ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1968
Seria: GÓRNICTWO z. 28 Nr kol. 217

FLORIAN KRASUCKI

ZWARCIE DOZIEMNE W SIECIACH GÓRNICZYCH Z IZOLOWANYM PUNKTEM GWIAZDOWYM

Streszczenie. Omówiono wybrane zagadnienia ze zwarć doziemnych w sieciach z izolowanym punktem gwiazdowym i związane z nimi zagrożenia dla ruchu górniczego. Wyprowadzono wzory ogólne dla napięć, prądów i mocy zwarcia doziemnego, z uwzględnieniem pojemności i upływności kabli, przewodów, urządzeń odbiorczych i pomiarowych oraz kompensacji pojemności. Dokonano analizy możliwości uproszczeń i zakresu stosowania wzorów w sieciach górniczych oraz podano przykładowe wyniki obliczeń.

1. Krótka charakterystyka sieci górniczych

Elektroenergetyczne sieci górnicze prądu 3-faz. przemiennego wykonywane są wyłącznie z przewodów izolowanych głównie dwóch typów, a to kabli opancerzonych i przewodów oponowych górniczych (PTEKW § 1053). Dla napięć do 1000 V jako zasadę przyjmuje się stosowanie kabli i przewodów co najmniej 4- żyłowych (PTEKW § 1150). Sieci te pracują w układzie izolowanym od ziemi (PTEKW § 1049), to znaczy punkt gwiazdowy transformatora ani żadna z faz nie są "celowo" połączone z ziemią uziemiaczem roboczym. Wyjątek stanowią sieci o napięciu międzyprzewodowym do 130 V (PN/E-05050 § 5), które mogą być uziemione. Podstawowymi środkami ochrony są izolacja i odpowiednia obudowa wszystkich urządzeń elektrycznych.

Zagadnienie prawidłowego wyboru układu sieci jest w dalszym ciągu dyskusyjne i nie można stwierdzić obiektywnie, który z nich bezwzględnie jest więcej bezpieczny, tym bardziej, że nie zostały określone ścisłe kryteria podziału sieci na izolowane i uziemione.

Początkowo większość sieci elektroenergetycznych posiadała punkt gwiazdowy uziemiony. Wynikało to z podziału na urządze-

nia niskiego i wysokiego napięcia i związanych z tym przepisów w zakresie wymagań i badań urządzeń elektrycznych. Rozwój elektryfikacji i stosowanie odbiorników o większych mocach jednostkowych stworzyły konieczność zwiększenia wartości napięcia ich zasilania. W chwili obecnej praktyczna granica podziału urządzeń niskiego i wysokiego napięcia wynosi 1000 V (według PN/E-05050 - 660 V).

Jako teoretyczne zalety sieci uziemionej i systemu zerowania podaje się przede wszystkim zmniejszenie niebezpieczeństwa porażeń z uwagi na brak obecności napięcia międzyprzewodowego względem ziemi oraz możliwość selektywnego wyłączania odcinków uszkodzonych. Zalety te są jednak w większości przypadków przemysłowych iluzoryczne. Napięcia fazowe i tak przekraczają znacznie dopuszczalne wartości napięć rażenia, a warunek wyłączenia nie może być spełniony z uwagi na dobór zabezpieczeń dla prądów rozruchowych silników zwartych i duże odległości zasilania. Dla zapewnienia odpowiedniego stopnia bezpieczeństwa konieczna jest stała kontrola ciągłości żyły zerującej. Nie chroni to mimo wszystko przed nieszczęśliwymi wypadkami choćby w przypadku dotyku gołej fazy czy uszkodzonych przewodów i kabli w powłokach nieprzewodzących (np. uszkodzenie przewodów oponowych przez drut strzałowy), które znajdują się pod pełnym napięciem fazowym względem ziemi. Równocześnie stosunkowo duże prądy zwarć ziemnych powodują wydzielanie się znacznej ilości energii cieplnej w miejscu uszkodzenia, co stwarza poważne zagrożenie pożarowe i wybuchowe.

W sieci izolowanej od ziemi prądy zwarć jednofazowych są dużo mniejsze i łatwiej jest zachować warunek wymaganej oporności uziemienia. Zlokalizowanie miejsca uszkodzenia jest jednak trudniejsze. W przypadku dotyku gołej fazy lub uszkodzonych przewodów bezpieczeństwo w sieci izolowanej może być zapewnione przy odpowiednio dużej wartości oporności izolacji pozostałych faz względnie oporności przejścia do ziemi.

W warunkach podziemi kopalń o wartości prądu rażenia stanowią wartość napięcia względem ziemi, oporność wypadkowa ciała człowieka oraz wypadkowy stan izolacji faz względem ziemi.

Pod pojęciem stanu izolacji względem ziemi należy rozumieć w tym przypadku składowe oporności czynnej i biernej oraz ich symetrię w układzie trójfazowym.

Parametry te można przyjąć jako podstawowe wymagania bezpieczeństwa rażenia prądem elektrycznym w górnictwie. Przyjmując takie założenia można przyznać wyższość sieci z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora, w której ciągła automatyczna kontrola stanu izolacji jest praktycznie możliwa do zrealizowania.

Można uznać, że w przypadku zastosowania kabli i przewodów górniczych z uziemionymi ekranami indywidualnymi na każdej żyle roboczej, stan izolacji jest również kryterium bezpieczeństwa pożarowego a częściowo i wybuchowego. Wtedy możliwość zwarć międzyprzewodowych istnieje praktycznie tylko wewnątrz obudów urządzeń elektrycznych, te zaś posiadają odpowiednią odporność pożarową i wybuchową.
Głównym zadaniem pozostaje więc zapobieganie skutkom zwarć jednobiegunowych doziemnych.

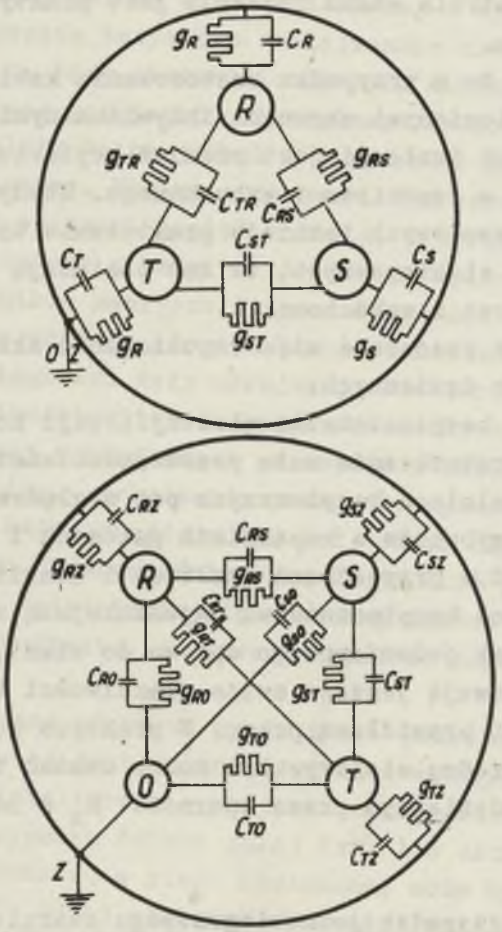
Pod pojęciem bezpieczeństwa elektryfikacji kopalń należy rozumieć więc dostatecznie małe prawdopodobieństwo porażeń i pożarów w kopalniach bezpiecznych pod względem wybuchowym oraz dodatkowo wybuchów w kopalniach gazowych i pyłowych, mogących zaistnieć w przypadkach zakłóceń i awarii.

W profilaktyce bezpieczeństwa najważniejszą rolę odgrywa właśnie przypadek jednofazowego upływu do ziemi, gdy sieć i urządzenia zachowują jeszcze swoje właściwości izolacyjne, umożliwiające ich prawidłową pracę. W praktyce kopalnianej przypadek rażenia prądem elektrycznym można uważać za równoznaczny ze zwarciem doziemnym przez oporność R_z o odpowiedniej wartości.

2. Uogólniony przypadek jednobiegunowego zwarcia doziemnego w sieci trójfazowej

Elektroenergetyczne kable opancerzone i oponowe przewody górnicze, z których wykonywane są sieci dołowe, stanowią pod względem elektrycznym złożony kondensator rzeczywisty. W kablach po-

siadających trzy żyły robocze, rozmieszczone centrycznie wokół rdzenia i otoczone wspólnym ekranem (powłoka ołowiana, opancerzenie, ekran ochronny) połączonym z ziemią, pojemności i upływności cząstkowe tworzą praktycznie symetryczny układ oporności (rys. 1). Dla kabli i przewodów z indywidualnymi



Rys. 1. Układ zastępczy przewodności i pojemności cząstkowych kabli trójżyłowego i czterożyłowego

uziemionymi ekranami żył roboczych pojemności i upływności międzyfazowe równe są zeru. Przy rozważaniu zwarć 1-faz. doziemnych, pojemności i upływności międzyfazowe można pominąć, również w kablach i przewodach bez ekranów indywidualnych, jako nie mające wpływu podobnie jak i odbiorniki symetryczne. W kablach i przewodach z czwartą żyłą uziemiającą (ochronną) brak jest symetrii oporności. Uwzględniając jednak, że powłoka kabla jest uziemiona, a żyły przewodów oponowych są skręcone ze stosunkowo małym skokiem oraz, że impedancje międzyfazowe zwierane są przez odbiorniki i transformatory, można z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością założyć symetrię konstrukcji tak jak dla kabli 3-żyłowych.

Dla wyjaśnienia wpływu poszczególnych parametrów przeprowadźmy analizę dla przypadku bardziej ogólnego, to znaczy gdy brak jest symetrii impedancji doziemnych, przy założeniu, że:

- napięcie źródła zasilania jest sztywne, symetryczne i bez wyższych harmonicznych,
- odbiorniki zasilane z sieci stanowią obciążenie symetryczne,
- impedancje międzyfazowe są takie same i stanowią układ symetryczny,
- pojemność, upływność, indukcyjność i oporność czynna jednostkowa rozłożone są liniowo wzdłuż przewodu,
- oporność przejścia w punkcie doziemienia R_z zmienia się od 0 do ∞.

W sieci 3-fazowej z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora pracującej w warunkach normalnych, żyły robocze znajdują się pod napięciem fazowym względem ziemi. Potencjał punktu gwiazdowego jest równy zeru. Przez oporności cząstkowe płyną prądy pojemnościowo upływnościowe rozłożone liniowo wzdłuż każdej żyły, wartość których jest funkcją długości przewodu.

Oporności wzdłużne czynne i indukcyjne, żył kabli i przewodów są nieznaczne w porównaniu z pojemnościowo-upływnościowymi i mogą być pominięte. Poszczególne żyły sieci łączą się więc z ziemią poprzez równomiernie rozłożone, na jednostkę długości wzdłuż poszczególnych odcinków trasy i równolegle po-

łączone, cząstkowe impedancje izolacji. Wypadkowa impedancja izolacji (Z_i) każdej z żył całej sieci względem ziemi składa się z wypadkowej rezystancji (R_i) i połączonej z nią równolegle reaktancji pojemnościowej ($X_i = \frac{1}{C_i \omega}$).

Doziemne pojemności i upływności cząstkowe odpowiednich odcinków kabli można również myślowo skupić w wybranych punktach sieci i uważać, że tworzą one sztuczny punkt zerowy. W ten sposób realna sieć izolowana nabiera cech zbliżonych do sieci uziemionej, zależnie od wartości impedancji doziemnych. W sieci rzeczywistej należy uwzględnić dodatkowo wypadkowe impedancje doziemne zainstalowanych urządzeń rozdzielczych, łączeniowych i odbiorczych (maszyny, przekładniki napięciowe, oświetlenie, urządzenia kontroli stanu izolacji, woltomierze itp.).

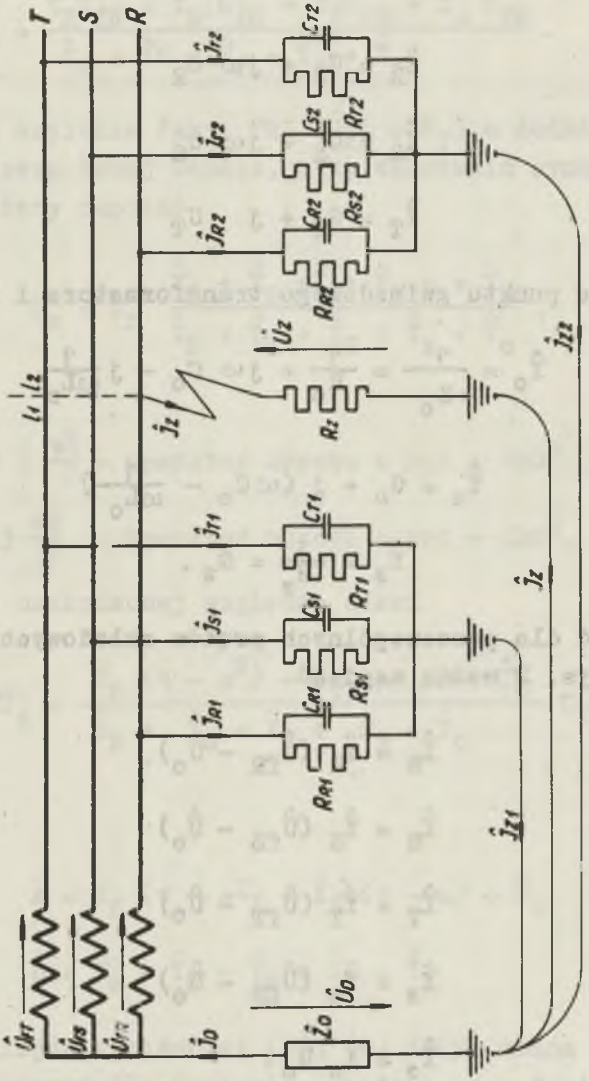
Rezystancje i reaktancje doziemne kabli i przewodów oraz wymienionych urządzeń składają się na wypadkową impedancję (Z) poszczególnych faz sieci względem ziemi. W przypadku ogólnym należy uwzględnić jeszcze dodatkowo impedancję doziemną (Z_o) punktu gwiazdowego transformatora (urządzenia do kompensacji prądów pojemnościowych, urządzenia do kontroli oporności izolacji, zabezpieczenia ziemnozwarciowe).

Schemat ideowy takiej sieci w ogólnym przypadku oporowego doziemienia jednej fazy można przedstawić w sposób podany na rys. 2. Dla przedstawionego schematu możemy napisać prawo Kirchhoffa w postaci symbolicznej

$$\hat{I}_R + \hat{I}_S + \hat{I}_T + \hat{I}_z - \hat{I}_o = 0, \tag{1}$$

w którym:

$$\begin{aligned} \hat{I}_R &= \hat{I}_{R1} + \hat{I}_{R2} \\ \hat{I}_S &= \hat{I}_{S1} + \hat{I}_{S2} \\ \hat{I}_T &= \hat{I}_{T1} + \hat{I}_{T2}. \end{aligned} \tag{2}$$



Rys. 2. Schemat ideowy dla ogólnego przypadku 1-fazowego zwarcia z ziemią w sieci 3-faz.

$G_1 = \frac{1}{R_1} = \sum(g\ l_1)$; $G_2 = \frac{1}{R_2} = \sum(g\ l_2)$ $C_1 = \sum(c\ l_1)$ $C_2 = \sum(c\ l_2)$

Oznaczmy admitancje symboliczne poszczególnych faz układu jako

$$\hat{Y}_R = \hat{Y}_{R1} + \hat{Y}_{R2} = \frac{1}{R_{R1}} + \frac{1}{R_{R2}} + j\omega(C_{R1} + C_{R2})$$

$$\hat{Y}_R = G_R + j\omega\, C_R$$

$$\hat{Y}_S = G_S + j\omega\, C_S \qquad (3)$$

$$\hat{Y}_T = G_T + j\quad C_T$$

a admitancje punktu gwiazdowego transformatora i doziemienia jako

$$\hat{Y}_o = \frac{1}{Z_o} = \frac{1}{R_o} + j\omega\, C_o - j\frac{1}{\omega L_o}$$

$$\hat{Y}_o = G_o + j\,(\omega C_o - \frac{1}{\omega L_o}) \qquad (4)$$

$$\hat{Y}_z = \frac{1}{R_z} = G_z\,.$$

Zależność dla poszczególnych prądów składowych równania (1) zgodnie z rys. 2 można napisać

$$\hat{I}_R = \hat{Y}_R\,(\hat{U}_{fR} - \hat{U}_o)$$

$$\hat{I}_S = \hat{Y}_S\,(\hat{U}_{fS} - \hat{U}_o)$$

$$\hat{I}_T = \hat{Y}_T\,(\hat{U}_{fT} - \hat{U}_o) \qquad (5)$$

$$\hat{I}_z = \hat{Y}_z\,(\hat{U}_{fR} - \hat{U}_o)$$

$$\hat{I}_o = \hat{Y}_o\,\hat{U}_o\,.$$

Wstawiając wyrażenia (5) do (1) i przekształcając otrzymuje się

$$\hat{U}_o = \frac{\hat{Y}_R\hat{U}_{fR} + \hat{Y}_S\,\hat{U}_{fS} + \hat{Y}_T\hat{U}_{fT} + \hat{Y}_z\,\hat{U}_{fR}}{\hat{Y}_R + \hat{Y}S + \hat{Y}_T + \hat{Y}_z + \hat{Y}_o}\,. \tag{6a}$$

Przyjmując napięcie fazy "R" ($\hat{U}_{fR} = U_f$) w dodatniej osi na płaszczyźnie zespolonej Gaussa, przy założeniu symetrii źródła zasilania, możemy napisać

$$\hat{U}_o = U_f\,\frac{\hat{Y}_R + \hat{Y}_S\,a^2 + \hat{Y}_T\,a + \hat{Y}_z}{\hat{Y}_R + \hat{Y}_S + \hat{Y}_T + \hat{Y}_z + \hat{Y}_o}\,, \tag{6b}$$

gdzie:

$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - operator obrotu o kąt + 120°

$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - operator obrotu o kąt - 120°.

Napięcie fazy uszkodzonej względem ziemi

$$\hat{U}_z = \frac{\hat{Y}_S\,(1 - a^2) + \hat{Y}_T(1 - a) + \hat{Y}_o}{\hat{Y}_R + \hat{Y}_S + \hat{Y}_T + \hat{Y}_z + \hat{Y}_o}\,U_f\,. \tag{7}$$

Oznaczając

$$\hat{A} = \hat{Y}_S\,(1 - a^2) + \hat{Y}_T\,(1 - a) + \hat{Y}_o \tag{8a}$$

$$\hat{B} = \hat{Y}_R + \hat{Y}_S + \hat{Y}_T + \hat{Y}_z + \hat{Y}_o \tag{8b}$$

oraz uwzględniając zależności (5), (6) i (7) można napisać wyrażenia symboliczne dla napięcia, prądu i mocy 1-biegunowego zwarcia z ziemią przez oporność R_Z, w następującej postaci:

$$\hat{U}_z = \frac{\hat{A}}{\hat{B}}\,U_f \tag{9}$$

$$\hat{I}_z = \hat{Y}_z \hat{U}_z = \frac{\hat{A}}{\hat{B}} \hat{Y}_z U_f \tag{9}$$

$$\hat{P}_z = \left(\frac{\hat{A}}{\hat{B}}\right)^2 \hat{Y}_z U_f^2 .$$

Wyraźmy poszczególne wyrażenia symboliczne w formie algebraicznej i obliczmy moduły wielkości funkcyjnych (8) i (9)

$$\hat{A} = \frac{1}{2}\left[3(G_S + G_T) + 2\,G_o + \sqrt{3}\,\omega(C_T - C_S)\right] + j\,\frac{1}{2}\left[\sqrt{3}\,(G_S - G_T) + 3\omega(C_S + C_T) + 2\left(\omega C_o - \frac{1}{\omega L_o}\right)\right]$$

$$A = |\hat{A}| = \frac{1}{2}\sqrt{\left[3\,(G_S + G_T) + \sqrt{3}\,\omega(C_T - C_S) + 2\,G_o\right]^2 + \left[\sqrt{3}\,(G_S - G_T) + 3\omega(C_S + C_T) + 2\left(\omega C_o - \frac{1}{\omega L_o}\right)\right]^2} \tag{10a}$$

$$\hat{B} = (G_R + G_S + G_T + G_o + G_Z) + j\omega\left(C_R + C_S + C_T + C_o - \frac{1}{\omega^2 L_o}\right)$$

$$B = |\hat{B}| = \sqrt{(G_R+G_S+G_T+G_o+G_Z)^2 + \omega^2\left(R_R+C_S+C_T+C_o - \frac{1}{\omega^2 L_o}\right)^2} \tag{10b}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\left[3\,(G_S+G_T) + \sqrt{3}\,\omega(C_T-C_S) + 2G_o\right]^2 + \left[\sqrt{3}(G_S - G_T)+3\omega(C_s+C_T) + 2\left(\omega C_o - \frac{1}{\omega L_o}\right)\right]^2}{(G_R + G_S + G_T + G_o + G_z)^2 + \omega^2\left(C_R + C_S + C_T + C_o - \frac{1}{\omega^2 L_o}\right)^2}} \tag{11}$$

$$U_z = \left|\hat{U}_z\right| = \frac{A}{B}\, U_f \tag{12a}$$

$$I_z = \left|\hat{I}_z\right| = \frac{A}{B}\, \frac{U_f}{R_z} \tag{12b}$$

$$P_z = \left|\hat{P}_z\right| = \left(\frac{A}{B}\right)^2 \frac{U_f^2}{R_z}\,. \tag{12c}$$

Otrzymane wyrażenia opisują zwarcie doziemne dla przypadku uogólnionego. Stanowią one skomplikowaną funkcję 10 zmiennych charakteryzujących stan izolacji oraz częstotliwości i wartości napięcia fazowego. Analiza teoretyczna tych wyrażeń jest praktycznie możliwa przy wykorzystaniu matematycznych maszyn cyfrowych.

Dla celów analiz konkretnych sieci, z praktycznych wykorzystaniem ich wyników, możliwe i celowe jest dokonanie pewnych założeń upraszczających. Pozwalają one na otrzymanie zależności funkcyjnych dla napięć, prądów i mocy zwarć z ziemią, przydatnych do stosunkowo łatwych obliczeń i oceny stopnia zagrożenia.

3. Zwarcie doziemne w sieci wysokiego napięcia

Dla celów analizy zwarć w sieci dołowej wysokiego napięcia (6 kV) można dokonać założeń znacznie upraszczających wzory (12). W sieciach tych punkt gwiazdowy transformatora jest stosunkowo dobrze izolowany względem ziemi (brak kompensacji) a stosowane kable trójżyłowe w izolacji papierowej nasyconej zapewniają symetrię impedancji doziemnych o dużej wartości rezystancji i względnie małej reaktancji. Wymienione właściwości można zapisać w postaci następujących założeń:

$$\hat{Y}_o = G_o + j\left(\omega C_o - \frac{1}{\omega L_o}\right) = 0$$

$$\hat{I}_o = 0$$

$$G_R = G_S = G_T = 0$$

$$C_R = C_S = C_T = C\,.$$

Zależności (12) i (6), po odpowiednich przekształceniach przyjmują teraz postać uproszczoną (13), szczególnie przydatną do praktycznej analizy doziemień oraz zabezpieczeń przed skutkami tych zwarć

$$U_o = \frac{1}{\sqrt{1 + 9\omega^2 C^2 R_z^2}} U_f \tag{13a}$$

$$U_z = \frac{3\omega C R_z}{\sqrt{1 + 9\omega^2 C^2 R_z^2}} U_f \tag{13b}$$

$$I_z = \frac{3\omega C}{\sqrt{1 + 9\omega^2 C^2 R_z^2}} U_f \tag{13c}$$

$$P_z = \frac{9\omega^2 C^2 R_z}{1 + 9\omega^2 C^2 R_z^2} U_f^2 . \tag{13d}$$

Analizując wyprowadzone wzory widzimy, że wartość napięcia sztucznego punktu zerowego niesymetrycznego układu obciążenia C i R_z, względem punktu gwiazdowego układu zasilającego, zależy od wartości oporności zwarcia R_z. Miejscem geometrycznym wektora U_o jest okrąg o średnicy U_f, przy czym dla dodatniej wartości R_z koniec wektora U_o zakreśla półokrąg [3], [8].

W przypadku sieci nieuszkodzonej $R_z = \infty$, prąd doziemienia równy jest zeru, a napięcia poszczególnych faz względem ziemi równe są napięciom fazowym ($U_z = U_f$, $U_o = 0$). Napięcie punktu gwiazdowego układu zasilającego względem ziemi U_o może być w tym przypadku różne od zera (praktycznie 5 do 10% U_f) jeżeli pojemności doziemne poszczególnych faz nie są jednakowe.

W drugim skrajnym przypadku gdy $R_z = 0$ (zwarcie "pełne"), napięcie U_z faz względem ziemi jest równe zeru dla fazy doziemionej oraz napięciu międzyprzewodowemu dla faz pozostałych,

prąd natomiast (wzór 13c) osiąga wartość maksymalną i jest funkcją liniową pojemności doziemnej zgodnie z wzorem

$$I_{z\ maks.} = 3\omega\ C\ U_f\ . \tag{14}$$

W przypadkach pośrednich ($0 < R_z < \infty$) wektory napięcia punktu gwiazdowego i faz względem ziemi oraz prądu ziemnozwarciowego zmieniają się po półokręgach zależnie od wartości R_z. Jak widać wartość oporności przejścia w miejscu uszkodzenia (doziemienia) decyduje na równi z pojemnością doziemną o wartościach napięć, prądów i mocy zwarcia doziemnego. Zależności te, dla różnych pojemności jednej fazy całej sieci względem ziemi i napięcia roboczego 6000 V, przedstawiono wykreślnie na rysunkach 3 i 4.

Wartość mocy wydzielonej w miejscu uszkodzenia w przypadkach skrajnych ($R_z = 0$ i $R_z = \infty$) równa się zeru, natomiast wartość maksymalną osiąga dla jednej określonej wartości oporności doziemienia R_{zm}, zależnej od pojemności doziemnej C (rys. 3). Wartość tej oporności można znaleźć obliczając pierwszą pochodną funkcji $P_z = f\ (R_z,\ C,\ U_f)$ względem zmiennej R_z i przyrównując ją do zera, czyli

$$\frac{\partial P_z}{\partial R_z} = 0\ .$$

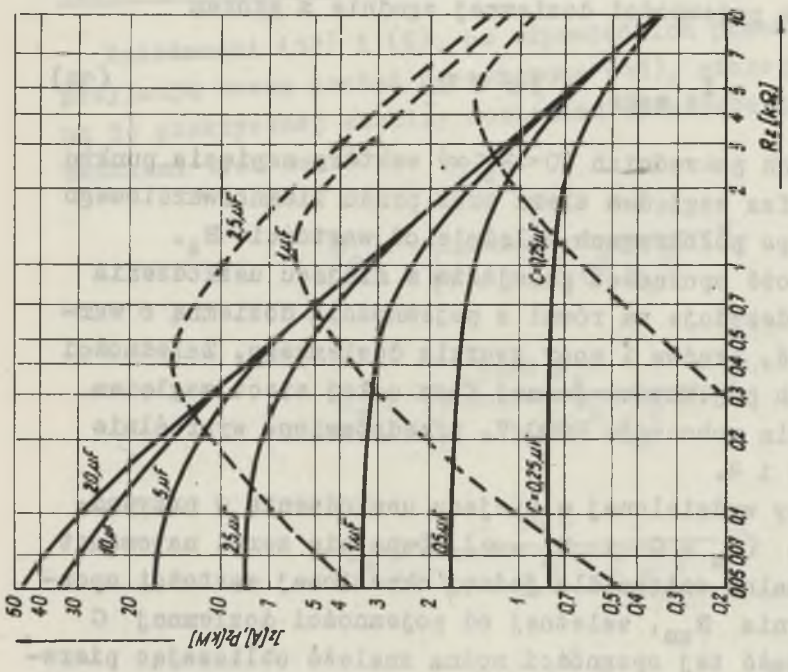
W wyniku otrzymuje się zależność funkcyjną pojemności doziemnej i oporności doziemienia przy której moc wydzielana w miejscu uszkodzenia jest maksymalna.

$$R_{zm} = \frac{1}{3\omega C}\ . \tag{15}$$

Wstawiając $R_z = R_{zm}$ do wzorów 13 otrzymuje się

$$U_{om} = \frac{U_f}{\sqrt{2}} \tag{16a}$$

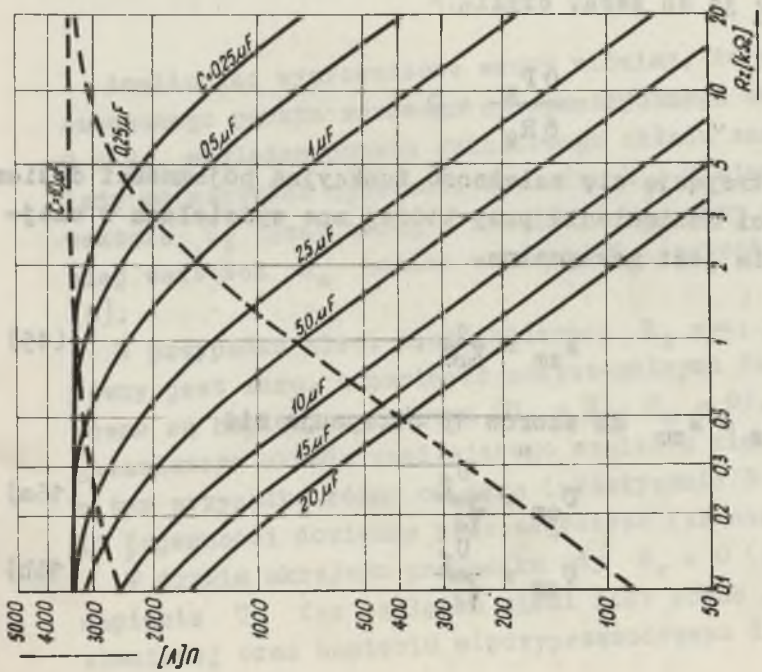
$$U_{zm} = \frac{U_f}{\sqrt{2}} \tag{16b}$$



Rys. 4. Prąd I_z i moc P_z zwarcia doziemnego sieci izolowanej 6000 V w funkcji doziemnej pojemności fazowej C i oporności zwarcia R_z

——— $I_z = f(R_z)$, C = constans

- - - - - - $P_z = f(R_z)$, C = constans



Rys. 3. Napięcie składowej symetrycznej kolejności zerowej U_o i napięcie doziemnej fazy U_z sieci izolowanej 6000V w funkcji doziemnej pojemności fazowej C i oporności doziemienia R_z

——— $U_o = f(R_z)$, C = constans

- - - - - - $U_z = f(R_z)$, C = constans

$$I_{zm} = \frac{3}{\sqrt{2}}\omega C\, U_f = \frac{I_{z\ maks.}}{\sqrt{2}} \tag{16c}$$

$$P_{zm} = \frac{3}{2}\,\omega C\, U_f^{\,2}. \tag{16d}$$

Wyprowadzone zależności (14, 15, 16c, 16d) przedstawiono graficznie na rys. 4 dla napięcia roboczego 6000 V. W przypadku sieci o innej wartości napięcia roboczego zależność $R_{zm} = f(C)$ pozostaje niezmienna, natomiast prąd zwarcia należy pomnożyć przez $\frac{U}{6000}$, a moc zwarcia przez kwadrat tego stosunku.

Z analizy przedstawionych równań i wykresów dla sieci WN można wyciągnąć wniosek, że dla uzyskania względnie dużego stopnia bezpieczeństwa zwarć doziemnych należy wyłączać je przy stosunkowo dużej oporności $R_z \gg R_{zm}$, to jest przy małej wartości składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia (U_o), gdyż moc i prąd ziemnozwarciowy są wtedy znacznie mniejsze od maksymalnie możliwych.

4. Zwarcie doziemne w sieci niskiego napięcia

W przypadku elektroenergetycznych sieci dołowych niskiego napięcia (do 1 kV), szczególnie przy analizowaniu problemów bezpieczeństwa rażenia prądem elektrycznym, nie można pominąć przewodności czynnej izolacji. Pojemność całkowita kabli i przewodów sieci oddziałowej jest stosunkowo mała, a dodatkowo stosowana jest jej kompensacja przy pomocy indukcyjności. Jeżeli dla sieci takiej można założyć, że:

$$C_R = C_S = C_T = C$$

$$C_o = 0 \tag{17}$$

$$G_R = G_S = G_T = G'$$

to wzory (12) przyjmują następującą postać:

$$U_z = U_f \sqrt{\frac{(3G' + G_o)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2}{(3G' + G_o + G_z)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2}} \tag{18a}$$

$$I_z = U_f G_z \sqrt{\frac{(3G' + G_o)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2}{(3G' + G_o + G_z)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2}} \tag{18b}$$

$$P_z = U_f^2 G_z \frac{(3G' + G_o)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2}{(3G' + G_o + G_z)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L_o})^2} . \tag{18c}$$

Z powyższych zależności funkcyjnych widać, że napięcie, moc i prąd zwarcia doziemnego, przy stałych wartościach przewodności czynnej i napięcia roboczego, zależą od wzajemnego stosunku pojemności C fazy sieci względem ziemi i indukcyjności L_o punktu gwiazdowego transformatora względem ziemi.

Teoretycznie możliwe są trzy stany pracy sieci kompensowanej

- sieć niedokompensowana, gdy $3\omega C > \frac{1}{\omega L_o}$
- sieć skompensowana zupełnie, gdy $3\omega C = \frac{1}{\omega L_o}$
- sieć przekompensowana, gdy $3\omega C < \frac{1}{\omega L_o}$.

Przypadek sieci skompensowanej w warunkach ruchu górniczego mógłby wystąpić tylko przy zastosowaniu niezawodnych i czułych urządzeń kompensacji automatycznej. W przypadku kompensacji statycznej mogą wystąpić, w odpowiednich okresach czasu,

wszystkie trzy stany. Analizując wzory (18) można stwierdzić, że sieć przekompensowana zachowuje się przy zwarciu doziemnym tak samo jak sieć nie dokompensowana. Sieć taką można rozpatrywać jako posiadającą równoważną susceptancję indukcyjną równą co do wartości susceptancji pojemnościowej. Należy na ten fakt zwracać szczególną uwagę przy opracowywaniu sposobów kompensacji i zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Dla celów analizy zagadnienie można uprościć w ten sposób, że sieć niedokompensowaną rozpatruje się jak zastępczą sieć nie kompensowaną o pojemności doziemnej jednej fazy odpowiednio zmniejszonej C_n (tzw. "pojemności nieskompensowanej"), przy czym

$$C_n = C - \frac{1}{3\omega^2 L_o} . \tag{19}$$

Kompensacja pojemności doziemnej w sieciach górniczych stosowana jest równocześnie z urządzeniami kontroli oporności izolacji. Należy więc dodatkowo uwzględnić wpływ upływności czynnej punktu gwiazdowego transformatora względem ziemi G_o. Przewodność tę można traktować jako zastępczą, dodatkową symetryczną przewodność izolacji doziemnej faz, skupioną w jednym miejscu, czyli

$$G_o = G_{oR} + G_{oS} + G_{oT} .$$

Uwzględniając powyższe oraz założenie (17), możemy napisać

$$G_{oR} = G_{oS} = G_{oT} = \frac{G_o}{3}$$

$$3G' = G_R + G_S + G_T$$

$$3G' + G_o = G_R + G_{oR} + G_S + G_{oS} + G_T + G_{oT}$$

oznaczając

$$G'_R = G_R + G_{oR}$$
$$G'_S = G_S + G_{oS} \tag{20}$$
$$G'_T = G_T + G_{oT}$$

otrzymujemy

$$3G = 3\,G' + 3\,G_o = G'_R + G'_S + G'_T\,. \tag{21}$$

Dla tak określonej sieci zastępczej, wzory (18) przyjmują postać

$$U_z = U_f\sqrt{\frac{(3\,G)^2 + (3\omega C_n)^2}{(3\,G + G_z)^2 + 9\,\omega^2\,C_n^{\,2}}} \tag{22a}$$

$$I_z = U_f\,G_z\sqrt{\frac{(3\,G)^2 + (3\omega C_n)^2}{(3\,G + G_z)^2 + 9\omega^2\,C_n^{\,2}}} \tag{22b}$$

$$P_z = U_f^{\,2}\,G_z\,\frac{9\,G^2 + 9\,\omega^2\,C_n^{\,2}}{(3\,G + G_z)^2 + 9\omega^2\,C_n^{\,2}}\,. \tag{22c}$$

Wzory powyższe, obowiązujące dla sieci nieskompensowanej symetrycznej pod względem zasilania i przewodności doziemnej, można napisać w postaci zawierającej oporności czynne. Uwzględniając, że

$$G = \frac{1}{R}$$

$$G_z = \frac{1}{R_z}$$

$$R > 0, \qquad C_n < \infty$$

po podstawieniu i wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się

$$U_z = \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R^2 + 6 R R_z}{9 R_z^2 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}} \tag{23a}$$

$$I_z = \frac{U_f}{R_z \sqrt{1 + \frac{R^2 + 6 R R_z}{9 R_z^2 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}}} \tag{23b}$$

$$P_z = \frac{U_f^2 R_z}{R_z^2 + \frac{R^2 + 6 R R_z}{9 (1 + \omega^2 C_n^2 R^2)}} . \tag{23c}$$

Ze względów bezpieczeństwa interesują nas warunki graniczne powyższych funkcji - dla jakiej wartości oporności doziemienia występują największe wartości napięć i prądów doziemnych oraz mocy zwarcia.

Obliczając pierwszą pochodną cząstkową funkcji (23a) względem zmiennej niezależnej R_z oraz przyrównując ją do zera można stwierdzić, że napięcie względem ziemi osiąga wartość maksymalną równą napięciu fazowemu dla sieci nieuszkodzonej ($R_z=\infty$) a więc dla $I_z = 0$.

Prąd doziemny natomiast przyjmuje wartość największą dla pełnego zwarcia ($R_z = 0$) to znaczy gdy napięcie fazy uszkodzonej względem ziemi równa się zeru. Wartość prądu w takim przypadku, jako funkcja parametrów sieci, wyraża się wzorem

$$I_{z\,max} = 3 U_f \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C_n^2} . \tag{24}$$

Podobnie obliczając pierwszą pochodną cząstkową funkcji (23c) znajduje się wartość oporności doziemienia, przy której moc w miejscu uszkodzenia osiąga największą wartość dla danych parametrów sieci

$$R_{zm} = \frac{R}{\sqrt{9(1+\omega^2 C_n^2 R^2)}} = \frac{1}{3\sqrt{\frac{1}{R^2}+\omega^2 C_n^2}} . \tag{25}$$

Graficzny obraz powyższej funkcji przedstawiono na rys. 5.

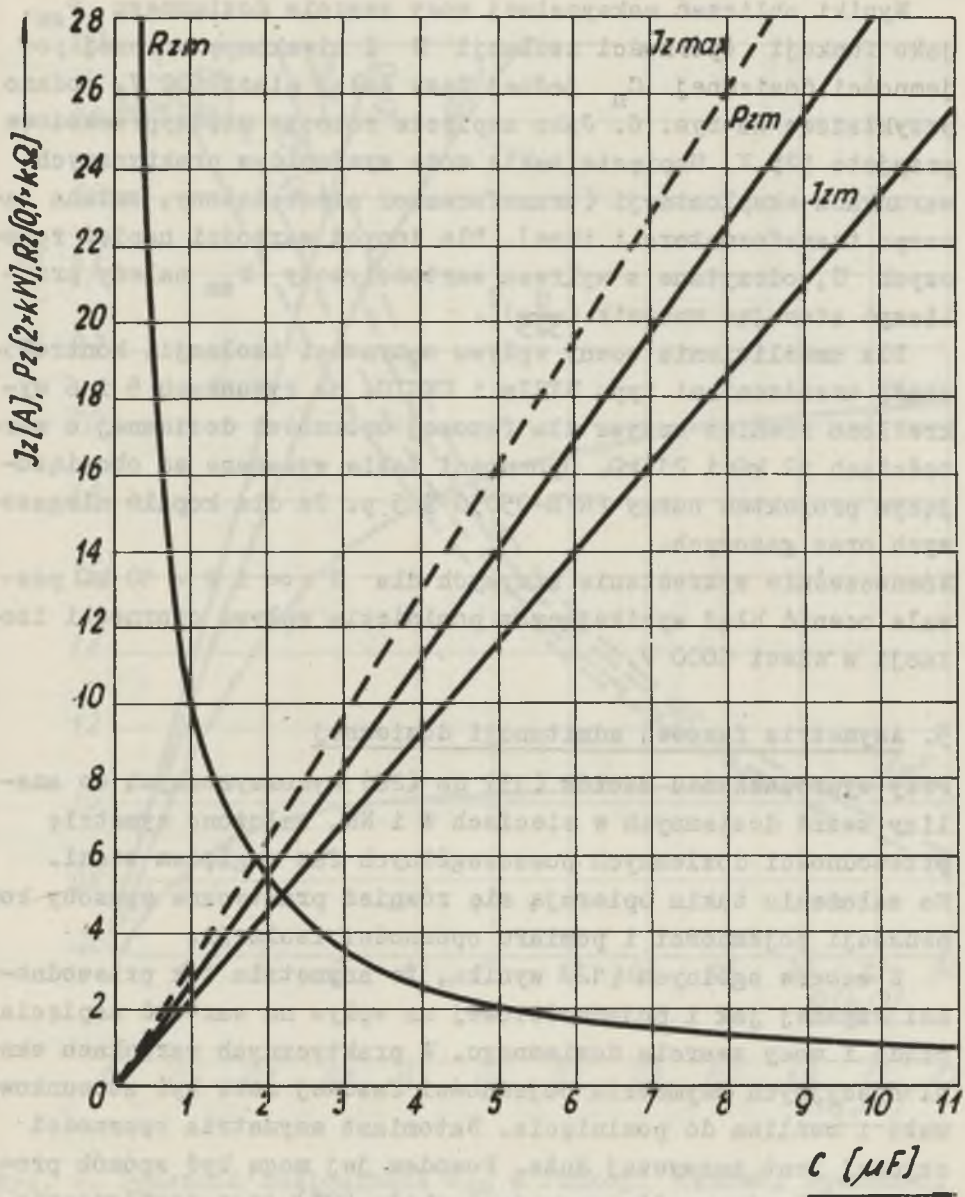
Z obliczeń wynika, że wartość oporności doziemienia, odpowiadającej maksimum mocy wydzielonej w miejscu zwarcia - przy pojemności doziemnej jednej fazy $C_n > 0,5\ \mu F$-praktycznie nie zależy od wartości oporności czynnej izolacji. Jest to również uzasadnieniem, że pominięcie upływnosci izolacji przy rozważaniu doziemienia w sieci wysokiego napięcia było dopuszczalne.

Podstawiając wyrażenie (25) do (23) otrzymamy zależności dla napięcia względem ziemi, prądu i mocy zwarcia doziemnego, jako funkcje parametrów sieci symetrycznej, w przypadku doziemienia opornością odpowiadającą warunkowi maksymalnej mocy

$$U_{zm} = \frac{U_f}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 C_n^2 R^2}}}} \tag{26a}$$

$$I_{zm} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot U_f \frac{\sqrt{1+\omega^2 C_n^2 R^2}\ \sqrt[4]{1+\omega^2 C_n^2 R^2}}{R\sqrt{1+\sqrt{1+\omega^2 C_n^2 R^2}}} \tag{26b}$$

$$P_{zm} = \frac{3}{2} \cdot U_f^2 \cdot \frac{1+\omega^2 C_n^2 R^2}{R(1+\sqrt{1+\omega^2 C_n^2 R^2})} . \tag{26c}$$



Rys. 5. Oporność doziemienia R_{zm}, moc P_{zm}, prądy doziemne I_{zm} oraz $I_{z\ maks.}$, jako funkcje doziemnej pojemności fazowej C przy zwarciu w sieci izolowanej 6000 V

$I_{z\ maks} \rightarrow R_z = 0$, $I_{zm} \rightarrow R_z = R_{zm}$, $P_{zm} \rightarrow R_{zm} = \frac{1}{3\omega C}$

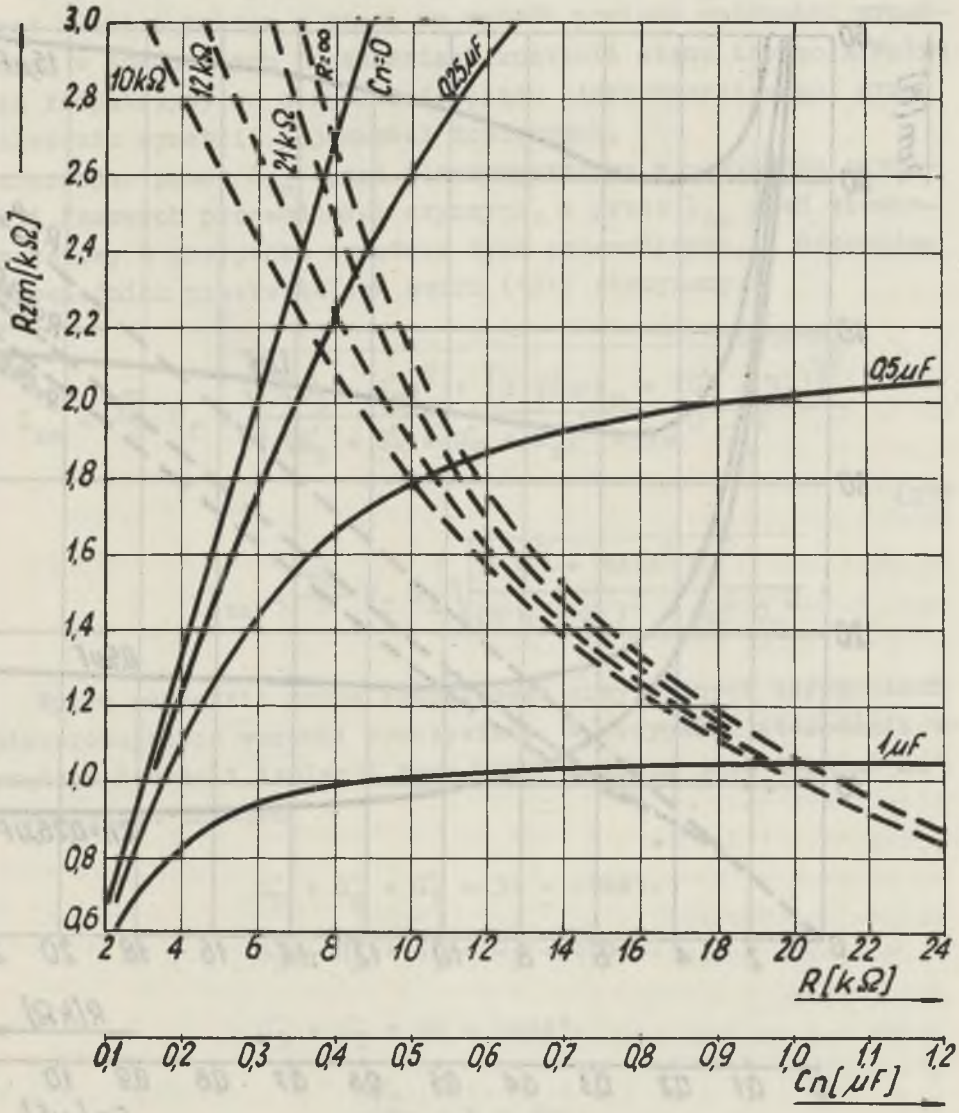
Wyniki obliczeń maksymalnej mocy zwarcia doziemnego P_{zm}, jako funkcji oporności izolacji R i nieskompensowanej pojemności doziemnej C_n jednej fazy całej sieci 500 V, podano przykładowo na rys. 6. Jako napięcie robocze międzyprzewodowe przyjęto 525 V. Napięcie takie może wystąpić w praktycznych warunkach eksploatacji (transformator nieobciążony, zmiana zaczepu transformatora i inne). Dla innych wartości napięć roboczych U, odczytane z wykresu wartości mocy P_{zm} należy przeliczyć stosując mnożnik $(\frac{U}{525})^2$.

Dla umożliwienia oceny wpływu oporności izolacji, kontrolowanej urządzeniami typu UKSIw i UKSIO, na rysunkach 5 i 6 wykreślono również krzywe dla fazowej oporności doziemnej o wartościach 12 kΩ i 21 kΩ. Oporności takie wymagane są obowiązującym projektem normy PN/E-05050 § 5 p. 2a dla kopalń niegazowych oraz gazowych.
Równocześnie wykreślenie krzywych dla $R = \infty$ i $R = 10$ kΩ pozwala ocenić błąd wynikający z pominięcia wpływu oporności izolacji w sieci 6000 V.

5. Asymetria fazowej admitancji doziemnej

Przy wyprowadzaniu wzorów (13) do (26) wykorzystanych do analizy zwarć doziemnych w sieciach W i NN, założono symetrię przewodności doziemnych poszczególnych faz względem ziemi. Na założeniu takim opierają się również praktyczne sposoby kompensacji pojemności i pomiaru oporności izolacji.

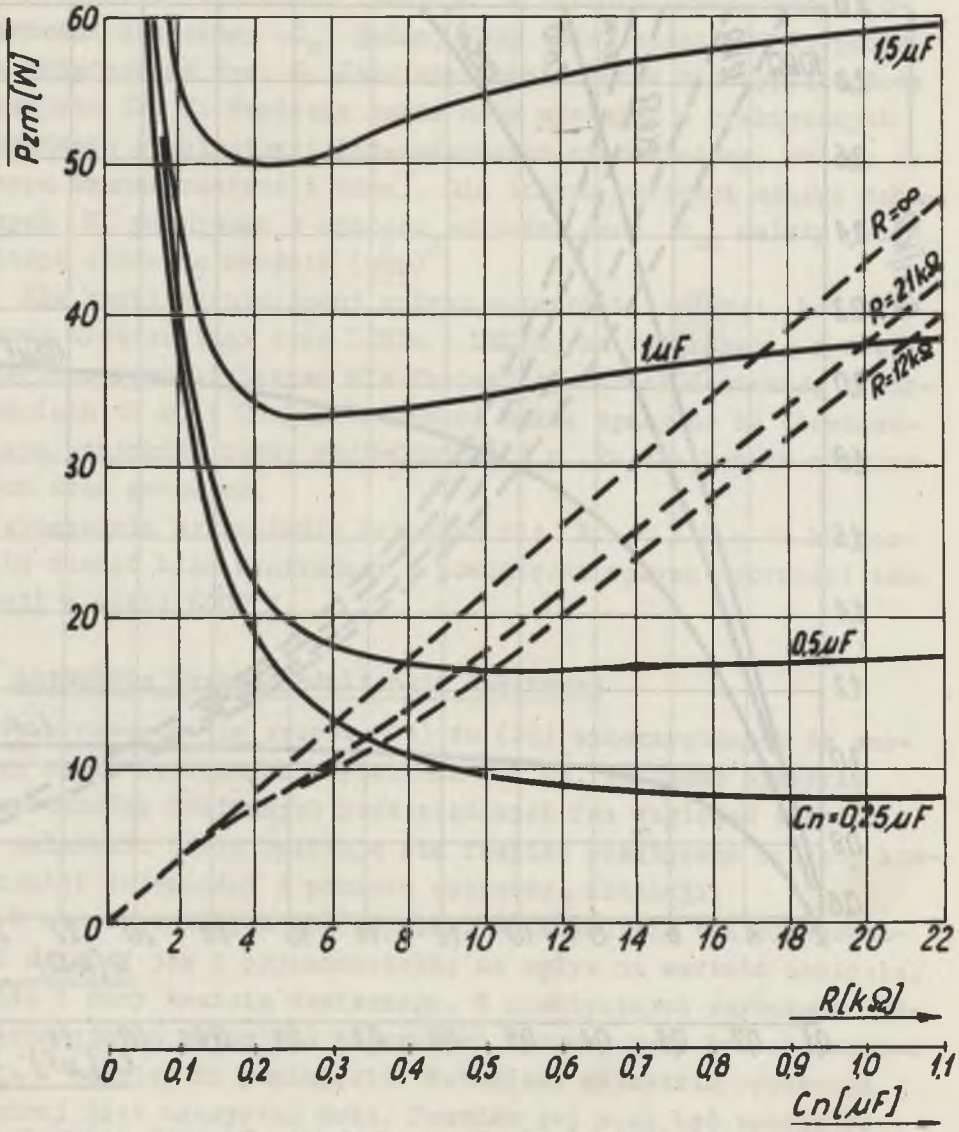
Z wzorów ogólnych (12) wynika, że asymetria tak przewodności czynnej jak i pojemnościowej ma wpływ na wartość napięcia, prądu i mocy zwarcia doziemnego. W praktycznych warunkach eksploatacyjnych asymetria pojemności fazowej może być stosunkowo mała i możliwa do pominięcia. Natomiast asymetria oporności czynnej jest zazwyczaj duża. Powodem jej mogą być sposób produkcji (dla przewodów oponowych około 50%) oraz zawilgocenie, nierównomierność obciążenia żył (asymetria temperatury), uszkodzenia mechaniczne izolacji i inne.



Rys. 6. Oporność doziemienia R_{zm} w funkcji fazowej oporności izolacji R i nieskompensowanej fazowej pojemności doziemnej C_n dla sieci izolowanej

——— $R_{zm} = f(R)$, C_n = constans

- - - - $R_{zm} = f(C_n)$, R = constans



Rys. 7. Moc P_{zm} w funkcji fazowej oporności izolacji R i pojemności doziemnej C_n w sieci izolowanej 500 V

——— $P_{zm} = f(R, R_{zm})$, C_n = constans

- - - - $P_{zm} = f(C_n, R_{zm})$, R = constans

Rozpatrzenie wpływu asymetrii doziemnych oporności czynnych jest również celowe z uwagi na sposób pomiaru oporności wypadkowej w stosowanych urządzeniach kontroli stanu izolacji. Wpływ ten rozpatrzymy na przykładzie prądu ziemnozwarciowego, przy założeniu symetrii pojemności doziemnych.
Oznaczając przez I_{za} prąd ziemnozwarciowy w przypadku asymetrii fazowych przewodności czynnych, a przez I_{zs} prąd ziemnozwarciowy w przypadku symetrii tych przewodności, i dokonując odpowiednich przekształceń wzoru (12b) otrzymamy:

$$I_{za} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_f G_z \sqrt{\frac{3(G'_S + G'_T)^2 + \left[2\sqrt{3}\omega C_n + (G'_S - G'_T)\right]^2}{(G'_R + G'_S + G'_T + G_z)^2 + 9\omega^2 C_n^2}}$$

$$I_{zs} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_f G_z \sqrt{\frac{12 G^2 + 12\omega^2 C_n^2}{(3G + G_z)^2 + 9\omega^2 C_n^2}} \quad (27)$$

Wpływ asymetrii można rozpatrywać przy różnych założeniach odwzorowujących warunki rzeczywiste. W przypadku stosowania urządzeń kontroli izolacji typu UKSIO celowym jest dokonać następujących założeń

$$G'_R + G'_S + G'_T = 3G = \text{const.}$$

$$G'_R + G'_S + G'_T + G_z = \text{const.}$$

$$G'_S + G'_T = 2G = \text{const.}$$

$$\frac{G'_T}{G'_S} = k = \text{var.}$$

Uwzględniając, że

$$G'_S = \frac{2G}{1+k}, \qquad G'_T = \frac{2G}{1+k} \cdot k$$

po podstawieniu do (27) i dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymamy

$$\frac{I_{za}}{I_{zs}} = \sqrt{\frac{x^2 + 2\,b\,x + b^2 + 3}{b^2 + 3}}\,, \tag{28}$$

gdzie:

$$x = \frac{1 - k}{1 + k}$$

$$k = \frac{G'_T}{G'_S} = \frac{1 - x}{1 + x}$$ – współczynnik asymetrii przewodności czynnej izolacji,

$$b = \frac{\sqrt{3}\,\omega C_n}{G}$$ – względna przewodność doziemna.

Wyniki obliczeń względnego prądu asymetrii $\frac{I_{za}}{I_{zs}}$ w funkcji współczynnika asymetrii $k = \frac{G'_T}{G'_S}$ przedstawiono wykreślnie na rys. 8.

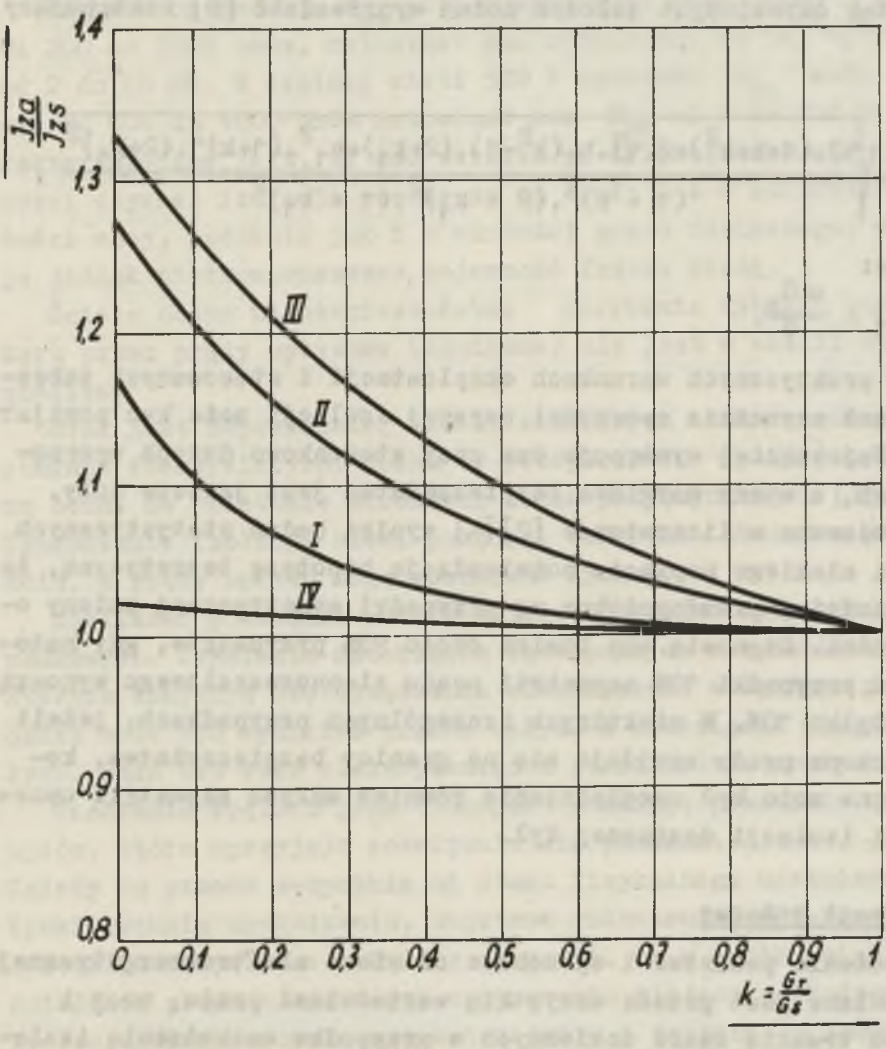
Z obliczeń wynika, że pomijany wzrost prądu wynikający z przyjęcia symetrii oporności czynnej wynosi teoretycznie 33%, wtedy gdy oporność izolacji jednej z faz względem ziemi równa się zeru (k = 0). Taki przypadek przy stosowaniu ciągłej kontroli izolacji nie jest możliwy. Widoczny jest również wpływ pojemności doziemnej. Krzywa 1 charakteryzuje sieć bezpojemnościową (skompensowaną). Przy zwiększaniu względnej przewodności b, początkowo asymetria prądowa wzrasta, a następnie maleje. Wynika stąd wniosek, że przy względnie dużej pojemności doziemnej jak również przy względnie dużej oporności czynnej, asymetria wartości oporności izolacji poszczególnych faz nie ma zasadniczego wpływu na zmianę wartości prądu doziemnego.

Warunki zbliżone do rzeczywistych można odwzorować również przy innych założeniach, na przykład

$$(G_R + G_Z) + G_S + G_T = 3\,G = \text{const}$$

$$k = \frac{G_T}{G_S} = \text{var}$$

$$k_1 = \frac{2\,(G_R + G_Z)}{G_S + G_T} = \text{var}.$$



Rys. 8. Wpływ asymetrii przewodności doziemnych na wartość prądu zwarcia doziemnego I_z

I : b = 0, b = 6

II : b = 0,5, b = 2,5

III : b = 1-2

IV : $b = \frac{3\ C_n}{G} = 50$

Dla tak określonych założeń można wyprowadzić [6] następujący wzór

$$\frac{I_{za}}{I_{zs}} = \sqrt{\frac{12.(1+k+k^2)+2.\sqrt{3}.b_1(k^2-1).(2+k_1)+b_1^2.(1+k)^2.(2+k_1)^2}{(1+k)^2.(2+k_1)^2.(1+b_1)^2}},$$

gdzie:

$$b_1 = \frac{\omega C_n}{G}.$$

W praktycznych warunkach eksploatacji i stosowanych zabezpieczeń asymetria oporności czynnej izolacji może być pomijalna. Najczęściej występuje ona przy stosunkowo dużych opornościach, a wtedy margines bezpieczeństwa jest jeszcze duży.

Podawane w literaturze [2][6] wyniki badań statystycznych sieci niskiego napięcia potwierdzają hipotezę teoretyczną, że najbardziej prawdopodobne są przypadki symetrycznej zmiany oporności. Stanowią one bowiem około 75% przypadków, gdy natomiast przypadki 10% asymetrii prądu ziemnozwarciowego wynoszą już tylko 10%. W niektórych szczególnych przypadkach, jeżeli obliczone prądy znajdują się na granicy bezpieczeństwa, konieczne może być uwzględnienie również wpływu asymetrii oporności izolacji doziemnej żył.

6. Uwagi końcowe

Zagrożenie pożarowe i wybuchowe od sieci elektroenergetycznej określane jest przede wszystkim wartościami prądu, mocy i czasu trwania zwarć doziemnych w przypadku uszkodzenia izolacji. Wyprowadzone zależności ogólne umożliwiają ocenę zagrożenia we wszystkich stosowanych sieciach górniczych prądu przemiennego. Moc zwarcia doziemnego wydzielona w miejscu uszkodzenia zależy od parametrów sieci oraz oporności doziemienia, która jest funkcją doziemnej pojemności i oporności izolacji sieci. Największa moc P_{zm} występuje dla określonej wartości oporności doziemienia $R_z = R_{zm}$, a wtedy napięcie fazy doziemionej U_z równe jest napięciu punktu gwiazdowego transformatora U_0.

Wartość oporności R_{zm} dla praktycznej sieci 6000 V wynosi od 200 do 2000 omów, natomiast moc wydzielona na tej oporności od 2 do 60 kW. W realnej sieci 500 V oporność R_{zm} może wynosić od 600 do 4000 omów natomiast moc P_{zm} od 2 do 100 W. Charakterystyczne jest, że moc wzrasta ze zwiększeniem się oporności czynnej izolacji począwszy od około 2 ÷ 4 kΩ/fazę. O wartości mocy, podobnie jak i o wartości prądu doziemnego, decyduje jednak nieskompensowana pojemność fazowa sieci.

Ścisła ocena niebezpieczeństwa powstania wybuchu bądź pożaru przez prądy upływowe (doziemne) nie jest w chwili obecnej możliwa.

Brak jest odpowiedniej ilości właściwych badań w różnych warunkach rzeczywistych. Można by przeprowadzać tylko przybliżoną ocenę na podstawie skromnych badań przyczynkowych [1], [5], [7]. Uszkodzenie izolacji sieci powoduje zwieranie obwodu z pojemnością, a prądy upływu mogą powodować wybuch.

Możliwość powstania pożaru zależy od wielu czynników przypadkowych. Zapalenie materiałów łatwopalnych w wyrobiskach, w których znajdują się urządzenia elektryczne, w ogólnym przypadku może być wynikiem prądów upływu i przeciążeń długotrwałych, bądź też łuku elektrycznego i zwarć krótkotrwałych.

Urabianie węgla i jego transport powodują powstanie osadów pyłów, które sprzyjają rozwijaniu się pożarów.
Zależy to przede wszystkim od stanu fizykalnego uszkodzenia (powierzchnia uszkodzenia, objętość chłodzenia, spiętrzenie i rozkład temperatur). Należy zauważyć, że w wyniku cieplnego działania prądu doziemnego, w otoczeniu miejsca uszkodzenia izolacja ulega stopniowemu zniszczeniu i zwarcie 1-fazowe przechodzi w 2-fazowe, a to zaś stwarza już całkiem wyraźne zagrożenie pożarowe,

Podsumowując powyższe wywody należy stwierdzić, że zabezpieczenia ziemnozwarciowe i kontrolujące stan izolacji mogą skutecznie zmniejszać prawdopodobieństwo wybuchów i pożarów kopalnianych. Odgrywa w tym rolę, tak ograniczenie wartości prądu, jak i czasu jego przepływu.

Również stosowanie żył ochronnych w kablach i przewodach oraz powłok przewodzących jest jak najbardziej celowe. Uzyska się przez to zwiększenie stopnia bezpieczeństwa pożarów i wybuchów - z uwagi na stosunkowo duże wartości prądów i mocy doziemnych konieczny jest rozkład energii cieplnej na większej powierzchni. Wszystkie osłony zewnętrzne kabli, przewodów i osprzętu muszą być niepalne.

W kopalniach niebezpiecznych pod względem wybuchowym oraz przy podwyższonym napięciu konieczne jest stosowanie kabli i przewodów z ekranami indywidualnymi na każdej żyle roboczej. Przy współpracy ich z urządzeniami ziemnozwarciowymi można wyeliminować iskrzenie oraz niedopuścić do powstawania groźnych zawsze wewnętrznych zwarć międzyprzewodowych.

LITERATURA

[1] Bihl C.: Le danger des défauts monophases dans les reseaux triphases d'electrifications du fond. Annales des Mines, 1958, nr 12.

[2] Gładilin Ł.W.: Issledowanije usłowij biezopasnosti rudicznych sietiej s izolirowannoj niejtraliu. Awtoreferat dissertacyj, MGI, 1955.

[3] Krasucki F.: Urządzenia bezstykowe w zastosowaniu do zabezpieczeń elektroenergetycznych sieci górniczych. Komunikat Nr 33, ZKMPW. "Śląsk", Katowice, 1963 r.

[4] Krasucki F.: Zabezpieczenie ziemnozwarciowe i kontrola ekranów z zastosowaniem wzmacniaczy magnetycznych. Wiadomości Górnicze, 1964 r., nr 9.

[5] Lejbow R.M., Ogłoblin D.N.: Tiechnika biezopasnosti w ugolnoj promyszlennosti (sbornik dokładow). Goseniergoizdat, 1963 r.

[6] Murzin Ju.M.: Issledowanije sostojanija izolacyj szachtnych kabielnych sietiej. Gornaja elektrotiechnika (sbornik dokładow). Moskwa, 1957 r.

[7] Strejch R.: Zur Frage der Sicherheit im elektrischen Betrieb Unter Tage. Glückauf. 1962, nr 98, z. 9.

[8] Szymik F.: Zagrożenie awaryjne sieci napowietrznej pracującej w warunkach zabrudzeniowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1958 r.