

Procedura weryfikacji modelu stacji elektroenergetycznej bez wyłączania obiektu z ruchu

Streszczenie. Obecny rozwój gospodarki charakteryzuje coraz większe uzależnienie od pewnego i niezawodnego zasilania w energię elektryczną. Stacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia w dużej mierze determinują prawidłowe funkcjonowanie całego systemu elektroenergetycznego. W referacie zostanie zaprezentowana procedura weryfikacji modelu stacji elektroenergetycznej WN stworzonego w programie CDEGS. Opracowany model będzie wykorzystany do analizy zagrożenia piorunowego urządzeń systemów telemechaniki. Wzrost lokalnego potencjału stacji względem ziemi odniesienia (GPR) zarejestrowany podczas pomiarów terenowych był porównywany z wynikami obliczeń. Analiza przeprowadzana była dla udarów napięciowo-prądowych 1,2/50µs 6kV, 8/20 µs 3kA.

Abstract. Present economic growth depends on electric power. High reliability is at the first place. High voltage substations are crucial for electric power system. This paper will present a verification procedure of the high voltage substation model. Model was constructed in the CDEGS software. Ground potential rise was measured on the real high voltage substation. Measurements were taken for typical surges - 1,2/50µs 6kV, 8/20 µs 3kA. (HV substation model verification process without down-time).

Słowa kluczowe: stacja WN/SN, wzrost lokalnego potencjału uziomu, GPR, wyładowanie atmosferyczne, CDEGS.

Keywords: HV/MV substation, ground potential rise, GPR, lightning, CDEGS.

Wstęp

Obecny rozwój gospodarki charakteryzuje coraz większe uzależnienie od pewnego i niezawodnego zasilania w energię elektryczną. Stacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia w dużej mierze determinują prawidłowe funkcjonowanie całego systemu elektroenergetycznego. Awarie urządzeń w stacjach elektroenergetycznych powodują znaczne straty finansowe dla zakładów energetycznych oraz odbiorów energii elektrycznej. Dodatkowo przerwy w zasilaniu mają duży negatywny oddźwięk społeczny. Katastrofalne w skutkach dla gospodarki każdego kraju może stać się uszkodzenie Głównych Punktów Zasilania (tzw. GPZ'ów), co w ekstremalnym przypadku może doprowadzić do rozpadnięcia się części systemu elektroenergetycznego.

Ze względu na swoją lokalizację, najczęściej na otwartych terenach oraz występowanie wysokich konstrukcji metalowych (np.: słupy linii przesyłowych, mosty szynowe itp.) stacje elektroenergetyczne są szczególnie narażone na bezpośrednie skutki oddziaływania prądów udarowych rozprzyskających się w nich podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych. Mając na uwadze własności systemu uziomowego ulegające dynamicznym zmianom podczas przepływu prądu piorunowego realne staje się zagrożenie powstające na stacji w wyniku wzrostu lokalnego potencjału uziomu (ang. Ground Potential Rise - GPR) względem ziemi odniesienia, innego systemu uziomowego lub innej stacji elektroenergetycznej.

Analizowany obiekt

Krajowe stacje elektroenergetyczne 110/15kV są najczęściej budowane według typowej dokumentacji KSU-3 [2]. Ewentualne modyfikacje dostosowawcze polegają na zmianie umiejscowienia urządzeń i budynków na terenie stacji.

Stacja KSU-3 posiada rozdzielnię 110kV, dwusekcyjną, jednosystemową, szynową, siedmio połową zbudowaną w oparciu o konstrukcje wsporcze wysokie i niskie żelbetowe z oszynowaniem linkowym AFL-6 240mm². W skład rozdzielni 110 kV wchodzi dwa pola liniowe, pole łącznika sekcji, dwa pola transformatorowe, dwa stanowiska transformatorów i dwa pola pomiaru napięcia. Układ rozdzielni 110kV jest typu H4. System uziomowy stacji wykonany jest z taśmy stalowej ocynkowanej – uziom kratowy i wyrównawczy [2].

W analizie rozkładu GPR najważniejszą sprawą jest dokładne odwzorowanie samego systemu uziomowego, który głównej mierze wpływa na wartości napięć na jej terenie. Wyłączniki, transformatory, przekładniki będące na wyposażeniu stacji nie mają bezpośredniego wpływu na wartość GPR podczas przepływu prądu piorunowego w systemie uziomowym. Opracowany na podstawie dokumentacji, system uziomowy analizowanej stacji elektroenergetycznej 110/15kV przedstawiono na rys.1.



Rys.1. System uziomowy analizowanej stacji 110/15kV [2].

Komputerowy model stacji WN

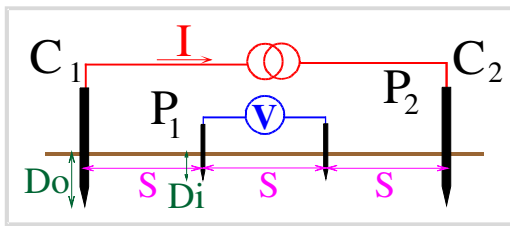
Obliczenia komputerowe przeprowadzono przy wykorzystaniu programu HIFREQ z pakietu CDEGS [3]. W celu uproszczenia obliczeń założono, iż stacja elektroenergetyczna jest wycięta z systemu elektroenergetycznego.

Każdy z metalowych elementów stacji został odwzorowany przewodnikiem o określonych parametrach, zaś element izolacyjny jako przerwa w obwodzie. W sumie model składa się z 1932 elementów. Każdemu zdefiniowanemu metalowemu elementowi w wyniku matematycznego modelowania przypisano jedną niewiadomą odpowiadającą za wartość płynącego w nim prądu. Przy opisie matematycznym pominięto ewentualne różnice pomiędzy stanem faktycznym a projektem.

Model gruntu

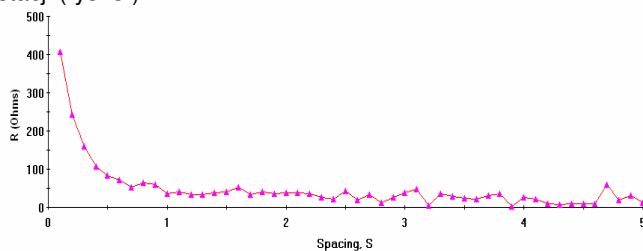
Strukturę geologiczną gruntu aproksymowano przy pomocy modelu warstwowego. Do stworzenia tego modelu wykorzystano wyniki wielopunktowego i wielotrawersowego pomiaru rezystywności gruntu na terenie analizowanej stacji oraz specjalistycznego oprogramowania komputerowego RESAP będącego również składnikiem pakietu CDEGS. Przeprowadzana analiza jest odmianą elektrooporowego

sondowania gruntu. Sam pomiar rezystywności gruntu przeprowadzono przy pomocy metody Wennera wprowadzając prąd do dwóch zewnętrznych elektrod wbitych na głębokość 8cm (rys. 2.).



Rys. 2. Pomiar rezystywności gruntu – metoda Wenner'a .

Mierzono potencjał między elektrodami również wbitymi na głębokość 8cm. Odstęp między elektrodami prądowymi i napięciowymi zmieniano w zakresie od 10cm do 4m co 10cm. Pomiar wykonano w różnych miejscach na terenie stacji (rys. 3.).



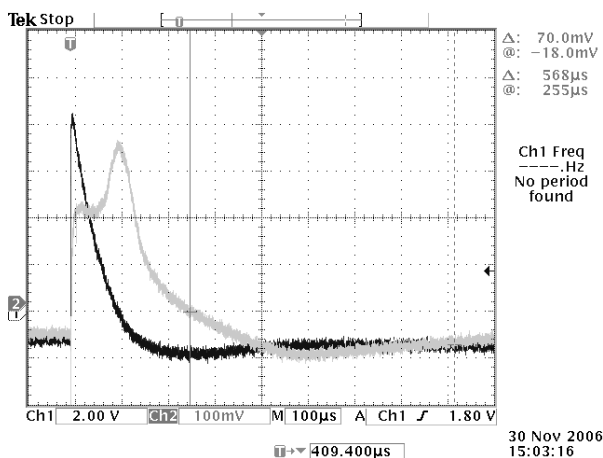
Rys. 3. Rezystywności gruntu w funkcji odległości między elektrodami (S).

W wyniku tych pomiarów i obliczeń komputerowych aproksymowano strukturę geologiczną gruntu modelem warstwowym o następujących parametrach:

- warstwa pierwsza o rezystywności $236,46 \Omega \cdot m$ i grubości 20,3 cm,
- warstwa druga o rezystywności $48,81 \Omega \cdot m$ i nieskończonej grubości.

Procedura weryfikacji modelu

Na podstawie wyników wielu serii pomiarów terenowych opracowano metodę weryfikacji poprawności modelu stacji. Do wymuszenia przepływu prądu wykorzystano generator napięciowo-prądowy $1,2/50\mu s - 8/20 \mu s$. Rzeczywiste przebiegi napięcia i prądu na wyjściu generatora podczas badań terenowych przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Rzeczywisty przebieg napięcia i prądu z wyjścia generatora (krzywa koloru czarnego – napięcie $U_{max}=6kV$, krzywa koloru szarego – prąd $I_{max}=157A$).

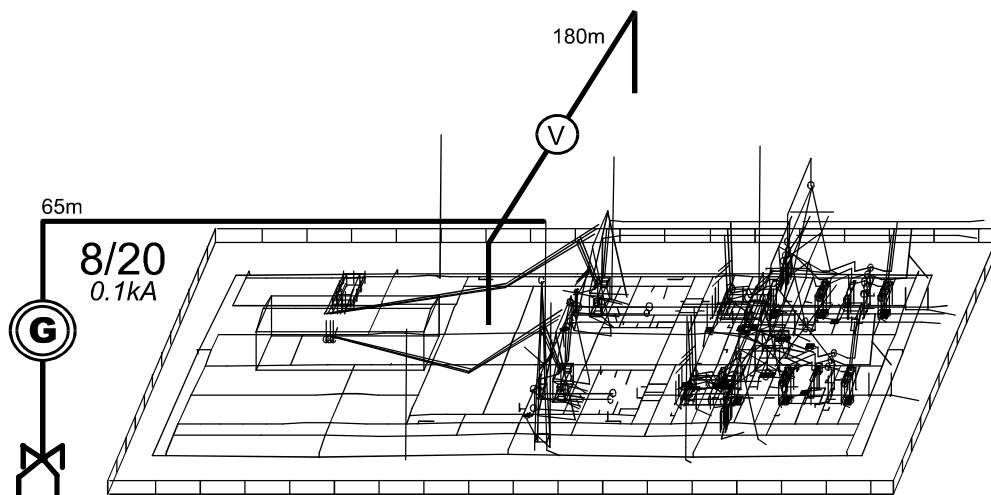
Kolejne etapy procedury zamieszczone są na rys. 5. Uwzględniono w niej niezbędne wymogi formalne. W celu uniknięcia sprzężeń galwanicznych oraz odizolowania generatora, sprzętu rejestrującego od systemu uziomowego do zasilania wykorzystano agregat prądowórczy i zespół urządzeń awaryjnego zasilania (UPS). Ważne jest również zapewnienie separacji galwanicznej między generatorem i oscyloskopem.

Niezbędne jest sprzężenie tych urządzeń ze względu na konieczność właściwej synchronizacji. Fizycznie zastosowano izolowaną pętlę napięciową w kanale drugim oscyloskopu sprzężoną magnetycznie z obwodem prądowym generatora. Rejestrowany w ten sposób przebieg stanowił poziom odniesienia dla skutecznego wyzwalania oscyloskopu, zaś kanał pierwszy dokonywał właściwej rejestracji przebiegu. Ze względu na charakter analizowanych zjawisk prąd z generatora wprowadzono do zwodu pionowego stacji stanowiącą element ochrony odgromowej stacji szczególnie narażony na bezpośrednie wyładowanie piorunowe (rys. 6.).

Pętlę prądową zamknięto przy pomocy dodatkowych elektrod prądowych wbitych po za terenem stacji, w odległości około 65m w linii prostej od zwodu pionowego.

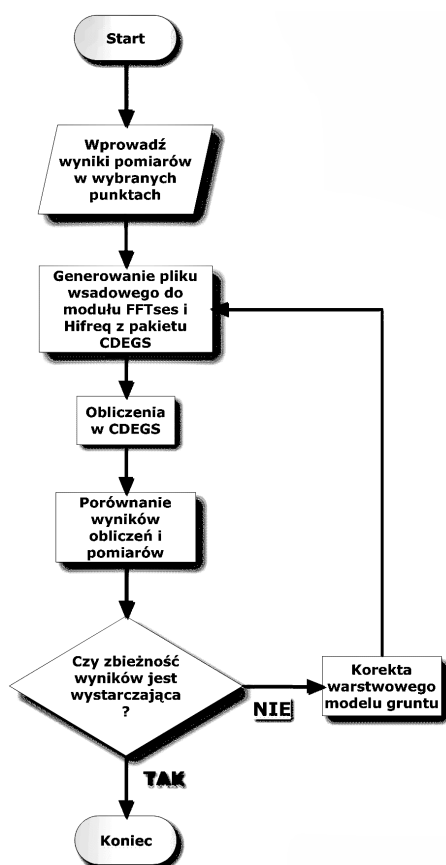


Rys. 5. Procedura przeprowadzania badań terenowych z uwzględnieniem przepisów BHP



Rys. 6. Schemat układu pomiarowego wykorzystanego do badań terenowych.

Źródłem uderzeń był wysokonapięciowy generator EM-Test wytwarzający przy otwartych zaciskach wyjściowych napięcie uderowe $1,2/50\mu s$ i wartości szczytowej do $6.6kV$, a przy zaciskach zwartych prąd uderowy $8/20\mu s$ dochodzący do $3,3kA$. Mierzono różnicę potencjałów między punktami kontrolnymi stacji wyznaczonymi pod kątem badania napięć rażeniowych (zgodnie z protokołami) a ziemią odniesienia. Sondy napięciowe stanowiące punkt odniesienia przy pomiarze GPR zostały wbite poza terenem stacji. Odległość w linii prostej między środkiem geometrycznym stacji a sondami wynosiła około $180m$.



Rys. 7. Algorytm weryfikacji modelu stacji

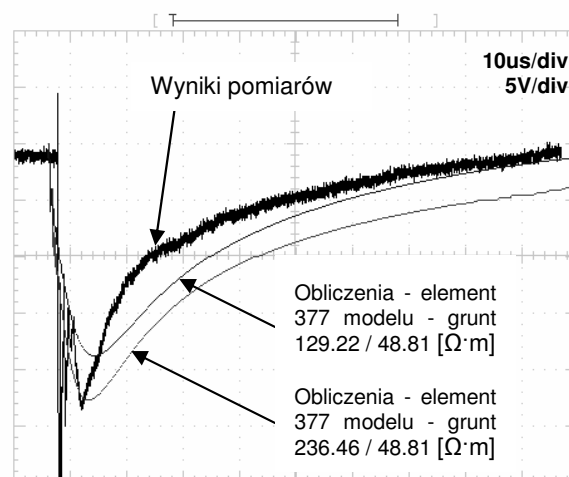
W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano rozkład napięć w wybranych punktach na terenie stacji elektroenergetycznej. Otrzymany rozkład porównano z

wynikami obliczeń przeprowadzonych za pomocą programu HIFREQ wchodzącego w skład pakietu CDEGS firmy SesTech [3]. Jako wymuszenie wykorzystano napięcia uderowe zaobserwowane na wyjściu generatora. Układ elektrod prądowych i napięciowych umiejscowiono również w przestrzeni trójwymiarowej stanowiącej część modelu stacji.

Ze względu na przyjęte uproszczenia, w trakcie przyjmowania

dwuwarstwowej struktury gruntu konieczne było zastosowanie rekurencyjnej procedury obliczeń (rys. 7). Koryguje ona błąd aproksymacji modelu gruntu wyznaczony programem RESAP. Zaproponowany algorytm umożliwia jednocześnie analizę wpływu struktury geologicznej gruntu na wartość wzrostu potencjału systemu uziomowego względem ziemi odniesienia.

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wyników pomiarów i obliczeń po zastosowaniu algorytmu rekurencyjnego.



Rys. 8. Zestawienie otrzymanych wyników pomiarów i obliczeń.

Opracowany model stacji wykorzystano do analizy zagrożenia występującego podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego na terenie stacji.

Szczegółowe obliczenia wpływu struktury gruntu wykonano przyjmując następujące założenia:

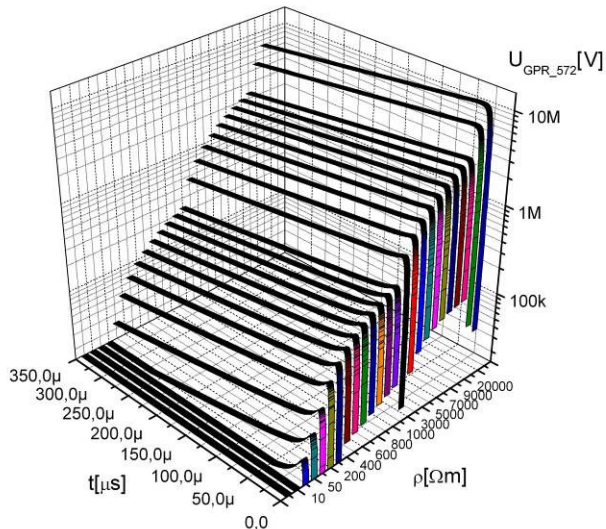
- jednowarstwowy model struktury gruntu (zmienna rezystywność),
- dwuwarstwowy model struktury gruntu (zmienna szerokość poszczególnych warstw),
- prąd wymuszający odpowiadający prądowi piorunowemu wyładowania doziemnego na terenie stacji o wartości szczytowej $100 kA$ i kształcie $10/350\mu s$ opisano równaniem

$$(1) \quad i(t) = \frac{I}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

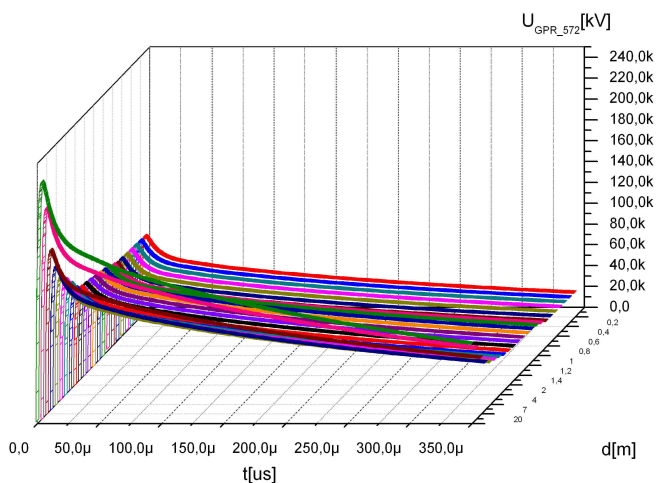
gdzie:

t - czas, $\alpha = 2049,38 s^{-1}$, $\beta = 563\,768,3 s^{-1}$, $I = 100kA$, $\eta = 0,976$

Rezystywności gruntu wpływa w sposób liniowy na wzrost GPR podczas przepływu prądu piorunowego w systemie uziomowym – rys. 9. Przy nie jednorodnym modelu gruntu zależność przestaje być liniowa. Wyraźnie zależy od grubości warstw i ich rezystywności – rys. 10.



Rys. 9 Wpływ rezystywności gruntu na wzrost lokalnego potencjału systemu uziomowego stacji przy wymuszeniu 10/350μs 100kA.



Rys. 10. Wpływ struktury gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności 500 Ω·m – zmienna grubość warstwy od $d=0,1m$ do $d=30m$, warstwa 2 o rezystywności 100 Ω·m i nieskończonej grubości $d = \infty$) przy wymuszeniu 10/350μs 100kA.

Wnioski

Obliczenia wykazały, że w stacjach elektroenergetycznych 110/15 kV jednym z głównych zagrożeń podczas wyładowania piorunowego jest skok lokalnego potencjału systemu uziomowego względem ziemi odniesienia. Na stacji elektroenergetycznej mamy do czynienia z tzw. „lejem napięciowym”, który powoduje powstanie dużych różnic potencjałów.

Istnieje realne zagrożenie dla urządzeń mających bezpośrednie lub pośrednie połączenie z systemami uziomowymi o innym potencjale. Istnieje wpływ rezystywności gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi.

Przeprowadzona analiza wykazała, że numeryczne określanie przepięć na terenie stacji elektroenergetycznych pozwala na wstępną ocenę występującego zagrożenia i właściwy dobór elementów oraz układów ograniczających lub eliminujących powstające przepięcia. Mając na uwadze rzeczywistą strukturę gruntu możliwe jest planowanie ułożenia okablowania względem zwodów lub innych wysokich obiektów, w które może nastąpić wyładowanie. Możliwa jest również przyszła ocena zagrożenia piorunowego przyłączy sygnałowych urządzeń, do których dochodzą linie z terenu stacji.

LITERATURA

- [1] PN-E-05115:2002, *Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1kV.*
- [2] Energoprojekt Kraków S.A., *Projekt typowej stacji 110/15kV typu KSU-3.*
- [3] Ses Software Canada, www.sestech.com

Autor: mgr inż. Jarosław Wiater, Politechnika Białostocka, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: jaroslawwiater@we.pb.bialystok.pl