

Własności uzemień przy prądach piorunowych

Streszczenie. Przy wymuszeniach prądami udarowymi w uzziemieniu zachodzą zjawiska, które znacznie wpływają na wartość jego impedancji. Są to zjawiska falowe związane z szybkimi zmianami prądu i wpływem indukcyjności przewodów uzziemienia oraz zjawisko jonizacji w gruncie, związane z przepływem dużych prądów. Wysokoczęstotliwościowe zjawiska falowe powodują wzrost impedancji wejściowej uzziemienia natomiast jonizacja w gruncie wpływa na jej zmniejszenie. W artykule przedstawiono analizę właściwości uzziemienia kratowego i słupowego przy przepływie prądów piorunowych.

Abstract. In case of impulse current excitations, phenomena occur in the grounding system that significantly affect the value of its impedance. These are wave phenomena associated with rapid fast current changes, influence of wire inductance and the phenomenon of soil ionization associated with large currents flowing into the ground. High frequency wave phenomena cause the increase of the input ground impedance, while the soil ionization contributes to the decrease of its impedance. The paper presents the analysis of mesh and vertical grounding system properties in case of lightning current flowing. (**Properties of grounding system subjected to lightning currents**).

Słowa kluczowe: impedancja uzziemienia, modelowanie, jonizacja gruntu.

Keywords: grounding impedance, modeling, soil ionization.

Wstęp

Uziemienie jest celowo wykonanym połączeniem elektrycznym urządzenia z ziemią. Pełni ono ważną rolę w poprawnym funkcjonowaniu układów elektroenergetycznych i obiektów budowlanych, zarówno w warunkach normalnej pracy jak i w stanach awaryjnych. W skład uzziemienia wchodzi: przewody uzemiające, zaciski i uziomy. Uziom stanowi pojedynczy przewód lub układ przewodów, zwykle bezpośrednio stykających się z gruntem stanowiąc tym samym elektryczne połączenie przewodu z ziemią.

Ze względu na pełnione funkcje, uzziemienia dzieli się na [1, 2]: robocze, ochronne, odgromowe i pomocnicze. Często funkcje te pełni fizycznie jedno uzziemienie, gdyż technicznie lub ekonomicznie nie jest możliwe budowanie takich uzemień w sposób rozłączny. W analizie własności takiego układu należy wtedy uwzględnić spełnienie wszystkich wymagań związanych z podanymi funkcjami uzziemienia.

Wymagania stawiane uzziemieniom

Podstawowym wymaganiem wobec projektowanego a następnie budowanego uzziemienia jest uzyskanie jak najmniejszej jego rezystancji (impedancji) oraz możliwość odprowadzenia do ziemi dużych prądów. Kolejnym wymaganiem jest uzyskanie odpowiedniego rozkładu potencjału na powierzchni ziemi przy przepływie dużych prądów (zwarciowych lub piorunowych), aby uzyskać odpowiednio niskie (bezpieczne) wartości napięć rażeniowych (dotykowych i krokowych). Stosuje się w tym celu tzw. technikę sterowania potencjałem na powierzchni ziemi polegającą na odpowiednim ułożeniu przewodów tworzących uziom (zagęszczanie uzziemienia kratowego, dodawanie uziomów sterujących) [2].

Czynniki wpływające na własności układów uziomowych

Czynniki wpływającymi na uzyskanie jak najmniejszej rezystancji uzziemienia jest odpowiednio niska rezystywność gruntu oraz rozmiary i konfiguracja uzziemienia, przy czym własności elektryczne stosowanych materiałów, z których wykonane jest uzziemienie, w małym stopniu wpływają na wypadkową rezystancję uziomu. W praktyce stosowane są różne konfiguracje uzemień od prostych pojedynczych przewodów (poziomych lub pionowych), poprzez układy otokowe do układów kratowych. Celem uzyskania odpowiednich parametrów uzziemienia stosuje się uzziemienia złożone z przewodów poziomych i pionowych. Uziomy pionowe odgrywają znaczącą rolę w gruncie

niejednorodnym (uwarstwionym poziomo) gdy na większej głębokości występują warstwy o znacznie niższej rezystywności niż rezystywność wierzchniej warstwy, w której umieszczone są poziome przewody uzziemienia.

Właściwości statyczne i dynamiczne uzemień

W analizie parametrów uzemień rozróżnia się ich rezystancję statyczną R_{st} , określaną dla prądu stałego lub przemiennego o niskiej częstotliwości, oraz rezystancję udarową R_u , określaną przy przepływie prądów udarowych. Przy wymuszeniach impulsowych dużej mocy w układach uziomowych zachodzą zjawiska falowe związane z dużą szybkością zmian parametrów oraz zjawiska wysokoprądowe związane procesem jonizacji w gruncie. Często wprowadza się uproszczoną zależność pomiędzy rezystancją statyczną i udarową $R_u = \alpha_u R_{st}$ gdzie α_u jest współczynnikiem udarowym rezystancji uzziemienia [1]. W zależności od rezystywności gruntu, wymiarów uzziemienia, stromości narastania prądu i od jego wartości szczytowej, wartość tego współczynnika może być większa lub mniejsza od jedności [1].

Przebiegi czasowe składowych prądu piorunowego

W normie PN-EN 62305-1 [3] zdefiniowane są składowe wyładowań piorunowych oraz podana jest zależność analityczna dla przebiegów czasowych udarów: pierwszego dodatniego $10/350 \mu s$, pierwszego ujemnego $1/200 \mu s$ oraz następnym ujemnych $0,25/100 \mu s$:

$$(1) \quad i(t) = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)^{10}} \cdot e^{-t/T_2}$$

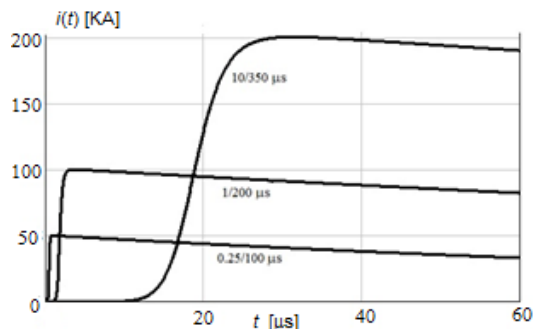
gdzie: I jest wartością szczytową prądu, k jest współczynnikiem korekcyjnym dla wartości szczytowej prądu, T_1 i T_2 są odpowiednio współczynnikami stałej czasu czoła i grzbietu.

Parametry w równaniu (1), składowych prądu piorunowego dla różnych klasy ochrony odgromowej zestawione są w Tabeli 1 [3].

Tabela 1. Parametry udarów piorunowych

Parametry	Pierwszy udar dodatni			Pierwszy udar ujemny			Następny udar ujemny		
	LPL			LPL			LPL		
	I	II	III-IV	I	III-IV	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	100	75	50	50	37,5	25
k	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
T_1 (μs)	19	19	19	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
T_2 (μs)	485	485	485	285	285	285	143	143	143

Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi czasowe udarów piorunowych danych zależnością (1) dla I klasy ochrony odgromowej.



Rys.1. Przebiegi czasowe udarów piorunowych dla I klasy ochrony odgromowej

Charakterystyki częstotliwościowe udarów piorunowych

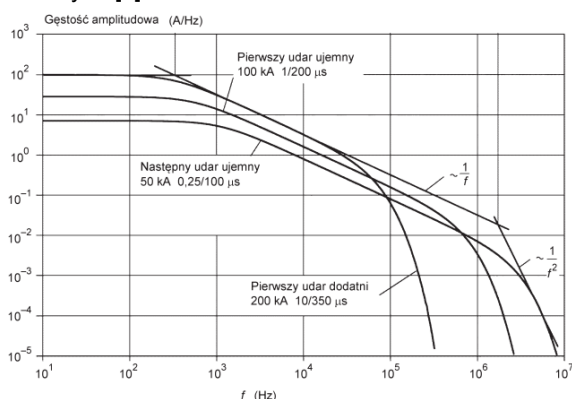
Przyjęte aproksymacje przebiegów czasowych udarów piorunowych są funkcjami spełniającymi warunki Dirichleta i bezwzględnie całkowalnymi, to znaczy spełniającymi warunek

$$(2) \quad \int_{-\infty}^{\infty} |i(t)| < \infty$$

Określona jest więc transformata Fouriera funkcji czasowej $i(t)$ dla $t > 0$, czyli jej charakterystyka gęstości amplitudowej..

$$(3) \quad I(j\omega) = \int_0^{\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt = I(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

Na rysunku 2 przedstawione są charakterystyki częstotliwościowe gęstości amplitudowej udarów piorunowych [3].



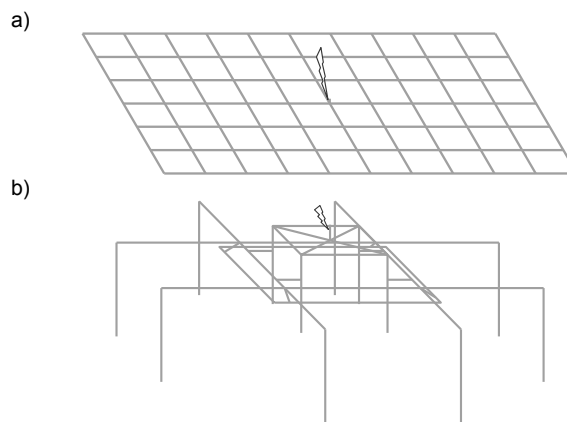
Rys.2. Charakterystyki gęstości amplitudowych udarów piorunowych

Widma amplitudowe sygnałów udarowych sięgają kilku megaherców. Dlatego w obliczeniach parametrów uzemień oraz w modelowaniu komputerowym należy stosować modele uzemień, które prawidłowo reprezentują ich własności elektryczne do takiego zakresu częstotliwości.

Charakterystyki częstotliwościowe impedancji wejściowych uzemień

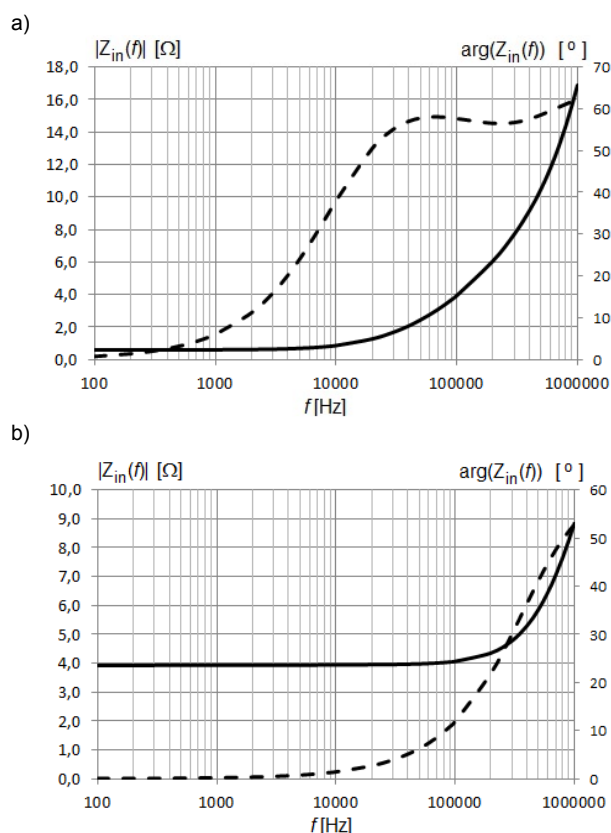
W modelowaniu układów uzimowych stosowane są modele obwodowe i polowe. Analizę z wykorzystaniem modeli obwodowych można wykonywać w szeroko stosowanych symulatorach cyfrowych takich jak EMTP czy PSpice. Przestrzenną analizę pola elektromagnetycznego w otoczeniu układu przewodów umożliwia metoda momentów (MoM) [4, 5]. W artykule przedstawiono wyniki analizy układów uzimowych z wykorzystaniem programu HIFREQ [6, 7] (wchodzącego w skład pakietu CDEGS) opartego na metodzie momentów.

Rysunek 3 przedstawia analizowane układy uzemień z zaznaczonymi miejscami przyłożenia udaru prądowego: uzimienie kratowe o wymiarach 100 m na 60 m (oczka kraty o wymiarach 10 m x 10 m) oraz uzimienie słupa elektroenergetycznego o rozpiętości elementów poziomych wynoszącej 12 m i długości uzimów pionowych równych 3 m. Do obliczeń przyjęto grunt jednorodny o rezystywności $\rho = 100 \Omega m$.



Rys.3. Analizowane układy uzemień: a) uzimienie kratowe; b) uzimienie słupowe

Na rysunku 4 zostały przedstawione charakterystyki częstotliwościowe impedancji wejściowej analizowanych uzimów: modułu - $|Z_{we}(f)|$ oraz faza - $\arg(Z_{we}(f))$. Otrzymano je jako stosunek wartości napięcia na uzimie względem ziemi odniesienia do wartości prądu wymuszającego przyłożonego w punktach zaznaczonych na rysunku 3, dla każdej częstotliwości widma w zakresie od 100 Hz do 1 MHz: $Z(j\omega) = U(j\omega) / I(j\omega)$, gdzie $\omega = 2\pi f$.



Rys.4. Charakterystyki częstotliwościowe impedancji wejściowej uzimienia kratowego (a) i uzimienia słupowego (b) moduł impedancji (linia ciągła) i faza impedancji (linia kreskowa)

Rezystancję statyczną uziemienia kratowego można wyznaczyć z przybliżonego wzoru Laurenta [2] danego zależnością (4). Rezystancja ta wynosi 0,65 Ω.

$$(4) \quad R_{st} = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{S}} + \frac{\rho}{L}$$

gdzie: S – pole powierzchni terenu zajętego przez uziemienie, L – całkowita długość elementów uziemienia, ρ – rezystywność gruntu.

W przypadku uziemień złożonych, zawierających dowolny układ elementów pionowych i poziomych w wyznaczeniu ich rezystancji wykorzystuje się specjalizowane programy komputerowe. Rezystancja uziemienia kratowego wyznaczona w przy pomocy pakietu CDEGS wyniosła 0,59 Ω, natomiast uziemienia słupa elektroenergetycznego 3,93 Ω.

Na wykresach zmienności modułu impedancji wejściowej analizowanych uziemień do częstotliwości około 10 kHz, widać praktycznie stałe wartości tych impedancji równe rezystancjom statycznym (odpowiednio 0,65 Ω dla uziemienia kratowego i 3,93 Ω dla uziemienia słupowego). Powyżej częstotliwości 10 kHz następuje znaczny wzrost impedancji osiągający przy częstotliwości 1 MHz wartości około 17 Ω dla uziomu kratowego i 8 Ω dla uziomu słupowego. Wzrost względem rezystancji statycznej jest znacznie większy w przypadku uziemienia kratowego i jest prawie trzydziestokrotny natomiast w przypadku uziemienia słupowego jest on około dwukrotny. Związane jest to z tzw. efektywnym obszarem działania uziomu dla wymuszeń szybkozmiennych, (w odniesieniu do uziomów liniowych nazywany długością efektywną), zależnym od rezystywności gruntu oraz szybkością narastania czoła udaru wymuszającego [1, 9].

Na przebiegach zmienności fazy impedancji wejściowych analizowanych uziomów widać ich indukcyjny charakter. W przypadku uziomu kratowego charakter ten uwidacznia się od częstotliwości ok. 100 Hz, natomiast dla uziomu słupowego od częstotliwości ok. 50 kHz.

Symulacje przebiegów czasowych w uziomach

Jeżeli zagadnienie wyznaczenia parametrów elektrycznych układu jest zagadnieniem liniowym, to może być sprowadzone do badania jego charakterystyk częstotliwościowych. Charakterystyki częstotliwościowe układu można techniką splotu łączyć z dowolnym wymuszeniem i za pomocą programów analizy częstotliwościowej otrzymywać odpowiedź układu. Charakterystyki częstotliwościowe sygnałów zakłócających przemnożone przez transmitancję częstotliwościową badanego układu dają charakterystykę częstotliwościową odpowiedzi układu.

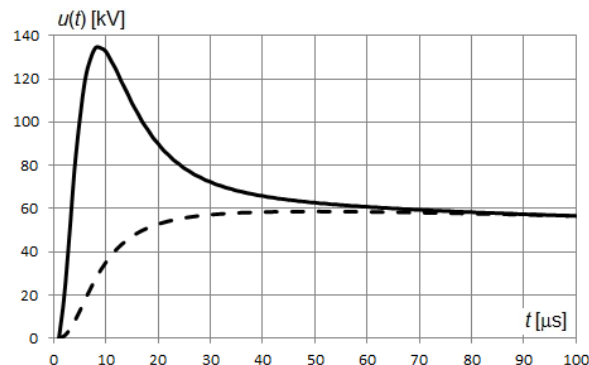
$$(5) \quad Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega)$$

Wyznaczanie funkcji czasu dla charakterystyki częstotliwościowej odpowiedzi polega na obliczeniu odwrotnej transformaty z wykorzystaniem odwrotnego przekształcenia Fouriera.

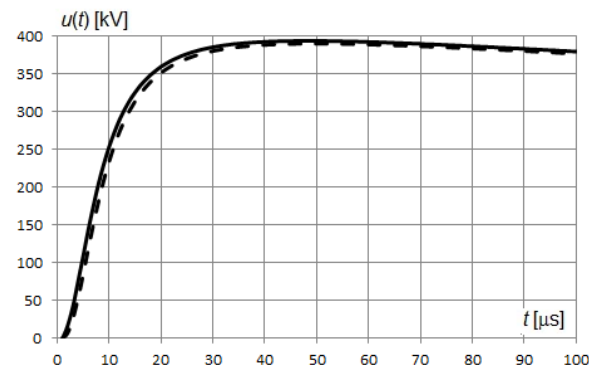
$$(6) \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega$$

Taką techniką otrzymuje się przebiegi czasowe przy symulacji komputerowej w pakiecie CDEGS. Wyznaczone w module HIFREQ charakterystyki częstotliwościowe impedancji wejściowej analizowanego uziemienia modulowane są charakterystyką prądu wymuszającego a następnie z wykorzystaniem algorytmu IFFT obliczane są przebiegi czasowe odpowiedzi układu.

Przebieg czasowy napięcia na impedancji wejściowej uziemienia dla udaru prądowego 10/350 μs, 100 kA, przyłożonego do środka kraty pokazano na rysunku 5. Analogiczny przebieg napięcia dla uziemienia słupowego pokazano na rysunku 6. Linią ciągłą przedstawione są wyniki dla modelu polowego w pakiecie CDEGS. Linią przerywaną pokazano dla porównania przebiegi dla rezystancji statycznych analizowanych uziemień, uzyskane jako iloczyn wartości prądu $i(t)$ i wartości rezystancji statycznej R_{st} .



Rys.5. Napięcie na impedancji wejściowej uziemienia kratowego przy wymuszeniu prądem 10/350 μs, 100 kA: dla modelu polowego (linia ciągła), dla rezystancji statycznej (linia kreskowa)



Rys.6. Napięcie na impedancji wejściowej uziemienia słupowego przy wymuszeniu prądem 10/350 μs, 100 kA: dla modelu polowego (linia ciągła), dla rezystancji statycznej (linia kreskowa)

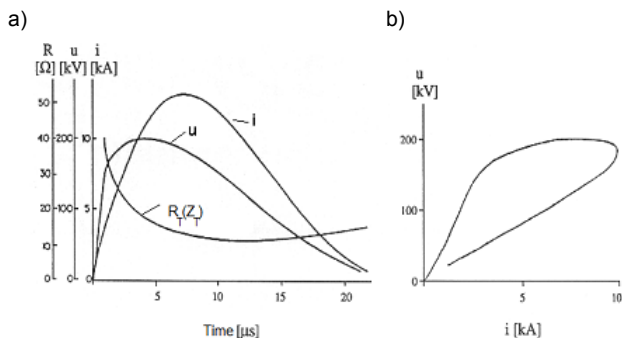
W przebiegu czasowym napięcia na impedancji wejściowej uziemienia słupowego nie uwidaczniają się znacząco efekty falowe gdyż wartość maksymalna napięcia oraz kształt przebiegu praktycznie pokrywa się z przebiegiem dla rezystancji statycznej. W przypadku uziemienia kratowego w istotny sposób uwidaczniają się zjawiska falowe. Wartość maksymalna napięcia jest ponad dwukrotnie większa niż wartość napięcia na rezystancji statycznej. W obliczeniach dla pozostałych udarów piorunowych (Tabela 1), charakteryzujących się znacznie krótszymi czasami narastania czoła, jeszcze bardziej uwidaczniają się te zjawiska.

Zjawisko jonizacji w gruncie przy prądach udarowych

Zjawiskiem zmniejszającym wartość wypadkowej rezystancji uziemienia przy wymuszeniu udarowym jest zjawisko jonizacji w gruncie, czyli powstawanie wyładowań w okolicy przewodów uziemienia. Powstaje ono w wyniku wzrostu natężenia pola elektrycznego powyżej wartości krytycznej wynoszącej w zależności od rodzaju gruntu w granicach kilku kV/cm [1, 8]. Zjawisko to powoduje pozorne zwiększanie rozmiaru uziemienia a tym samym obniżenie jego rezystancji. Fizyka powstawania tego zjawiska jest w rzeczywistych warunkach bardzo skomplikowana. Dlatego na potrzeby modelowania w zakresie wyznaczania napięć i

prądów, opracowano kilka modeli prezentowanych i analizowanych w licznych publikacjach. Aktualne podsumowujące informacje dotyczące zjawiska jonizacji i sposobów modelowania go dla potrzeb projektowych z propozycjami uwzględnienia ich w aktualnych normach zawarte są w pozycji [8].

Rysunek 7 przedstawia charakterystyki czasowe prądu, napięcia i rezystancji (impedancji) uziemienia przy przepływie prądów udarowych [9].



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki czasowe prądu, napięcia i rezystancji (impedancji) uziemienia przy przepływie prądów udarowych [9]

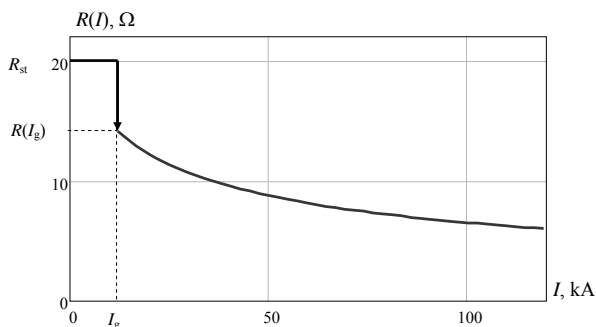
Uproszczony, obwodowy model zjawiska jonizacji w gruncie wokół uziomu odprowadzającego prąd o wartości przekraczającej wartość graniczną I_g wyraża się zależnością na nieliniową rezystancję uziomu $R(I)$ [8]:

$$(7) \quad R(I) = \frac{R_{st}}{\sqrt{1 + I/I_g}} \quad I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_{st}^2}$$

gdzie: R_{st} – rezystancja statyczna uziomu, E_0 – krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego, po przekroczeniu której następuje proces jonizacji w gruncie (przyjmowane są wartości E_0 od 300 kV/m do 400 kV/m), I_g – prąd graniczny.

Model taki jest zalecany i często wykorzystywany w symulatorach cyfrowych typu EMTP [10,11]. Obrazuje on zmienność rezystancji nie precyzując szczegółowo procesu przejścia od rezystancji statycznej do rezystancji udarowej czyli procesu rozwoju wylądowań w gruncie.

Na rysunku 8 przedstawiona jest przykładową zmienność rezystancji uziemienia w zależności od wartości przepływającego prądu. Zmienność rezystancji uziomu $R(I_g)$ po przekroczeniu wartości granicznej prądu I_g wyznaczono z zależności (8) dla przykładowych danych: $R_{st} = 20 \Omega$; $\rho = 100 \Omega m$; $E_0 = 300 \text{ kV/m}$. Prąd graniczny wynosi wtedy $I_g = 12 \text{ kA}$, a rezystancja uziomu dla wartości granicznej $R(I_g) = 14 \Omega$.



Rys.8. Przebieg zmienności rezystancji uziemienia powyżej wartości granicznej prądu

Wykonując obliczenia z zależności (7) w odniesieniu do analizowanych uziemień (kratowego i słupowego) okazuje

się, że zjawisko jonizacji ma znacznie mniejszy wpływ. Przykładowo dla uziemienia słupowego o rezystancji statycznej równej 3,93 Ω przy rezystywności gruntu równej 100 Ωm, prąd graniczny wynosi ok. 300 kA co znacznie przekracza występujące wartości szczytowe prądów piorunowych. Wystąpienie zjawiska jonizacji w całym uziemieniu nie jest zatem możliwe.

Podsumowanie

Głównym parametrem uziemień, brany pod uwagę zarówno w warunkach narażeń impulsowych dużej mocy, jak i przy wymuszeniach wolnozmiennych, jest ich rezystancja (impedancja) wejściowa. W przypadku wymuszeń wolnozmiennych i o małych wartościach prądu rozpatruje się rezystancję statyczną uziemień R_{st} , zależącą głównie od konfiguracji (rozmiaru) uziemienia oraz rezystywności gruntu. W przypadku wymuszeń impulsowych dużej mocy, w uziemieniu uwiadcniają się dodatkowe zjawiska, które znacznie wpływają na wartość rezystancji (impedancji) wejściowej. Jest to zjawisko jonizacji w gruncie, związane z przepływem dużych prądów oraz zjawiska falowe związane z szybkością zmian wymuszenia i występowaniem indukcyjności przewodów uziemienia. Zjawisko jonizacji powoduje zmniejszenie rezystancji natomiast w wyniku zjawisk falowych następuje wzrost impedancji wejściowej uziemienia. Dominacja każdego z tych zjawisk, występujących jednocześnie w warunkach narażeń impulsowych dużej mocy, zależna jest od rozmiaru uziemienia. W przypadku uziemień skupionych, których rozmiar od punktu przyłożenia wymuszenia nie przekracza tzw. długości efektywnej [1] dominujące jest zjawisko jonizacji (czyli obniżenie rezystancji wejściowej). Dla uziomów o dużych rozmiarach, dominującym jest wzrost impedancji wejściowej powodowany występowaniem zjawisk falowych.

Autor: dr inż. Robert Ziemia, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: ziemia@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Flisowski Zd., Technika wysokich napięć, WNT Warszawa 2009
- [2] Wołkowiński K., Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1967
- [3] PN-EN 62305-1 Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne
- [4] Harrington R.F., Field computation by moment methods, MacMillan, New York, 1968
- [5] Grcev, L.; Dawalibi, F., An electromagnetic model for transients in grounding systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol: 5, No. 4, pp. 1773-81, Oct. 1990.
- [6] HIFREQ User's Manual: Low and High Frequency Electromagnetic Field Analysis Buried and Overhead Conductor Networks, *Safe Engineering Services & Technologies Ltd.*, Montreal, Canada 1997
- [7] Ziemia R., Modelowanie uziemień w gruncie niejednorodnym, *Przegląd Elektrotechniczny* 2014 R. 90, nr 1, ss.115-118 Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [8] "MODELING GUIDELINES FOR FAST FRONT TRANSIENTS" Report Prepared by the Fast Front Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients WG
- [9] Łoboda M.: Transient Behaviour and Parameters of Earth Electrodes Designed for Lightning Protection System (LPS) in Focus of the Requirements of New Edition of IEC (EN) 62305 standard, 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China
- [10] Geri A., "Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol: 14, No. 3, pp. 1008-1017, July 1999
- [11] Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Impulse Resistance of Concentrated Tower Grounding Systems Simulated by an ATPDraw Object, International Conference on Power Systems Transients, Delft - Netherlands, June, 2011