

Florian KRASUCKI

Henryk PUDEŁKO

POJEMNOŚCIOWY FILTR SKŁADOWEJ ZEROWEJ NAPIĘCIA
W KOPALNIANEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ 6 kV

Streszczenie. Analizowano przypadek doziemienia w sieci elektroenergetycznej z izolowanym punktem zerowym, w której zastosowano pojemnościowy filtr składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia. Uzasadniono celowość jego stosowania w miejsce dotychczas stosowanych filtrów indukcyjnych. Podane ogólne wskazówki doboru parametrów filtru oraz wyniki badań możliwości współpracy proponowanego filtru z zabezpieczeniami zerowo-mocowymi typu ZSG-6.

1. Wstęp

W kopalnianych wysokonapięciowych sieciach elektroenergetycznych stosowane są indukcyjne filtry składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia - do współpracy z kierunkowymi zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi [2, 4]. W stanach nieustalonych, podczas czynności łączeniowych, zwarć łukowych lub wyłączenia doziemień, indukcyjne filtry z uziemionym punktem gwiazdowym uzwojeń pierwotnych mogą być źródłem pasożytniczych napięć o częstotliwościach subharmonicznych lub krotnościach częstotliwości podstawowej [5]. Towarzyszący temu zjawisku wzrost napięć fazowych może doprowadzić do termicznego uszkodzenia przekładników napięciowych; może zagrażać także izolacji doziemnej sieci. Napięcia te są również przyczyną nieselektywnego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

W opracowaniu przeprowadzono analizę pracy pojemnościowego filtru napięcia (proporcjonalnego do składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia) w układzie elektroenergetycznym z izolowanym punktem gwiazdowym. Filtr taki nie powinien powodować wzbudzenia napięć pasożytniczych. Umożliwi to zwiększenie zakresu stosowania i poprawności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych.

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły możliwość współpracy filtru ze stosowanymi aktualnie w kopalniach kierunkowymi zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi.

2. Napięcia składowych zerowych przy doziemieniu w sieci kopalnianej z filtrem pojemnościowym

Układ elektryczny (ideowy) pojemnościowego filtra składowych zerowych napięcia, przewidzianego do współpracy z zabezpieczeniami zero-mocowymi, przedstawiono na rys. 1. Tworzy go układ gwiazdowy pojemności C_F przyłączonych do faz sieci elektroenergetycznej. Punkt gwiazdowy filtra połączony jest z ziemią przez pojemność "dopasowującą" C_{OF} , do której przyłączony jest równolegle indukcyjny przekładnik napięciowy T_n .

Rozważmy doziemienie w sieci kopalnianej, z izolowanym punktem gwiazdowym, w której zastosowano filtr pojemnościowy. Uproszczony schemat ideowy takiej sieci wysokonapięciowej, dla ogólnego przypadku oporowego doziemienia jednej z faz, można przedstawić w sposób podany na rys. 2 [3].

Oznaczając odpowiednio poszczególne prądy, napięcia i admitancje jako wielkości zespolone oraz stosując prawo Kirchhoffa dla węzła "Z" wyprowadzamy zależność dla składowej zerowej napięcia U_0 .

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T + \underline{I}_Z + \underline{I}_{OF} = 0 \quad (1)$$

$$(\underline{U}_{fR} - \underline{U}_0) \underline{Y}_R + (\underline{U}_{fS} - \underline{U}_0) \underline{Y}_S + (\underline{U}_{fT} - \underline{U}_0) \underline{Y}_T + (\underline{U}_{fR} - \underline{U}_0) \underline{Y}_Z + \underline{U}_{OF} \underline{Y}_{OF} = 0 \quad (2)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_{fR}(\underline{Y}_R + \underline{Y}_Z) + \underline{U}_{fS} \underline{Y}_S + \underline{U}_{fT} \underline{Y}_T + \underline{U}_{OF} \underline{Y}_{OF}}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T + \underline{Y}_Z} \quad (3)$$

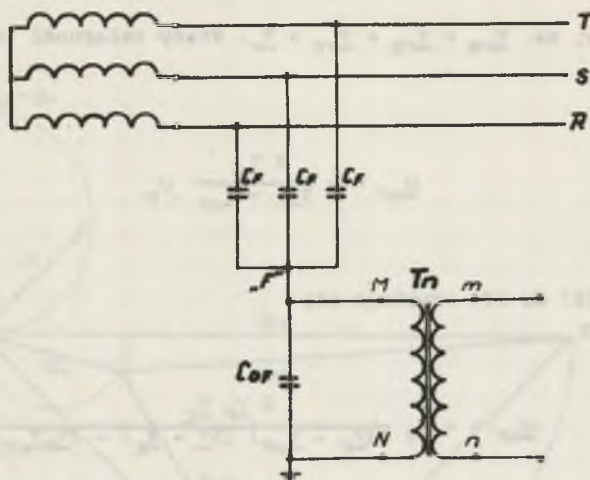
Zakładając [1, 3] symetrię źródła zasilania oraz $\underline{U}_{fR} = \underline{U}_f$, a następnie symetrię admitancji fazowych ($\underline{Y}_R = \underline{Y}_S = \underline{Y}_T = \underline{Y}$), otrzymuje się:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_f \underline{Y}_R + a^2 \underline{U}_f \underline{Y}_S + a \underline{U}_f \underline{Y}_T + \underline{U}_f \underline{Y}_Z + \underline{U}_{OF} \underline{Y}_{OF}}{\underline{Y}_R + \underline{Y}_S + \underline{Y}_T + \underline{Y}_Z} \quad (4)$$

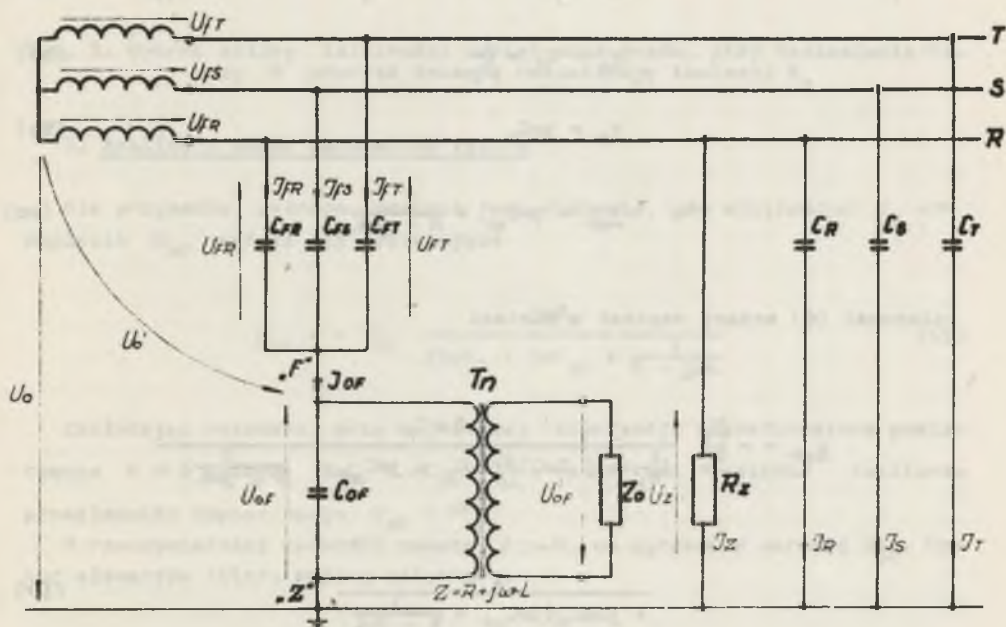
$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_f \underline{Y}_Z + \underline{U}_{OF} \underline{Y}_{OF}}{3 \underline{Y} + \underline{Y}_Z} \quad (5)$$

Postępując podobnie dla punktu gwiazdowego filtra ("F") otrzymamy

$$(\underline{U}_f - \underline{U}_{OF} - \underline{U}_0) \underline{Y}_{FR} + (a^2 \underline{U}_f - \underline{U}_{OF} - \underline{U}_0) \underline{Y}_{FS} + (a \underline{U}_f - \underline{U}_{OF} - \underline{U}_0) \underline{Y}_{FT} = \underline{U}_{OF} \underline{Y}_{OF} \quad (6)$$



Rys. 1. Pojemnościowy filtr składowej zerowej napięcia
 C_F - pojemność filtra w układzie gwiazdy, C_{oF} - pojemność uziemiająca punkt gwiazdy filtra, T_n - przekładnik napięciowy



Rys. 2. Przypadek zwarcia fazy z ziemią przy stosowaniu pojemnościowego filtra składowej zerowej napięcia

Przyjmujemy, że $Y_{FR} = Y_{FS} = Y_{FT} = Y_F$. Wtedy zależność (6) możemy napisać w postaci:

$$\underline{U}_{oF} = - \frac{3 Y_F}{3 Y_F + Y_{oF}} U_o \quad (7)$$

Podstawiając (5) do (7) uzyskuje się

$$\underline{U}_{oF} = - \underline{U}_f \frac{3 Y_F Y_Z}{(3 Y_F + Y_{oF}) (3 Y_F + Y_Z) + 3 Y_F Y_{oF}} \quad (9)$$

Uwzględniając (rys. 2), że

$$\underline{Y} = j\omega C \quad (9a)$$

$$\underline{Y}_Z = G_Z = \frac{1}{R_Z} \quad (9b)$$

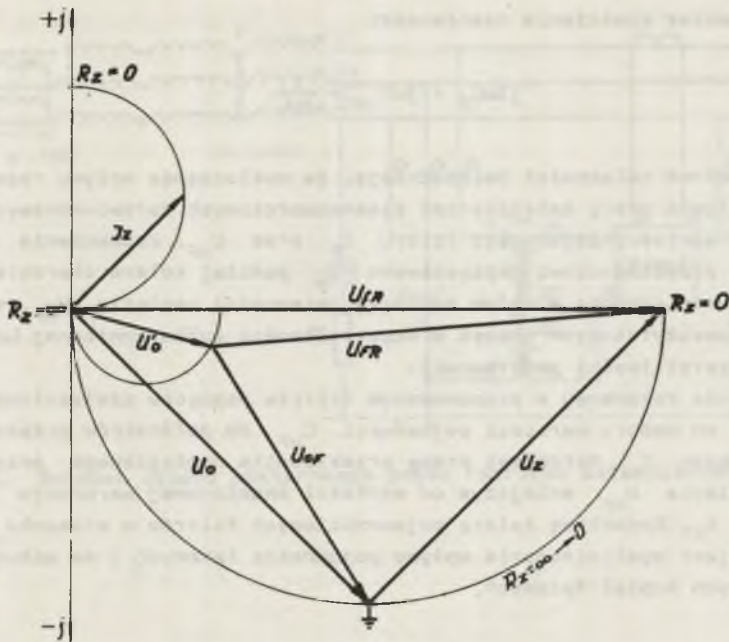
$$\underline{Y}_F = j\omega C_F \quad (9c)$$

$$\underline{Y}_{oF} = j\omega C_{oF} + \frac{1}{R + j\omega L} \quad (9d)$$

zależność (8) możemy napisać w postaci

$$\underline{U}_{oF} = - \frac{\underline{U}_f}{R_Z} \frac{j 3 \omega C_F}{\left(\frac{1}{R_Z} + j 3 \omega C\right) \left(j 3 \omega C_F + j \omega C_{oF} + \frac{1}{R + j \omega L}\right) + \frac{1}{j 3 \omega C_F \left(j \omega C_{oF} + \frac{1}{R + j \omega L}\right)}} \quad (10)$$

Wykres kołowy napięć, w ogólnym przypadku doziemienia oporowego fazy R w sieci z rys. 2, przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wykres kołowy, zależności napięć oraz prądu, przy doziemieniu fazy R przez zmienną rezystancję izolacji R_z

3. Analiza i dobór parametrów filtra

Dla przypadku pełnego zwarcia fazy z ziemią, gdy admitancja $Y_z = \infty$ napięcie U_{OF} wyraża się następująco:

$$\underline{U}_{OF} = -3\underline{U}_f \frac{j\omega C_F}{j3\omega C_F + j\omega C_{OF} + \frac{1}{R + j\omega L}} \quad (11)$$

Zakładając rezonans, przy wejściowej rezystancji transformatora pomiarowego $R = 0$ - czyli $3\omega C_F + \omega C_{OF} = \frac{1}{\omega L}$, to wartość napięcia zasilania przekładnika napięciowego $U_{OF} = \infty$.

W rzeczywistości zachodzi zawsze $R > 0$, co ogranicza wartość U_{OF} . Dobór elementów filtra według zależności

$$3\omega C_F + \omega C_{OF} > \frac{1}{\omega L} \quad (12a)$$

zapewnia również spełnienie nierówności

$$j3\omega C_F + j\omega C_{OF} > \frac{1}{j\omega L} \quad (12b)$$

Przedstawione zależności uwidoczniają, że wykluczenie wpływu rezonansu na nieselektywną pracę zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych wymaga doboru wartości pojemności filtra C_F oraz C_{OF} . Zapewnienie natomiast pracy przekładnikowi napięciowemu T_n poniżej kolana charakterystyki magnesowania rdzenia w całym zakresie zmienności napięcia U_{OF} , wyklucza źródło pasożytniczych napięć o częstotliwości subharmonicznej lub krotnościach częstotliwości podstawowej.

Wykluczenie rezonansu w proponowanym filtrze napięcia uzależnione jest praktycznie od doboru wartości pojemności C_{OF} do parametrów przekładnika napięciowego T_n . Natomiast pracę przekładnika napięciowego przy napięciu zasilania U_{OF} mniejszym od wartości znamionowej warunkuje dobór pojemności C_F . Dodatkową zaletą pojemnościowych filtrów w stosunku do indukcyjnych jest wyeliminowanie wpływu pojemności fazowych C na wzbudzenie pasożytniczych napięć fazowych.

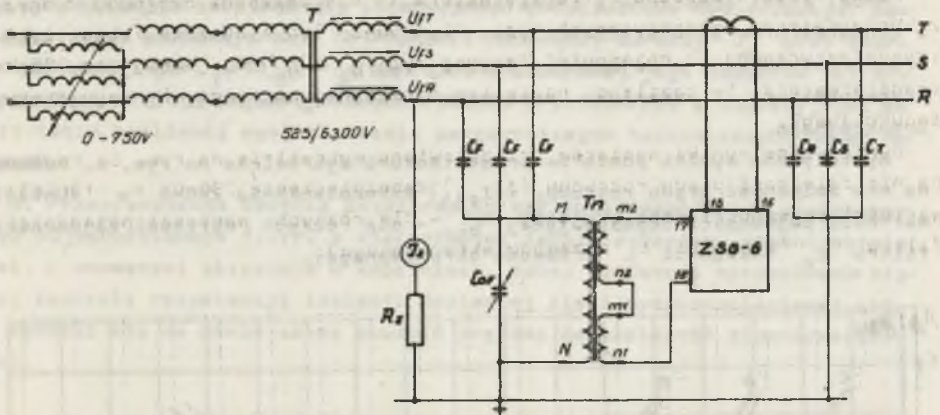
4. Badania laboratoryjne

Możliwość praktycznej realizacji współpracy filtra pojemnościowego z produkowanymi i stosowanymi w kopalniach zabezpieczeniami zerowo-mocowymi badano na przykładzie współpracy z zabezpieczeniem typu ZSG-6. Schemat ideowy układu pomiarowego podano na rys. 4.

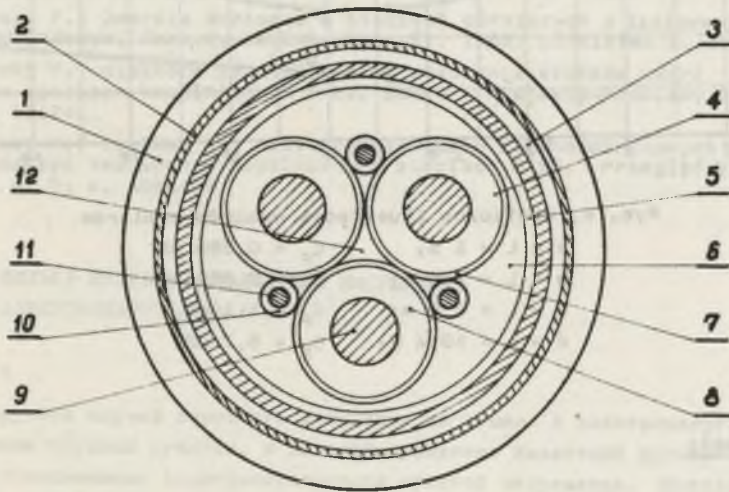
Filtr napięciowy (pojemnościowy) zrealizowano za pomocą odcinka ekranowanego przewodu trójżyłowego 6 kV (rys. 5) - z ekranami indywidualnymi na izolowanych żyłach roboczych oraz ekranem ogólnym na ośrodku przewodu. Pojemności między przewodzącymi żyłami a połączonymi galwanicznie ekranami indywidualnymi tworzą gwiazdowy układ pojemności C_F . Uziemiony ekran ogólny, oddzielony powłoką izolacyjną od ekranów indywidualnych, wykorzystano do uzyskania pojemności uziemiającej filtra C_{OF} .

Jako transformator T_n , umożliwiający wprowadzenie sygnału napięciowego, proporcjonalnego do sumy składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia, do wejścia przekładnika ZSG-6 zastosowano typowy przekładnik UZ6 - 1T z dwoma uzwojeniami wtórnymi $(\frac{6000}{\sqrt{3}}, \frac{100}{\sqrt{3}}, \frac{100}{3})$. Dla zwiększenia sygnału napięciowego połączono w szereg oba wtórne uzwojenia przekładnika.

Sygnał prądowy, proporcjonalny do sumy składowych symetrycznych kolejności zerowej prądu $I_z = 3I_{(0)}$, doprowadzano z typowego filtra IO1S (przekładnika Ferrantiego), stosowanego w zabezpieczeniach ZSG-6. Badania przeprowadzono przy nastawieniu największej znamionowej czułości zabezpieczenia ($3I_{(0)} = 0,2 \text{ A}$).



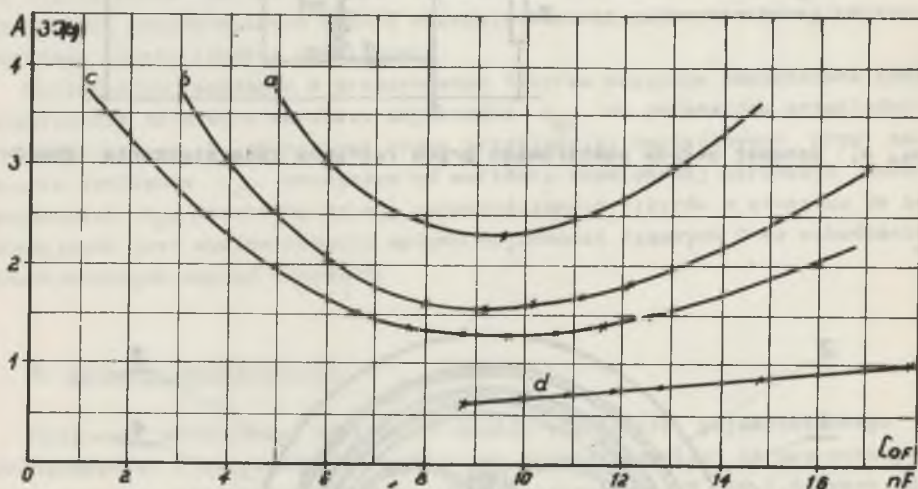
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego prądu rozruchu zabezpieczenia ZSG-6



Rys. 5. Zasada budowy wykorzystanego w badaniach przewodu ekranowanego
 1 - osłona antykorozyjna, 2 - oplot stalowy, 3 - powłoka izolacyjna, 4 - ekran ogólny, 5 - powłoka izolacyjna, 6 - powłoka wypełniająca, 7 - ekrany indywidualne, 8 - izolacja żył roboczych, 9 - żyła robocza, 10 - izolacja żył pomocniczych, 11 - żyła pomocnicza, 12 - rdzeń

Model sieci utworzono z transformatora T o przekładni 525/6000 V oraz z kondensatorów energetycznych typu C6,3/50-2 lub z odcinka kabla elektroenergetycznego, o pojemności fazowej żył $C_R \approx C_S \approx C_T$. Uzwojenie 525 V transformatora T zasilano napięciem o zmiennej wartości z regulatora indukcyjnego.

Syntetyczne wyniki pomiarów przedstawiono wykreślenie na rys. 6. Podano na nim zależność prądu rozruchu ($3I_{(0)}$) zabezpieczenia ZSG-6 w funkcji wartości pojemności dopasowującej C_{OF} - dla różnych wartości pojemności filtra C_F (długości L przewodu ekranowanego).



Rys. 6. Graficzna ilustracja wyników pomiarów

a - L = 1 m;	$C_F = 0,550$ nF
b - L = 1,5 m;	$C_F = 0,860$ nF
c - L = 2,0 m;	$C_F = 1,1$ nF
d - L = 10,4 m;	$C_F = 5,7$ nF

5. Wnioski

1. Proponowany pojemnościowy filtr napięcia proporcjonalnego do składowej symetrycznej kolejności zerowej umożliwia stosowanie układu elektroenergetycznego nie połączonego galwanicznie z ziemię. Właściwość ta pozwala na wprowadzenie samoczynnej ciągłej kontroli, zarówno symetrycznych jak i asymetrycznych, zmian rezystancji izolacji sieci względem ziemi pod napięciem oraz po wyłączeniu napięcia.

2. Odpowiedni dobór parametrów elementów składowych pojemnościowego filtra eliminuje możliwość wystąpienia rezonansu i jego wpływu na nieselektywność pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych.

3. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że również w wypadku nie obciążonej strony wtórnej indukcyjnego przekładnika napięciowego, napięcie U_{OF} , proporcjonalne do napięcia składowej zerowej U_0 przy zwarciu z ziemią, jest mniejsze od wartości znamionowej jego napięcia strony pierwotnej. Zaletą pojemnościowych filtrów w porównaniu z indukcyjnymi jest więc także możliwość wyeliminowania pasożytniczych harmoniczných napięć fazowych.

4. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość współpracy proponowanego pojemnościowego filtra z kierunkowymi zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi, stosowanymi aktualnie w kopalniach. Wobec tendencji wprowadzenia ciągłej kontroli rezystancji izolacji doziemnej sieci wysokonapięciowej, można zgodzić się na zmniejszoną czułość prądową zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

LITERATURA

- [1] Bronner I.: Incidences d'un défaut d'isolment dans un réseau a neutre isole sur un transformateur de tension du type triphase a flux libre. Revue de l'industrie minerale 1970, nr 7; s. 619÷627.
- [2] Krasucki F., Boron W.: Kierunkowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe typu TNI-HT. BBPPW, Projekty-Problemy 1964, nr 4; s. 14÷19.
- [3] Krasucki F.: Zwarcie doziemne w sieciach górniczych z izolowanym punktem gwiazdowym. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. 1968; Górnictwo z. 28.
- [4] Krasucki F.: Niektóre zagadnienia ograniczania skutków zwarc doziemnych w sieciach kopalnianych 6 kV. BBPPW - Projekty-Problemy 1969, nr 3; s. 19÷24.
- [5] Krasucki F., Cholewa A.: Wpływ zabezpieczeń ziemnozwarciowych na przebieg napięć fazowych w kopalnianych sieciach 6 kV. Przegląd Górniczy 1974, nr 9; s. 489÷494.

ЁМКОСТНЫЙ ФИЛЬТР НУЛЕВОГО СЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГОСЕТЯХ 6 КВ

Резюме

Анализируется случай короткого замыкания на землю в электроэнергосети с изолированным нулевым пунктом, в которой применено ёмкостный фильтр симметрических составляющих последовательности нулевой напряжения. Мотивируется целесообразность её применения вместо до сих пор применяемых индуктивных фильтров. Даются общие указания подбора параметров фильтра, а также результаты исследований возможности совместной работы предлагаемого фильтра с нулевой защитой мощности типа ЗСГ-6.

A ZERO VOLTAGE COMPONENT CAPACITANCE FILTER IN A 6 kV MINE NETWORK

Summary

A ground fault case has been analysed with an insulated zero point and a capacitance harmonics filter. Its superiority over ordinary induction filters has been proved and parameters provided, the possibility of such filter linkage with ZSG-6 fuses shown.

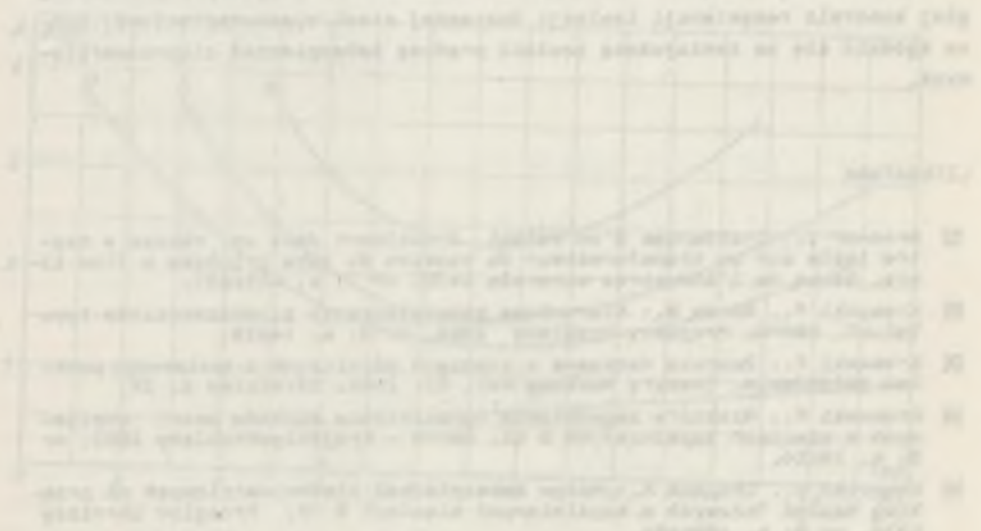


Fig. 1. Characteristics of the filter.

$$\begin{aligned}
 R &= L \times 10^{-3} \quad \omega = 314 \text{ rad/s} \\
 X_L &= \omega L = 3.14 \text{ ohms} \\
 X_C &= 1 / (\omega C) = 100 \text{ ohms} \\
 Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2 + X_C^2} = 100.01 \text{ ohms}
 \end{aligned}$$

REFERENCES

1. ...
 2. ...
 3. ...
 4. ...
 5. ...