

BADANIA I ANALIZA ZWARĆ DOZIEMNYCH W SIECI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA INNOGY STOEN OPERATOR DLA DOBORU REZYSTORA UZIEMIAJĄCEGO

Rafał TARKO¹, Wiesław NOWAK², Waldemar SZPYRA³, Marek WITKOWSKI⁴

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: 126173653, e-mail: rtarko@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: 126172824, e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: 607 985 345, e-mail: wszpyra@agh.edu.pl
4. innogy Stoen Operator Sp z o o, tel.: 228214728, e-mail: marek.witkowski@innogy.com

Streszczenie: Przedmiotem artykułu jest analiza doboru parametrów zespołów uziemiających, którą przeprowadzono dla wybranych obszarów sieci 15 kV eksploatowanej przez innogy Stoen Operator. W artykule omówiono wybrane zagadnienia problematyki ziemnozwarciowej w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, takie jak zagrożenie porażeniowe, warunki działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz przepięcia. Przedstawiono wyniki obliczeń uzyskanych przy pomocy opracowanych modeli komputerowych, których celem była analiza zagrożenia porażeniowego, działania ziemnozwarciowej automatyki zabezpieczeniowej oraz przepięć ziemnozwarciowych. Przeprowadzone pomiary i symulacje pozwoliły na sformułowanie wniosków i rekomendacji odnośnie wymaganych parametrów zespołów uziemiających oraz nastaw automatyki zabezpieczeniowej w stacjach zasilających.

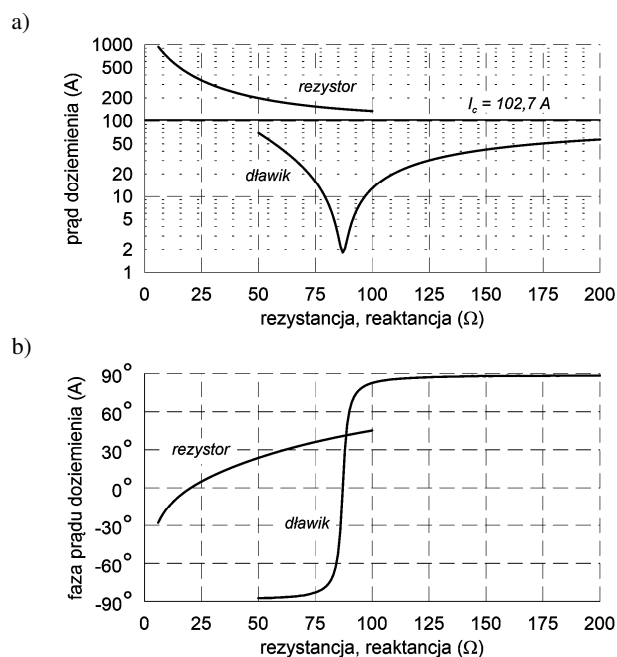
Słowa kluczowe: zwarcia doziemne, rezystor uziemiający, zagrożenie porażeniowe, przepięcia ziemnozwarciowe.

1. WPROWADZENIE

Wybór sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego sieci elektroenergetycznych średnich napięć należy do stale aktualnych problemów elektroenergetyki [1]. Wynika to przede wszystkim z wielu możliwych aspektów oceny sposobu połączenia punktu neutralnego w danej sieci, wśród których do najistotniejszych należą możliwość wystąpienia zagrożenia porażeniowego, niezawodność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz poziom przepięć ziemnozwarciowych. W polskich sieciach średnich napięć stosowane są trzy podstawowe sposoby pracy punktu neutralnego sieci: izolowany, uziemionym przez dławik kompensacyjny oraz uziemiony przez rezystor.

Istotą kompensacji jest zmniejszanie wartości prądu doziemienia w stopniu umożliwiającym samoczynne gaśnięcie palącego się w powietrzu łuku elektrycznego w miejscu doziemienia. Ten sposób połączenia punktu neutralnego jest więc zalecany dla sieci czysto napowietrznych oraz dla sieci napowietrzno-kablowych. Istota połączenia punktu neutralnego sieci przez rezystor polega na zwiększaniu prądu doziemienia w takim stopniu, aby przy doziemieniach bezoporowych w rozdzielniach średniego napięcia prąd ten nie przekroczył wartości 500 A.

Ten sposób pracy jest szczególnie korzystny w sieciach kablowych. Ilustruje to rysunek 1, na którym przedstawiono zależności prądu doziemienia od reaktancji dławika kompensacyjnego i rezystancji rezystora uziemiającego, wyznaczone dla przykładowej sieci 15 kV o prądzie pojemnościowym około 100 A.



Rys. 1. Zależność wartości prądu doziemienia (a), oraz fazy prądu doziemienia (b) od rezystancji rezystora uziemiającego i reaktancji dławika kompensacyjnego.

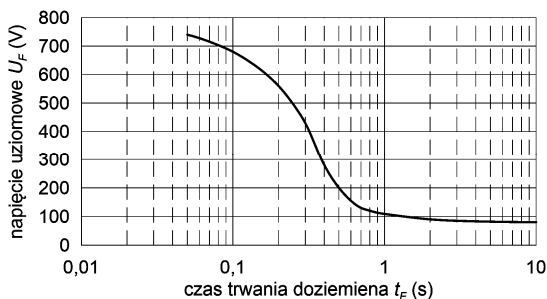
2. PROBLEMATYKA ZIEMNOZWARCIOWA W SIECIACH Z PUNKTEM NEUTRALNYM UZIEMIONYM PRZEZ REZYSTOR

2.1. Zagrożenie porażeniowe

Stopień zagrożenia porażeniowego zależy od czasu trwania oraz miejsca doziemienia i odmiennie kształtuje się na terenach stacji 110 kV/SN oraz w głębi sieci SN. Na terenie stacji WN/SN, zagrożenie porażeniowe występujące

podczas zwarcia w rozdzielni SN jest wielokrotnie mniejsze od zagrożenia występującego podczas zwarcia w rozdzielni WN. Natomiast w głębi sieci zagrożenie należy rozpatrywać oddzielnie dla stacji SN/nn oraz dla linii SN. Spływająca do uziomów stacji SN/nn oraz uziomów słupów część prądu doziemienia jest przyczyną powstawania napięć uziomowych, których wartości określają stopień zagrożenia porażeniowego w danym miejscu sieci. Ponieważ wartości napięć uziomowych zależą również od wartości rezystancji rezystora uziemiającego, determinują one możliwość akceptacji takiego sposobu połączenia z ziemią punktu neutralnego.

Uziemienia w stacjach SN/nn najczęściej wykonywane są jako wspólne dla urządzeń wysokiego napięcia i sieci niskiego napięcia. Wystąpienie doziemienia po stronie SN stacji skutkuje przeniesieniem się napięcia uziomowego do sieci niskiego napięcia, a w konsekwencji wystąpieniem również w niej zagrożenia porażeniowego [1, 2]. W takim przypadku sprawdzeniu podlegać powinny wymagania stawiane urządzeniom wysoko- i niskonapięciowym. Aby nie występowało zagrożenie porażeniowe, napięcie uziomowe nie powinno przekraczać wartości przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Największe dopuszczalne napięcia uziomowe U_F w zależności od czasu trwania doziemienia t_F [3].

W przypadku oceny zagrożenia porażeniowego w stacji, w której uziemienia ochronne urządzeń wysokiego napięcia i uziemienia robocze urządzeń niskiego napięcia nie są połączone, oraz przy ocenie ochrony przeciwporażeniowej w liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, bazuje się na porównaniu spodziewanych napięć dotykowych z określonymi w normach wartościami dopuszczalnymi.

2.2. Warunki działania zabezpieczeń

Specyfika pracy punktu neutralnego sieci SN powoduje, że mała wartość prądu doziemienia implikuje istotne trudności w realizacji skutecznych zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Większość doziemień w liniach napowietrznych to zwarcia oporowe poprzez rezystancje o wartościach dochodzących nawet do kilku kiloomów [4]. Duże wartości rezystancji przejścia mogą spowodować, że sygnały pomiarowe podawane do zabezpieczeń będą miały wartości zbliżone do poziomu wynikającego z naturalnej asymetrii linii oraz uchybów pomiarowych prądu składowej symetrycznej zerowej doziemionej linii. W tych warunkach zapewnienie właściwej skuteczności działania zabezpieczeń może być trudne lub wręcz niemożliwe [2].

W sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor zapewnienie skutecznego i selektywnego działania zabezpieczeń nadprądowych jest względnie łatwe. Składowa czynna prądu przepływa tylko w doziemionej linii, a w pozostałych liniach przyłączonych do tych samych szyn

w rozdzielni płyną tylko ich własne prądy pojemnościowe. Selektywność działania zabezpieczenia nadprądowego można więc uzyskać nastawiając jego prąd rozruchowy na wartość większą od własnego prądu pojemnościowego linii. Możliwość zastosowania zabezpieczenia określa nierówność [4, 5]:

$$3I_{0L}k_b + I_u \leq I_{rp} \leq \frac{3I_{0d} - I_u}{k_c} \quad (1)$$

gdzie: I_{rp} – próg rozruchowy zabezpieczenia, I_{0d} – prąd zerowy płynący w doziemionej linii, I_{0L} – prąd zerowy płynący w analizowanej linii podczas doziemienia w innych liniach, zasilanej z tej samej sekcji rozdzielni, k_b – współczynnik bezpieczeństwa (wg [5] $k_b = 2$ dla zabezpieczenia zwłocznego oraz $k_b = 4$ dla zabezpieczenia bezzwłocznego), k_c – współczynnik czułości (wg [5] $k_c = 1,5 \div 2$), I_u – prąd uchybowy.

W zabezpieczeniach ziemnozwarciowych stosowane jest również kryterium nadnapięciowe, wykorzystujące napięcie zerowe jako wartość kryterialną. Kryterium to stosowane indywidualnie, z zasady nie może zapewnić selektywności działania zabezpieczeń. Jego zastosowanie ogranicza się tylko do sygnalizacji doziemienia, albo jako kryterium rozruchowe w zabezpieczeniach kierunkowych.

Sygnały wejściowe zabezpieczeń $3U_0$ i $3I_0$ zależą od rezystancji przejścia R_F w miejscu zwarcia. Większym wartościom rezystancji przejścia odpowiadają mniejsze wartości sygnałów $3U_0$ i $3I_0$. W tych warunkach lepsze właściwości mogą mieć zabezpieczenia ziemnozwarciowe admitancyjne, wykorzystujące jako kryterium wzrost, w warunkach doziemienia, modułu mierzonej admitancji zerowej lub jej części rzeczywistej (w zabezpieczeniach konduktancyjnych) albo części urojonej (w zabezpieczeniach susceptancyjnych) [6]. Charakterystyczną cechą jest, praktycznie stały i niezależny w szerokim zakresie wartości rezystancji R_F , stosunek sygnałów $3U_0$ i $3I_0$. Czułość działania tych zabezpieczeń jest więc ograniczona jedynie napięciowym progami rozruchowym dla składowej zerowej.

2.3. Przepięcia ziemnozwarciowe

Wartości przepięć ziemnozwarciowych ustalonych w sieciach SN, praktycznie nie zależą od sposobu pracy punktu neutralnego oraz wartości reaktancji dławika lub wartości rezystancji rezystora uziemiającego. Ich poziom, określony wartością współczynnika przepięć, nie przekracza wartości $k_p = 1,73$.

W stanie niustalonym przepięcia ziemnozwarciowe mają kształt tłumionych oscylacji nałożonych na składową harmoniczną o częstotliwości sieciowej.

3. BADANIA W SIECI RZECZYWISTEJ

3.1. Charakterystyka sieci i zakres badań

Badania wykonano w sieciach zasilanych z trzech stacji 110 kV/15 kV, oznaczonych jako: RPZ A, RPZ B oraz RPZ C, w których punkt neutralny jest połączony z ziemią przez rezystor. Sieci zasilane z RPZ A oraz RPZ B są to sieci kablowo-napowietrzne, natomiast sieć zasilana z RPZ C jest siecią kablową. W sieci kablowej występuje duża różnorodność zarówno typów kabli, jak i przekrojów (zarówno kable jedno- jak i trzy-żyłowe). W sieci napowietrznej dominują linie z przewodami AFL-6 o przekrojach 25 – 70 mm². Długości linii oraz ilość stacji SN/nn zasilanych z poszczególnych RPZ zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Liczba i długości linii SN oraz liczba stacji SN/nN.

RPZ	Liczba zasilanych linii	Długość linii			Liczba stacji SN/nN
		kablowych	napowietrznych	razem	
	szt.	km	km	km	szt.
A	24	116,2	23,8	140,0	166
B	22	114,7	27,4	142,1	171
C	27	34,0	0,0	34,0	87
Razem	73	264,9	51,2	316,1	434

Badania obejmowały:

- opracowanie modeli cyfrowych poszczególnych linii w programie ATP-EMTP,
- wykonanie zwarć jednofazowych w rozdzielniach 15 kV i w wybranych stacjach SN/nN w głębi sieci;
- obliczenia wartości prądów $3I_0$, I_{Ru} i napięć $3U_0$,
- obliczenia wartości przepięć przejściowych, (w stanie nieustalonym), oraz wartości skutecznych przepięć ustalonych.

Podczas zwarć rejestrowano przebiegi prądów $3I_0$ i I_{Ru} oraz napięć $3U_0$. Ze względów bezpieczeństwa układu pomiarowego i obsługi, pomiary prądów i napięć wykonywane były w obwodach wtórnych przekładników prądowych i napięciowych. Przebiegi czasowe mierzonych wielkości rejestrowano za pomocą oscyloskopów cyfrowych. Przed wykonaniem prób zwarciowych obliczono spodziewane wartości prądów zwarciowych. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów wyznaczono wartości skuteczne mierzonych wielkości. Celem pomiarów było zweryfikowanie opracowanych modeli cyfrowych analizowanych sieci oraz działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Łącznie wykonano 18 prób zwarciowych w polach liniowych w RPZ oraz 10 w stacjach SN/nN. Ze względów logistycznych, pomiary były wykonywane w rozdzielniach SN RPZ.

3.2. Wyniki obliczeń i analiz

Obliczenia wartości prądów $3I_0$, I_{Ru} i napięć $3U_0$ wykonano w programie ATP-EMTP przy założeniu, że zwarcia doziemne występują kolejno w polach liniowych rozdzielni 15 kV oraz we wszystkich stacjach 15/04 kV zasilanych z tych linii dla założonych czterech wartości rezystancji rezystora uziemiającego: $R_{uz} = \{17,5; 24; 35; 50\} \Omega$ oraz indywidualnej rezystancji uziemienia każdej stacji SN/nN $R_{us} = 10 \Omega$.

W zależności od rodzaju uziomu, różne są wymagania dotyczące dopuszczalnych napięć uziomowych i dopuszczalnych napięć rażeniowych. Ich wartość zależna jest przede wszystkim od spodziewanego czasu trwania zwarcia doziemnego, wynikającego z czasu działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. W tablicy 2 przedstawiono dopuszczalne napięcia uziomowe dla uziomów stacji SN/nN w przypadku, gdy uziom ochronny sieci niskiego napięcia jest wspólny z uziomem stacji średniego napięcia. Jest to przypadek najczęściej spotykany oraz dający najniższe dopuszczalne napięcia uziomowe.

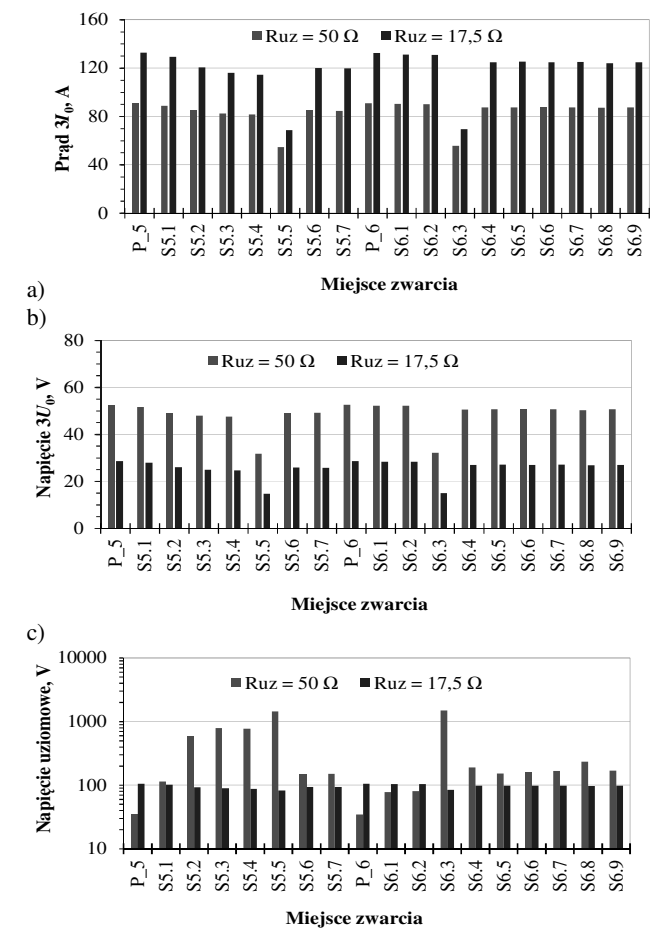
Tablica 2. Dopuszczalne napięcia uziomowe U_F w stacji SN/nN w zależności od czasu trwania doziemienia t_F [3].

Czas trwania zwarcia t_F , s	0,4	0,3	0,2
Napięcie uziomowe U_F , V	270	430	560

Czasy wyłączeń wynoszące 0,3 s oraz 0,4 s, wynikają z obecnych nastaw czasów zwłoki 0,2 s w zabezpieczeniach

konduktancyjnych oraz 0,3 s w zabezpieczeniach nadprądowych zerowych, przy założonych czasach własnych wyłączników 0,1 s. Natomiast skrócenie czasu zwłoki do 0,1 s skróciłoby czas wyłączenia zwarcia do 0,2 s, a w efekcie zwiększyłoby dopuszczalną wartość napięcia uziomowego do 560 V.

Na rysunku 4 przedstawiono wybrane wyniki obliczeń wykonanych dla sekcji B rozdzielni SN w stacji B (dla linii zasilanych z pól P05 i P06 oraz wszystkich stacji SN/nN zasilanych z tych linii), dla dwóch wartościach rezystancji rezystora uziemiającego.



Rys. 3. Zależności prądu $3I_0$, napięcia $3U_0$ oraz napięcia uziomowego od rezystancji rezystora uziemiającego i miejsca zwarcia. Oznaczenia: P05 –zwarcie w rozdzielni SN w polu nr 5, S5.1 –zwarcie w stacji nr 1 zasilanej z linii zasilanej z pola nr 5.

Można zauważyć, że im większa wartość rezystancji rezystora uziemiającego, tym mniejsza wartość prądu $3I_0$ (rys. 3a), natomiast mniejszym wartościom rezystancji rezystora odpowiadają mniejsze wartości $3U_0$ (rys. 3b).

Wartość rezystora uziemiającego wpływa również na wartości napięć uziomowych – im większa wartość jego rezystancji, tym mniejsza wartość napięcia uziomowego pojawiającego się na uziomach stacji SN/nN (rys. 3.c). Należy również zauważyć, że napięcia uziomowe są największe i przekraczają wartości dopuszczalne w stacjach zasilanych liniami napowietrznymi, lub w stacjach, w których linia zasilająca ma w swoim ciągu nawet niewielki odcinek linii napowietrznej. Wynika to z braku ciągłości w powłokach kabli zasilających pomiędzy uziomem stacji zasilającej i stacji SN/nN.

Analiza napięć w stanach nieustalonych pozwoliła wyznaczyć największe chwilowe wartości napięć doziemnych występujące w fazach nieobjętych zwarciami.

Poziom przepięć bardzo słabo zależy od rezystancji rezystora uziemiającego R_{RU} . Zmianie R_{RU} w zakresie od 17,5 Ω do 50 Ω towarzyszy wzrost przepięć o ok. 10%.

Podczas zwarcia w pobliżu stacji RPZ, wartość przepięć ustalonych nie przekracza 16,97 kV (współczynnik zwarcia doziemnego $k_{zd} = 1,68$) i praktycznie nie zależy od rezystancji rezystora uziemiającego.

4. PODSUMOWANIE

Właściwy dobór rezystora jest uwarunkowany spełnieniem wymagań wielu kryteriów, spośród których do najistotniejszych należą: zagrożenie porażeniowe, niezawodność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz poziom przepięć ziemnozwarciowych.

Zaletami stosowania uziemienia punktu neutralnego sieci przez rezystor są ograniczanie przepięć ziemnozwarciowych i ferrozonansowych, a przede wszystkim zwiększenie skuteczności działania ziemnozwarciowej automatyki zabezpieczeniowej. Jednak jest to okupione wzrostem zagrożenia porażeniowego. Dotyczy to w szczególności sieci napowietrznej i kablowo-napowietrznej. Potwierdziła to przeprowadzona analiza, z której płyną następujące wnioski:

Współczynnik przepięć ziemnozwarciowych w analizowanych obszarach sieci nie przekracza wartości 1,94.

Stwierdzono wysoką skuteczność działania ziemnozwarciowej automatyki zabezpieczeniowej dla wszystkich rozpatrywanych wartości rezystancji rezystora uziemiającego.

W sieci kablowej zasilanej z RPZ C oraz w czysto kablowych ciągach liniowych zasilanych z pozostałych RPZ, poziom napięć uziomowych zapewnia skuteczną ochronę przeciwporażeniową. Warunek ten jest spełniony przy wszystkich analizowanych wartościach rezystancji rezystora uziemiającego i przy założeniu rezystancji uziemień stacjach SN/nN wynoszącej 10 Ω . Natomiast w ciągach zawierających odcinki linii napowietrznych, napięcia uziomowe osiągają duże wartości. Poprawę tego stanu można uzyskać poprzez zapewnienie małych wartości rezystancji uziemienia stacji SN/nN oraz skrócenie czasów działania zabezpieczeń. Można również rozważyć zwiększenie rezystancji rezystora uziemiającego powyżej 50 Ω .

Na podstawie analizy otrzymanych wyników zarekomendowano dla sieci kablowo-napowietrznych

stosowanie rezystorów uziemiających o rezystancji $R_{RU} = 35 \Omega$, przy jednoczesnym zmniejszeniu nastaw zabezpieczeń nadprądowych w wybranych polach do wartości 35 A oraz zmniejszeniu nastaw zabezpieczeń konduktancyjnych do wartości 3 mS. Natomiast dla sieci czysto kablowych zaproponowano stosowanie rezystorów uziemiających o rezystancji $R_{RU} = 24 \Omega$ bez zmiany nastaw zabezpieczeń lub też rozważenie stosowania rezystorów uziemiających o rezystancji $R_{RU} = 35 \Omega$, przy zmniejszeniu nastaw zabezpieczeń nadprądowych w wybranych polach do wartości 35 A oraz zmniejszeniu nastaw zabezpieczeń konduktancyjnych do wartości 3 mS.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Hoppel W.: Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażen, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
2. Czapp S.: Ocena stanu instalacji uziemiającej w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. INPE Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, miesięcznik Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Nr 145 (Rok XVII), październik 2011 r., ISSN 1234-0081, s. 3-38.
3. PN-HD 60364-4-442:2012 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona instalacji niskiego napięcia przed przepięciami dorywczymi powstającymi wskutek zwarcia doziemnych w układach po stronie wysokiego i niskiego napięcia (oryg.).
4. Bąchorek W., Kot A., Makuch A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R.: Skuteczność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w przypadku wysokooporowego zwarcia doziemnego w napowietrznej linii SN. V Konferencja Elektroenergetyczne linie napowietrzne, 15 maja 2012 r., Dźwirzyno, PTPiRE, s. 15-1-15-8.
5. Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych (wyd. 2). WNT, Warszawa 2017.
6. Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Komitet Elektrotechniki PAN, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.

TESTS AND ANALYSIS OF EARTH FAULTS IN THE MEDIUM VOLTAGE NETWORK OF INNOGY STOEN OPERATOR FOR SELECTION OF EARTHING RESISTOR

The article discusses the analysis aimed to select proper parameters of earthing sets. It was carried out for selected areas of the 15 kV network operated by the innogy Stoen Operator. The article discusses selected issues of earth fault problems in networks with a neutral point grounded by a resistor, such as shock hazard, operating conditions of earth fault protections and overvoltages. Results of calculations obtained with use of computer models developed for analysis of shock hazard and earth fault overvoltages as well as operation of earth fault protection are presented. The measurements and simulations made it possible to formulate conclusions and recommendations regarding the required parameters of earthing units and settings of protection automatics in power substations. Among other things, high efficiency of the applied earth fault protection automatics for all considered values of earthing resistors has been confirmed. In the analyzed pure cable networks, the determined values of ground voltages confirmed effective protection against electric shock. This condition is fulfilled with all analyzed earthing resistors and assuming that the earth resistance of the MV/LV substations is equal to 10 Ω . However, in overhead line sections, the ground voltages can reach high values. Improvement of this state can be achieved by low earth resistance of MV/LV substations and reduction of protection operation times.

Keywords: earth fault, earthing resistor, shock hazard, temporary overvoltage.