

MARIAN SAUCZEK

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

UKŁAD CZUŁEGO ZABEZPIECZENIA ZIEMNOZWARCIOWEGO O  
WŁAŚCIWOŚCIACH KIERUNKOWYCH

Streszczenie. Omówiono wady dotychczas stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-prądowych. Podano zasady działania i budowy nowego układu zabezpieczenia ziemnozwarciowego zerowo-prądowego o wprowadzonej do obwodu dodatkowej SEM pochodzącej od składowej zerowej napięcia. Określono właściwości, dane techniczne oraz sposoby regulacji zaproponowanego układu. Przedstawiono wyniki prób laboratoryjnych przeprowadzonych na modelu omawianego zabezpieczenia.

1. Wstęp

Zabezpieczenia ziemnozwarciowe krajowych sieci kablowych średnich napięć w zakładach przemysłowych są rozwiązywane zazwyczaj jako zerowo-prądowe. Układy tego typu, składające się z filtru składowej zerowej prądu oraz elektromagnetycznego przełącznika prądowego, w szeregu przypadkach nie gwarantują jednakże należytej czułości i wybiórczości działania.

Wynika to z tego, że prąd rozruchowy zabezpieczenia zerowo-prądowego zainstalowanego na danym odcinku otwartym sieci jest scharakteryzowany jako pewien dopuszczalny przedział nastawień [4], [6], określony przez niżej przedstawione warunki czułości i wybiórczości:

$$k_n J_{cl} \leq J_r \leq \frac{J_{zc} - J_{cl}}{k_c} \quad (1)$$

gdzie:

- $J_r$  - prąd rozruchowy zabezpieczenia zerowo-prądowego (sprowadzony na stronę pierwotną filtru),
- $J_{zc}$  - prąd ziemnozwarciowy odpowiadający pojemności całej sieci,
- $J_{c1}$  - prąd ziemnozwarciowy odpowiadający pojemności zabezpieczanego odcinka sieci,
- $k_n$  - współczynnik niezawodności gwarantujący odstrojenie od stanów nieustalonych, wynoszący dla zabezpieczeń działających bezzwłocznie  $k_n = 4 - 5$ ,
- $k_c$  - współczynnik czułości uwzględniający tłumienie prądu zwarciovego przez rezystancję przejścia dobierany zazwyczaj jako  $k_c = 2$ .

Z powyższego wzoru wynika, że warunek czułości sprowadza się do tego, aby przekaźnik reagował na sumę prądów przewodowych ( $J_{zc} - J_{c1}$ ) płynących w linii w przypadku zwarcia w zabezpieczanym odcinku sieci. Natomiast spełnienie warunku wybiórczości wymaga, aby przekaźnik nie reagował na sumę prądów przewodowych ( $J_{c1}$ ), pochodzących od pojemności zabezpieczanego odcinka sieci i płynących w linii w przypadku zwarcia z ziemią poza tym odcinkiem sieci.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że równoczesne spełnienie obu warunków w niektórych przypadkach jest niemożliwe. Praktycznie biorąc w przypadku, gdy prąd ziemnozwarciowy odpowiadający całej sieci ( $J_{zc}$ ) nie jest w przybliżeniu 10-krotnie większy od prądu ziemnozwarciowego zabezpieczonego odcinka sieci ( $J_{c1}$ ), uzyskanie wybiórczej pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych zero-prądowych jest niemożliwe [6].

Opisane trudności można opanować, zastępując zabezpieczenia zerowo-prądowe układami droższymi, o działaniu opartym na pomiarze kierunku mocy zerowej.

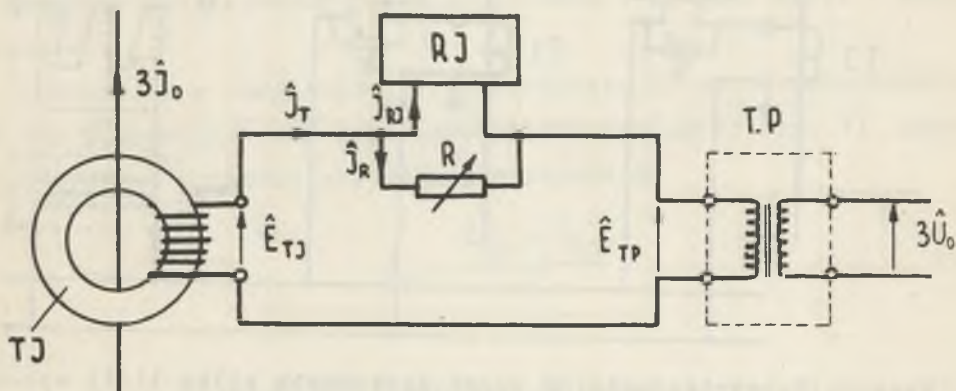
Niemożliwe jest również zastosowanie produkowanych w kraju układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-prądowych, w przypadkach gdy wartość wyrażenia  $\frac{J_{zc}-J_{cl}}{k_c}$  we wzorze (1) jest mniejsza od 2 A, ponieważ czułość tych układów nie przekracza ww wartości.

Jak wynika z wyżej przedstawionych wywodów istnieje w szeregu przypadkach zapotrzebowanie na proste zabezpieczenie ziemnozwarciowe o wysokiej czułości i wybiórczości działania zagwarantowanej przez kierunkowe działanie układu. Czynnione są więc próby zbudowania takiego zabezpieczenia przez wprowadzenie do układu zabezpieczenia zerowo-prądowego dodatkowej SEM, pochodzącej od składowej zerowej napięcia [2], [3], [5]. Jedno z zabezpieczeń tego typu zbudowane w głównej mierze z typowych elementów krajowych przedstawione zostanie poniżej.

## 2. Opis układu

Schemat ideowy układu zabezpieczenia przedstawiono na rys. 1.

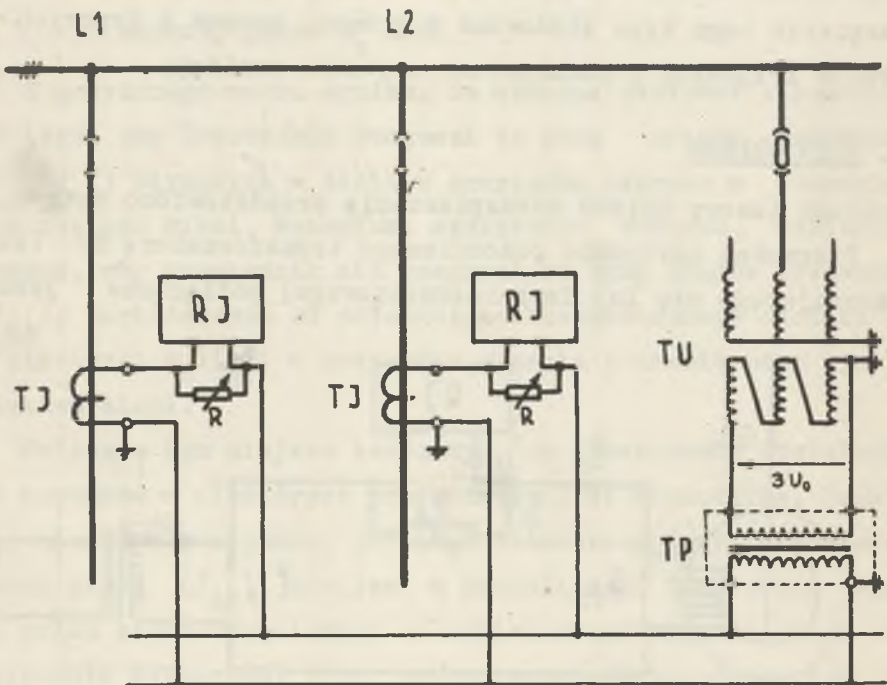
Pierwotne uzwojenie pomocniczego transformatora TP (szybkonasycającego się lub ferrorrezonansowego) podłączone jest do



Rys. 1. Schemat ideowy układu zabezpieczenia ziemnozwarciowego zerowo-prądowego z dodatkową SEM pochodzącą od składowej zerowej napięcia

filtru składowej zerowej napięcia. Do wtórnego uzwojenia tego transformatora podłączone są szeregowo: wtórne uzwojenie przekładnika składowej zerowej prądu TJ oraz uzwojenie przekaźnika elektromagnetycznego RJ. Równolegle do uzwojenia przekaźnika RJ podłączono regulowaną rezystancję R. Zadaniem tej rezystancji jest dobór odpowiedniej wartości prądu przepływającego przez przekaźnik RJ.

W analogiczny sposób do transformatora pomocniczego TP podłączyć można przekładniki i przekaźniki pozostałych linii odchodzących od szyn zbiorczych rozdzielni co przedstawione zostało na rysunku 2.



Rys. 2. Zabezpieczenie od zwarć doziemnych kilku linii wykonane za pomocą układu z rys. 1

### 3. Zasada działania układu

W czasie normalnej pracy sieci wartości napięć indukowanych we wtórnym uzwojeniu przekładnika składowej zerowej prądu TJ oraz we wtórnym uzwojeniu transformatora pomocniczego TP są bliskie zeru wobec czego przez uzwojenie przekaźnika RJ prąd nie płynie.

Przy zwarciu doziemnym na jednej z linii kablowych na wyjściu filtra TU pojawi się napięcie składowej zerowej  $3U_0$ , które powoduje indukowanie we wtórnym uzwojeniu transformatora TP siły elektromotorycznej  $E_{TP}$ .

Pod wpływem płynącego w linii prądu doziemnego indukuje się również siła elektromotoryczna  $E_{TJ}$  w uzwojeniu przekładnika składowej zerowej prądu.

Kierunek indukowanej SEM  $E_{TJ}$  jest zależny od położenia miejsca zwarcia doziemnego w sieci i będzie jednakowy w przekładnikach wszystkich linii kablowych za wyjątkiem linii, w której zwarcie wystąpiło. W linii tej będzie płynął prąd ziemnozwarciowy w kierunku do szyn stacji zasilającej, stanowiący sumę prądów wszystkich równolegle połączonych linii [1].

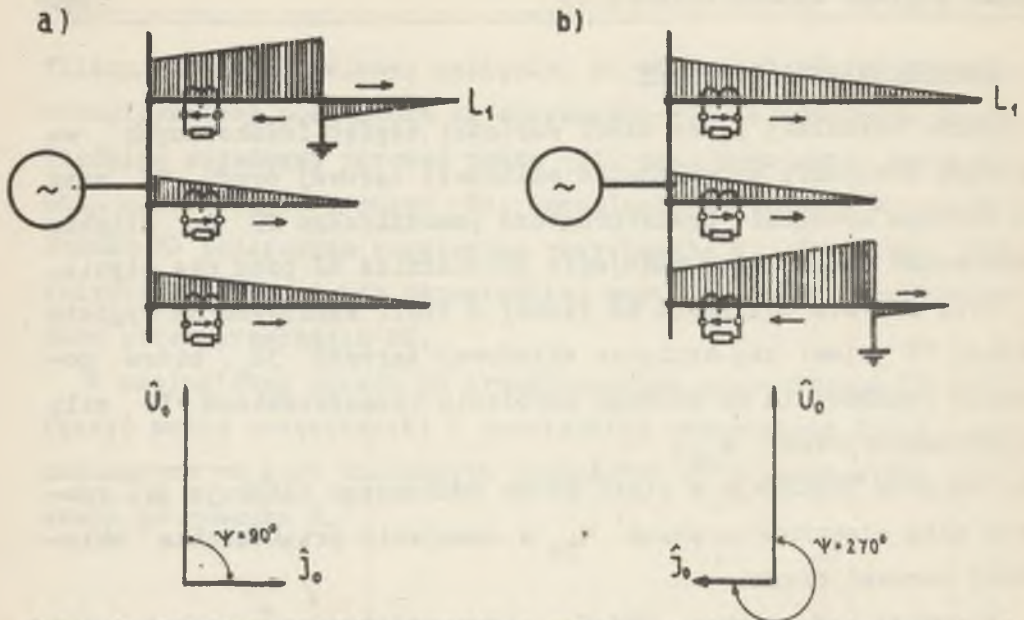
Zagadnienie to zilustrowane zostało na rysunku 3, przedstawiającym rozływ prądów zwarcia z ziemią w prostej sieci elektrycznej.

Indukowane w uzwojeniach transformatora TP oraz przekładnika TJ SEM spowodują w obwodzie zabezpieczenia (patrz rys. 1) przepływ prądu o wartości określonej wyrażeniem:

$$\hat{J}_T = \frac{\hat{E}_{TP} - \hat{E}_{TJ}}{\hat{Z}} \quad (2)$$

gdzie:

$\hat{Z}$  - całkowita impedancja obwodu uzależniona od impedancji: TP, TJ, RJ oraz rezystancji R.



Rys. 3. Rozpływ prądów zwarcia z ziemią w sieci elektrycznej i wykresy wskazowe prądów i napięć

a - przy zwarciu z ziemią linii zabezpieczanej, b - przy zwarciu z ziemią innej linii. Wykresy wskazowe sporządzono w obu przypadkach dla linii zabezpieczanej  $L_1$

Prąd  $J_T$  można rozpatrywać również jako sumę geometryczną prądów (rys. 4):

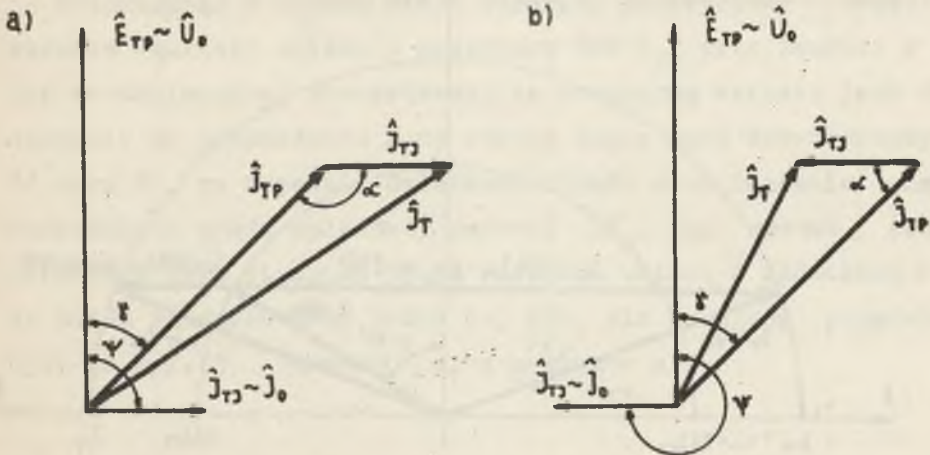
$$\hat{J}_T = \hat{J}_{TP} + \hat{J}_{TJ} \quad (3)$$

gdzie:

$$\hat{J}_{TP} = \frac{\hat{E}_{TP}}{\hat{Z}} - \text{składowa prądu } J_T \text{ pochodząca od SEM } E_{TP},$$

$$\hat{J}_{TJ} = \frac{\hat{E}_{TJ}}{\hat{Z}} - \text{składowa prądu } J_T \text{ pochodząca od SEM } E_{TJ}.$$

Wartość prądu  $J_T$  i proporcjonalnego do niego prądu w uzwojeniu przekładnika  $J_{RJ}$  jest uzależniona od wartości kąta  $\alpha$ , który z kolei zależy od wartości kąta  $\psi$ , tj. kąta przesunięcia fazowego między prądem  $J_{TJ}$  a SEM  $E_{TP}$ . Wartość kąta  $\psi$  zależy od wartości składowej czynnej prądu doziemnego.



Rys. 4. Wykresy wskazowe prądów i napięć układu zabezpieczenia z rys. 1

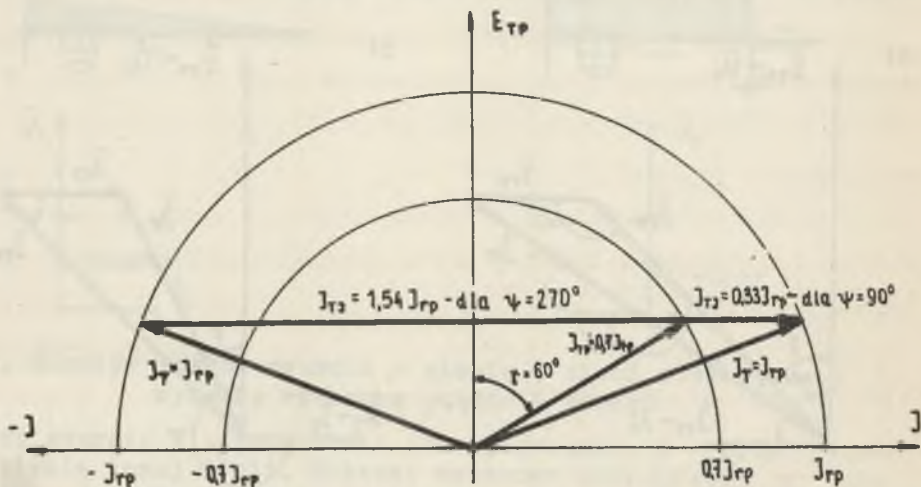
a - przy zwarciu z ziemią linii zabezpieczonej, b - przy zwarciu z ziemią innej linii

Jeśli zwarcie doziemne wystąpi na zabezpieczanym odcinku sieci kablowej to kąt  $\psi$  zawarty jest w granicach  $0 < \psi < 90^\circ$ , kąt  $\alpha$  jest wtedy zawsze większy od  $90^\circ$  i wobec tego prąd  $J_T > J_{TP}$  (rys. 4a).

Jeśli natomiast zwarcie doziemne wystąpi poza strefą zabezpieczaną to kierunek prądu  $J_{TJ}$  w uzwojeniu przekładnika TJ ulegnie zmianie o  $180^\circ$  i wtedy kąt  $\psi$  jest zwarty w granicach  $180^\circ < \psi < 270^\circ$ , kąt  $\alpha$  jest mniejszy od  $90^\circ$  a prąd  $J_T < J_{TP}$  (rys. 4b).

Zakładając kąt  $\psi = 90^\circ$  (zwarcie w strefie zabezpieczanej), kąt  $\gamma$  (zależny od parametrów obwodu) równy  $60^\circ$  oraz

prąd  $J_{TP}$  o wartości odpowiadającej przepływowi przez przełącznik prądu  $J_{RJ} = 0,7 J_{rp}$  (przy czym  $J_{rp}$  - oznacza prąd rozruchu przełącznika), nie trudno stwierdzić (rys. 5), że wartość prądu  $J_{TJ}$  konieczna do rozruchu przełącznika wynosi w tych warunkach  $0,33 J_{rp}$ .



Rys. 5. Wykres obrazujący wyniki zastosowania układu z rys. 1. Dla uproszczenia założono  $R = \infty$  wobec czego  $J_T = J_{RJ}$

Zakładając z kolei kąt  $\psi = 270^\circ$  (zwarcie poza strefą zabezpieczoną) oraz pozostałe wartości jak poprzednio, można stwierdzić, że wartość prądu  $J_{TJ}$ , konieczna do rozruchu przełącznika, wynosi w tym przypadku  $1,54 J_{rp}$ .

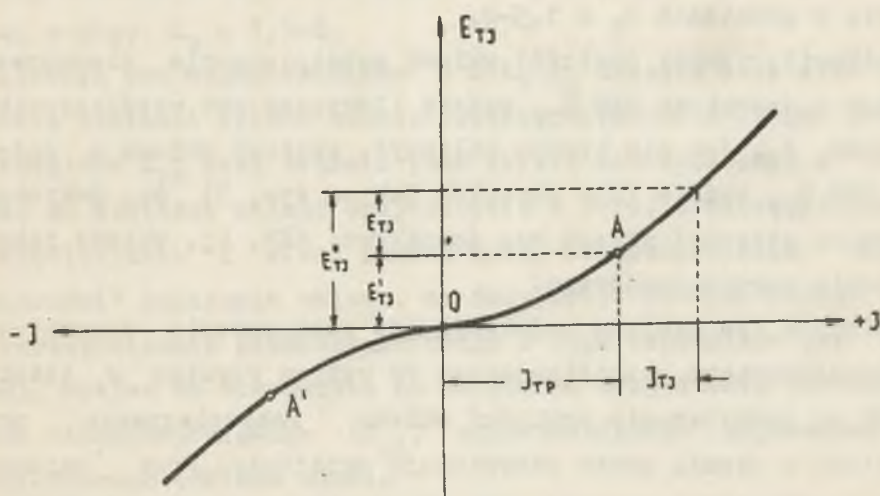
Wartość prądu  $J_{TP}$  odpowiadającą przepływowi przez uzwojenie przełącznika prądu  $J_{RJ} = 0,7 J_{rp}$  ustalono, mając na uwadze współczynnik powrotu wynoszący dla przełączników elektromagnetycznych 0,8-0,85. Ma to na celu zapewnienie powrotu przełącznika po jego przypadkowym zadziałaniu.

Z przytoczonych dotychczas rozważań wynika, że wprowadzenie do obwodu omawianego zabezpieczenia dodatkowej SEM  $E_{TP}$ , pochodzącej od składowej zerowej napięcia, powoduje wzrost lub



obniżenie czułości tego układu w stosunku do układu bez dodatkowej SEM  $E_{TP}$ . Ponieważ wzrost czułości następuje w przypadku powstania zwarcia w strefie zabezpieczonej a obniżenie czułości w przypadku zwarcia poza strefą, układ posiada niejako właściwości kierunkowe, mające znaczny wpływ na wybiórczość działania zabezpieczenia ziemnozwarciowego.

Rozpatrując w sposób nieco bardziej szczegółowy zagadnienie wzrostu czułości układu z dodatkową SEM  $E_{TP}$  przy zwarcu w strefie zabezpieczanej stwierdzamy, że przyczyną wzrostu jest doprowadzenie do przekaznika mocy równej sumie mocy doprowadzonych z TJ oraz TP, co zapewnia działanie układu przy znacznie mniejszych wartościach prądu składowej zerowej  $3J_0$ . Ten wzrost czułości określony jako stosunek prądu rozruchu układu z dodatkową SEM  $E_{TP}$  do prądu rozruchu przy braku tej SEM, dla warunków przedstawionych na rys. 5 wynosi:  $c_1 = \frac{J_{rp}}{0,33 J_{rp}} = 3$ .



Rys. 6. Wykres ilustrujący zasadę wyników podmagnesowania prądem  $J_{TP}$  przekładnika TJ

Jak wynika z charakterystyki  $E_{TJ} = f(J)$ , podanej na rysunku 6 na wzrost czułości układu poważny wpływ ma również przepływ prądu  $J_{TP}$  przez uzwojenie przekładnika TJ. Spowoduje on wstępne podmagnesowanie rdzenia przekładnika TJ, wobec czego nastąpi przesunięcie punktu pracy przekładnika z początku układu do miejsca o znacznie większym nachyleniu charakterystyki magnesowania (punkt A na podanej charakterystyce) [4].

Przesunięcie punktu pracy przekładnika na bardziej stromą część charakterystyki spowoduje, że temu samemu prądowi  $J_{TJ}$  odpowiadać będzie teraz znacznie większa zmiana strumienia więc i większa SEM  $E_{TJ}$ , której z kolei odpowiada większy prąd płynący przez przekładnik.

Można przyjąć, że dla spotykanych w eksploatacji przekładników składowej zerowej prądu, wzrost czułości układu zabezpieczenia spowodowany niewielkim nawet podmagnesowaniem, będzie ważył się w granicach  $c_2 = 1,5-2$ .

Całkowity wzrost czułości układu zabezpieczenia ziemnozwarciowego z dodatkową SEM  $E_{TP}$  będzie iloczynem obu współczynników  $c_1$  oraz  $c_2$ . Jak nie trudno obliczyć, czułość układu z dodatkową SEM  $E_{TP}$  będzie (dla warunków jak na rys. 5) ok. 6-krotnie wyższa od czułości układu bez dodatkowej SEM, tj. układu zabezpieczenia zerowo-prądowego.

Należy w tym miejscu nadmienić, że zastosowanie pomocniczego transformatora stabilizującego TP wpływa również w istotny sposób na podwyższenie czułości układu zabezpieczenia przy zwarcia z ziemią przez rezystancje przejścia. Przy zmianach napięcia składowej zerowej  $3U_0$  w granicach od  $U_N$  do  $0,5 U_N$  napięcie po stronie wtórnej transformatora pomocniczego TP zmieni się tylko nieznacznie (o 5-10%). Oznacza to, że przy zmianie współczynnika pełni zwarcia od 1 do 0,5 prąd  $J_{TP}$  praktycznie się nie zmienia.