

Wpływ rezystywności gruntu stacji elektroenergetycznej WN na zagrożenie piorunowe obwodów telemechaniki

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawione będą wyniki komputerowych symulacji oddziaływania wyładowań piorunowych na obwody sygnalizacji i sterowania stacji elektroenergetycznych wysokich napięć - 110/15kV. Zaprezentowany zostanie model obliczeniowy i wyniki obliczeń napięć indukowanych w obwodach telemechaniki na terenie stacji. Analizowany będzie wpływ rezystywności gruntu i jego struktury geologicznej na wartość indukowanych napięć.

Abstract. In the HV substation the damages or malfunctions of the electric and electronic equipment were very often caused by lightning. Electronic devices are very sensitive for any transient state. In this paper a lightning overvoltages on the open air high-voltage HV substation is considered with respect to different ground resistivity. This transient state induces voltage and current in low-voltage cables, which can cause severe problems in control, measurement and secondary circuits.

Słowa kluczowe: rezystywność gruntu, wyładowanie atmosferyczne, obwody sterowania, stacja WN/SN, model 3D.

Keywords: ground resistivity, lightning, control circuits, HV/MV substation, 3D modeling.

Wstęp

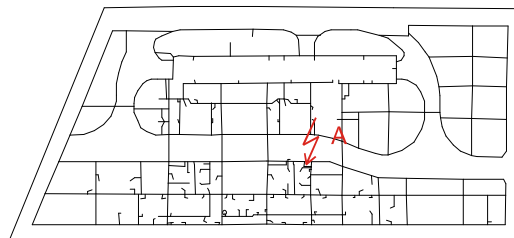
Problem przepięć w układach telemechaniki stacji elektroenergetycznych WN/SN zaczął się pojawiać równolegle ze wzrostem liczby urządzeń elektronicznych w nich stosowanych. Przy obecnym poziomie wykorzystania urządzeń elektronicznych, techniki cyfrowej do kontroli i nadzorowania stacji WN każdej jej nieprawidłowe funkcjonowanie może doprowadzić do przerwy w dostawie energii elektrycznej a co za tym idzie znacznych strat finansowych. Obecnie zapewnienie prawidłowego funkcjonowania urządzeń na stacji elektroenergetycznej wymaga znajomości występujących zagrożeń.

Jednym z zagrożeń mogących negatywnie oddziaływać na funkcjonowanie urządzeń są wyładowania atmosferyczne bezpośrednie i pośrednie. W przypadku wyładowań bezpośrednich w stację WN największy wpływ na poziom bezpieczeństwa ludzi oraz niezawodność urządzeń ma system uziomowy. Dominujący wpływ na parametry systemu uziomowego ma rezystywność gruntu. Konstrukcja, rozległość systemu uziomowego jest stała, zaś rezystywność gruntu zmienna zależna od pory roku, warunków atmosferycznych, struktury geologicznej itp. Znajomość struktury geologicznej gruntu, zmiany rezystywności gruntu wraz z głębokością mogą posłużyć do oceny zagrożenia i poprawienia bezpieczeństwa urządzeń telemechaniki stosowanych na stacji elektroenergetycznej.

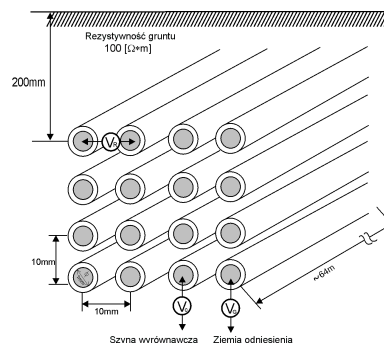
W niniejszym opracowaniu podjęto próbę wyznaczenia wpływu rezystywności gruntu na wartość szczytową prądów i napięć indukowanych w przewodach teletransmisyjnych ułożonych na terenie stacji WN podczas bezpośredniego wyładowania atmosferycznego. Zbadano wpływ dwuwarstwowej struktury geologicznej gruntu na wartość szczytową prądów i napięć. Analiza pozwoli zoptymalizować sposób układania obwodów telemechaniki na terenie stacji pod kątem wartości napięć i prądów indukowanych podczas wyładowania atmosferycznego.

Analizowany obiekt

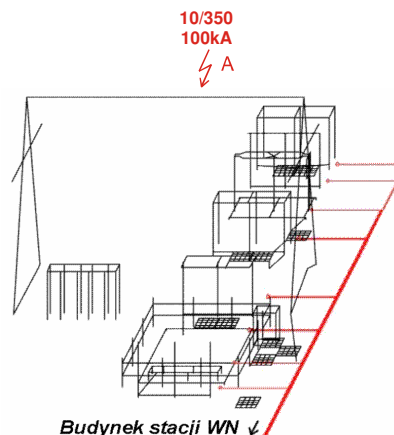
Analizowana stacja posiada rozdzielnię 110kV, dwusekcyjną, jednosystemową, szynową, siedmio polową zbudowaną w oparciu o konstrukcje wsporcze wysokie i niskie żelbetowe z oszynowaniem linkowym AFL-6 240mm². W skład rozdzielni 110 kV wchodzi dwa pola liniowe, pole łącznika sekcji, dwa pola transformatorowe, dwa stanowiska transformatorów i dwa pola pomiaru napięcia. Układ rozdzielni 110kV jest typu H4. Uziemienie



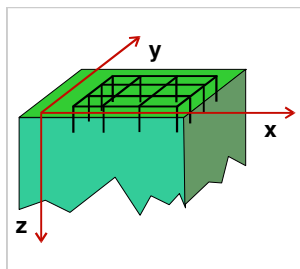
Rys.1. System uziomowy stacji 110/15kV przyjęty do obliczeń przyjęty na podstawie oryginalnych planów [2].



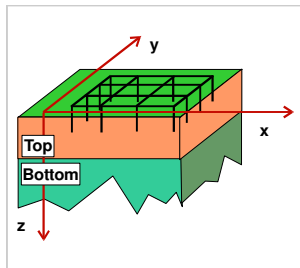
Rys. 2 Układ przewodów w kanale kablowym stacji.



Rys. 3. Widok 3D pola pomiarowego stacji – użytego do symulacji.



Rys. 4. Jednowarstwowy model struktury gruntu.



Rys. 5. Dwuwarstwowy model struktury gruntu.

stacji wykonane jest z bednarki ocynkowanej – uziom kratowy i wyrównawczy [1,2].

Dla potrzeb prowadzonych obliczeń stworzono na podstawie oryginalnej dokumentacji przestrzenny model stacji elektroenergetycznej 110/15kV. Do analizy przebiegów i wpływu rezystywności gruntu najważniejsze jest dokładne odwzorowanie samego systemu uziomowego, który jako najważniejszy element stacji wysokiego napięcia podczas wyładowania atmosferycznego ma wpływ na zagrożenie piorunowe układów telemechaniki. System uziomowy analizowanej stacji elektroenergetycznej 110/15kV jest przedstawiony na rysunku 1.

Rozmieszczenie linii transmisyjnych przedstawiono

Komputerowy model stacji WN

Obliczenia komputerowe przeprowadzono przy wykorzystaniu programu HIFREQ [4]. W celu uproszczenia obliczeń założono, iż stacja elektroenergetyczna jest wycięta z systemu elektroenergetycznego.

W analizowanej stacji elektroenergetycznej mamy do czynienia z dwu lub trzy warstwowym środowiskiem. Dla każdej warstwy (powietrze, ziemia pierwsza lub druga warstwa) ciągłość stycznych elementów dla poszczególnych warstw na granicy ośrodków wykorzystano jako warunki brzegowe podczas przejścia z jednego do drugiego ośrodka.

W modelu komputerowym wykorzystano trójwymiarowy system odwzorowywania konstrukcji przestrzennej stacji elektroenergetycznej. Każdy z metalowych elementów stacji został odwzorowany jak jeden „przewodnik”, 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. Każda niewiadoma odpowiada za wartość prądu płynącego w przyporządkowanym mu przewodniku. Przy opisie matematycznym pominięto ewentualne różnice pomiędzy stanem faktycznym a projektem.

Jako punkt odniesienia założono jednorodny, jednowarstwowy model struktury gruntu o rezystywności 100 Ω·m i przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_r=1$ – patrz rysunek 4. Aby móc porównać wyniki wykorzystano dwuwarstwowy model struktury gruntu o zmiennej rezystywności pierwszej warstwy (10, 500, 1000 Ω·m) przy niezmiennych wartościach rezystywności drugiej warstwy (100 Ω·m) – patrz rysunek 5.

Szczegółowe obliczenia wykonano przyjmując następujące założenia:

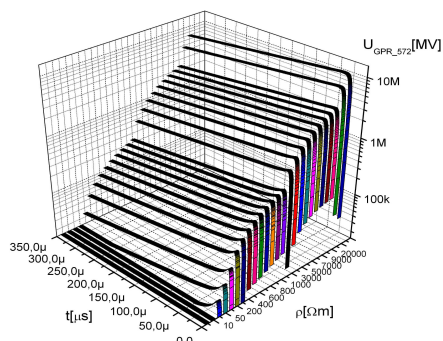
- jednowarstwowy model struktury gruntu (zmienna rezystywność),
- dwuwarstwowy model struktury gruntu (zmienna szerokość poszczególnych warstw),
- prąd wymuszający wprowadzono do punktu A oznaczonego na rysunku 1 i 3,
- prąd wymuszający odpowiadał prądowi piorunowemu wyładowania doziemnego na terenie stacji o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 μs opisany równaniem 1.

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

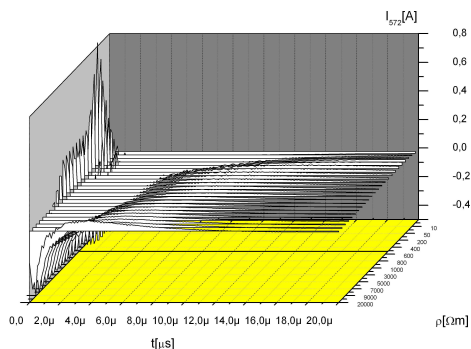
gdzie: t - czas, $\alpha = 2049,38 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 563 \text{ } 768,3 \text{ s}^{-1}$, $I = 100 \text{ kA}$, $\eta = 0,976$

Wyniki obliczeń

Aby kompleksowo przeanalizować wpływ struktury gruntu na wartość napięć i prądów indukowanych w okablowaniu stacji rozpatrzono cztery różne przypadki. Pierwszy wariant zakłada jednolitą strukturę gruntu (model ziemi jednowarstwowy). Wartość rezystywności gruntu zmieniano od 1 Ω·m do 30000 Ω·m, co odpowiada praktycznie każdej możliwej strukturze gruntu. Począwszy od praktycznie podmokłych terenów do terenów skalistych. Na rysunku 6 przedstawiono zależność opisującą wpływ rezystywności jednowarstwowego gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi w dziedzinie czasu. Analizowany był konkretny przewód o symbolu „572” wg. projektu stacji. Jest to przewód łączący przekładnik napięciowy z budynkiem kontrolno-pomiarowym. Można zauważyć, iż zależność rezystywności gruntu od wartości szczytowej napięcia względem lokalnej ziemi ma charakter logarytmicznie rosnący. Na rysunku 7 przedstawiono

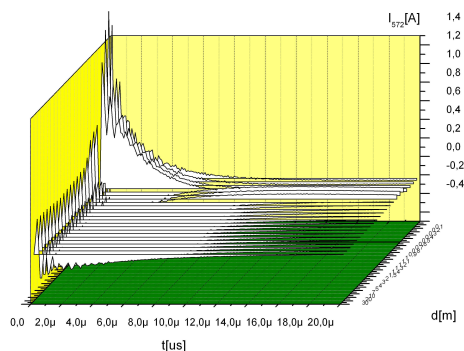


Rys. 6. Wpływ rezystywności gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi.

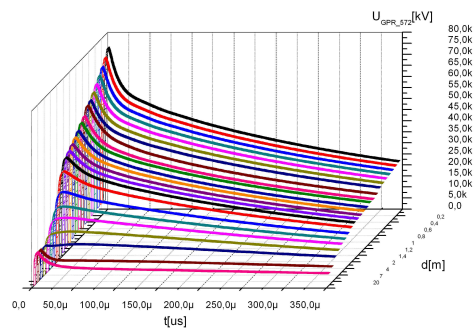


Rys. 7. Wpływ rezystywności gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli.

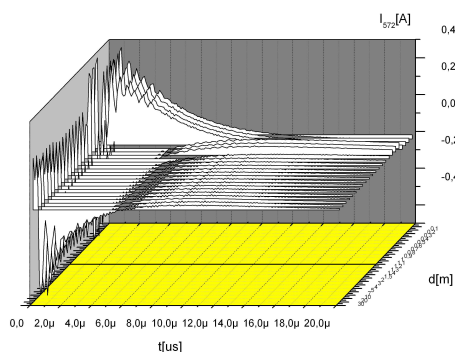
na rysunku 3. Kable te umieszczone są po ziemi, na głębokości 20cm w kanale kablowym, odstęp między kolejnymi warstwami 1 cm (rys. 2). Siatka uziomowa wykonana z bednarki o przekroju poprzecznym 120mm² umieszczona jest pod ziemią na głębokości 0,8m.



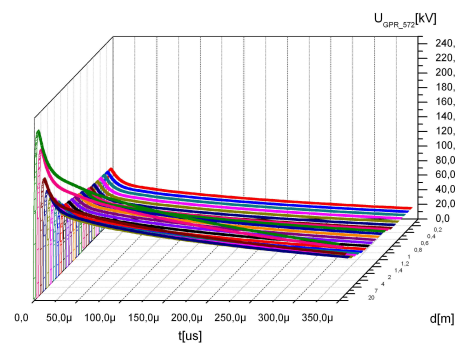
Rys. 8. Wpływ struktury gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $10 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).



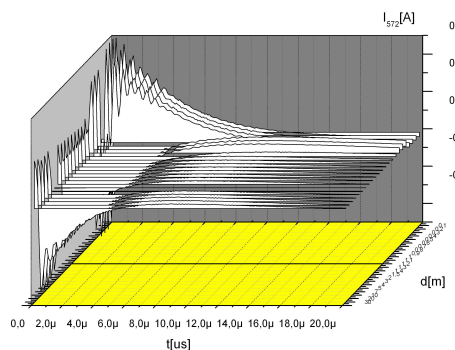
Rys. 11. Wpływ struktury gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $10 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).



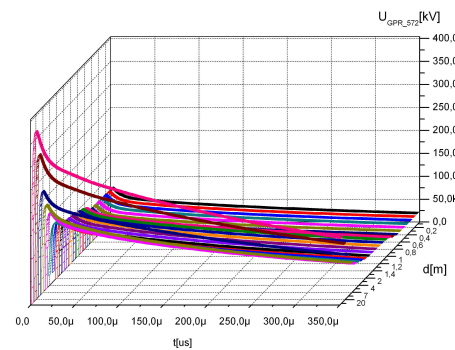
Rys. 9. Wpływ struktury gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $500 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).



Rys. 12. Wpływ struktury gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $500 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).



Rys. 10. Wpływ struktury gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $1000 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).



Rys. 13. Wpływ struktury gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi (dwuwarstwowy model gruntu, warstwa 1 o rezystywności $1000 \Omega\cdot\text{m}$ – zmienna grubość warstwy od $d=0,1\text{m}$ do $d=30\text{m}$, warstwa 2 o rezystywności $100 \Omega\cdot\text{m}$ i nieskończonej grubości $d = \infty$).

zależność opisującą wpływ zmiany rezystywności gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli - między przekładnikiem napięciowym i układem kontrolno-pomiarowym stacji. Przyjęto, iż przekładnik jest obciążony opornością dopasowującą 100Ω . Analizując przedstawioną zależność można zauważyć, że dla danej konfiguracji stacji przy rezystywności gruntu na poziomie $400 \Omega\cdot\text{m}$ występuje ekstremum płynącego prądu w wyżej opisanej pętli.

Aby dodatkowo przeanalizować sezonowe zmiany rezystywności gruntu na wartość napięć i prądów indukowanych w okablowaniu stacji rozpatrzono kolejne trzy przypadki tym razem wykorzystujące dwuwarstwowy model gruntu. Na rysunku 8 przedstawiono wpływ zawilgocenia wierzchniej warstwy gruntu na wartość prądu indukowanego w pętli opisanej wyżej. Jako zmienną do analizy przyjęto grubość pierwszej, zawilgoconej warstwy

odzwierciedlając w ten sposób różny stopień przeniknięcia wody (rezystywności pierwszej warstwy gruntu $10\Omega\cdot m$). Począwszy od małego rzędu 10 cm do skrajnie dużego – 30 metrów. Analiza wykazuje znaczny wzrost wartości szczytowej indukowanego prądu do głębokości zakopania uziomu kratowego. Ekstremum tego wzrostu występuje przy grubości pierwszej warstwy na poziomie 0,4m. Stanowi to podwójną głębokość umiejscowienia kabla, w którym obliczano wartość indukowanego prądu. Po przekroczeniu grubości pierwszej warstwy na poziomie 0,8m – czyli głębokości umieszczenia głównego uziomu kratowego stacji nastąpiło pewnego rodzaju zjawisko „nasylenia” – stała wartość prądu indukowanego w pętli przy dalszym zwiększaniu grubości pierwszej warstwy. W kolejnych dwóch przypadkach przy symulowaniu tym razem stopniowego sezonowego wysuszenia się gruntu (rezystywności pierwszej warstwy gruntu odpowiednio 500 i $1000\Omega\cdot m$) obserwowano podobne zjawisko „nasylenia” przy praktycznie tych samych grubościach pierwszej warstwy gruntu – patrz rysunek 9 i 10. Na rysunku 11 przedstawiono wpływ zawilgocenia pierwszej warstwy gruntu na wzrost lokalnego potencjału ziemi. Wraz ze zwiększaniem grubości zawilgoconej warstwy (rezystywności pierwszej warstwy gruntu $10\Omega\cdot m$) liniowo spada wartość lokalnego potencjału ziemi. Odwrotny przypadek przedstawiają rysunki 12 i 13. Tym razem wzrost grubości pierwszej warstwy powoduje wzrost lokalnego potencjału ziemi odpowiednio dla rezystywności 500 i $1000\Omega\cdot m$ – stopniowe wysuszenie gruntu, zależność nie jest liniowa.

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. 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 jak również na wartość prądu indukowanego w pętli na terenie stacji. Występują ekstrema wartości szczytowej indukowanego prądu.

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 ocena zagrożenia piorunowego przyłączy sygnałowych urządzeń, do których dochodzą linie z terenu stacji.

LITERATURA

- [1] PN-E-05115, *Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1kV*, 12-15.
- [2] Energoprojekt Kraków S.A., *Zestawienie wyników obliczeń do uziemienia stacji 110/15kV*, 5-6.
- [3] Energoprojekt Kraków S.A., *Dokumentacja techniczna stacji 110/15kV - typ KSU-3*.
- [4] Ses Software Canada, *HIFREQ Theory*, 7-12.

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