

## Ograniczanie obszaru występowania napięć rażeniowych na terenie stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia

**Streszczenie.** Sterowanie rozkładem pola potencjału na terenie stacji WN/SN pozwala wielokrotnie zmniejszyć wartości szczytowe napięcia dotykowego i krokowego. Przy zastosowaniu zaproponowanych modyfikacji systemu uziomowego w wybranych punktach można przy małych nakładach własnych znacznie je ograniczyć. Zmniejszenie pola powierzchni o największych wartościach gradientu pola potencjału w przypadku jednofazowego zwarcia doziemnego jak i wylądowania atmosferycznego zmniejszy prawdopodobieństwo wystąpienia rażenia.

**Abstract.** One of the tasks of the grounding system is to ensure safety for people during various fault conditions. Fatal electric shock hazard depend on surface potential that occurs when a short circuit current or lightning current is injected into the grounding system or induced in it. The main objective of this paper is to improve grounding system of the typical HV substation. Quality of this modification will be measured by the drop of the ground potential distribution and by the cost of it.

**Słowa kluczowe:** napięcie dotykowe, napięcie krokowe, stacja WN/SN, system uziomowy.

**Keywords:** touch voltage, step voltage, HV/MV substation, grounding system.

### Wstęp

W stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia głównym środkiem ochrony przeciwporażeniowej jest uziemienie ochronne. Obejmuje ono powierzchnię terenu, na którym zlokalizowano stację. W sytuacji awaryjnej na obudowach metalowych urządzeń rozmieszczonych na terenie stacji, jak i na innych metalowych częściach może pojawić się napięcie, które nie występuje na nich w czasie normalnej pracy. Również przy niekorzystnym rozwoju zdarzeń mogą pojawić się osoby, które nieświadomie znajdują się w strefie napięć rażeniowych.

Napięcia na metalowych elementach konstrukcji mogą się pojawić w stanie awaryjnym np.: zwarcie doziemne, wylądowanie atmosferyczne. W tej sytuacji zostanie wyniesiony potencjał z układu uziomowego na inne elementy z nim bezpośrednio lub pośrednio połączone.

Badania uziemień stacji elektroenergetycznej są czynnościami wykonywanymi przed oddaniem obiektu do eksploatacji oraz przeprowadzanymi okresowo w pracujących już obiektach. Celem badań jest kontrola wymagań normy PN-E-05115 [1]. Oceny zagrożenia porażeniowego można dokonać na podstawie wyników pomiarów napięć rażeniowych. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości konieczne są do podjęcia kroki mające na celu ich zmniejszenie do poziomu akceptowanego przez przepisy. Uziemienie ochronne stacji elektroenergetycznej wówczas nie spełnia wymagań stawianych ochronie przeciwporażeniowej dodatkowej.

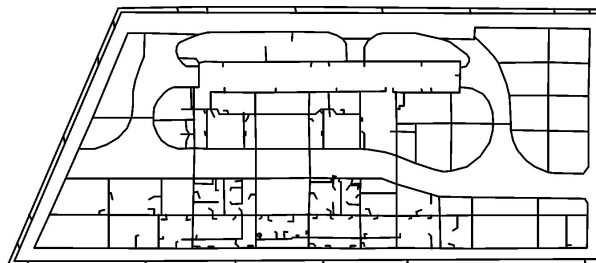
### Analizowany obiekt

Krajowe stacje elektroenergetyczne 110/15kV są zazwyczaj 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 konstrukcję wsporcze wysokie i niskie żelbetowe z oszynowaniem linkowym AFL-6 240mm<sup>2</sup>. 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.

W analizie rozkładu napięć najważniejszą sprawą jest dokładne odwzorowanie samego systemu uziomowego,

który głównej mierze wpływa na wartości napięć rażeniowych na jej terenie. Wylączniki będące na wyposażeniu stacji skracają jedynie czas trwania rażenia, zaś bezpośredniego wpływu na wartość napięcia rażeniowego nie mają. Pozostałe elementy takie jak np. transformatory, przekładniki nie mają większego wpływu na wartości napięć rażeniowych przy założeniu, iż znamy wartości prądu uziomowego. System uziomowy analizowanej stacji elektroenergetycznej 110/15kV przedstawiono na rys.1.



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

### Rozkład napięć krokowych na terenie stacji WN/SN

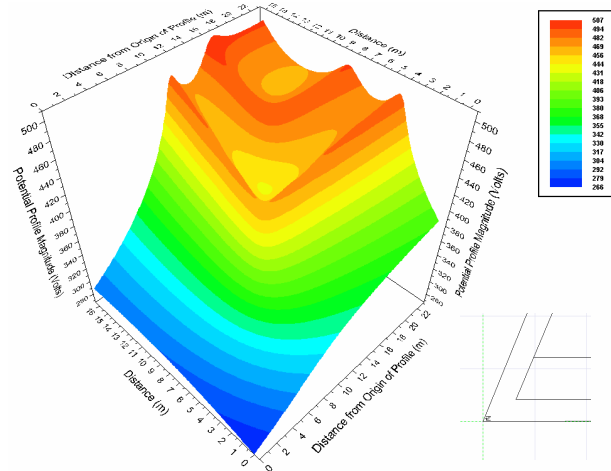
Obliczenia komputerowe przeprowadzono przy wykorzystaniu programu HIFREQ [3]. W celu uproszczenia modelu matematycznego stacji elektroenergetycznej założono, że jest ona wycięta z systemu elektroenergetycznego. Podczas obliczeń wymuszono prąd uziomowy z zewnętrznego źródła, którym w warunkach rzeczywistych może być inna stacja elektroenergetyczna przy założeniu wieloprądowej metody pomiarowej napięć rażeniowych.

Obliczenia wykonano przyjmując następujące założenia [2]:

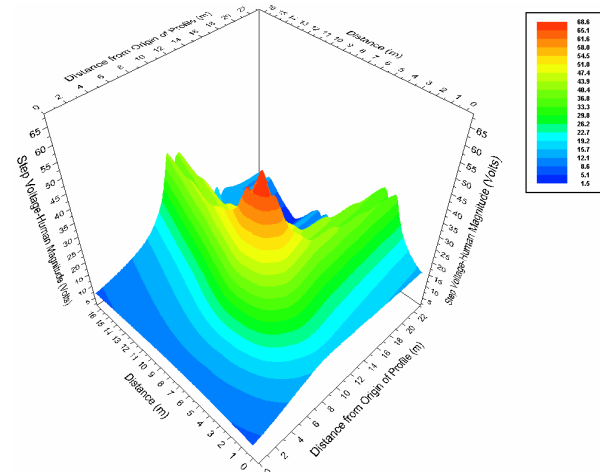
- rezystywność gruntu przy modelu jednorodnym ziemi  $\rho=11,7 \Omega \cdot m$ ,
- prąd zwarcia 1-fazowego  $I_{zw1f}=14350 \text{ A}$ ,
- prąd uziomowy  $I_u=9113 \text{ A}$ ,
- taśma głównego uziomu kratowego 30x4 mm,
- przewody uziemiające wykonane z taśmy 2x(40x5)mm,
- średni czas trwania zwarcia  $\Sigma t=0,8 \text{ s}$ ,
- współczynnik redukcji linii  $r=0,98$ ,
- moc zwarciova na terenie stacji na napięciu 110 kV  $S_{z110kV}=3038 \text{ MVA}$ ,

- moc zwarcziowa na terenie stacji na napięciu 15 kV  $S_{z15kV}=145,46$  MVA.

Na stacji elektroenergetycznej mamy do czynienia z tzw. „lejem napięciowym”, który powoduje powstanie dużych różnic potencjałów na terenie stacji. Jednym z miejsc gdzie wartości napięć rażeniowych są znaczne jest obrzeże stacji elektroenergetycznej (rys.2 i 3).



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



Rys.3. Rozkład napięć krokowych na terenie stacji 110/15kV, naroże stacji.

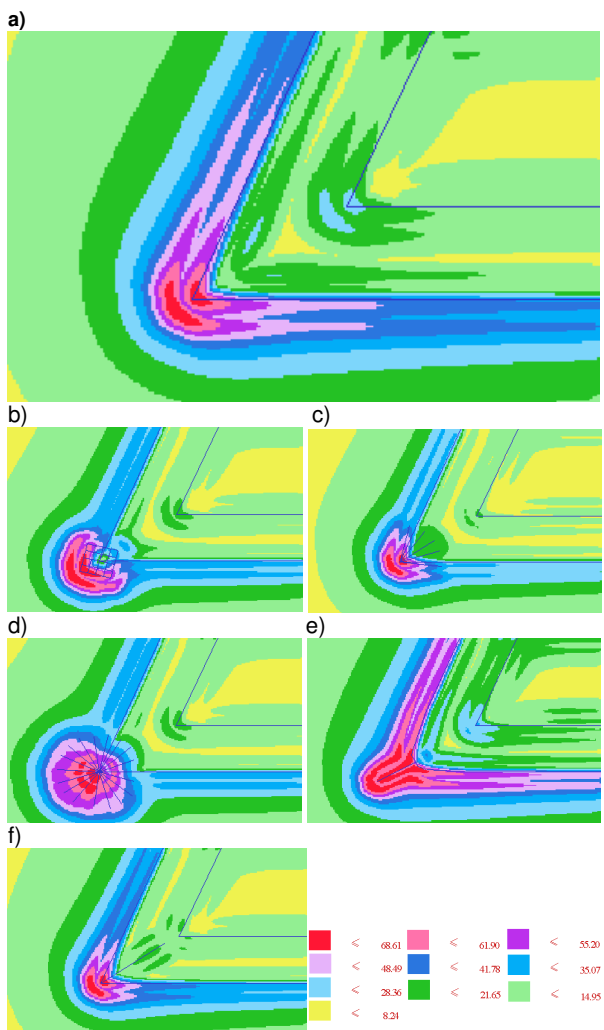
### Ograniczanie obszaru występowania napięć rażeniowych na terenie stacji WN/SN

Sztuczne kształtowanie rozkładu pola na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV ma na celu ograniczenie wartości gradientu pola potencjału, co jednocześnie ogranicza wartości szczytowe napięć dotykowych i krokowych.

Gradient pola potencjału jest w przybliżeniu matematycznym ekwiwalentem napięcia krokowego na terenie stacji. Napięcie dotykowe nie może być używane jako wyznacznik skuteczności modyfikacji systemu uziomowego, gdyż przy jego stosowaniu możemy mówić najwyżej o kilkuset punktach na terenie stacji, które w niewystarczający sposób określają rozkład potencjału. Napięcie krokowe w znacznie lepszym stopniu uwidacznia zagrożenie na terenie stacji, a także jest ostrzejszym kryterium oceny układu uziomowego.

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

Ograniczania obszarów występowania napięć rażeniowych przekraczających dopuszczalne wartości szczytowe można dokonać na wiele sposobów. W węzłach naroża można dołączać uziomy pionowe lub poziome określonych długościach, odpowiednio ukształtowane taśmy np.: kratownice o określonym oczku.



Rys.4. Sztucznie kształtowany rozkład napięć krokowych na terenie stacji 110/15kV - naroże stacji, a) oryginalny układ systemu uziomowego, b) kratownica dołączona w narożu o oczku  $a=0,5m$ , c) 3 poziome pręty ułożone w kierunku do wewnątrz stacji, d) 20 elementowa gwiazda dołączona w narożu, e) zaokrąglone naroże z poziomo ułożonym prętem, f) poziomy pręt położony w kierunku do wewnątrz stacji – dł. 6m .

Jakość modyfikacji 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.

Wartość współczynnika  $k_r$  można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad k_r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

gdzie:  $n$  – ilość przedziałów, na które podzielono maksymalny zakres napięcia krokowego,  $k_r$  – współczynnik rażenia,  $P_i$  – pole powierzchni zajmowane przez dany obszar o określonym przedziale napięcia krokowego.

W najgorszym przypadku, gdy na całym analizowanym terenie przekroczone są dopuszczalne wartości napięć krokowych opisany współczynnik przyjmie wartość  $k_r=1$ . Jeśli na danym obszarze nie występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości napięć krokowych to współczynnik  $k_r=0$ .

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 -  $k_{pmax}$ . Współczynnik ten jest określony jako stosunek pola o maksymalnej wartości napięcia krokowego na danym obszarze do pola o minimalnej wartości napięcia krokowego na analizowanym obszarze przy założeniu, że teren mamy podzielony na trzy strefy rażenia i są one zawsze większe od zera ( $P_{MAX}>0$ ,  $P_{MED}>0$ ,  $P_{MIN}>0$ ). Podział jest wykonany w sposób wprost proporcjonalny do pola powierzchni i napięcia krokowego.

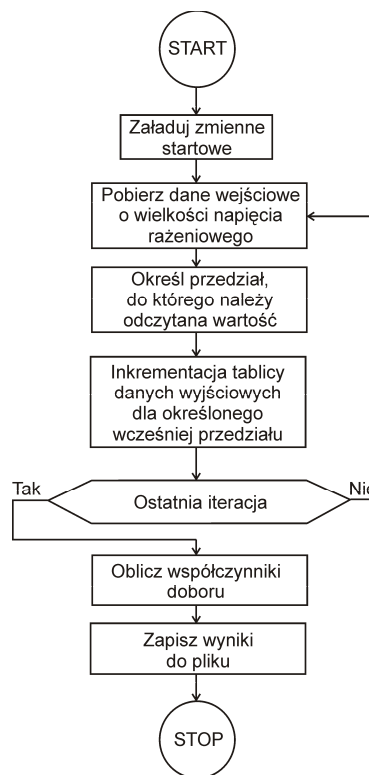
$$(2) \quad k_{pmax} = \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}}$$

gdzie:  $k_{pmax}$  – współczynnik rażenia przy maksymalnej wartości napięcia krokowego,  $P_{MAX}$  – pole powierzchni zajmowane przez I strefę rażenia (max. wartość napięcia krokowego),  $P_{MIN}$  – pole powierzchni zajmowanie przez III strefę rażenia gdzie wartości napięć krokowych są najmniejsze.

Algorytm wykorzystywany do wyznaczania wartości współczynników  $k_r$  i  $k_{pmax}$  przedstawiono na rys. 5.

Spośród wielu analizowanych sposobów modyfikacji systemu uziomowego i oceny parametrycznej wybrano tylko jeden, który okazał się być wariantem optymalnym. Sposób ten przedstawiono na rys. 4c. Minimalizuje on obszar występowania szczytowych napięć rażeniowych i zmniejsza  $k_{pmax}=2,62$  razy pole powierzchni rażenia w porównaniu do oryginalnej wersji systemu uziomowego (rys. 4a) przy jednocześnie optymalnych kosztach. Obliczenia powyższych współczynników można wykonać tylko przy użyciu metod numerycznych gdyż bazują one na rozkładach napięć i gradientów.

Bardzo ciekawym przykładem jest kratownica połączona z systemem uziomowym – rys. 4b. Na jej środku rzeczywiście zmniejszone są wydatnie napięcia rażeniowe. Lokalnie ogranicza ona napięcia rażeniowe, ale stosunkowo długi obwód powoduje, iż na granicy powstaje gwałtowny skok potencjału, co zwiększa znacząco napięcia rażeniowe i niweluje pozytywne aspekty jej stosowania.



Rys.5. Algorytm do wyznaczania współczynników  $k_r$  i  $k_{pmax}$ .

## Wnioski

Sztuczne kształtowanie rozkładu pola potencjału na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV pozwala zmniejszyć ryzyko wystąpienia rażeniowego napięcia krokowego. Stosując zaproponowane rozwiązanie można przy małych nakładach własnych znacznie ograniczyć zagrożenie. Zmniejszenie pola powierzchni o największych wartościach napięcia krokowego w przypadku jednofazowego zwarcia doziemnego zmniejsza jednocześnie prawdopodobieństwo wystąpienia rażenia. Modyfikacja wskazana jest bardzo prosta w wykonaniu i możliwa do realizacji przy użyciu tylko siły własnej będącej w dyspozycji zakładu energetycznego.

Zaproponowane powyżej metody modyfikacji systemu uziomowego pozwalają sterować rozkładem pola potencjału a poprzez to rozkładem napięć dotykowych i krokowych na terenie stacji WN. Mogą one być także zastosowane w innych miejscach stacji elektroenergetycznej oczywiście po ich nieznaczącej modyfikacji do konkretnego przypadku. Sama idea pozostaje ta sama.

## 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] 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](mailto:jaroslawwiater@vela.pb.bialystok.pl).