

Waldemar SKOMUDEKPOLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI
PSE OPERATOR SA**Narażenie przepięciowe układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych średniego i wysokiego napięcia**

Dr inż. Waldemar SKOMUDEK

Absolwent WSI w Opolu, Wydział Elektryczny 1985r, Pol. Śląska w Gliwicach, Wydział Elektryczny, trzyletnie studia doktoranckie zakończone rozprawą doktorską. Działalność naukowa dotyczy głównie zastosowania nowych rozwiązań układów izolacyjnych, ochrony przed przepięciami, ochrony od porażeń, informatycznych systemów nadzoru oraz nowoczesnych rozwiązań proekologicznych. Członek m.in. Sekcji Wielkiej Mocy i Wysokich Napięć Komitetu Elektrotechniki PAN, PTEiTIS i PKWSE CIGRE, Senior Member IEEE.



e-mail: waldemar.skomudek@pse-operator.pl

Streszczenie

Przepięcia, jako specyficzne obciążenia elektryczne powstające podczas różnego rodzaju stanów nieustalonych w sieciach elektroenergetycznych, wywierają bardzo niekorzystny wpływ na urządzenia i obiekty elektroenergetyczne. Efektem tego są zakłócenia w pracy sieci przesyłowej i dystrybucyjnej oraz uszkodzenia izolacji i osprzętu. Przepięcia i skutki ich oddziaływań stały się przedmiotem analiz i ocen narażenia układów izolacyjnych wykonanych przez autora, a dane uzyskane mają zasadniczy wpływ na dobór odpowiednich środków ochrony przed przepięciami.

Słowa kluczowe: narażenie przepięciowe, zakłócenie pracy sieci, układ izolacyjny.

Overvoltage hazard to insulation systems in medium and high voltage electric devices**Abstract**

Overvoltages, as specific electric loads occurring during various transient states in power networks, play a very detrimental effect on power electric devices and installations [2, 4, 5, 6]. The results of such events are various disturbances during operation of power networks and damages of electrical equipment [1, 3, 7]. Overvoltages and the effects of their occurrence have been the subject of analysis and assessment concerned with the hazard posed to insulation systems undertaken by the author [8, 9]. This assessment has focused on the effects of overvoltages with a particular emphasis placed on the role of its configuration, system of surface ground, continuity of power supply, cost of failures and standardization of systems. Using relation (1), taking into account the total probability of a lightning alternatively hitting a post or a ground wire of a line, the vicinity of a post, the middle of the span of a ground wire, a live wire (due to the failure of a shield) the potential number of emergency shut-downs of a high voltage lines over a year has been estimated. The obtained results are given in Table 1 and show a need for the limitation of peak values which characterize overvoltages. Such values would be the ones, which can be withstood by insulation systems without the occurrence of an arc or a spark-over and further confirm the satisfactory resistance of a high voltage line to storm. In addition, the results associated with the assessment of overvoltage hazard to medium and high voltage electrical facilities enable the relevant services to undertake adequate actions in order to determine the principles relative to the selection of adequate measures taken for the protection of electric facilities and devices against overvoltages.

Keywords: overvoltage hazard, disturbance of a network, insulation system.

1. Wstęp

Dużym zagrożeniem dla układów izolacyjnych w urządzeniach elektroenergetycznych średniego (SN) i wysokiego (WN) napięcia są przepięcia powstające wskutek bezpośrednich wyładowań

piorunowych w urządzenia lub w ich pobliżu. Krótkotrwałe przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia udarowego spowodować może przeskok lub nawet przebiecie izolacji.

Aby podjąć działania zmierzające do skutecznej ochrony przed przepięciami należy wcześniej dokonać oceny stopnia narażenia urządzeń elektroenergetycznych spowodowanego bezpośrednimi uderzeniami piorunów. Stosując probabilistyczne charakterystyki prądu pioruna oraz znając parametry konstrukcyjne i wytrzymałościowe układów izolacyjnych, można oszacować spodziewaną liczbę wyłączeń burzowych linii wysokiego napięcia w ciągu roku. Wyniki tych obliczeń są zazwyczaj zawyżone, ale służą do zgrubnej oceny zagrożenia burzowego izolacji liniowej i skuteczności stosowanej ochrony odgromowej. W tym celu należy posłużyć się zależnością uwzględniającą łącznie prawdopodobieństwo alternatywnego uderzenia pioruna: w słupek lub w przewód odgromowy linii, w pobliżu słupa, w srodek przęsła przewodu odgromowego, w przewód roboczy (wskutek zawadności osłony). Ma ona następującą postać [1]:

$$N_{wobl} \cong (4,8 \dots 8,1) h_{osr}^{0,5} [\psi_s P(I_{sd}) \eta_s + \psi_0 P(s_{id}) \eta_0 + \psi_r P(I_{rd}) \eta_r] \quad (1)$$

przy czym:

$h_{osr} = h_s - \frac{2}{3} f_p$ - średnia wysokość zawieszenia najwyższego przewodu (odgromowego lub roboczego), w m,

h_s - wysokość słupa, w m,

f_p - zwis najwyższego przewodu w przęsle, w m,

$\psi_s \cong 0,5 \dots 0,6$ - prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w słupek (wartości szacunkowe),

$\psi_0 \cong 0,4 \dots 0,5$ - prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w srodek przęsła przewodu odgromowego (wartości szacunkowe),

$\psi_r \cong 0,01$ - prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w przewód roboczy (wartość szacunkowa)

$I_{sd} \cong \frac{U_{u50}}{R_{zu} + \delta_s h_s}$ - dopuszczalny poziom prądowy udarowy, w kA,

$s_{id} \cong \frac{2250 a_{or}}{l_p (1 - k_u)}$ - dopuszczalna stromość czoła fali prądowej pioruna, w kA/ μ s,

$I_{rd} \cong \frac{U_{u50}}{100(1 - k_u)}$ - dopuszczalny poziom prądowy udarowy dla

łańcucha izolatorów, w kA,

$P(I_{sd}), P(I_{rd}), P(s_{id})$ - prawdopodobieństwa wystąpienia pioruna o wartości szczytowej przekraczającej dopuszczalny poziom prądowy udarowy I_{sd} i I_{rd} lub dopuszczalną stromość czoła fali prądowej s_{id} (odpowiednio przypadki 1, 3, 2 na rys. 1,

U_{u50} - pięćdziesięcioprocentowe udarowe napięcie przeskoku izolacji doziemnej, w kV,

R_{zu} - rezystancja udarowa uziemienia słupa, w Ω ,

$\delta_p \cong 0,15 \dots 0,3$ - współczynnik uwzględniający pozorny wzrost rezystancji uziemienia słupa wskutek napięć indukowanych (odpowiednio dla linii z dwoma i jednym przewodem odgromowym),

l_p - rozpiętość przęsła, w m,

a_{iz} - długość łańcucha izolatorów, w m,

a_{or} - odstęp między przewodem odgromowym a roboczym w środku przęsła, w m,

$k_u \cong 0,3 \dots 0,6$ - współczynnik sprzężenia przewodów odgromowego i roboczego, uwzględniający ulot dynamiczny,

$\eta_s \cong 0,015 \bar{E}_s - 0,04$ - prawdopodobieństwo wyładowania łukowego przy uderzeniu pioruna w słup (rys. 1, przypadek 1),

$\eta_0 \cong 0,015 \bar{E}_0 - 0,04$ - prawdopodobieństwo wyładowania łukowego w przęsło przewodu odgromowego (rys. 1, przypadek 2),

$\eta_r \cong 0,015 \bar{E}_r - 0,04$ - prawdopodobieństwo wyładowania łukowego przy uderzeniu pioruna w przęsło przewodu roboczego (rys. 1, przypadek 3),

$\bar{E}_s \cong \bar{E}_r \cong \frac{U_m}{a_{iz} \sqrt{3}}$ - średnie natężenie pola elektrycznego dla

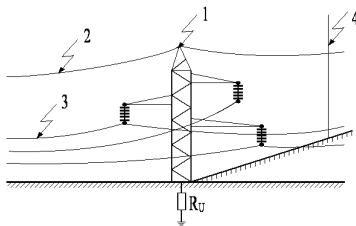
łańcucha izolatorów w warunkach roboczych, w kV/m;

$\bar{E}_0 \cong \frac{U_m}{a_{or} \sqrt{3}}$ - średnie natężenie pola elektrycznego dla odstępu

powietrznego przewód roboczy - przewód odgromowy w warunkach roboczych, w kV/m;

U_m - najwyższe napięcie sieci, w kV.

Aby dokładnie ocenić stopień zagrożenia linii napowietrznych WN spowodowanego składowymi napięciami (przebiegami) pojawiającego się wskutek bezpośrednich uderzeń piorunów, należy - korzystając z wzoru (1) - uwzględnić prawdopodobieństwo jednoczesnego przekroczenia wartości szczytowych i stromości czoła udarowych prądów piorunowych, dopuszczalnych dla rozpatrywanych izolatorów lub łańcuchów izolatorów oraz odstępów powietrznych przewód roboczy - przewód odgromowy.



Rys. 1. Charakterystyczne przypadki powstawania przepięć przy uderzeniu pioruna: 1 - uderzenie w słup, 2 - uderzenie w środek przęsła przewodu odgromowego, 3 - uderzenie w przewodność ochrony odgromowej, 4 - uderzenie obok linii; R_u - rezystancja uziemienia słupa

Fig. 1. Characteristic cases of overvoltages due to lightning stroke: 1 - stroke into a tower, 2 - stroke into the centre of lightning conductor span, 3 - stroke into the phase conductor (resulting from a failure of lightning protection); 4 - stroke into the area around the line; R_u - earth resistance of a tower.

2. Ocena narażenia przepięciowego

W celu określenia wartości parametrów opisujących zagrożenie izolacji wysokonapięciowych linii napowietrznych, spowodowane bezpośrednimi uderzeniami piorunów wykonano obliczenia dla

linii napowietrznych WN, wyposażonych w łańcuchy izolatorów o zróżnicowanej długości, a wyniki zestawiono w tablicy 1. Jakość ochrony odgromowej rozpatrywanych linii oceniono na podstawie - sformułowanej w literaturze [2, 4, 5] i skonfrontowanej z doświadczeniem praktycznym - umownej skali odporności burzowej. Przyjęto z dużym przybliżeniem, że jeżeli roczny wskaźnik wszystkich wyłączeń burzowych $N_{wobl} \leq 1$, to ochrona odgromowa jest bardzo dobra, gdy $1 < N_{wobl} \leq 10$, ochrona odgromowa jest dobra lub dostateczna, natomiast gdy $N_{wobl} > 10$, to ochrona odgromowa powinna być uznana za niewystarczającą.

Otrzymane wyniki potwierdzają odporność burzową linii napowietrznych WN na poziomie zadowalającym (lp. 9, 10, 11 w tabl. 1).

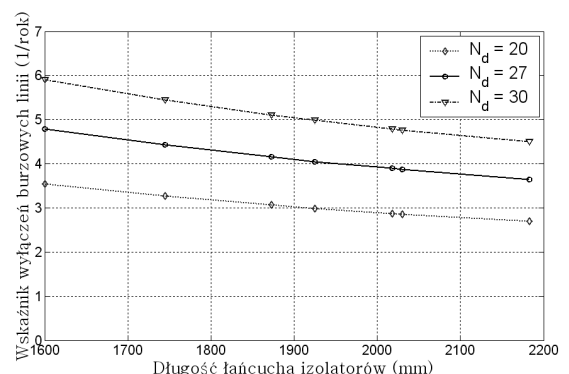
Tab. 1. Wyniki obliczeń przykładowych parametrów służących do oceny stopnia narażenia linii napowietrznych 110 kV wskutek bezpośrednich uderzeń piorunów

Tab. 1. Calculation results for exemplary parameters used for the assessment of hazard degree posed to 110 kV overhead line as a result of direct lightning stroke

Lp.	Parametr obliczeniowy	Linia napowietrzna o napięciu znamionowym $U_n = 110$ kV							
		Długość łańcucha izolatorów (w mm)							
		1600	1745	1873	1925	2018	2030	2183	
1	I_{sd} w kA	41,52							
2	s_{id} w kA/ μ s	50,5							
3	I_{rd} w kA	12,2							
4	$P(I_{sd})$	0,33							
5	$P(s_{id})$	0,31							
6	$P(I_{rd})$	0,88							
7	η_s (η_r)	0,638	0,581	0,539	0,523	0,497	0,494	0,460	
8	η_0	0,157							
9	N_{wobl}	dla $N_d = 20$	3,54	3,27	3,07	2,99	2,87	2,86	2,70
10		dla $N_d = 27$	4,79	4,43	4,16	4,05	3,90	3,87	3,65
11		dla $N_d = 30$	5,90	5,45	5,11	4,99	4,79	4,76	4,50

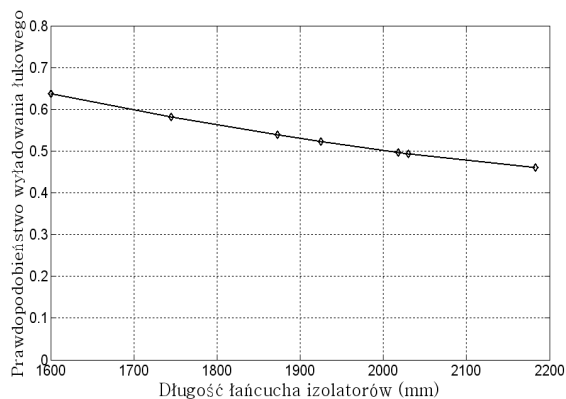
Dodatkowe założenia:
 $l_p = 350$ m; $a_{or} = 5,5$ m; $h_p = 35$ m; $R_{zi} = 10$ Ω ; $k_u = 0,3$; $\psi_s = 0,5$; $\psi_0 = 0,4$; $\psi_r = 0,01$.

Z obliczeń wynika również, że wskaźnik wyłączeń burzowych spowodowanych uderzeniem w przewód roboczy (z ominięciem przewodu odgromowego) jest na poziomie kilku tysięcznych, co świadczy o tym, że takie zdarzenie występuje bardzo rzadko. Obliczenia wykonano dla trzech różnych poziomów izokeraicznych N_d , występujących w obszarze Polski [9].



Rys. 2. Wpływ długości łańcucha izolatorów linii WN na wartość wskaźnika wyłączeń burzowych linii N_{wobl} dla różnych obszarów Polski ($N_d = 20 \dots 30$)

Fig. 2. Effect of the insulator string length in HV line on the index of storm breaks of lines N_{wobl} for various areas of Poland ($N_d = 20 \dots 30$)



Rys. 3. Wpływ długości izolatora (łańcucha izolatorów) na prawdopodobieństwo wyładowania łukowego przy uderzeniu pioruna w słup lub w przesłono przewodu roboczego linii

Fig. 3. Effect of the insulator length (insulator string) on arc discharge probability for pole or span of a line live conductor

W każdym przypadku otrzymane wartości wskaźnika wyłączeń burzowych potwierdzają, że zastosowana ochrona odgromowa w liniach wysokiego napięcia jest dobra (skuteczna). Zmienność wskaźnika wyłączeń burzowych w zależności od liczby dni burzowych w ciągu roku przedstawiono na rys. 2, a wpływ długości izolatora (łańcucha izolatorów) na prawdopodobieństwo wyładowania łukowego ilustruje rys. 3.

Z uwagi na probabilistyczny charakter parametrów prądu pioruna wyniki obliczeń przedstawione w tabelicy 1 oraz graficznie na rysunku 3 są przybliżone i zwykle zawyżone, ale pozwalają oszacować zagrożenie burzowe linii napowietrznych oraz – pośrednio – skuteczność zastosowanej ochrony odgromowej.

3. Wpływ wybranych czynników na poziom narażenia przepięciowego

Wśród wielu czynników mających wpływ na poziom narażenia przepięciowego sieci elektroenergetycznych SN i WN istotną rolę odgrywają konfiguracja sieci i sposób połączenia z ziemią punktu neutralnego. Z doświadczeń praktycznych wynika, że przepięcia powstające wskutek przepływu prądu zwarcia (w szczególności zwarcia jednofazowego) mogą stanowić zagrożenie dla izolacji urządzeń sieciowych [10].

Do środków służących ograniczeniu przepięć w sieciach SN i WN odpowiadających wymienionym czynnikom należą: podział sieci (rozcinać sieci dwu- i wielostronnie zasilanych, sekcjonowanie szyn w rozdzielniach sieciowych) powodujący ograniczenie poziomu mocy zwarciowej i wybór sposobu połączenia punktu neutralnego z ziemią, zapewniający ograniczenie prądu nieskompensowanego do wartości kilku amperów.

Opanowanie prądów zwarcia – z uwagi na wytrzymałość łączeniową, cieplną i dynamiczną aparatury, konstrukcji rozdzielni, kabli i przewodów roboczych i odgromowych linii napowietrznych – wymaga zastosowania rozwiązań polegających na odpowiednim ukształtowaniu struktury sieci. Dokonując przełączeń w zbiorze elementów sieci zmianie ulega droga przepływu prądu zwarcia, a tym samym zmienia się wartość impedancji pętli zwarciowej, w którym płynie prąd zwarcia.

Wartości prądów zwarciowych, a także przepięcia towarzyszące tym zwarciom, zależą również od sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego sieci (punktu gwiazdowego transformatorów pracujących w sieci). W krajowym systemie elektroenergetycznym ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym pracują sieci o napięciu znamionowym 110, 220 i 400 kV oraz sieci niskiego napięcia. Sieci średnich napięć pracują

z punktem neutralnym izolowanym albo uziemionym przez reaktancję lub rezystancję.

Największe zagrożenie stwarzają zwarcia doziemne o łuku przerywanym, gdyż powodują przepięcia o dużych wartościach szczytowych [10]. Dotyczy to w szczególności sieci izolowanych i pracujących z punktem neutralnym uziemionym przez indukcyjność.

4. Podsumowanie

Ocena skutków oddziaływania przepięć w sieciach elektroenergetycznych SN i WN potwierdziła odporność burzową linii wysokiego napięcia na poziomie zadowalającym oraz wykazała potrzebę ograniczania wartości szczytowych charakteryzujących przepięcia do takich, które układy izolacyjne są w stanie wytrzymać bez przeskoków lub przebiecia.

Wyniki oszacowania narażenia przepięciowego układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych średniego i wysokiego napięcia pozwalają na podjęcie działań zmierzających do uściślenia zasad doboru odpowiednich środków ochrony obiektów i urządzeń elektroenergetycznych przed przepięciami.

Przeprowadzona ocena wpływu sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego sieci na wartość przepięć występujących podczas zakłóceń w sieciach SN wykazała, że poziom przepięć zagrażający izolacji urządzeń występuje przede wszystkim w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, podczas zwarć doziemnych z łukiem przerywanym.

5. Literatura

- [1] P. Chowdhuri: Response of overhead lines of finite length to nearby lightning strokes. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No 1, 1991, pp.343-341.
- [2] Z. Flisowski: Technika Wysokich Napięć (wyd. 5). WNT, Warszawa 2005.
- [3] Flisowski Z., Kosztaluk R.: Metody redukcji przepięć w sieciach elektrycznych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 11/2001, s. 269-273.
- [4] Z. Gacek: Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami (wyd. 3). Skrypt Pol. Śląskiej nr 2137, Gliwice 1999.
- [5] Z. Gacek: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2006.
- [6] J.L. Jakubowski: Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych. PWN, Warszawa 1968.
- [7] Z. Pohl: Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [8] W. Skomudek: The analysis of overvoltage hazard in selected power network systems. ZN Elektryka Nr 56. Oficyna Wyd. Pol. Opolskiej, Opole 2006.
- [9] W. Skomudek, Z. Gacek: Influence of selected parameters of overvoltages on hazard of insulating systems in MV power lines. Electronics and Electrical Engineering, Nr 2/2006, Lithuania, pp. 88-91.
- [10] W. Skomudek: Analiza i ocena skutków przepięć w elektroenergetycznych sieciach średniego i wysokiego napięcia. Oficyna Wyd. Pol. Opolskiej, Opole 2008.