

Statystyczna ocena zagrożenia porażeniowego podczas zwarcć doziemnych w stacjach elektroenergetycznych średnich napięć

Streszczenie. Artykuł dotyczy oceny zagrożenia porażeniowego podczas zwarcć doziemnych w stacjach elektroenergetycznych średnich napięć zasilanych z sieci o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym. Podstawę tej oceny stanowią wartości napięć uziomowych, które zależą od wartości prądu zwarcia doziemnego oraz od mającej losowy charakter wartości rezystancji uziemienia stacji. W artykule zaproponowano oryginalną metodę statystycznej oceny zagrożenia porażeniowego, którą wykorzystano do analizy rzeczywistej sieci 15 kV.

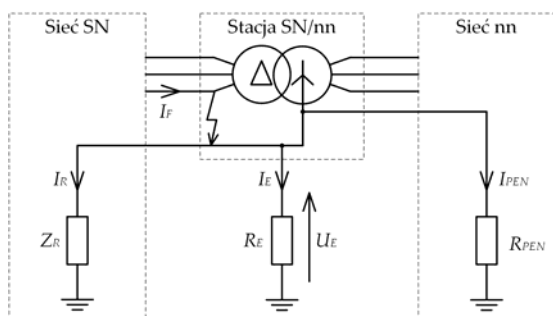
Abstract. The article concerns the shock hazard during earth faults in medium-voltage substations supplied from networks with non-effectively earthed neutral point. The basis for the risk assessment are the values of earth voltages which depend on the value of earth fault current and on random value of substation earth resistance. This paper proposes an original method for statistical assessment of the electric shock hazard, which was used to analyze the real 15 kV network. (**Statistical assessment of shock hazard during earth faults in medium voltage substations**).

Słowa kluczowe: zagrożenie porażeniowe, ocena statystyczna, napięcie uziomowe, stacja elektroenergetyczna SN/nn.

Keywords: electric shock hazard, statistical assessment, earthing-electrode voltage, medium/low voltage substation.

Wstęp

Jednofazowe zwarcia doziemne w nieskutecznie uziemionych sieciach elektroenergetycznych średnich napięć (SN), są przyczyną zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn, które zależne jest od wartości prądu i czasu trwania zwarcia [1]. Podstawą oceny tego zagrożenia jest napięcie uziomowe U_E , wynikające z rozplywu prądu zwarcia I_F w układzie uziomowym stacji (rys. 1).



Rys. 1. Rozplyw prądu zwarcia jednofazowego w stacji SN/nn
 R_E – rezystancja uziomu stacji, R_{PEN} – wypadkowa rezystancja uziemień przewodu PEN w sieci nn, Z_R – impedancja drogi ziemnopowrotnej sieci SN, I_F – prąd jednofazowego zwarcia doziemnego, I_E – prąd uziomowy, U_E – napięcie uziomowe

Napięcia uziomowe U_E nie powinny przekraczać zależnych od czasu t_F trwania zwarcia wartości dopuszczalnych U_{Ep} , które określone są w normie [2]. Na jej podstawie, dla czasów $0,1 \text{ s} \leq t_F \leq 1 \text{ s}$ napięcia U_{Ep} można aproksymować następującym wielomianem [3]:

$$(1) \quad U_{Ep} = a_6 t_F^6 + a_5 t_F^5 + a_4 t_F^4 + a_3 t_F^3 + a_2 t_F^2 + a_1 t_F + a_0$$

gdzie: $a_6 = -10208,3 \text{ Vs}^{-6}$; $a_5 = 43315,7 \text{ Vs}^{-5}$; $a_4 = -72805,3 \text{ Vs}^{-4}$; $a_3 = 60204,3 \text{ Vs}^{-3}$; $a_2 = -23751,9 \text{ Vs}^{-2}$; $a_1 = 2770,4 \text{ Vs}^{-1}$; $a_0 = 585,7 \text{ V}$.

Wypadkowa impedancja uziemienia stacji ma charakter losowy. Decydujące znaczenie ma losowość rezystancji uziomu R_E , wynikająca z wpływu warunków atmosferycznych na parametry geoelektryczne gruntu [4, 5, 6]. Drugim istotnym czynnikiem jest wypadkowa rezystancja R_{PEN} uziemień przewodu ochronno-neutralnego (PEN) w sieci nn, na którą oprócz warunków atmosferycznych wpływa również zmienna liczba odbiorców. Także impedancje dróg ziemnopowrotnych Z_R mają charakter

losowy, pomimo że drogi te zdeterminowane są strukturą sieci. Przyczyną tego jest losowość rezystancji R_E i R_{PEN} w pozostałych stacjach SN/nn.

Z powyższych powodów spodziewane napięcie uziomowe U_E jest również zmienną losową. Powoduje to, że ocena zagrożenia porażeniowego jest problemem, do rozwiązania którego predysponowane jest podejście statystyczne [7, 8, 9].

Przedmiotem artykułu jest statystyczna ocena zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn. Podstawą tej oceny jest opracowany na podstawie badań i pomiarów statystyczny model rezystancji uziemienia stacji SN/nn oraz oryginalna metoda wyznaczania prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych. Umożliwia ona wyznaczenie rozkładów statystycznych napięć uziomowych, a na ich podstawie identyfikację tych stacji SN/nn, w których prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia porażeniowego nie jest akceptowalne. Dla tych stacji proponowana metoda umożliwia określenie najdłuższych dopuszczalnych czasów wyłączenia zwarcć lub maksymalnej rezystancji uziemienia, dla których zapewnione jest, założone *a priori* prawdopodobieństwo nieprzekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych.

Statystyczny model rezystancji uziemienia stacji SN/nn

Statystyczny model rezystancji uziemienia stacji SN/nn autorzy opracowali w oparciu o wartości rezystancji $R_B = R_E \parallel R_{PEN}$. Dzięki uprzejmości Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, pozyskano od Operatorów Systemów Dystrybucyjnych próbę losową rezystancji R_B z 2408 stacji SN/nn, w których impedancje dróg ziemnopowrotnych $Z_R = \infty$. Próba ta została pobrana z populacji generalnej stacji SN/nn, zlokalizowanych na gruntach o zróżnicowanych właściwościach geoelektrycznych na terenie Polski.

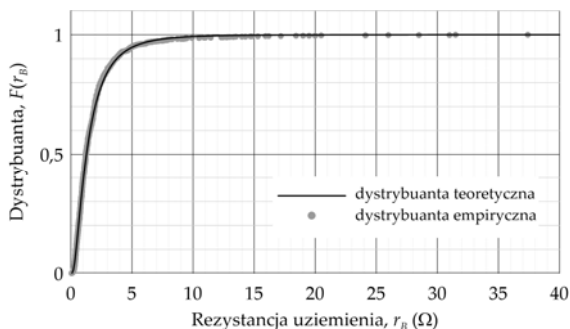
Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że zmienna losowa R_B ma rozkład logarytm-normalny o następującej dystrybucji:

(2)

$$F(r_B) = \int_0^{r_B} \frac{1}{x \sqrt{2\pi} \cdot 0,845} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - 0,241}{0,845} \right)^2 \right] dx$$

gdzie: r_B – realizacja (Ω) zmiennej losowej R_B .

Na rysunku 2 przedstawiono dystrybuantę (2) wraz z dystrybuantą empiryczną.



Rys.2. Dystrybuanta zmiennej losowej R_B

Model statystyczny rezystancji R_B wyrażony rozkładem (2), stał się podstawą oryginalnego podejścia autorów do oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn. Proponowaną metodę tej oceny przedstawiono w kolejnym rozdziale.

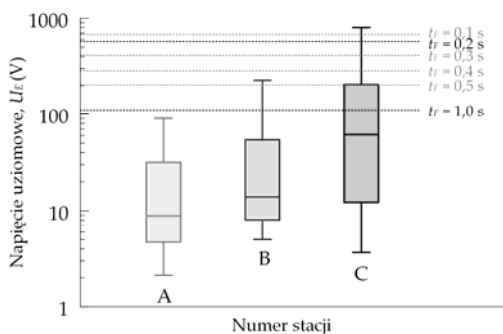
Metoda statystycznej oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn

Przedmiotem rozważań jest sieć elektroenergetyczna SN, z której zasilane jest M stacji SN/nn. Celem rozważań jest określenie na drodze symulacji numerycznych wartości napięć uziomowych:

$$(3) \quad U_E(i, j), \quad i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N$$

gdzie: N – liczba losowych symulacji jednofazowych zwarcí doziemnych w i -tej stacji.

W każdej symulacji losowana jest wartość rezystancji R_B z rozkładu logarytmno-normalnego (2). Z przeprowadzonych symulacji otrzymuje się M N -elementowych prób losowych napięć uziomowych U_E . Próby te poddaje się analizie statystycznej, której pierwszym krokiem jest sporządzenie wykresów box-and-whisker napięć uziomowych U_E dla poszczególnych stacji SN/nn. Stacje te są następnie klasyfikowane do trzech grup A, B, C (rys.3), a podstawą tej klasyfikacji jest położenie wykresu napięcia uziomowego U_E na tle dopuszczalnych poziomów napięć U_{Ep} , zależnych od czasów trwania zwarcia t_F (1).



Rys.3. Typy wykresów box-and-whisker napięć uziomowych w stacjach SN/nn z zaznaczonymi poziomami napięć dopuszczalnych $U_{Ep} = f(t_F)$

Grupa A obejmuje stacje, w których największe wartości prób losowych są mniejsze od dopuszczalnego napięcia uziomowego dla czasu trwania zwarcia $t_F = 1$ s. W stacjach tych niezależnie od wartości rezystancji uziemień, bezpieczeństwo porażeniowe jest zapewnione dla nastaw czasowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych krótszych od 1 s.

Do grupy B zaliczane są wszystkie stacje, w których największe wartości prób losowych są większe od dopuszczalnego napięcia uziomowego dla czasu trwania zwarcia $t_F = 1$ s i jednocześnie mniejsze od dopuszczalnego napięcia uziomowego dla czasu trwania zwarcia $t_F = 0,2$ s. W stacjach tych niezależnie od wartości rezystancji uziemień, bezpieczeństwo porażeniowe jest zapewnione dla nastaw czasowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych z przedziału $0,2 \div 1$ s.

Grupa C obejmuje stacje, w których największe wartości prób losowych są większe od dopuszczalnego napięcia uziomowego dla czasu trwania zwarcia $t_F = 0,2$ s. W stacjach tych mogą wystąpić zagrożenia porażeniowe, o ryzykach zależnych od rezystancji uziemień tych stacji. W związku z tym, konieczna jest dalsza analiza statystyczna, w celu określenia zależności ryzyka od czasu wyłączenia zwarcia.

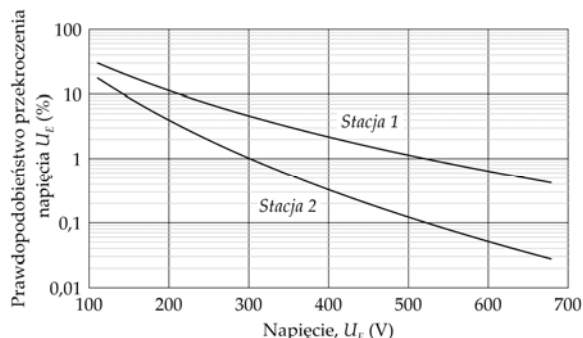
W pierwszym kroku tej analizy estymowane są rozkłady statystyczne napięć uziomowych U_E o dystrybuantach $F(u_E)$:

$$(4) \quad F(u_E) = P(U_E \leq u_E), \quad U_E \geq 0$$

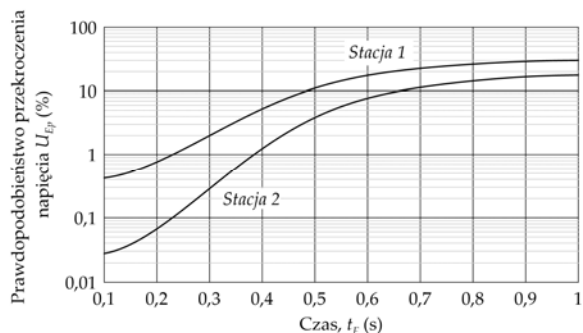
na podstawie których wyznaczane są zależności prawdopodobieństwa $G(u_E)$ przekroczenia napięć uziomowych U_E (rys.4):

$$(5) \quad G(u_E) = 1 - F(u_E) = P(U_E > u_E), \quad U_E \geq 0$$

Na podstawie krzywych $G(u_E)$ oraz zależności (1) tworzone są dla poszczególnych stacji z grupy C, zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F (rys.5).



Rys.4. Przykładowe prawdopodobieństwa przekroczenia napięć uziomowych U_E w stacjach typu C

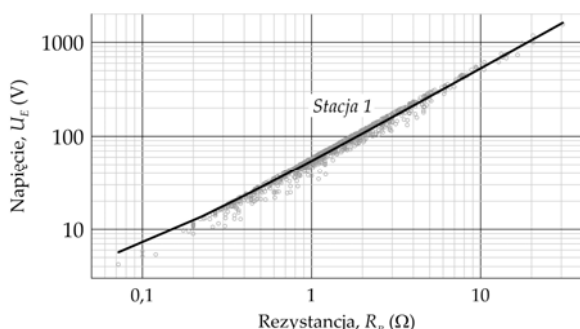


Rys.5. Przykładowe zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F

Krzywe przedstawione na rysunku 5 stanowią podstawę określenia najdłuższych czasów zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w danych stacjach z grupy C. Przykładowo: niezależnie od wartości rezystancji

uziemiaenia R_B , prawdopodobieństwo przekroczenia napięcia U_{Ep} na poziomie 1% będzie spełnione w stacji nr 1 dla czasów $t_F < 0,23$ s, a w stacji nr 2 dla czasów $t_F < 0,38$ s. Jeżeli jednak założyć największą wartość prawdopodobieństwa na poziomie 0,1%, to w stacji nr 1 nie jest możliwe spełnienie tego warunku poprzez skrócenie czasu zadziałania t_F . Dla tego przypadku, w stacji nr 1 wymagane jest ograniczenie rezystancji uziemiaenia R_B do wartości R_{Bmax} i wynikające stąd ucięcie dystrybuanty (4).

Wartość R_{Bmax} wyznaczana jest w oparciu o korelację pomiędzy zmienną losową U_E a zmienną losową R_B (rys.6). Na podstawie tej korelacji określane jest napięcie ucięcia u_{E0} odpowiadające rezystancji R_{Bmax} . Dla przykładu, dla założonej wartości rezystancji $R_{Bmax} = 10 \Omega$ wartość napięcia ucięcia dystrybuanty (4) wynosi $u_{E0} = 528,9$ V (rys.6). Większym wartościom R_{Bmax} odpowiadają również większe wartości u_{E0} .



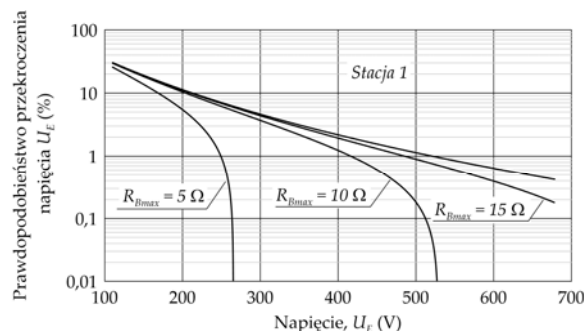
Rys.6. Przykładowa korelacja zmiennych losowych U_E i R_B w stacji SN/nn

Do dalszej analizy przyjmuje się uciętą prawostronnie dystrybuantę F :

$$(6) \quad H(u_E) = \begin{cases} P(U_E \leq u_E | U_E \leq u_{E0}), & 0 \leq U_E \leq u_{E0} \\ 0, & U_E > u_{E0} \end{cases}$$

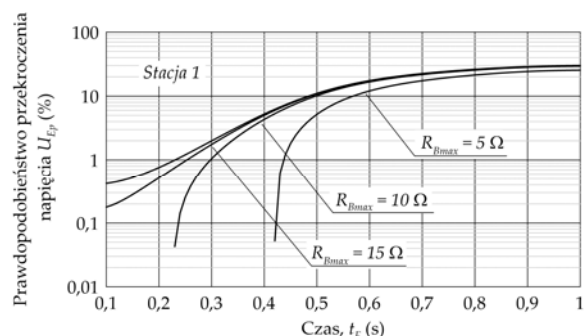
Na rysunku 7 przedstawiono dla stacji 1 krzywe prawdopodobieństwa $G(u_E)$ przekroczenia napięć uziomowych U_E przy założeniu rezystancji R_{Bmax} równej odpowiednio 5 Ω , 10 Ω i 15 Ω . Natomiast na rysunku 8 przedstawiono odpowiadające tym krzywom zależności

prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} dla danego czasu trwania zwarcia t_F .

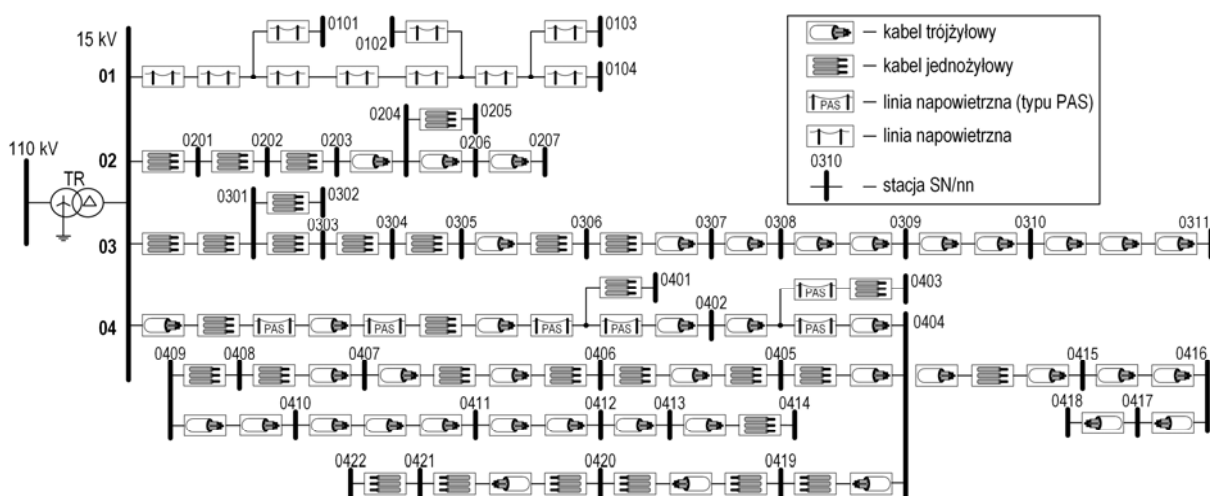


Rys.7. Prawdopodobieństwo przekroczenia napięć uziomowych U_E przy ograniczeniu rezystancji R_B do wartości maksymalnej R_{Bmax} równej odpowiednio 5 Ω , 10 Ω i 15 Ω

Krzywe przedstawione na rysunku 8 stanowią podstawę określenia najdłuższych czasów zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w stacji 1, przy ograniczeniu co do największej wartości rezystancji R_B . Przykładowo: jeżeli założyć największą wartość prawdopodobieństwa przekroczenia napięcia U_{Ep} na poziomie 0,1%, to w stacji 1 warunek ten może zostać spełniony dla czasów zadziałania zabezpieczeń $t_F < 0,42$ s dla $R_{Bmax} = 5 \Omega$ lub $t_F < 0,24$ s dla $R_{Bmax} = 10 \Omega$.



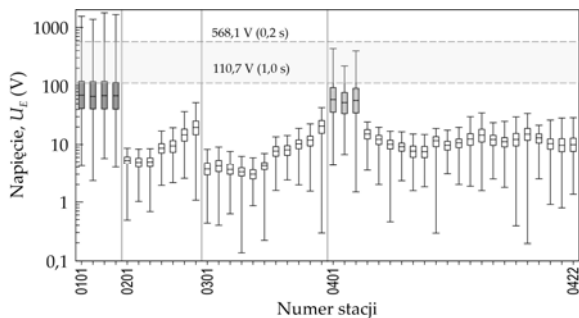
Rys.8. Zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F przy ograniczeniu rezystancji R_B do wartości maksymalnej R_{Bmax} równej odpowiednio 5 Ω , 10 Ω i 15 Ω



Rys.9. Schemat analizowanej sieci kablowo-napowietrznej 15 kV

Analiza rzeczywistej sieci 15 kV

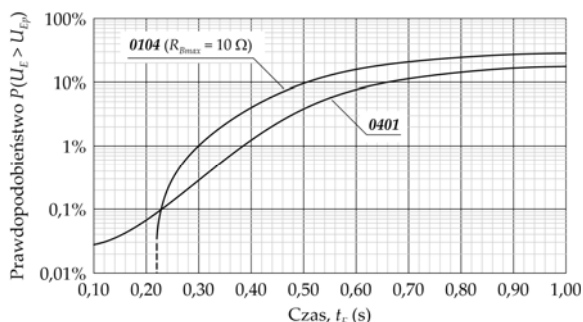
Przedmiotem badań była rzeczywista sieć kablowo-napowietrzna 15 kV o pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego 57,5 A, której schemat przedstawiono na rysunku 9. Sieć ta zasilana jest z systemu 110 kV poprzez transformator o mocy 16 MVA i pracuje z izolowanym punktem neutralnym. W rozdzielni 15 kV znajdują się cztery pola liniowe, oznaczone jako 01÷04, zasilające 44 stacje 15/0,4 kV. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody przedstawionej w rozdziale poprzednim. Na rysunku 10 pokazano wykresy box-and-whisker napięć uziomowych U_E w stacjach 15/0,4 kV.



Rys. 10. Wykresy box-and-whisker napięć uziomowych U_E dla sieci 15 kV pracującej z izolowanym punktem neutralnym

Z rysunku 10 wynika, że większość stacji kwalifikuje się do grupy A. Do grupy B kwalifikują się trzy stacje zasilane z pola 04 o numerach 0401, 0402, 0403, natomiast do grupy C zaliczają się wszystkie cztery stacje zasilane z pola 01 o numerach 0101÷0104.

Na rysunku 11 przedstawiono zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F . Dotyczą one stacji z grupy B i C, które są podstawą określenia najdłuższych dopuszczalnych czasów wyłączeń zwarc przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe zainstalowane w polach 01÷04 rozdzielni 15 kV. W analizowanej sieci o wyborze czasu t_F w polu 01 decyduje stacja 0104, przy ograniczeniu $R_{Bmax} = 10 \Omega$ w stacjach 0101, 0102, 0103 i 0104. Natomiast w polu 04 o wyborze czasu t_F decyduje stacja 0401.



Rys. 11. Zależności prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych U_{Ep} od czasu trwania zwarcia t_F dla pracy sieci 15 kV z izolowanym punktem neutralnym

Na podstawie wyników zaprezentowanych na rysunkach 10 i 11, w tabeli 1 przedstawiono wyznaczone wartości czasów t_{Fmax} oraz rezystancji R_{Bmax} w analizowanej sieci 15 kV, dla założonego prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych wynoszącego 1,0% oraz 0,1%.

Tabela 1. Wartości czasów t_{Fmax} oraz rezystancji R_{Bmax} dla założonego prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych napięć uziomowych

Pole	$P(U_E \geq U_{Ep})$	t_{Fmax} (s)	R_{Bmax} (Ω)
01	1,0%	0,30	$10^{(1)}$
	0,1%	0,20	$10^{(1)}$
02	1,0%	1,0	nd.
	0,1%	1,0	nd.
03	1,0%	1,0	nd.
	0,1%	1,0	nd.
04	1,0%	0,35	nd.
	0,1%	0,20	nd.

¹⁾ dotyczy stacji : 0101, 0102, 0103, 0104

Podsumowanie

W artykule zaproponowano oryginalną metodę statystycznej oceny zagrożenia porażeniowego w stacjach SN/nn zasilanych z sieci o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym. Pozwala ona na wyznaczenie rozkładów statystycznych napięć uziomowych, a na ich podstawie wskazanie stacji SN/nn, w których zagrożenie porażeniowe nie jest akceptowalne. Ponadto opracowana metoda pozwala określić dla tych stacji najdłuższe dopuszczalne czasy wyłączeń zwarc lub maksymalne rezystancje uziemień. Może ona również mieć zastosowanie do wyboru sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią [3].

Autorzy: mgr inż. Jarosław Kmak, e-mail: kmak@agh.edu.pl; dr hab. inż. Wiesław Nowak, e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl; dr inż. Rafał Tarko, e-mail: rtarko@agh.edu.pl; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

LITERATURA

- [1] Hoppel W., Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażień, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, 2017.
- [2] IEC 60364-4-44: Low-voltage electrical installations. Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances.
- [3] Tarko R., Kmak J., Nowak W., Szpyra W., Statistical Assessment of Electric Shock Hazard in MV Electrical Power Substations Supplied from Networks with Non-Effectively Earthed Neutral Point, *Energies*, 2022, 15(4):1560
- [4] Dawalibi F.P., Ma J., Southey R.D., Behaviour of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1994, nr 9, 334-342
- [5] He J., Zeng, R., Gao, Y., Tu Y., Sun W., Zou J., Guan Z., Seasonal influences on safety of substation grounding system, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2003, nr 18, 788-795
- [6] Razali M.N.F.B., Osman S.B.A.B.S., Non-quantitative correlation of soil resistivity with some soil parameters, *In Proceedings of the IEEE 2011 National Postgraduate Conference*, Perak, Malaysia, 19–20 September 2011.
- [7] Bastian M.B., Carman W.D., Woodhouse D.J., A network asset based probabilistic model of ground potential rise and touch voltage hazard profiles at MV substations, *In Proceedings of the IEEE, 2016 Down to Earth Conference (DTEC)*, Hunter Valley, Australia, 1–4 September 2016.
- [8] Griffiths I., Woodhouse D., Palmer, S., Use of finite probabilistic modelling to establish earthing hazard limits, *In Proceedings of the IET, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, Sweden, 10–13 June 2013.
- [9] Dimopoulos A., Griffiths H., Harid N., Haddad A., Ainsley A., Guo D., Mpofu G., Proposal for Probabilistic Risk Assessment in Grounding Systems and Its Application to Transmission Substations, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2012, nr 27, 2219-2226