Andrzej SOWA
Politechnika Białostocka, 15-353 Białystok, ul. Wiejska 45D, e-mail: andrzejsowa@ochrona.net.pl
Jarosław WIATER
Politechnika Białostocka, 15-353 Białystok, ul. Wiejska 45D, e-mail: jaroslawwiater@vela.pb.bialystok.pl

STEROWANIE ROZKŁADEM POLA POTENCJAŁU NA TERENIE STACJI ELEKTROENERGETYCZNEJ 110/15KV

Sterowanie rozkładem pola potencjału pozwoliło zmniejszyć wielokrotnie ryzyko wystąpienia rażeniowego napięcia krokowego na terenie stacji elektroenergetycznej. Zastosowanie proponowanych modyfikacji umożliwiło osiągnięcie znacznego ograniczenia występującego zagrożenia. W przedstawionym przykładzie uzyskano ponad 2,5 krotne zmniejszenie pola powierzchni rażenia w porównaniu z rozkładem uzyskanym dla typowego projektu systemu uziomowego stacji.

1. WPROWADZENIE

Badania uziemień stacji elektroenergetycznej są czynnościami wykonywanymi przed oddaniem obiektu do eksploatacji oraz przeprowadzanymi okresowo w pracujących już obiektach. Celem badań jest sprawdzenie wymagań zawartych w normie PN-E-05115 [1].

Ocenę zagrożenia porażeniowego można dokonać na podstawie wyników pomiarów napięć rażeniowych. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości konieczne jest podjęcie działań, których celem jest zmniejszenie występującego zagrożenia do poziomu akceptowanego przez przepisy.

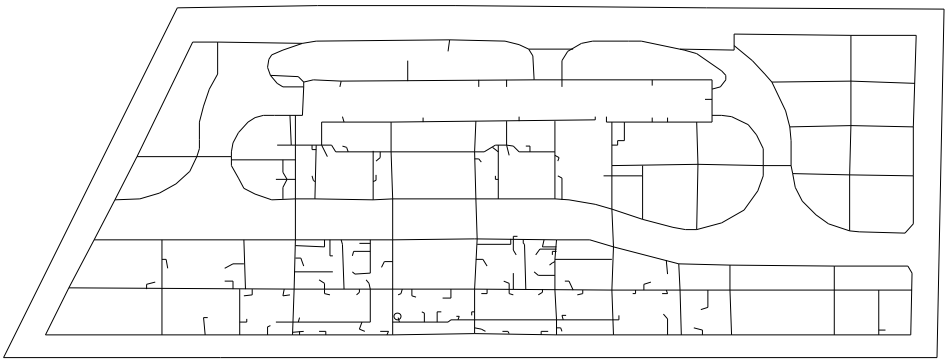
Na terenie stacji mamy do czynienia z tzw. „lejem napięciowym”, powodującym powstawanie dużych różnic potencjałów. Jednym z miejsc gdzie wartości napięć rażeniowych są znaczne jest obrzeże stacji elektroenergetycznej, a w szczególności jej naroża.

2. ANALIZOWANY OBIEKT

W analizie rozkładu napięć najważniejsze jest dokładne odwzorowanie samego systemu uziomowego, który jest podstawowym elementem stacji wysokiego napięcia wpływającym na wartości napięć rażeniowych na jej terenie.

Wyłączniki będące na wyposażeniu stacji skracają jedynie czas trwania rażenia, nie mają bezpośredniego wpływu na wartość napięcia rażeniowego. Pozostałe elementy takie jak np. transformatory, przekładniki także nie mają większego wpływu na wartości napięć rażeniowych przy założeniu, iż znamy wartości prądu uziomowego.

Analizowana stacja stanowi część systemu elektroenergetycznego dużej aglomeracji miejskiej. System uziomowy analizowanej stacji elektroenergetycznej 110/15kV przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 System uziomowy stacji 110/15kV przyjęty do obliczeń (widok 2D) przyjęty na podstawie oryginalnych planów systemu uziomowego typowej stacji 110/15kV.

3. ANALITYCZNA METODA WYZNACZANIA ROZKŁADU POLA POTENCJAŁU NA TERENIE STACJI 110/15kV

Obliczenia rozpływu prądów i rozkładu pola potencjału na terenie stacji przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszej kolejności wyznaczono rozpływ prądów w elementach przewodzących a potem na ich podstawie określono rozkład pola wymuszony przez przepływający prąd. W tym celu wykorzystano równania Maxwella z warunkami początkowymi dla jednorodnego ośrodka, które można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= \dot{\vec{B}} \\ \nabla \times \vec{H} &= \dot{\vec{D}} + \vec{J}_{\text{total}} \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie całkowita gęstość prądu :

$$\vec{J}_{\text{total}} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_{\text{ext}} \tag{2}$$

gdzie:

σ - konduktywność ośrodka

$\vec{J}_{\text{ext}}$ - gęstość prądu wymuszającego

Zakładając rozkład na składowe harmoniczne w postaci *exp(jωt)* i zależności:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \end{aligned} \tag{3}$$

można powyższe równania uprościć do:

$$\begin{aligned} \varepsilon \nabla \cdot \vec{E} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= j\omega\mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= \theta \vec{E} + \vec{J}_{\text{ext}} \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:

$\theta = \sigma + j\omega\varepsilon$ - zespolona konduktywność ośrodka.

W analizowanym przypadku mamy do czynienia z ośrodkiem dwuwarstwowym. W takim przypadku dla każdej kolejnej warstwy (ziemia, powietrze) należy rozwiązywać oddzielnie przedstawiony układ równań (4). Ciągłość stycznych elementów dla poszczególnych warstw na granicy ośrodków wykorzystano jako warunki brzegowe podczas przejścia z jednego do drugiego ośrodka - tzn. założono, iż na granicy ośrodków nie może istnieć połączenie elementów przewodzących [2].

Obliczenia wykonano przy następujących założeniach [3]:

- system uziomowy
  - rezystywność gruntu przy modelu jednorodnym ziemi $\rho = 11{,}7\ \Omega\cdot m$,
  - bednarka uziomu głównego kratowego 30x4 mm,
  - przewody uziemiające wykonane z bednarki 2x (40x5)mm,
  - głębokość zakopania 0,8 m.
- parametry prądu zwarciowego
  - prąd zwarcia 1-fazoweg $I_{zw1f} = 14350$ A,
  - prąd uziomowy $I_u = 9113$ A,
- inne parametry
  - średni czas trwania zwarcia Σt_f=0,8s
  - współczynnik redukcyjny linii r=0,98
  - moc zwarciowa na terenie stacji na napięciu 110 kV S_{z110kV}=3038 MVA
  - moc zwarciowa na terenie stacji na napięciu 15 kV S_{z15kV}=145,46 MVA

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

Podczas obliczeń wymuszono prąd uziomowy z zewnętrznego źródła, którym w warunkach rzeczywistych, przy założeniu wielkoprądowej metody pomiarowej napięć wrażeniowych, może być inna stacja elektroenergetyczna.

Na terenie stacji analizowano:

- rozkład pola potencjału względem ziemi odniesienia,
- rozkład napięć krokowych,
- gradient rozkładu napięcia krokowego względem ziemi odniesienia.

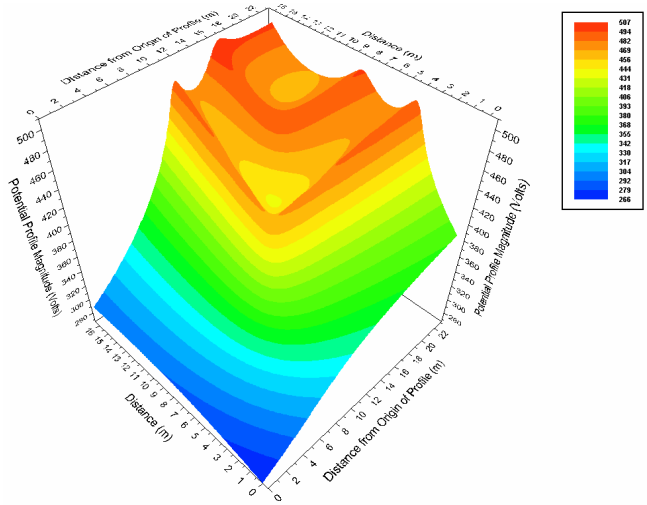
Przykłady wyznaczonych wartości przedstawiono na rys. 2, 3 i 4.

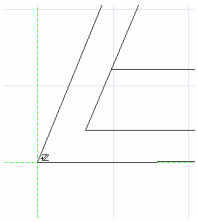
4. SZTUCZNE KSZTAŁTOWANIE ROZKŁADU POLA POTENCJAŁU

Sztuczne kształtowanie rozkładu pola na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15 ma na celu ograniczenie wartości gradientu pola potencjału, co jednocześnie ogranicza wartości szczytowe napięć krokowych. Gradient pola potencjału jest w przybliżeniu matematycznym ekwiwalentem napięcia krokowego na terenie stacji.

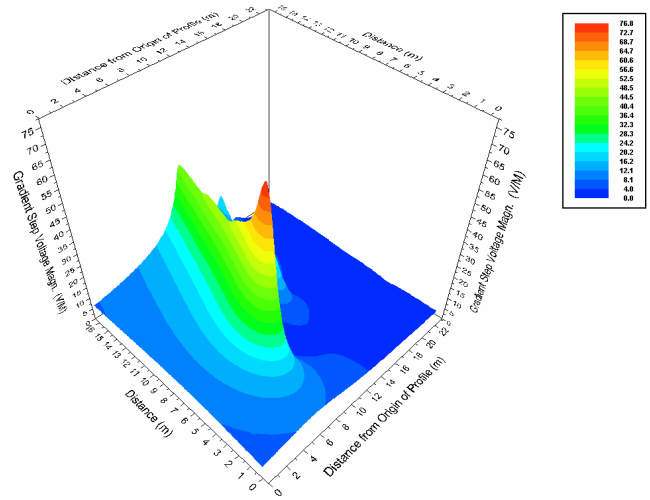
Skuteczne ograniczanie wartości szczytowych gradientu pola potencjału wymaga w pierwszej kolejności zlokalizowania miejsc w analizowanym obszarze, które mają największy wpływ na wartość średnią w przeliczeniu na jednostkę kwadratową. W przypadku stacji 110/15kV takimi miejscami są naroża - bezpośrednie sąsiedztwo ogrodzenia stacji i terenu poza nią.

Kształtować rozkład można na wiele sposobów. Jego jakość możemy oszacować na podstawie współczynnika rażenia k_r określonego na analizowanym terenie. Jest on wprost proporcjonalny do pola powierzchni, na którym jest przekroczona wartość napięcia krokowego dopuszczalna uznana za próg bezpieczeństwa i odwrotnie proporcjonalna do pola powierzchni całkowitej analizowanego terenu [1].

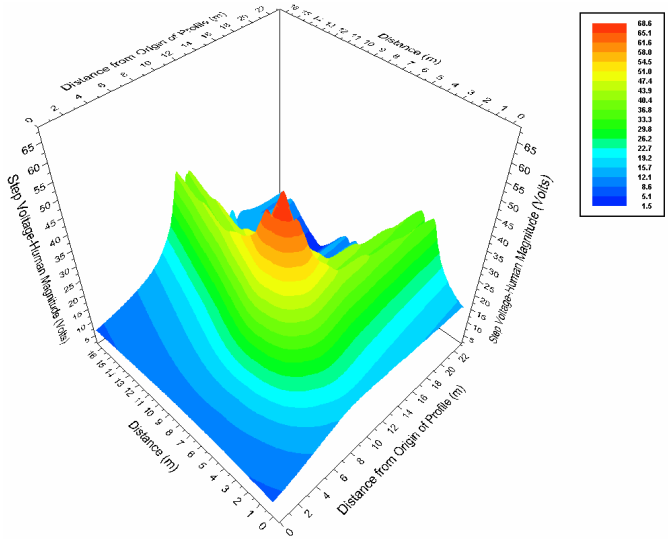




Rys. 2. Rozkład pola potencjału względem ziemi odniesienia na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV – naroże stacji.



Rys. 3. Gradient rozkładu napięcia krokowego względem ziemi odniesienia na terenie stacji 110/15kV.



Rys. 4. Rozkład napięć krokowych na terenie stacji 110/15kV.

W najgorszym przypadku, gdy na całym analizowanym terenie przekroczone są dopuszczalne wartości napięć krokowych, opisany współczynnik przyjmie wartość k_r=1.

Jeśli w żadnym miejscu analizowanego terenu nie występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości napięć krokowych to k_r=0.

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{i}{n} \cdot Pi}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \tag{5}$$

gdzie:

n – ilość przedziałów, na które podzielono maksymalny zakres napięcia krokowego,

P_i – pole powierzchni zajmowane przez dany obszar o określonym przedziale napięcia krokowego,

k_r – współczynnik rażenia.

Kolejną metodą oceny jakości modyfikacji systemu uziomowego jest maksymalizacja gradientu napięcia krokowego. Jest on odwrotnie proporcjonalny do obszaru, na którym wartość napięcia krokowego przekracza dopuszczalne wartości.

Oceną stopnia jakości powyższego kryterium jest współczynnik rażenia przy maksymalnej wartości napięcia krokowego - k_{pmax}. Określony jako stosunek pola o maksymalnej wartości napięcia krokowego na danym obszarze do pola o minimalnej wartości napięcia krokowego na danym obszarze przy założeniu, że dany obszar mamy podzielony na trzy strefy rażenia i są one zawsze większe od zera ($P_{MAX}>0$, $P_{MED}>0$, $P_{MIN}>0$).

$$k_{p\max} = \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} \tag{6}$$

Najbardziej optymalnym wariantem jest sposób modyfikacji oznaczono liczbą porządkową 1. Zmniejsza on k_{pmax}=2,62 razy pole powierzchni rażenia w porównaniu do oryginalnej wersji systemu uziomowego przy jednocześnie optymalnych kosztach. Obliczanie powyższych współczynników jest wykonalne tylko numerycznie, gdyż bazują one na rozkładach napięć i gradientów.

5. WNIOSKI

Sztuczne kształtowanie rozkładu pola potencjału na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV pozwala zmniejszyć ryzyko wystąpienia rażeniowego napięcia krokowego. Wykorzystując przedstawione propozycji można przy małych nakładach własnych znacznie ograniczyć zagrożenie. W przypadku jednofazowego zwarcia doziemnego zmniejszenie pola powierzchni o największych wartościach napięcia krokowego zmniejsza jednocześnie prawdopodobieństwo wystąpienia rażenia. Przedstawiona modyfikacja jest bardzo prosta w realizacji i możliwa do wykonania przy użyciu środków będących w dyspozycji zakładu energetycznego.

Zaproponowane metody pozwalają sterować rozkładem pola potencjału a poprzez to rozkładem napięć krokowych na terenie stacji WN. Mogą one być również wykorzystane w innych miejscach stacji elektroenergetycznej oczywiście po ich nieznacznej modyfikacji do konkretnego przypadku. Sama idea nie ulega zmianie.

LITERATURA

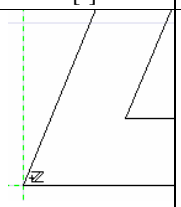
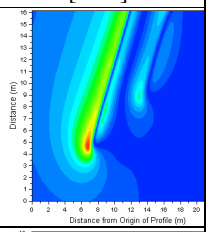
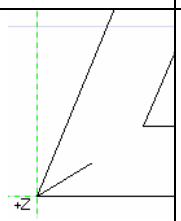
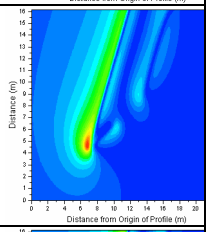
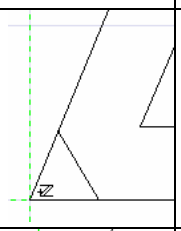
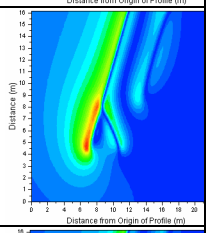
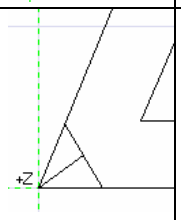
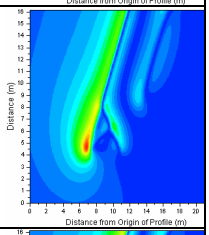
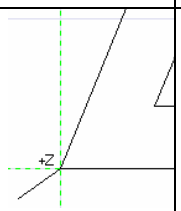
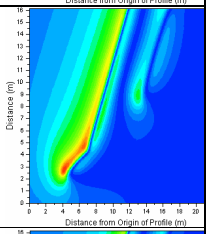
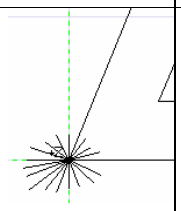
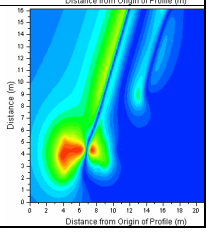
[1] PN-E-05115 „Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1kV”.

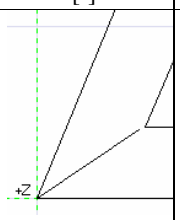
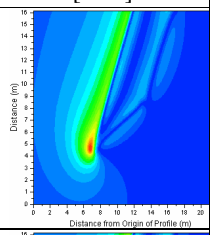
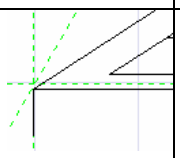
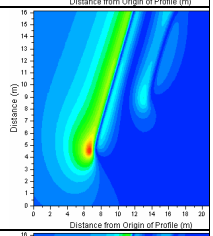
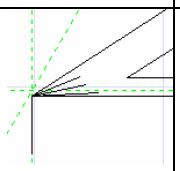
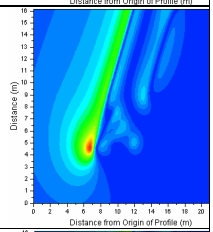
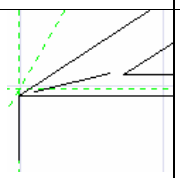
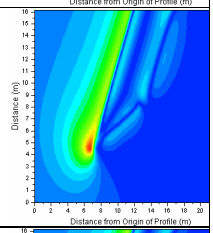
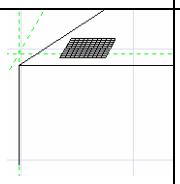
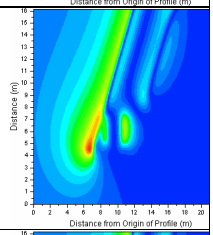
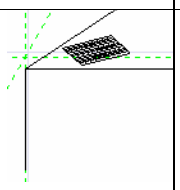
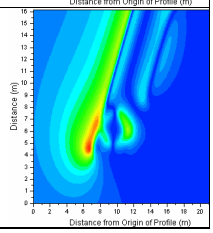
[2] HIFREQ Theory, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal Canada.

[3] Zestawienie wyników obliczeń do uziemienia stacji 110/15kV, Energoprojekt Kraków S.A.

[4] HIFREQ User’s Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal Canada.

Tab. 1 Zestawienie wartości szczytowych gradientu pola potencjału na terenie stacji 110/15kV dla różnych analizowanych wariantów kształtujących sztucznie rozkład pola potencjału.

Lp.	Wartość szczytowa gradientu napięcia krokowego MAX grad U_{step}	Układ naroża systemu uziomowego sztucznie kształtujący rozkład pola potencjału	Gradient rozkładu napięcia krokowego
	[V/m]	[-]	[V/m]
ORG	76,8		
1	90,3		
2	72,3		
3	85,4		
4	61,6		
5	66,5		

Lp.	Wartość szczytowa gradientu napięcia krokowego MAX grad U_{step}	Układ naroża systemu uziomowego sztucznie kształtujący rozkład pola potencjału	Gradient rozkładu napięcia krokowego
	[V/m]	[-]	[V/m]
8	88,1		
9	74,9		
10	89,8		
11	72,4		
12	69,0		
13	68,6