

Marcin SZEWCZYK¹
Wojciech PIASECKI²
Mariusz STOSUR³
Tomasz KUCZEK⁴
Przemysław BALCEREK⁵
Marek FLORKOWSKI⁶

WYBRANE ASPEKTY ANALIZY NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH STACJI WYSOKICH I NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ TYPU GIS POWSTAŁYCH W WYNIKU WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH

W artykule przedstawiono wybrane aspekty analizy koordynacji izolacji wykorzystywane w praktyce projektowania stacji wysokich i najwyższych napięć. Omówiono główne założenia typowych analiz przepięciowych oraz przedstawiono metody obliczeniowe wspomagające proces poprawnego doboru środków ochrony odgromowej. Przedstawiono metody modelowania narażeń przepięciowych oraz modele poszczególnych elementów systemu, istotnych z punktu widzenia koordynacji izolacji. Szczególny nacisk położono na uwzględnienie zjawisk nieliniowych oraz charakterystyk częstotliwościowych, pozwalających na uzyskanie wymaganej dokładności obliczeń. Przedstawiono wyniki przykładowej analizy wpływu długości linii kablowej na wartości przepięć występujących w miejscu zainstalowania transformatora. Analizę przepięciową przeprowadzono dla schematu jednokresowego typowej stacji rozdzielczej wysokich napięć w izolacji gazowej typu SF₆, dla której przyjęto typowe parametry konstrukcyjne linii napowietrznych i kablowych,

¹ Autor do korespondencji: Marcin Szewczyk, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 420, marcin.szewczyk@pl.abb.com.

² Wojciech Piasecki, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 123, wojciech.piasecki@pl.abb.com.

³ Mariusz Stosur, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 108, mariusz.stosur@pl.abb.com.

⁴ Tomasz Kuczek, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 417, tomasz.kuczek@pl.abb.com.

⁵ Przemysław Balcerek, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 179, przemyslaw.balcerek@pl.abb.com.

⁶ Marek Florkowski, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków, Starowiślna 13a, 31-038, PL, +48 12 4334 104, marek.florkowski@pl.abb.com.

parametry konstrukcji wsporczych linii napowietrznych, oraz modele aparatów i urządzeń stacji wraz z doprowadzeniami, w szczególności modele transformatorów oraz ograniczników przepięć. Dla ograniczników przepięć dokonano oceny skuteczności i niezawodności ograniczników, związanej ze zdolnością ograniczników do pochłaniania i skutecznego odprowadzania energii wydzielanej podczas zadziałania, oraz pozwalającej na weryfikację poprawności doboru ograniczników dla pracy w danych warunkach przepięciowych. Przedstawiona w pracy analiza wskazuje, że połączenia kablowe mogą w znaczny sposób zmieniać narażenia powstałe w wyniku przepięć atmosferycznych w linii dochodzące do stacji, a tym samym wpływać na narażenia napięciowe, jakim w trakcie eksploatacji poddawane są układy izolacyjne aparatów i urządzeń.

Słowa kluczowe: koordynacja izolacji, przepięcia piorunowe, ochrona odgromowa, rozdzielnica GIS, wysokie i ultra wysokie napięcia, HV, UHV

1. Wstęp

Podstawą koordynacji izolacji aparatów i urządzeń stacji rozdzielczych wysokich i najwyższych napięć są przebiegi czasowe przepięć powstałych w warunkach wyładowań piorunowych w linii dochodzące do stacji [1]. Obliczenia numeryczne przebiegów przepięć wspomagają proces koordynacji izolacji w celu zapewnienia niezawodnej pracy systemu w zróżnicowanych warunkach przepięciowych i przetężeniowych.

W artykule przedstawiono wybrane aspekty metody analizy narażeń przepięciowych w stacjach wysokich i najwyższych napięć, powstałych w wyniku wyładowań atmosferycznych. W pierwszej części pracy zawarto uwagi wprowadzające, ogólne dla koordynacji izolacji: jej metody, zasad obliczeniowych oraz rodzajów przeprowadzanych, typowych analiz. W drugiej części artykułu przedstawiono metody modelowania w odniesieniu do narażeń napięciowych powstałych w wyniku wyładowań atmosferycznych w linii dochodzące do stacji. Następnie przedstawiono wyniki analizy wpływu długości linii kablowej na wartości szczytowe przepięć występujących w miejscu zainstalowania transformatora. Artykuł zakończono podsumowaniem i wnioskami.

1.1. Metoda koordynacji izolacji

W warunkach zakłóceń przepięciowych, wartości szczytowe przebiegów przepięć obniżane są poprzez zastosowanie właściwie dobranych środków ochrony odgromowej. Różnica pomiędzy poziomem ochrony, wynikającym z charakterystyk środków ochrony odgromowej, a poziomem wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych, stanowi o wielkości tzw. marginesu koordynacyjnego. Dobór szerokości marginesu koordynacyjnego uwarunkowany jest wymaganym zapasem wytrzymałości elektrycznej dla zapewnienia określonej niezawodności układu izolacyjnego. Zapas wytrzymałości uwzględnia: 1) śro-

dowiskowe oraz 2) systemowe warunki eksploatacji aparatów, 3) zmiany parametrów układu izolacyjnego w czasie oraz 4) rozrzut technologiczny. Wraz ze wzrostem przyjętego zapasu wytrzymałości następuje przewymiarowanie układu i wzrost wynikającego stąd marginesu koordynacyjnego. Prowadzi to do zwiększenia niezawodności układu przy jednocześnie jego większym koszcie.

Uwzględniając powyższe ogólne zależności, celem koordynacji izolacji jest zapewnienie optymalnej niezawodności układu, a tym samym spełnienie wymagań stawianych niezawodności układu przy jednoczesnym zapewnieniu jego minimalnych kosztów. Optymalizacji podlega zarówno dobór konstrukcji układów izolacji, jak i zapewnienie optymalnej w powyższym znaczeniu konfiguracji systemu. Optymalizacja układów izolacji odnosi się w głównej mierze do izolatorów liniowych, a zwłaszcza doboru ich długości oraz do izolacji aparatów i urządzeń stacji. Wśród czynności związanych z optymalizacją konfiguracji systemu można wymienić sposób uziemienia konstrukcji wsporczych linii napowietrznych dochodzących do stacji, stosowanie linii kablowych oraz decyzję co do liczby i miejsca zainstalowania ograniczników przepięć.

Z powyższych uwag wynika, że podstawowe rodzaje analiz koordynacji izolacji, poza analizą liczby i miejsca zainstalowania ograniczników przepięć, uwzględniają różne wartości rezystancji systemu uziemienia oraz różne długości łańcuchów izolatorów. W szczególnych przypadkach analizowane są również nietypowe warunki powstawania narażeń przepięciowych, takie jak w przypadku odbicia fali przepięciowej od otwartego układu styków wyłącznika. W przypadku analizy związanej z doбором ograniczników przepięć, wykonuje się obliczenia dla układu typowego (tj. ograniczniki zainstalowane w polach liniowych i w polach transformatorów bezpośrednio przy zaciskach przyłączowych transformatorów) oraz analizę potrzeby stosowania ograniczników dodatkowych. W przypadku ograniczników przepięć w izolacji powietrznej analizuje się różne warianty ich połączeń do elementów stacji.

Nakreślona powyżej metoda oparta na marginesie koordynacyjnym jest podstawowa dla koordynacji izolacji w jej ujęciu deterministycznym. Uzupełniająca ją ujęcie statystyczne, pozwala uwzględnić fakt, że nawet przy znacznym przewymiarowaniu układu izolacyjnego istnieje określone ryzyko, prawdopodobieństwo, jego uszkodzenia.

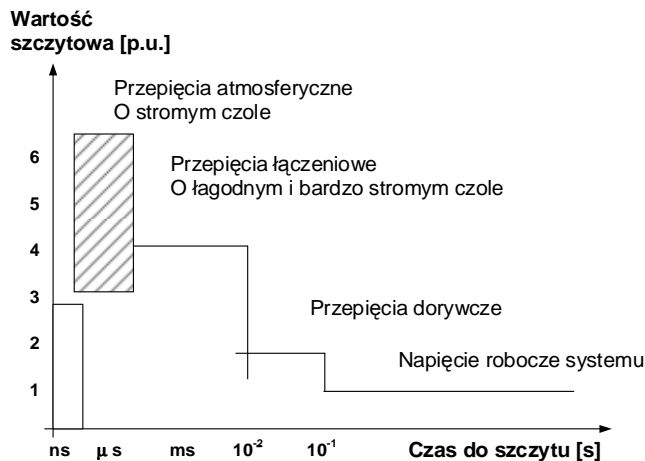
Metoda koordynacji izolacji oparta jest na metodzie obliczeniowej, która polega na sformułowaniu, a następnie rozwiązaniu układu równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych, stanowiących model wybranego fragmentu systemu elektroenergetycznego. Do obliczeń wykorzystywane są dedykowane programy symulacyjne. Celem obliczeń jest określenie spodziewanych narażeń napięciowych układów izolacyjnych poszczególnych elementów systemu, przy założonych wymuszeniach odwzorowujących zakłócenia występujące w trakcie pracy systemu. Wykorzystuje się w tym celu modele narażeń przepięciowych oraz modele poszczególnych elementów systemu, istotnych dla scharakteryzo-

wania analizowanych zjawisk. Uwzględnienie nieliniowości oraz charakterystyk częstotliwościowych przy modelowaniu elementów systemu o kluczowym znaczeniu dla koordynacji izolacji, takich jak ograniczniki przepięć, pozwala na uzyskanie wymaganej dokładności obliczeń.

1.2. Klasyfikacja przepięć

Przepięcia stanowią podstawowy czynnik decydujący o wymiarowaniu układów izolacyjnych i podlegają klasyfikacji, poprzez którą wyraża się różnorodność zjawisk fizycznych zachodzących w systemie elektroenergetycznym (zob. Rys. 1).

Wśród narażeń przepięciowych pochodzenia atmosferycznego wyróżnia się przepięcia atmosferyczne pośrednie i przepięcia atmosferyczne bezpośrednie. W przypadku przepięć pośrednich, kanał piorunowy występuje w oddaleniu od linii, zaś mechanizm powstawania przepięć w liniach lub elementach stacji opiera się na zjawisku indukcji. Poziom indukowanych przepięć nie stanowi zagrożenia dla układów izolacyjnych linii jak i stacji, natomiast może stanowić zagrożenie dla obwodów wtórnych, w tym stacyjnych układów automatyki zabezpieczeniowej. Przepięcia atmosferyczne bezpośrednie powodowane są uderzeniem pioruna 1) w przewód odgromowy linii napowietrznej, 2) w elementy konstrukcji wsporczych (stwarzając wówczas ryzyko przeskoku tzw. odwrotnego do przewodów fazowych linii) oraz 3) w przewód fazowy linii.



Rys. 1. Klasyfikacja przepięć w systemie elektroenergetycznym wg CIGRE [2]; obszarem zakreślonym oznaczono przepięcia powstałe wskutek wyładowań atmosferycznych

Fig. 1. Transients in power system according to CIGRE [2]; dashed box indicates lightning overvoltages

W przypadku stacji wysokich i najwyższych napięć przyjmuje się, że dla prawidłowo wykonanej instalacji odgromowej stacji wyładowania bezpośrednie w aparaty i urządzenia stacji są niemożliwe. Dodatkowo przyjmuje się, że w przypadku wyładowania w instalację odgromową stacji przeskok odwrotny jest niemożliwy – ze względu na znacznie mniejszą rezystancję układów uziomowych instalacji odgromowych stacji niż ma to miejsce w przypadku konstrukcji wsporczych linii napowietrznych.

Oznacza to, że w przypadku układów izolacyjnych obwodów głównych stacji wysokich i najwyższych napięć, narażenia przepięciowe pochodzenia atmosferycznego powstają w wyniku wyładowań piorunowych w linii napowietrzne dochodzące do stacji.

2. Modelowanie narażeń przepięciowych powstałych w wyniku wyładowań atmosferycznych w linii napowietrzne dochodzące do stacji

W świetle powyższych uwag, można wyróżnić trzy czynniki procesu koordynacji izolacji: narażenia przepięciowe, ochrona przepięciowa oraz wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych.

2.1. Przegląd modeli elementów systemu

Modele matematyczne przyjmowane w obliczeniach wspomagających proces koordynacji izolacji powinny więc poprawnie odwzorowywać warunki wymuszeń prowadzących do narażeń przepięciowych, jak również opisywać elementy systemu elektroenergetycznego, w sposób właściwy dla częstotliwości charakteryzujących analizowane zjawiska przepięciowe.

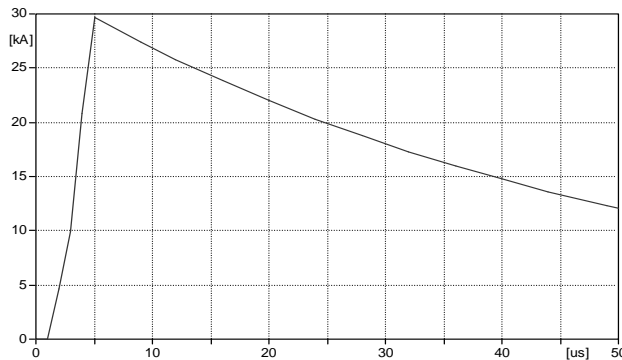
Modele matematyczne wymuszeń zawierają źródła prądowe o zestandaryzowanym kształcie prądu charakterystycznym dla występujących w przyrodzie przebiegów prądu pioruna. Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego zawierają: modele linii napowietrznych i kablowych, modele konstrukcji wsporczych linii napowietrznych (słupów) wraz z układami uziomów, modele aparatów i urządzeń stacji, w tym stacji w izolacji powietrznej oraz stacji w izolacji gazowej wykonanej na bazie sześćfluorku siarki SF₆ (typu GIS), modele szyn zbiorczych i połączeń aparatowych, modele izolatorów liniowych uwzględniające zjawisko zapłonu w przerwie iskrowej izolatora, modele środków ochrony przepięciowej, a wśród nich modele uwzględniające przewody odgromowe linii napowietrznych oraz modele ograniczników przepięć.

2.2. Przebieg prądu pioruna

Narazenia przepięciowe układów izolacyjnych stanowią odpowiedź na wymuszenie prądowe w postaci uderzenia pioruna w linię wprowadzane do stacji. Przepięcia powstałe wskutek wyładowania prądowego związane są z propagacją fal przepięciowych wzdłuż elementów linii i stacji, podlegając wielokrotnym odbiciom i wynikającym stąd wzmocnieniom w węzłach stacji stanowiących punkty nieciągłości impedancji falowych.

Przebieg prądu pioruna odwzorowywany według zaleceń CIGRE [3] opisany jest przy użyciu funkcji dwu-wykładniczej, określonej w cytowanym dokumencie poprzez osobno sparametryzowane kształty czoła oraz grzbietu pioruna.

Model wymuszenia prądowego wykonany w programie numerycznym otrzymuje się poprzez użycie źródła prądowego sterowanego sygnałem określonym omawianymi zależnościami. Przykładowo, w programie EMTP-ATP [10], otrzymanie sterowanego źródła prądowego możliwe jest poprzez wykorzystanie wewnętrznego języka programowania MODELS. Otrzymany w ten sposób przebieg czasowy prądu pioruna, opisany omawianymi zależnościami, przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Przebieg prądu pioruna otrzymany zgodnie z zaleceniami CIGRE [3]

Fig. 2. Current waveform obtained according to CIGRE [3]

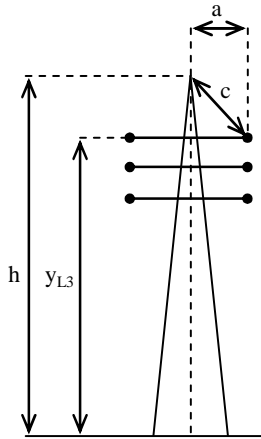
W przypadku uderzenia pioruna w przewód fazowy linii, źródło prądu piorunowego przyłączone jest bezpośrednio do przewodu fazowego, a wartość szczytowa przebiegu prądu określona jest z użyciem elektrogeometrycznego modelu strefy ochronnej. Model ten uwzględnia geometryczną konfigurację linii oraz krytyczną wartość prądu, poniżej której możliwe staje się uderzenie pioruna do przewodu fazowego linii. Postać modelu zaproponowaną przez IEEE [4] określa równanie (1) opisujące wartość szczytową prądu I_m :

$$I_m = \left(\frac{r}{0.67 y_{L3}^{0.6}} \right)^{\frac{1}{0.74}}, \quad (1)$$

gdzie:

$$r = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left[a + \sqrt{a^2 + c^2(\gamma^2 - 1)} \right], \quad \gamma = \left(\frac{h}{y_{L3}} \right)^{0.6}, \quad c = \sqrt{(h - y_{L3})^2 + a^2}, \quad (2)$$

gdzie z kolei zgodnie z Rys. 3: h – jest wysokością konstrukcji wspanoczej od podstawy słuca do punktu zamocowania przewodu odgromowego [m], y_{L3} – jest wysokością zamocowania najwyżej położonego przewodu fazowego [m], c – jest minimalną odległością przewodu fazowego od przewodu odgromowego [m], a – jest odległością pomiędzy przewodem fazowym a osią symetrii słuca [m].



Rys. 3 Konstrukcja wspanocza linii napowietrznej z oznaczeniem wymiarów wykorzystywanych w modelu elektro-geometrycznym

Fig. 3. Overhead line tower with denoted dimensions as used in electro-geometrical model

Dla przykładowej konstrukcji wspanoczej o geometrii przedstawionej na Rys. 3 wyznaczono następujące wartości szczytowe przebiegów prądów udarowych: 27.2 kA dla fazy L3, 13.9 kA dla fazy L2 oraz 12.6 kA dla fazy L1. Do dalszych obliczeń przyjęto wartość 30 kA.

2.3. Przeskok na izolatorze liniowym

W przypadku gdy wartość chwilowa fali przepięciowej w występującej w punkcie zainstalowania izolatora przekracza chwilową wartość wytrzymałości udarowej izolatora liniowego, zwiększa się prawdopodobieństwo przeskoku w przerwie iskrowej izolatora. Zjawisko to może wystąpić w dwóch przypadkach: 1) przy uderzeniu pioruna w konstrukcję wsporcą lub w przewód odgromowy linii, bądź 2) przy uderzeniu pioruna w przewód fazowy.

W przypadku uderzenia pioruna w przewód odgromowy, a zwłaszcza w konstrukcję wsporcą linii napowietrznej, przebicie przerwy międzyiskrowej izolatora liniowego określane jako tzw. przeskok odwrotny na izolatorze. Przekroczeniem wytrzymałości udarowej izolatora spowodowane jest spadkiem napięcia na impedancji konstrukcji słupa wskutek przepływu prądu udarowego w kierunku od przewodu odgromowego do układu uziemienia. Dużą rolę odgrywa w tym wypadku długość izolatora oraz wartość rezystancji układu uziomu.

Model przeskoku odwrotnego określany jest równaniem opisującym rozwój lidera przeskoku iskrowego wzdłuż izolatora. W postaci zaproponowanej dla opisu przeskoku odwrotnego przez CIGRE [3] i IEEE [5], prędkość rozwoju lidera przeskoku iskrowego opisana jest przy użyciu równania (3):

$$\frac{dL}{dt} = k \cdot u(t) \cdot \left(\frac{u(t)}{g - L(t)} - E_0 \right), \quad (3)$$

gdzie: L – jest chwilową długością wyładowania liderowego [m], g – jest długością łańcucha izolatora liniowego (ang. *gap*) [m], E_0 – jest minimalną, uśrednioną wartością natężenia pola elektrycznego warunkującą rozwój lidera [V/m], k – jest współczynnikiem wyrażonym w [m²/V²/s]. Warunek początkowy dla powyższego równania przyjmuje się jako $L(t=0) = 0$.

Przeskok opisany powyższym równaniem następuje w chwili, w której długość lidera L osiągnie zadaną długość łańcucha izolatorów g .

Zjawiskiem analogicznym w stosunku do przeskoku odwrotnego jest przeskok na izolatorze, który może wystąpić przy uderzeniu pioruna w przewód fazowy linii. W wyniku przeskoku w przerwie iskrowej izolatora występuje wówczas zwarcie doziemne oraz towarzyszący mu prąd następczy wyłączany przez automatykę zabezpieczeniową stacji. W przypadku analizy przepięć pochodzących od uderzenia pioruna w linię fazową, pomija się możliwość wystąpienia przeskoku na izolatorze, który, działając podobnie do ogranicznika przepięć, zmniejsza wartość narażenia napięciowego dochodzącego przewodami fazowymi do stacji rozdzielczej. W ten sposób w obliczeniach przyjmuje się najbardziej srogie warunki przepięciowe, a tym samym wprowadza się do koordynacji izolacji dodatkowy margines bezpieczeństwa.

2.4. Przesła linii napowietrznych wraz z układem uziomowym

Przesła linii napowietrznych modelowane są jako konstrukcje wsporcze linii (słupy) oraz przewody linii: odgromowe oraz fazowe, jedno bądź wielotorowe. Ze względu na znaczne gabaryty konstrukcji wsporczych linii wysokich i najwyższych napięć, w analizie uwzględnia się własności falowe poszczególnych elementów konstrukcji wsporczych (w przypadku linii najwyższych napięć, wysokości słupów przekraczają 100 m). Prędkości propagacji fali w konstrukcji słupa przyjmuje się pomniejszoną w stosunku do prędkości propagacji fali wzdłuż linii odgromowych bądź fazowych.

Jako model układu uziomowego przyjmuje się uproszczony model, który stanowi rezystancja skupiona o wartości kilkudziesięciu omów. Uproszczone podejście pomija zjawiska falowe w gruncie, a także nieliniową zależność rezystancji układu uziomowego od częstotliwości, która wynika ze złożonych zjawisk fizycznych występujących w gruncie w otoczeniu uziomu, a także z efektów starzeniowych uziomu.

Prąd piorunowy przepływając przez uziom powoduje jonizację gruntu w otoczeniu uziomu, zmniejszając efektywną rezystancję przejścia na styku uziomu i gruntu. Pominięcie tego zjawiska stwarza więc bardziej rygorystyczne niż to jest w rzeczywistych układach warunki analizy, a zatem ponownie wprowadza dodatkowy margines bezpieczeństwa w obliczeniach koordynacji izolacji. W modelu układu uziemienia przyjmuje się często wartość rezystancji, przy której dla zadanych wymuszeń oraz dla przyjętego układu stacji i linii, na izolatorach liniowych występują przeskoki odwrotne.

2.5. Ulot

W wyniku wyładowania piorunowego w przewód fazowy linii fala przepięciowa propaguje wzdłuż przewodu w kierunku stacji, zagrażając izolacji zainstalowanych w stacji urządzeń i aparatów. Towarzyszące propagacji fali zjawisko ulotu zmniejsza jej wartość szczytową. Zjawisko to w analizach obliczeniowych jest często pomijane, z uwagi na to, że 1) największe narażenie izolacji linii napowietrznej występuje w miejscu uderzenia pioruna, a zatem jeszcze zanim fala podlegając propagacji doznaje zmniejszenia swojej wartości szczytowej wskutek zjawiska ulotu, 2) największe narażenie izolacji urządzeń i aparatów stacji występuje w przypadku uderzenia pioruna w pierwsze przęsło linii licząc od stacji. W przypadku 2, wartość szczytowa fali przepięciowej podlegając propagacji wzdłuż przewodów fazowych na stosunkowo niewielkiej odległości od stacji ulega tylko nieznacznemu zmniejszeniu (około 10%).

Przyjęcie w obliczeniach uproszczonego modelu układu uziomów w postaci rezystancji skupionej, oznacza więc ponownie wprowadzenie dodatkowego marginesu bezpieczeństwa do uzyskanych wyników obliczeń, a przy tym po-

zwala na uniknięcie stosowania złożonych, nieliniowych modeli uziomu. Trudnością występującą w przypadku zastosowania modelu nieliniowego jest konieczność identyfikacji pomiarowej jego parametrów, w tym częstotliwościowych odpowiedzi układu uziomu na wymuszenia w postaci udarów prądowych.

2.6. Linie napowietrzne i kablowe

Linie napowietrzne i kablowe modelowane są jako wieloprzewodowe linie długie, w których uwzględnia się geometrię układu przewodów odgromowych i fazowych (w przypadku linii napowietrznych) bądź geometrię układu żył roboczych i ekranów (w przypadku linii kablowych). Uwzględnia się również zależność parametrów linii od częstotliwości, a także wzajemne sprzężenia przewodów fazowych i odgromowych.

Ze względu na złożoność oraz częstotliwościowy charakter modeli linii napowietrznych i kablowych, obecność odpowiednich modeli w dostępnych narzędziach obliczeniowych ma decydujące znaczenie dla wyboru narzędzia, które wykorzystywane jest do obliczeń koordynacji izolacji.

2.7. Szyny zbiorcze i połączenia aparatowe

Szyny zbiorcze i połączenia aparatowe reprezentowane są przez odcinki wieloprzewodowych linii długich, przy których modelowaniu przyjmuje się analogiczne zasady jak ma to miejsce przy modelowaniu linii napowietrznych.

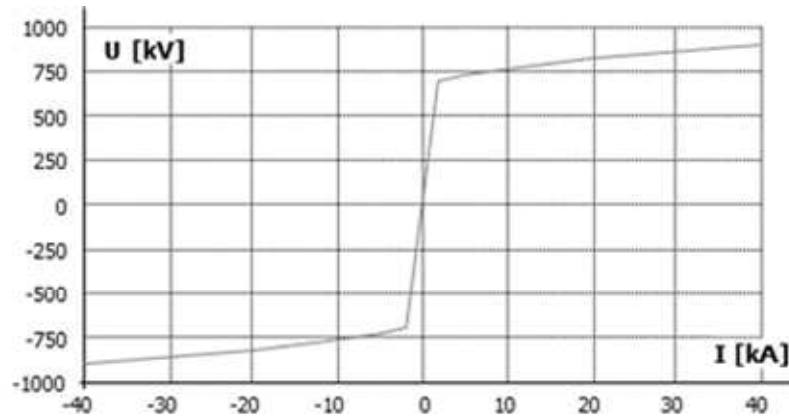
W przypadku linii o parametrach rozłożonych, istnieje zależność pomiędzy długością linii a maksymalnym krokiem czasowym rozwiązania równań modelu (im krótsza linia, tym krótszy jest wymagany krok całkowania równań opisujących linie). Z tego względu, dla odcinków linii o długości poniżej 15 m przyjmuje się model uproszczony w postaci indukcyjności skupionej, o wartości jednostkowej 1 uH/m. W przypadku konstrukcji bramy wejściowej do stacji (ang. *portal, gantry*), jako model przyjmuje się impedancję falową, podobnie jak to ma miejsce w przypadku konstrukcji wsporczych linii napowietrznych (z uwzględnieniem różnic w wymiarach) oraz odpowiednio mniejszą wartość rezystancji układu uziomowego stacji w stosunku do układów uziomów konstrukcji wsporczych linii.

2.8. Ograniczniki przepięć

Poza instalacją odgromową stacji oraz przewodami odgromowymi linii napowietrznych, jako podstawową metodę ograniczania przepięć stosuje się ograniczniki przepięć, które we współczesnym systemie elektroenergetycznym są ogranicznikami beziskiernikowymi.

Oznacza to, że w ogranicznikach tych następuje płynne przejście od pracy w normalnych warunkach roboczych do stanu ograniczania przepięć. Wartości szczytowe przepięć występujących w systemie elektroenergetycznym są skutecznie obniżane do wartości wynikających z wartości napięć obniżonych ograniczników.

Podstawowy model matematyczny ograniczników beziskiernikowych określa ich charakterystyka prądowo napięciowa, przedstawiona przykładowo na Rys. 4. Rys. 4 przedstawia charakterystykę ogranicznika podaną w danych katalogowych dla udaru prądowego 8/20 us.



Rys. 4. Charakterystyka prądowo napięciowa ogranicznika przepięć dla udaru prądowego 8/20 us, napięcie znamionowe $U_r = 340$ kV, maksymalne napięcie ciągłej pracy MCOV = 272 kV

Fig. 4. Surge arrester current-voltage characteristics for current surge 8/20 us, rated voltage $U_r = 340$ kV, Maximum Continuous Operating Voltage MCOV = 272 kV

Poza modelem podstawowym istnieją bardziej złożone modele ograniczników przepięć, opisujące w pełniejszy sposób złożone zjawiska fizyczne zachodzące w czasie zadziałania ogranicznika. Na Rys. 4 podano przykładową charakterystykę statyczną elementu warystorowego, która w warunkach przepięciowych powinna zostać uzupełniona o elementy pasożytnicze i uwzględnić zachowanie rzeczywiste ogranicznika w warunkach wysokich częstotliwości. Jako przykładowe modele wymienić tu można model grupy roboczej IEEE WG 3.4.11 [7], zawierający dwie statyczne charakterystyki prądowo napięciowe dla różnych przedziałów częstotliwości. Istnieją również modele będące uproszczeniem modelu IEEE, przykładowo: model Pincetti-Giannettoni [8] oraz model Fernandez-Diaz [9].

2.9. Rozdzielnice typu GIS

Szynoprzewody typu GIS modelowane są przy użyciu linii o parametrach rozłożonych, które opisane są parametrami: impedancją falową Z oraz prędkością v propagacji fali elektromagnetycznej wzdłuż szynoprzewodu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4)$$

Parametry te wyznaczone są przy użyciu zależności (4) na podstawie jednostkowych wartości pojemności C i indukcyjności L linii współosiowej, które z kolei wyrażone są w zależności (5) poprzez parametry geometryczne linii: średnicę zewnętrzną d_1 przewodu prądowego oraz średnicę wewnętrzną d_2 obudowy szynoprzewodu:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(d_2/d_1)}, \quad L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right). \quad (5)$$

Pojemności wzdłużne i poprzeczne elementów rozdzielnic typu GIS mogą być wyrażone poprzez całkę objętościową z gęstości pola elektrycznego E w obszarze V , pomiędzy przewodem prądowym a obudową szynoprzewodu, wyrażoną zależnością (6):

$$C = \epsilon_0 \int_V |\vec{E}|^2 dV. \quad (6)$$

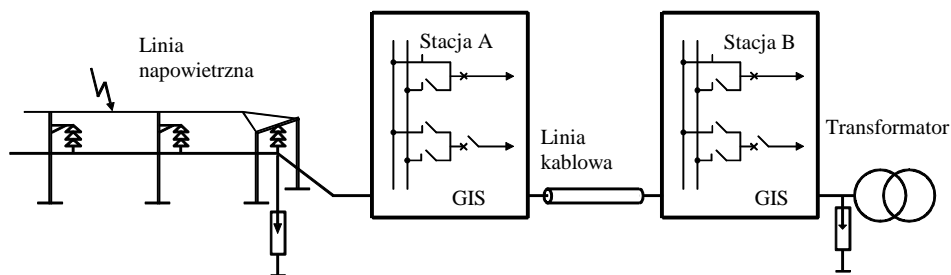
Pojemność wyrażona zależnością (6) może być obliczona przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Ocena prawidłowego zestrojenia modelu MES, obejmująca weryfikację doboru siatki obliczeniowej, warunków brzegowych oraz wymuszeń, dokonywana jest poprzez porównanie wartości pojemności obliczonej przy użyciu metody elementów skończonych dla szynoprzewodu GIS o podstawowym, regularnym kształcie, z wartością uzyskaną przy użyciu jawnej, analitycznej formuły (5). Zweryfikowany tą metodą model pozwala na obliczenie pojemności zastępczych dla układów o bardziej złożonej geometrii, dla których nie istnieją zależności analityczne, takich jak połączenia dwóch wzajemnie prostopadłych względem siebie odcinków szynoprzewodu (kolanko) lub układ otwartych styków odłącznika.

Modele bazujące na obliczonych w ten sposób zastępczych pojemnościach skupionych wykorzystywane są do analiz przeprowadzanych dla przebiegów o bardzo stromym czole (według klasyfikacji podanej na Rys. 1), a zatem dla przepięć charakteryzujących się znacznie wyższymi częstotliwościami, niż ma to

miejsce w przypadku przepięć atmosferycznych. W takim przypadku zasadne jest uwzględnienie bardziej szczegółowych modeli stacji GIS, takich jak wspomniane wyżej kolanka oraz układy otwartych styków odłączników.

3. Przykładowe wyniki analizy koordynacji izolacji dla stacji wysokich napięć 380 kV typu GIS

Punktem wyjścia dla analizy narażeń przepięciowych jest schemat jednokreskowy stacji rozdzielczej, parametry konstrukcyjne linii napowietrznych i kablowych, parametry konstrukcji wsporczych linii napowietrznych oraz modele aparatów i urządzeń stacji wraz z doprowadzeniami, w szczególności modele transformatorów oraz ograniczników przepięć.



Rys. 5. Układ stacji GIS wysokich napięć 380 kV przyjęty dla analizy koordynacji izolacji

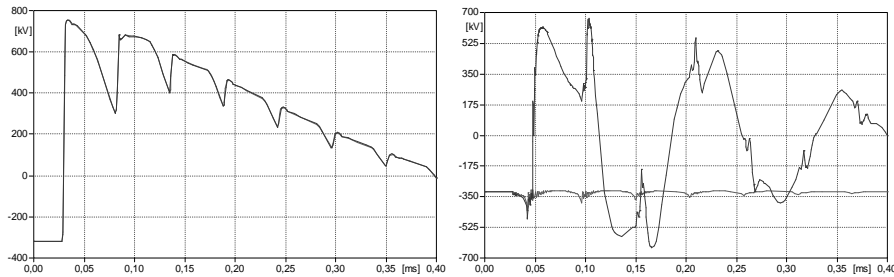
Fig. 5. GIS substation set-up for rated voltage 380 kV assumed for insulation co-ordination analysis

Na Rys. 5 przedstawiono model fragmentu systemu elektroenergetycznego przyjęty dla analizy koordynacji izolacji, zawierający dwie stacje GIS wysokich napięć, każda o napięciu znamionowym 380 kV, połączone linią kablową. Poszczególne elementy modelu stanowią: model systemu w postaci źródła napięcia o częstotliwości 50 Hz, model pięciu przęseł linii napowietrznej, model konstrukcji wsporczych i systemu uziemień, model przeskołu odwrotnego na izolatorze liniowym. Jako wartość szczytową przebiegu prądu pioruna przy uderzeniu w przewód fazowy linii przyjęto wartość 30 kA wyznaczoną przy użyciu modelu elektrogeometrycznego zgodnie z opisem podanym powyżej. Jako wartość szczytową prądu pioruna przy uderzeniu w przewód odgromowy linii przyjęto 200 kA. Założono, że uderzenie nastąpiło w pierwsze przęsło linii, licząc od stacji, w odległości 50 m od pierwszego słupa. Jako model przepustu przyjęto pojemność skupioną. Uwzględniono połączenie linią kablową łączącą stacje A i B. Ogranicznik przepięć w izolacji powietrznej umieszczono na wejściu stacji A, wraz z przewodami doprowadzającymi. Ograniczniki przepięć w izolacji gazo-

wej typu GIS umieszczono pomiędzy stacjami A i B na wejściu linii kablowej oraz na zaciskach transformatora. Jako model transformatora przyjęto pojemność skupioną.

3.1. Analiza prądów: wpływ długości linii kablowej na przepięcia występujące na zaciskach wejściowych transformatora

Wynikiem obliczeń w procesie koordynacji izolacji są przebiegi czasowe prądów w wybranych punktach systemu. Na Rys. 6 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów uzyskane dla modelu stacji przedstawionej na Rys. 5.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi prądów uzyskane dla modelu stacji przedstawionej na Rys. 5

Fig. 6. Exemplary waveforms of overvoltages obtained for the model of substation shown in Fig. 5

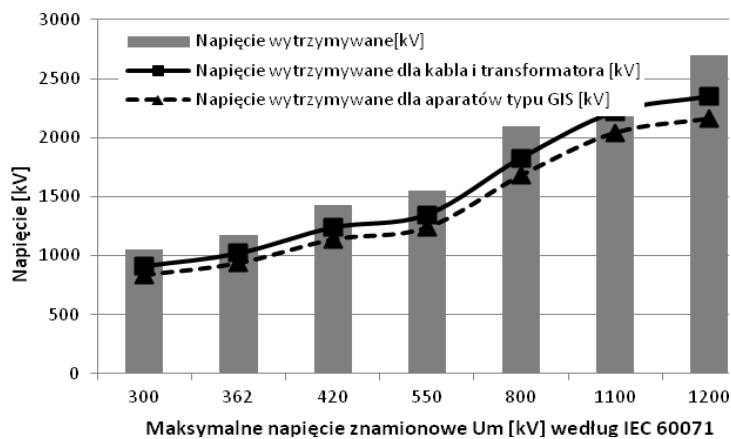
Podstawę koordynacji izolacji, a w szczególności podstawę doboru ograniczników prądów, stanowi odniesienie wartości szczytowych przebiegów prądów do znormalizowanego wytrzymawanego napięcia udarowego piorunowego, określonego w normach IEC [2] i ANSI. Znormalizowane wartości napięcia udarowego przedstawiono na Rys. 7.

Dla przedstawionego na Rys. 5 układu stacji wykonano analizę wpływu długości linii kablowej pomiędzy stacjami A i B na ograniczanie prądów występujących na transformatorze. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że połączenie kablowe w znaczny sposób zmienia narażenia na transformatorze powstałe w wyniku prądów atmosferycznych w linii dochodzące do stacji. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 8, gdzie zaznaczono poziomy prąd na tle znormalizowanego wytrzymawanego napięcia udarowego transformatora.

3.2. Weryfikacja doboru ograniczników przepięć

Skuteczność i niezawodność ogranicznika przepięć związana jest z jego zdolnością do pochłaniania i skutecznego odprowadzania energii wydzielonej podczas zadziałania. Po przeprowadzonej analizie koordynacji izolacji przeprowadza się weryfikację doboru ogranicznika przepięć ze względu na obciążenie energetyczne. Analiza polega na ocenie krzywej przedstawiającej energię absorbowaną przez ogranicznik w czasie jego zadziałania i porównanie maksymalnej wartości energii wydzielonej podczas zadziałania ogranicznika z wartością dopuszczalną dla danego typu ogranicznika.

Na Rys. 9 przedstawiono krzywą energii (kolor niebieski) wydzielonej w ograniczniku przepięć opisanym charakterystyką przedstawioną na Rys. 4. Krzywa energii została obliczona dla przebiegu przepięcia (kolor czerwony) powstałego wskutek wyładowania w przewód odgromowy, dla którego przyjęto wartość szczytową udaru piorunowego wynoszącą 200 kA oraz zestandaryzowany kształt udaru 8/20 us. Dla przedstawionego na Rys. 9 przykładowego przebiegu, energia wydzielona w ograniczniku wynosiła 795 kJ, zaś dopuszczalna wartość energii podana w katalogu dla przyjętego typu ogranicznika wynosiła 2356 kJ.



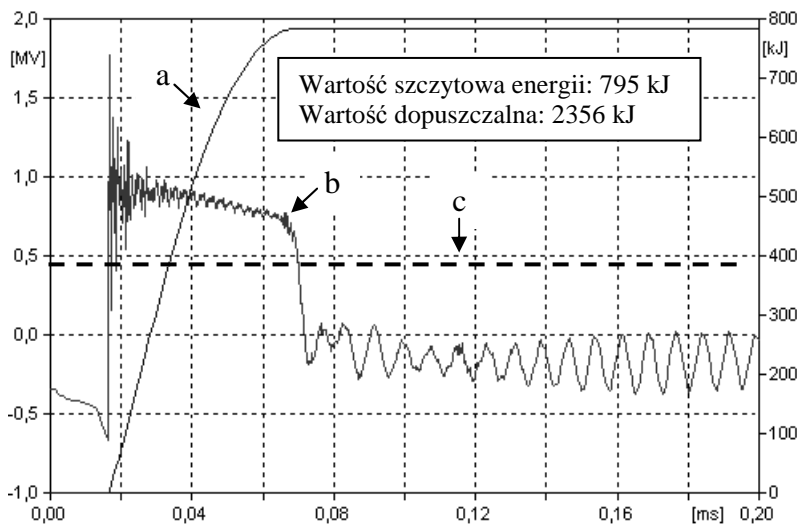
Rys. 7. Znormalizowane wartości wytrzymałego napięcia udarowego (niebieskie słupki), napięcie wytrzymałościowe po uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa dla transformatorów (czerwone kwadraty) oraz dla aparatów typu GIS (zielone trójkąty)

Fig. 7. Lightning Impulse Withstand Voltage according to IEC (blue boxes), withstand voltage with safety factors for transformers (red line with boxes) and GIS switchgear (green line with triangles)



Rys. 8. Wpływ długości linii kablowej na wartości szczytowe przepięć w miejscu zainstalowania transformatora

Fig. 8. Impact of the cable length on maximum overvoltages in at transformer terminals



Rys. 9 Energia wydzielona w ograniczniku przepięć podczas zadziałania ogranicznika; a) energia, b) przepięcie, c) punkt kolanowy

Fig. 9. Energy dissipated in surge arrester; a) energy, b) overvoltage, c) elbow

Z porównania wynika, że zdolność pochłaniania i odprowadzania energii przez ogranicznik pozwala na jego niezawodną pracę podczas ograniczania przepięć atmosferycznych w przyjętym układzie i przy założonych wymuszeniach.

4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrane aspekty metody koordynacji izolacji wykorzystywane w praktyce projektowania stacji wysokich i najwyższych napięć. Podstawą koordynacji izolacji są obliczenia numeryczne przebiegów przepięć powstałych w wyniku wyładowania piorunowego w linii dochodzące do stacji. Decydujący dla wyboru podejścia numerycznego w obliczaniu zagadnień koordynacji izolacji jest model systemu, którego złożoność nie pozwala na zastosowanie metod analitycznych.

Przedmiotem typowej analizy jest określenie liczby i miejsca zainstalowania ograniczników przepięć oraz długości izolatorów liniowych. W artykule przedstawiono przykładową analizę wpływu długości linii kablowej na wartości przepięć występujących w miejscu zainstalowania transformatora. Przeprowadzona analiza wskazuje, że połączenia kablowe mogą w znaczny sposób zmniejszać narażenia powstałe w wyniku przepięć atmosferycznych.

Literatura

- [1] Nowak W.: Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych, Rozprawy i Monografie, 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005
- [2] IEC TR 60071-4 Insulation co-ordination guide
- [3] CIGRE WG33.0, Guide to procedure for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRE brochure 63, Oct. 1991.
- [4] Eriksson A. J.: An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis, IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 2, Issue: 3), pp. 871-886, July 1987
- [5] IEEE Modeling and System Transients Working Group, Modeling Guidelines for Fast front transients, IEEE Trans. on PD, 1996, vol. 11, p. 493-506
- [6] IEC 60071-2, Insulation co-ordination, Part 2, 1996
- [7] IEEE Working Group 3.4.11 Modling of metal oxide surge arresters, IEEE Transactions on Power Delivery 1992; 7(1):302-309
- [8] Pinceti P., Giannetoni M.: A simplified model for zinc oxide surge arresters, IEEE Transactions on Power Delivery 1999; 14(2):393-398
- [9] Fernandez F., Diaz R.: Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations, International Conference of Power System Transients, IPST 2001, Paper 14, Rio de Janerio, Brazil, June 24-28, 2001.
- [10] Dommel H. W., Meyer W. S.: Computation of Electromagnetic Transients, Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 7, July 1974, pp. 983-993

PRACTICAL ASPECTS OF INSULATION COORDINATION IN HIGH VOLTAGE GAS-INSULATED SWITCHGEAR SUBSTATIONS DUE TO LIGHTNING OVERVOLTAGES

Summary

In the paper practical aspects of insulation co-ordination analyses are presented for high and ultra high voltage Gas Insulated Switchgear substations. Modeling methods are elaborated for proper selection of overvoltage protection measures, such as surge arresters, overhead lines towers grounding system, and line insulators chain lengths. The methods of lightning surges and substation equipment modeling were presented with special interest in modeling of nonlinear phenomena and high frequency characteristics, allowing for the required accuracy of the simulation results. The results for exemplary insulation co-ordination analysis are presented, showing the cable line impact on the substation overvoltages. The analysis was performed for a Single Line Diagram of an exemplary typical High Voltage GIS substation, for which a typical configuration and parameters of the elements have been assumed: overhead lines, substation apparatus, transformers and surge arresters. For the surge arresters, the analysis of the arresters reliable and efficient energy dissipation was analyzed, which allowed for evaluation and verification of proper selection and operation of the equipment in given voltage stress conditions and the assumed substation layout. The analyses presented in the paper shows that the cable line connections within or between substations have significant impact on overvoltages, which can threaten insulation system of transformers and can also influence selection of number and location placement of the surge arresters.

Keywords: lightning overvoltages, insulation co-ordination, lightning protection, GIS substation, High Voltage

DOI: 10.7862/re.2013.18

Tekst złożono w redakcji: lipiec 2013

Przyjęto do druku: grudzień 2013