

Zdobysław Flisowski¹, Romuald Kosztaluk¹

METODY REDUKCJI PRZEPIĘĆ W SIECIACH PRZESYŁOWYCH

Streszczenie: Przedstawiono analizę stosowanych w Polsce metod i środków ograniczania przepięć w sieciach przesyłowych 220 kV i 400 kV z uwzględnieniem również sieci 110 kV. Metody te porównano z metodami stosowanymi w praktyce krajów Unii Europejskiej. W szczególności przeanalizowano: sposób uziemiania punktu neutralnego sieci, ochronę stacji i rozdzielni od uderzeń pioruna, osłonę linii przewodami odgromowymi, zastosowanie zespołów kondensatorów i dławików równoległych oraz korzyści wynikające ze stosowania nowoczesnych technik łączeniowych i indukcyjnych przekładników napięcia.

Słowa kluczowe: Ograniczniki przepięć, ochrona izolacji od przepięć, ochrona sieci od uderzeń pioruna.

1. Wstęp

Metody ograniczania wartości szczytowej i innych parametrów przepięć stosowane w Polsce w sieciach 110 kV, 220 kV i 400 kV ukształtowały się - podobnie jak w sieciach rozdzielczych - w wyniku wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych i współpracy międzynarodowej.

W artykule dokonano analizy podstawowych sposobów ograniczania przepięć w sieciach 110 kV i wyższych napięć, stosowanych w Polsce oraz w krajach Unii Europejskiej. Zagadnienia dotyczące ograniczników przepięć, zwanych tu dla uproszczenia odgromnikami, instalowanych w sieciach przesyłowych i rozdzielczych omówiono łącznie w publikacji [2].

Niniejszy referat obejmuje w szczególności zagadnienia: uziemienia punktu neutralnego sieci, ochrony stacji i rozdzielni od bezpośrednich uderzeń pioruna oraz stosowania przewodów odgromowych do osłony linii, zespołów kondensatorów i dławików równoległych, wyłączników wyposażonych lub współpracujących z urządzeniami do redukcji przepięć, łączy sterowanych, indukcyjnych przekładników napięcia i odgromników zaworowych.

2. Uziemienie punktu neutralnego sieci

Analizy teoretyczne potwierdzone wieloletnimi doświadczeniami eksploatacyjnymi wykazały, że skutecznym sposobem redukcji przepięć w sieciach 110 kV i wyższych napięć jest uziemienie punktu neutralnego sieci. Rozwiązanie to jest obecnie powszechnie stosowane we wszystkich krajach w nowo budowanych sieciach przesyłowych i w sieciach na napię-

¹ Politechnika Warszawska, Zakład Techniki Wysokich Napięć, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

cie 110 kV. Uprzednio w krajach, w których szczególnie ceniono skutki działania dławików Petersena, łączono niekiedy punkt neutralny sieci 110 kV z ziemią przez te dławiki. Powodowało to wzrost wymagań dotyczących wytrzymałości izolacji sieci. Poprawa charakterystyk ochronnych odgromników przyczyniła się do tego, że nie stosuje się już dławików Petersena w nowo budowanych sieciach 110 kV.

Wybór miejsca i liczby transformatorów, których punkt neutralny jest bezpośrednio łączony z uziemieniem stacyjnym, jest wynikiem starannej analizy. Jej celem jest uzyskanie kompromisu między sprzecznymi wymaganiami. Należy do nich ograniczenie parametrów przepięć dorywczych, pojawiających się przy jednofazowych zwarcia z ziemią, oraz ograniczenie wartości prądu zwarciegowego.

Przy rozpatrywaniu zwarć z ziemią [3], [4] uwzględnia się obecnie przepięcia występujące podczas: jednofazowych zwarć z ziemią, nagłych odciążen urządzeń prądowców (generatorów) w elektrowniach, odciążen powodowanych eliminacją zwarć i wskutek efektu Ferrantiego. Analiza tego rodzaju przepięć prowadzi do wniosku, że w sieciach krajowych 110 kV, 220 kV i 400 kV jest właściwe przyjmowanie wartości współczynnika zwarcia doziemnego

$$k_z = \frac{U_T \sqrt{3}}{U_s} \quad (1)$$

(przy czym: U_T – wartość skuteczna przepięć dorywczych, U_s – wartość skuteczna najwyższego napięcia sieci) oraz podanych w tablicy 1 czasów występowania przepięć.

Tablica 1. Współczynniki zwarcia doziemnego k_z i czasy trwania zwarcia t_z proponowane do stosowania w koordynacji izolacji sieci 110 kV, 220 kV, 400 kV wg [2], [3], [4].

1	Napięcie znamionowe sieci U_n		kVsk	110	220	400
2	Najwyższe napięcie sieci U_s		kVsk	123	245	420
3	Sieć	współczynnik k_z	-	1,4	1,3	1,3
		przyjmowany czas t_z	s	1	1	1
4	Rozdzielnia elektrowni*, koniec linii długiej	współczynnik k_z	-	1,5	1,4	1,4
		przyjmowany czas t_z	s	3	3	3
* między generatorem a wyłącznikiem powodującym nagłe odciążenie generatora.						

Współczynnik zwarcia doziemnego k_z wyznacza się w zależności od wartości ilorazu składowych symetrycznych

$$X_0/X_b \quad R_0/X_b \quad R_l/X_l \quad (2)$$

przy czym: X_0 , R_0 – reaktancja i rezystancja dla składowej zerowej, X_l , R_l – reaktancja i rezystancja dla składowej zgodnej [4].

W obliczeniach uwzględnia się rezystancję uziemienia stacyjnego. Praktyka i sposób uziemiania punktu neutralnego sieci 110 kV – 400 kV w Polsce i w krajach Unii Europejskiej są podobne.

3. Ochrona stacji i rozdzielni od bezpośrednich uderzeń pioruna

Sposoby wykonywania urządzeń piorunochronnych w stacjach i w rozdzielniach 110 kV, 220 kV i 400 kV są podobne do stosowanych w sieciach rozdzielczych [1]. Również w tym zakresie napięć mogą wystąpić zakłócenia lub nawet uszkodzenia podziemnych instalacji sterowania i sygnalizacji, powodowane spadkami napięć od bezpośrednich uderzeń piorunów. Ze względu na niebezpieczne awarie sieciowe w Polsce i w wielu innych krajach nie stosuje się zwodów poziomych w stacjach napowietrznych, ograniczając się wyłącznie do zwodów pionowych, zwykle odsuniętych od konstrukcji wsporczych szyn i innych urządzeń stacyjnych.

4. Przewody odgromowe linii napowietrznych

W Polsce linie 220 kV i 400 kV od początku ich budowy były wyposażane w przewody odgromowe, chroniące izolację linii od skutków uderzeń pioruna i izolację stacyjną od przepięć doprowadzanych przewodami roboczymi. Po drugiej wojnie światowej w liniach 110 kV stosowano, ze względów oszczędnościowych przewody odgromowe tylko w kilkusetmetrowych podejściach do stacji. W celu poprawy ochrony odgromowej urządzeń stacyjnych stosowano układ dławikowy S. Szpora. Układ ten był instalowany w polach liniowych stacji 110 kV i składał się z dławika szeregowego o indukcyjności 1 mH oraz z iskiernika, instalowanego po stronie liniowej, i odgromnika zaworowego, instalowanego po stronie stacyjnej. Przewody uziemiające iskiernika i odgromnika były łączone z uziemieniem stacyjnym. Badania eksperymentalne wykazały dobrą skuteczność tego układu w ochronie od przepięć doprowadzanych do stacji [5].

Budowane obecnie w Polsce linie 110 kV są wyposażane na całej długości w przewody odgromowe. W innych krajach stosowanie przewodu odgromowego w takich liniach zależy od liczby dni burzowych oraz od rodzaju stosowanych słupów (drewno, żelbet, stal).

W Polsce stosuje się z bardzo dobrym skutkiem kąty osłony zewnętrznej $\alpha \leq 20^\circ$ i osłony wewnętrznej $\beta \leq 60^\circ$ [4].

5. Kondensatory równoległe

Zespoły (baterie) kondensatorów równoległych (ang. shunt capacitors) są stosowane w stacjach prądu przemiennego i prądu stałego oraz w wysokonapięciowych instalacjach zakładów przemysłowych i użytkowników pobierających znaczne ilości energii. Moce zainstalowanych kondensatorów osiągają niekiedy 30 % mocy transformatorów.

Kondensatory umożliwiają poprawę kształtu i innych parametrów napięcia w miejscu poboru energii, gdy zespół kondensatorów jest właściwie dobrany, zmniejszenie strat energii dzięki zmniejszeniu prądu biernego i całkowitego oraz inne korzyści [6].

Powyższe zalety są okupione znacznymi wartościami przepięć, powstających przy łączeniu baterii kondensatorów równoległych. Częstotliwości przepięć przy łączeniu tych urządzeń osiągają 300 - 900 Hz. Ich przyczyną są zapłony w komorach wyłączników. Do łączenia kondensatorów równoległych najlepiej nadają się wyłączniki próżniowe i z sześciofluorkiem siarki (SF_6), a w mniejszym stopniu wyłączniki ze sprężonym powietrzem. Przepięcia osiągają 1,8 do 2,6 wartości szczytowej napięcia doziemnego sieci i stwarzają zagrożenie dla odgromników, narażonych na częste odprowadzanie prądów wyładowczych o znacznych wartościach [6].

Przebiecia powstają zarówno przy załączaniu baterii kondensatorów, jaki i przy ich odłączaniu. Mogą one powodować: uszkodzenia izolacji, niepożądane działanie odgromników, zakłócenia w pracy wyłączników, urządzeń sterowania i zabezpieczeń oraz czułych urządzeń elektronicznych [7].

W Europie zespoły kondensatorów stosuje się w sieciach i instalacjach na napięcie od 3 kV do 525 kV w takich krajach jak: Belgia, Francja, Holandia, Niemcy, Rosja, Wielka Brytania, Włochy [7]. W Polsce baterie kondensatorów są instalowane głównie w sieciach średnich napięć zakładów przemysłowych.

6. Dławiki równoległe

Dławiki równoległe (ang. shunt reactors) spełniają w sieciach przesyłowych podobną rolę w regulacji napięcia jak zespoły kondensatorów. Dławiki są instalowane zwykle w rozdzielniach, do których doprowadza się energię linią o znacznej długości. Przed kilkunastu laty przebieciom powstającym przy łączeniu dławików równoległych poświęcano znaczną uwagę [7].

Łączenie dławików może powodować pojawianie się prądów załączeniowych (ang. *in-rush currents*) o dużej asymetrii i względnie dużej stałej czasowej. Zjawiska te mogą prowadzić do zakłóceń w pracy zabezpieczeń i do uszkodzenia izolacji dławików.

Przy odłączaniu dławików mogą wystąpić przebiecia powodowane ucięciem prądu (ang. *chopping overvoltages*). Przebiecia te osiągają wartości jak przy łączeniu kondensatorów równoległych i mogą powodować uszkodzenie odgromników wskutek częstego przepływu prądów wyładowczych o znacznej wartości [7].

Dławiki równoległe są stosowane w sieciach przesyłowych w wielu krajach. W Polsce pracują 4 zespoły dławików w sieci 400 kV, każdy o mocy 50 MVA.

7. Wyłączniki z urządzeniami do redukcji przebiegów łączeniowych

Zagadnieniom wyłączników wyposażonych w urządzenia umożliwiające ograniczanie przebiegów łączeniowych (Rys. 1) lub współpracujących z takimi urządzeniami poświęca się obecnie znaczną uwagę [6], [9]. Wynika to m.in. z poszukiwania środków i sposobów zmniejszenia parametrów przebiegów, występujących przy częstym łączeniu w ciągu doby zespołów kondensatorów i dławików równoległych.

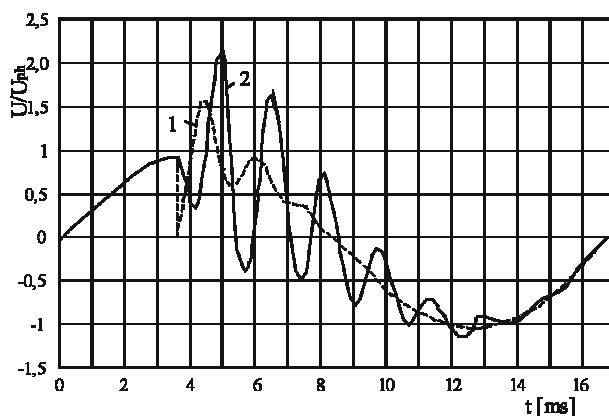
W celu ograniczenia parametrów przebiegów stosuje się w wyłącznikach [6]:

- dławiki indukcyjne od kilkuset μH do kilkunastu mH, włączane razem z kondensatorami równoległymi;
- rezystory (o wartości od 100 Ω do 400 Ω) w komorach wyłączników, włączane na kilkanaście ms w chwili zamykania lub otwierania styków;
- cewki indukcyjne (o indukcyjności od 10 mH do 40 mH), włączane jak rezystory.

8. Łączenia sterowane

Technika łączeń sterowanych (ang. *controlled switching*) polega na zastosowaniu urządzeń elektronicznych (sterowników), wybierających chwilę zamknięcia lub otwarcia styków wyłącznika, ustalaną względem przebiegu napięcia lub prądu. Obecnie uzyskuje się dokładność $\pm 1,5$ ms w stosunku do zadanej chwili łączenia. Z analiz podanych w publikacji [9] wynika, że obecnie, przy zastosowaniu omawianej techniki, jest możliwe skuteczne ogra-

niczanie przepięć podczas łączeń baterii kondensatorów i dławików równoległych, nieobciążonych transformatorów i innych urządzeń, gdy występują małe prądy pojemnościowe i indukcyjne. Dzięki temu uzyskuje się zmniejszenie narażenia układów izolacyjnych na przepięcia, zwiększenie trwałości mechanicznej urządzeń, a także zmniejszenie narażeń odgromników na uszkodzenia.



Rys. 1. Przepięcia doziemne: 1) na zaciskach łączonej baterii kondensatorów i 2) na szynach po stronie sieci.

Powyższe zalety są jednak okupione znacznymi kosztami urządzeń i układów pomocniczych.

Zwraca się uwagę, że prąd załączeniowy (ang. *inrush current*), występujący przy łączeniu nieobciążonego transformatora, może wpływać niekorzystnie na obwody ochrony przekątnikowej, a nawet może spowodować uszkodzenie transformatora [9]. Zjawiska te nie występują, gdy prąd załączeniowy jest ograniczony do wartości prądu znamionowego, co obecnie jest już osiągalne.

9. Indukcyjne przekładniki napięcia

Indukcyjne przekładniki napięcia, instalowane w stacjach, spełniają korzystną rolę w ograniczaniu wartości przepięć łączeniowych, gdyż umożliwiają przepływ do ziemi ładunku elektrycznego, wywołanego przepięciami, i obniżenie wartości przepięć zarówno doziemnych, jak i międzyfazowych. Zalet takich nie wykazują przekładniki pojemnościowe, nowoczesne przekładniki optoelektroniczne i przekładniki prądowe.

10. Odgromniki zaworowe

Odgromniki zaworowe (iskiennikowe) zainstalowane w stacjach i rozdzielniach do ochrony izolacji fazowej i izolacji punktu neutralnego transformatorów, a także do ochrony innych urządzeń, spełniają pożyteczną rolę, podobnie jak w sieciach rozdzielczych. Obecnie są one wycofywane w miarę jak ulegają naturalnemu i awaryjnemu zużyciu i są zastępowane odgromnikami tlenkowymi.

11. Wnioski

- Uziemienie punktu neutralnego sieci 110 kV i wyższych napięć pozwoliło na obniżenie parametrów przepięć i stosowanie układów izolacyjnych o rozsądnie zmniejszonej wytrzymałości elektrycznej.
- W analizach koordynacji izolacji sieci 110 kV, 220 kV i 400 kV jest uzasadnione przyjmowanie współczynników zwarcia doziemnego k_z i czasu trwania zwarcia doziemnego t_z o wartościach podanych w tablicy 1.
- Stosowanie przewodów odgromowych w krajowych liniach napowietrznych 110 kV i wyższych napięć przyniosło dobre skutki.
- Obserwacja doświadczeń zagranicznych upoważnia do przewidywania rozwoju zastosowań kondensatorów i dławików równoległych oraz nowoczesnych technik łączeniowych (np. łączy sterowanych) w sieciach elektrycznych.

Literatura

- [1] **Kosztaluk R., Flisowski Z., Kuca B.:** *Sposoby ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych.* EUT'2001.
- [2] **Kosztaluk R., Flisowski Z.:** *Ekspansja tlenkowych ograniczników przepięć w sieciach elektrycznych.* EUT'2001.
- [3] **Flisowski Z., Kosztaluk R.:** *Współczesne metody koordynacji izolacji.* Przegląd Elektrotechniczny nr 2/1998, s. 36 - 40.
- [4] **Kosztaluk R., Flisowski Z.:** *Koordynacja izolacji polskich sieci wysokich napięć.* Przegląd Elektrotechniczny nr 2/1998, s. 41 - 45.
- [5] **Kosztaluk R.:** *Skuteczność układów dławikowych Szpora do ochrony odgromowej rozdzielni 15 ... 110 kV.* Przegląd Elektrotechniczny nr 7/1967, s. 286 - 290.
- [6] CIGRE WG 13.04: *Shunt Capacitor Bank Switching – Stresses and Test Methods.* First Part: Electra No 182, Febr. 1999, p. 165 - 190. Second Part: Electra No 183, April 1999, p. 13 - 41.
- [7] CIGRE WG 13.02 – Switching Equipment: *Interruption of small inductive currents: Chapter 4: Reactor Switching. Part A: General and Specific Theory.* Electra No 101, July 1985, p. 11 - 39. *Part B: Limitation of overvoltages and testing.* Electra No 113, July 1987, p. 51 - 74.
- [8] CIGRE WG 13.07 – *Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers. First Part:* Electra No 183, April 1999, p. 43 - 73. *Second Part:* Electra No 185, August 1999, p. 37 - 59.

METHODS OF REDUCTION OF OVERVOLTAGES IN TRANSMISSION NETWORKS

Summary: The analysis of methods and measures applied in Poland for limitation of overvoltages in transmission networks 220 kV and 400 kV as well as in networks 110 kV has been presented. These methods have been compared with those applied in the practice of European Union countries. In particular the earthing way of network neutral, protection of power and switching stations against lightning strikes, lines shielding by ground wires, application of shunt capacitors and shunt reactors, advantages resulting from application of modern switching technologies and inductive voltage transformers have been analysed.