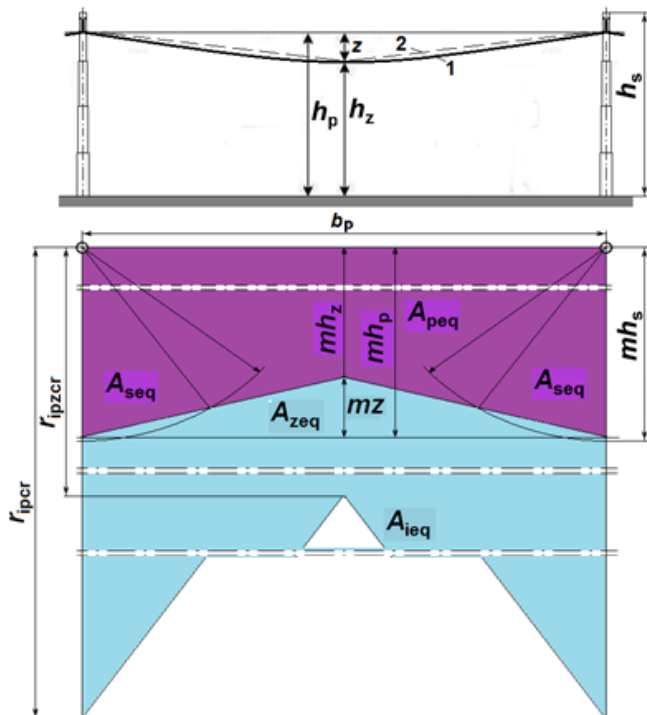
$A_{\text{seq}} = 0,5\pi(mh_s)^2 - 2(mh_p)^2$ [m^2]; $A_{\text{peq}} = 2bmh_p$ [m^2];

$A_{\text{ieq}} = 2b33lh_p/U_w - 2bmh_p$ [m^2], w przypadku przewodu bez zwisu;

$A_{\text{ieq}} = b33l(h_p + h_z)/U_w - 2bmh_p$ [m^2], w przypadku przewodu ze zwisem (rys.6)

Z kolei występujące w tych zależnościach symbole mają następujące znaczenie:

- h_s – wysokość słupa; h_p – wysokość przewodu bez zwisu;
- h_z – wysokość przewodu ze zwisem; b – obliczeniowa długość linii $b=1\ 000$ m;
- l – wartość szczytowa udaru prądowego; $m = 13,4h^{0,48}$ – krotność h w ocenie zasięgu.



Objaśnienie symboli:

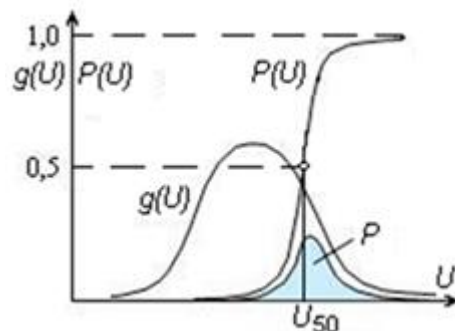
- 1, 2 – zwis naturalny i uproszczony;
- h_s, h_p, h_z – wysokość słupa, przewodu bez i ze zwisem;
- mh_p, mh_z, mz – zasięgi powierzchni równoważnej (A_{peq}) przewodu bez zwisu i ze zwisem oraz zwisu (A_{zeq});
- mh_s – zasięg powierzchni równoważnej (A_{seq}) słupa;
- b_p – długość przęsła;
- A_{ieq} – powierzchnia równoważna do obliczania napięć indukowanych
- $r_{\text{ipcr}}, r_{\text{ipzcr}}$ – zasięgi krytyczne powierzchni A_{ieq} dla przewodu bez zwisu i ze zwisem

Rys. 6. Przęsło linii ŚN z uwidocznionymi powierzchniami równoważnymi (A_{eq})

Prawdopodobieństwa wystąpienia napięć: na wierzchołku słupa U_{ws} , na trafionym przewodzie U_p i napięcia indukowanego U_i , większych niż – napięcie wytrzymawane izolatora U_w (wg kategorii przepięć) są następujące:

$$P(U_{ws} \geq U_w); \quad P(U_p \geq U_w); \quad P(U_i \geq U_w); \quad (3)$$

Wartości P wynikają ze skojarzenia ze sobą funkcji gęstości $g(U)$ rozkładu przepięć i dystrybuanty $P(U)$ napięć powodujących przeskok, co uwidoczniło na rys. 7.



Rys. 7. Ilustracja prawdopodobieństwa P jako wyniku skojarzenia $g(U)$ z $P(U)$

Przejście w zwarcie łukowe przeskoiku iskrowego na izolatorze linii może oznaczać ryzyko jej wyłączenia R , którego wyznaczenie wymagana następującej zmiany wykładnika potęgi w podstawowym wzorze (3.2):

$$R = 1 - \exp(-N_w) \quad (4)$$

Symbol N_w oznacza spodziewaną częstość wyłączeń linii o określonej długości, np. o długości 100 km, w określonym okresie czasie, np. w ciągu 1 roku. Częstość ta wynika z następującej zależności [2]:

$$N_w = N p_\alpha P_i + N(1 - p_\alpha) P_o P_z \quad (5)$$

w której:

N – roczna liczba wyładowań piorunowych w 100 km odcinek linii,
 p_α - odsetek liczby N piorunów trafiających w przewody fazowe linii,
 P_i – prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoiku na izolacji linii (od przewodów fazowych),
 P_o – prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoiku odwrotnego,
 P_z – prawdopodobieństwo przejścia przeskoiku w zwarcie, a więc i wyłączenia linii.

Zależności 2a), b) i c) wyraźnie ujawniają, że liczbę oddziaływań piorunowych na linię można ustalić na podstawie wzoru:

$$N = N_g (A_{seq} + A_{peq} + A_{ieq}) \quad (6)$$

Pozwala on w zależności (3.5) przyjąć wartość $N p_\alpha = 100 N_g A_{peq}$ lub - zgodnie z danymi eksperymentalnymi - obliczoną dla rozważanej linii wartość N pomnożyć przez $p_\alpha \approx 0,4$.

Prawdopodobieństwo przeskoiku P_i może być określone - przy uwzględnieniu statystycznego rozkładu prądu - na podstawie drugiego warunku (3), zależnością:

$$P_i = P(U_p \geq U_w) \quad (7)$$

Z kolei, prawdopodobieństwo przeskoiku odwrotnego P_o wynika z warunku:

$$U_w < R_s I_{smw} + L_s \left(\frac{di_{sw}}{dt} \right)_{max} \quad (8)$$

przy uwzględnieniu w nim również statystycznego rozkładu wartości szczytowej prądu I oraz maksymalnej jego stromości narastania di/dt_{max} .

Przy założeniu, że kwantyle I_{smw} i $(di_{sw}/dt)_m$ są tego samego rzędu p , otrzymuje się prawdopodobieństwo:

$$P_o = 1 - (1 - p)^2 \quad (9)$$

Ostatnia wielkość z zależności (5), tj. prawdopodobieństwo P_z , może być wyznaczona na podstawie danych eksperymentalnych w warunkach lokalnych, a gdy one sprzyjają takiemu przejściu, prawdopodobieństwo to przyjmuje wartość

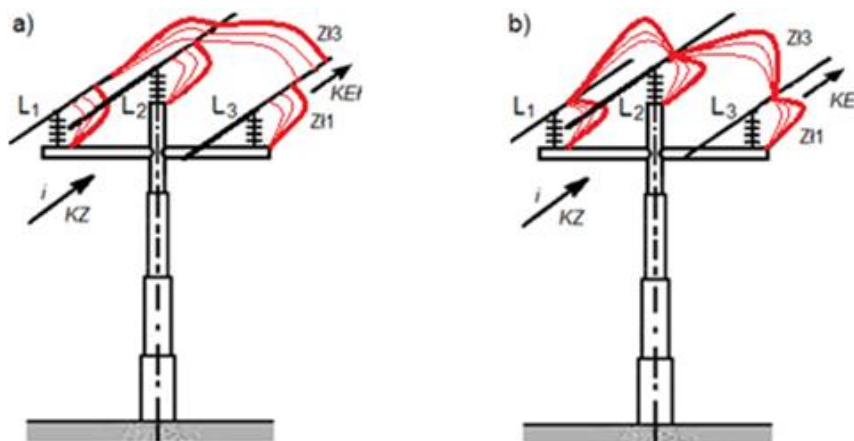
$$P_z \leq 0,8 \quad (10)$$

W ten sposób liczba wyłączeń linii N_w (5), odniesiona do jednostki czasu, np. do 1 roku, jest częstością wyłączeń linii, a gdy jej wartość $N_w > 1$, to ryzyko wyłączenia linii w ciągu roku jest prawie pewne, czyli wartość ryzyka zbliża się do jedności. Na przykład, gdy $N_w = 2$, to $R = 1 - \exp(-2) = 0,87$, a gdy $N_w = 5$, to $R = 1 - \exp(-5) = 0,99$.

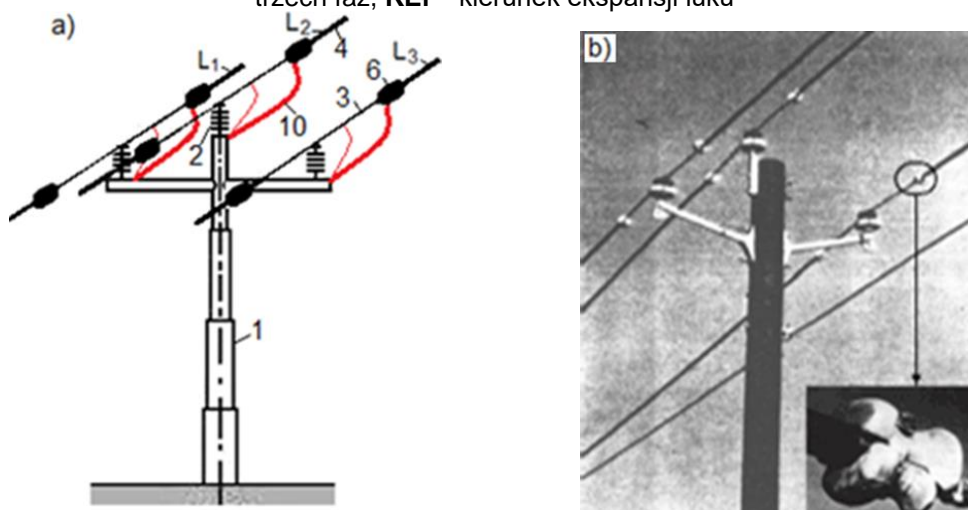
4. Unikanie lub łagodzenie szkodliwych efektów

W liniach napowietrznych ŚN i nn. nie stosuje się przewodów odgromowych, gdyż nie przynoszą tu one istotnych efektów, natomiast dobór innych środków ochrony jest uzależniony w znacznym stopniu od rodzaju rozpatrywanego elementu, jakim może być na przykład izolator lub inny element linii, a także przyłączone do niej urządzenie.

W przypadku izolatora chodzi głównie o odsunięcie iskry od jego powierzchni, czyli o zainstalowanie równoległych iskierników o mniejszej wytrzymałości udarowej niż wytrzymałość izolatorów. W przypadku innych elementów linii lub przyłączonych do nich urządzeń problem staje się bardziej złożony, gdyż wymagane jest dostosowanie doboru środków ochrony do rodzaju i warunków pracy linii [1]. Obecnie może mieć ona przewody gołe lub z powłoką izolacyjną. Jeżeli przewód jest goły, to po jego zwarcu, zwykle przy izolatorze, do chwili wyłączenia linii, istnieje łuk elektryczny, którego kraniec jest przesuwany przez siły elektrodynamiczne od izolatora wzdłuż przewodu (rys. 8a) i jego zagrożenie termiczne znika, a więc nie wpływa to istotnie na koncepcję ochrony odgromowej linii. Natomiast, jeżeli przewody linii mają powłokę izolacyjną, to kraniec łuku - powstającego po przeskoku przy izolatorze (Rys. 8b) - nie przemieszcza się wzdłuż przewodu, a to stwarza termiczne jego zagrożenie i kończy się przetopieniem. Środkiem zaradczym może być tu usunięcie powłoki z odcinka przewodu przy izolatorze i wyposażenie jego krańców w zaciski łukoodporne (rys.9);

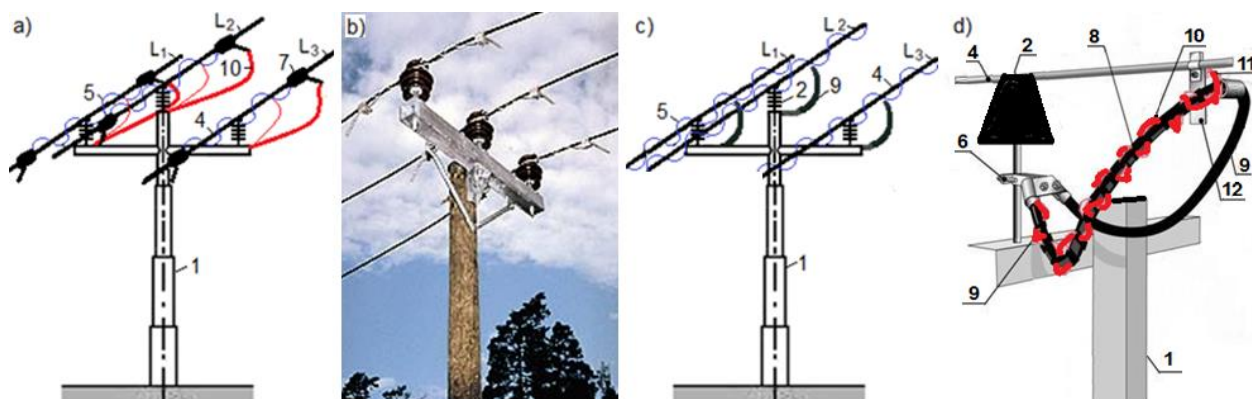


Rys. 8. Ilustracja przeskoku iskrowego z przejściem w łuk zwarcia w linii z przewodami: a) gołymi, b) w powłoce izolacyjnej; KZ – kierunek zasilania, ZI1 – zwarcie łukowe jednej fazy, ZI3 – zwarcie łukowe trzech faz, KEI – kierunek ekspansji łuku



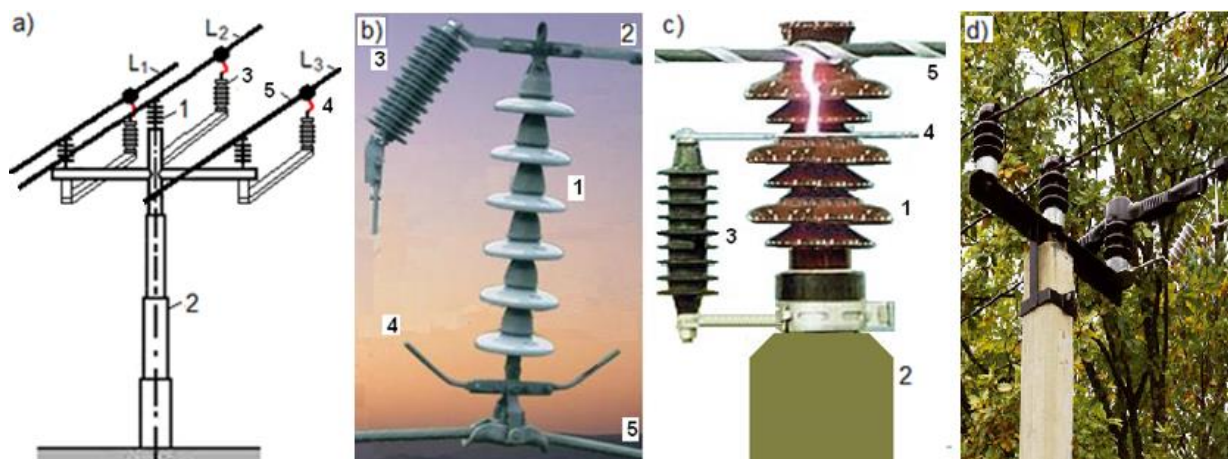
Rys. 9. Układ zacisków łukoodpornych chroniących przewód izolowany przed przepaleniem [1]: a) szkic układu, b) jego zdjęcie; 1 – konstrukcja wsporcza, 2 – izolator, 3 – goły przewód, 4 – izolowany przewód, 6 – zacisk łukoodporny, 10 – łuk elektryczny

Można też wyposażyć odizolowany odcinek w spiralę metalową i alternatywne zainstalowanie różków ochronnych na jej krańcach (Rys. 4.3a,b) lub wieloelektrodowego iskiernika bocznikującego izolator (Rys.4.3c,d). Obecnie w grę wchodzi również bocznikowanie izolatorów warystorowymi urządzeniami do ograniczania przepięć z zewnętrznymi iskiernikami szeregowymi, typu EGLA (ang. Externally Gapped Line Arrester) [3], odpornymi na skutki termiczne (Rys. 11);



Rys.10. Układy ochronne [1]: a), b) - różków łukoodpornych (szkic i zdjęcie), c), d) – iskierników wieloelektrodowych (szkic i fragment); 1 – konstrukcja wsporcza, 2 – izolator, 4 – przewód, 5 – spirala ochronna, 6 – wspornik, 7 – różek ochronny, 8 – elektroda iskiernika, 9 – iskiernik wieloelektrodowy, 10 – łuk elektryczny, 11 – iskiernik, 12 – zacisk iskiernika

Należy zauważyć, że układ ochronny z urządzeniem EGLA nadaje się do stosowania również w liniach z przewodami nieizolowanymi i w liniach na wyższe napięcia, a warystory w tym układzie powinny być instalowane równoległe do zestawu izolatorowego, bezpośrednio na wysięgniku konstrukcji wsporczej (Rys. 11).



Rys. 11. Układ z urządzeniem typu EGLA [1], [3]: a) szkic układu; b) fragment z izolatorem wiszącym, c) fragment z izolatorem wsporczym; d) – zdjęcie układu, 1 – izolator, 2 – konstrukcja nośna, 3 – ogranicznik warystorowy z tlenków metali, 4 – zewnętrzny iskiernik szeregowy, 5-przewód,

5. Podsumowanie

Z przedstawionych rozważań wynika - dość paradoksalnie - fakt, że skutki oddziaływań piorunowych na linie elektroenergetyczne zależą bardziej od ich właściwości i stanu pracy niż

od parametrów tych oddziaływań, czego nie można powiedzieć w przypadku zagrożenia przyłączonych do linii urządzeń.

Niepodłączone do układu zasilającego linie nie są w zasadzie zagrożone, a po ich włączeniu wyładowanie piorunowe, powodujące przeskoki iskrowe na izolacji linii, inicjuje w niej procesy uszkodzeniowe, zależne od układu, w którym występuje linia. Czynniki, które decydują o skali uszkodzeń są m.in.:

- miejsce linii w układzie, jego warunki uziemieniowe, moc najbliższych źródeł zasilania,
- warunki zwarciove, umożliwiające przejście przeskoku w zwarcie łukowe, jego cykliczność i narastanie przepięć,
- rodzaje zwarć i możliwość ich eskalacji,
- skuteczność urządzeń zabezpieczających i ochronnych.

Literatura

- [1] Borecki M. Analiza warunków powstawania przepięć atmosferycznych w liniach średniego napięcia z przewodami niepełno izolowanymi. Wyd. P.W. 2017
- [2] Flisowski Z.: Technika Wysokich Napięć. Ed.6, WNT, Warszawa 2015 .
- [3] IEC 60099-8:2017 - Surge arresters - Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems > 1 kV
- [4] PN-EN 62305-1:2011 - Ochrona odgromowa Część 1: Zasady ogólne.
- [5] PN-EN 62305-2: 2012 - Ochrona odgromowa - Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
- [6] Szcześniak M.: Informacja o uszkodzeniu izolatorów. PGE Dystrybucja S.A. Oddział Skarżysko-Kamienna. Sekcja Analiz Sieciowych. 6.11.2015
- [7] Wasiak Irena: Elektroenergetyka w zarysie -Przesył i rozdział energii elektrycznej. Skrypt Politechnika Łódzka, Łódź 2009
- [8] <https://pixabay.com/pl/images/search/linie%20energetyczne/?paci=2>