

E. LAWERA, M. MIKRUT, Z. PILCH
Katedra Elektroenergetyki
Politechniki Śląskiej

WPLYW NIEKTÓRYCH CZYNNIKÓW NA POPRAWNOŚĆ
DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH
ZEROWO-MOCOWYCH W SIECIACH SKOMPENSOWANYCH

S t r e s z c z e n i e

W niniejszym artykule przeanalizowano kształtowanie się pierwotnych wielkości elektrycznych decydujących o działaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych w napowietrznych sieciach kompensowanych przy zwarciach jednofazowych w zależności od warunków pracy układu sieciowego. Powyższą analizę przeprowadzono zarówno przy uwzględnieniu jak i pominięciu konduktancji sieci.

1. WSTĘP

W sieciach rozdzielczych krajowego systemu pracujących z punktem zerowym kompensowanym zabezpieczenia od skutków zwarcć doziemnych realizowane są w oparciu o układy zerowo-mocowe. Z praktyki eksploatacyjnej wynika, że powyższe układy zabezpieczeń częstokroć działają niewybiórczo, a więc nie spełniają podstawowego warunku jaki stawia się zabezpieczeniom elektroenergetycznym. Zabezpieczenia ziemnozwarciowe zerowo-mocowe reagują na wartość mocy czynnej kolejności zerowej, czyli na iloczyn doprowadzonych do przekładników składowych symetrycznych zerowych prądu, napięcia i cosinusa kąta zawartego między nimi. Prądy i napięcia podawane są do przekładnika poprzez układy filtrów charakteryzujące się pewnymi uchybami, które mogą być szczególnie duże dla filtrów prądowych. Wielkości pierwotne prądów, napięć i kątów przesunięcia zależą od warunków pracy sieci i jej parametrów.

W niniejszym artykule omówiono wpływ na kształtowanie się pierwotnych wielkości elektrycznych doprowadzanych do zabezpieczeń ziemnozwarciowych następujących czynników:

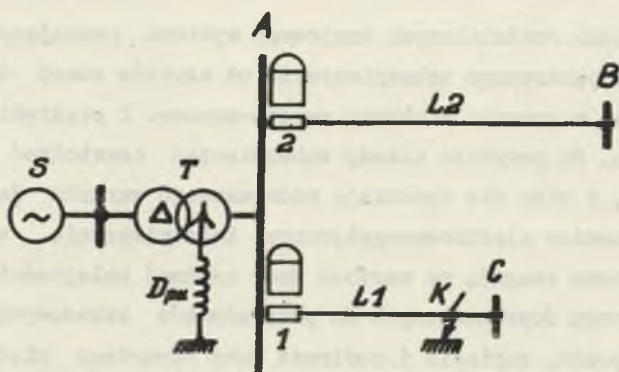
- lokalizacji miejsca zwarcia
- stopnia rozstrojenia kompensacji
- wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia.

Wpływ podanych czynników przeanalizowano dla sieci z uwzględnieniem i pominięciem jej konduktancji. Otrzymane wyniki obliczeń zastosowano do analizy warunków pracy wybranych układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych pracujących w sieciach krajowych.

2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO UKŁADU SIECIOWEGO

2.1. Schemat układu sieciowego

Analizę wpływu niektórych czynników związanych ze strukturą i warunkami pracy sieci na działanie zabezpieczeń zerowo-mocowych przeprowadzono dla układu, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu sieci rozdzielczej pracującej z punktem zerowym kompensowanym

Sieć rozdzielcza, promieniowa pracuje z punktem zerowym kompensowanym, za pomocą cewki kompensacyjnej D_{pu} . Ze stacji transformatorowo-rozdzielczej odchodzą linie promieniowe, których całkowita długość wynosi $\sum L$.

Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 1

$$\sum L = L_1 + L_2 \quad (1)$$

przy czym:

$L_1 = L_{AK}$ - długość linii wychodzącej ze stacji A do miejsca zwarcia doziemnego K

$L_2 = L_{2_1} + L_{2_2} + \dots + L_{2_n}$ - całkowita długość pozostałych linii "zdrowych" wychodzących ze stacji A.

W stacji A w punktach 1, 2 zainstalowane są zabezpieczenia ziemnozwarciowe zerowo-mocowe, chroniące sieć rozdzielczą $\sum L$ od skutków zwarc doziemnych.

2.2. Schemat zastępczy układu i podstawowe zależności matematyczne

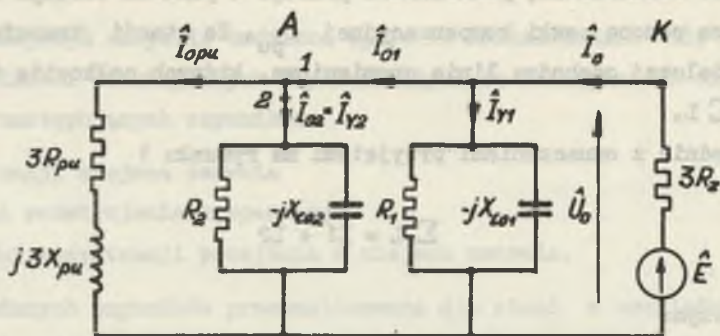
W przypadku analizy zwarc doziemnych w sieciach z punktem zerowym kompensowanym impedancje wzdłużne elementów układu, jako wielokrotnie mniejsze od impedancji poprzecznych, można pominąć [2]. Przy tym założeniu schemat zastępczy, jednofazowy dla składowej zerowej przy zwarcu jednofazowym doziemnym w punkcie K badanego układu sieci rozdzielczej, przyjmuje postać podaną na rysunku 2.

Poszczególne symbole w schemacie przedstawionym na rysunku 2 oznaczają:

Z_{pu} - impedancja uziemienia punktu zerowego transformatora

X_{CO1} - reaktancja pojemnościowa dla składowej zerowej odpowiadająca całkowitej pojemności linii L_1

X_{CO2} - reaktancja pojemnościowa dla składowej zerowej odpowiadająca całkowitej pojemności linii L_2



Rys. 2. Schemat zastępczy dla składowej zerowej układu sieciowego podanego na rys. 1

R_1, R_2 - rezystancje poprzeczne linii L1 i L2

R_z - rezystancja przejścia w miejscu zwarcia

\hat{E} - zastępcza SEM

\hat{I}_o - składowa zerowa prądu płynącego w miejscu zwarcia K

\hat{I}_{o1} - składowa zerowa prądu płynącego przez punkt zainstalowania zabezpieczenia 1, przy zwarciu w miejscu K

\hat{I}_{o2} - składowa zerowa prądu płynącego przez punkt zainstalowania zabezpieczenia 2 przy zwarciu w miejscu K

$\hat{I}_{Y1}, \hat{I}_{Y2}$ - prądy odpowiadające admitancjom linii L1 i L2

\hat{I}_{pu} - składowa zerowa prądu płynącego przez cewkę kompensacyjną przy zwarciu w punkcie K

\hat{U}_o - składowa zerowa napięcia w miejscu zainstalowania zabezpieczeń przy zwarciu w punkcie K.

Stopień skompensowania prądów ziemnozwarciowych można scharakteryzować współczynnikiem rozstrojenia kompensacji, który definiuje się:

$$k_F = \frac{X_C}{X_D} \quad (2)$$

gdzie:

X_C - reaktancja pojemnościowa odpowiadająca całkowitej długości linii $\sum L$

$X_D = 3 X_{pu}$ - reaktancja indukcyjna cewki kompensacyjnej.

W przypadku niedokompensowania sieci $k_r < 1$, natomiast w przypadku przekompensowania sieci $k_r > 1$.

Istotnym parametrem analizowanego układu sieciowego jest całkowita reaktancja pojemnościowa określona zależnością:

$$X_c = \frac{X_{co}}{\sum L} = \frac{1}{\omega C_o \cdot \sum L} \quad (3)$$

Impedancję uziemienia punktu zerowego wyrażono w postaci funkcji całkowitej reaktancji pojemnościowej sieci, przy pomocy relacji:

$$3\hat{Z}_{pu} = \left(\frac{k_{pu}}{k_r} + j \frac{1}{k_r} \right) X_c \quad (4)$$

gdzie:

$$k_{pu} = \frac{R_{pu}}{X_{pu}}$$

Impedancję poprzeczną sieci, wynikłą z połączenia równoległego X_c i R można wyznaczyć ze wzoru:

$$\hat{Z}_c = \frac{\eta}{1 + j\eta} X_c \quad (5)$$

przy czym:

$$\eta = \frac{R}{X_c} = \frac{B}{G}$$

gdzie:

B - susceptancja linii

G - konduktancja linii.

Z zależności (5) wynika, że gdy $\eta \rightarrow \infty$ to:

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} \hat{Z}_c = -j X_c$$

i otrzymuje się układ bez uwzględnienia przewodności poprzecznej linii.

Impedancję zastępczą wynikłą z połączenia równoległego impedancji $3\hat{Z}_{pu}$ oraz \hat{Z}_c określa relacja:

$$\hat{Z}'_o = \frac{(k_{pu} + j1)\eta}{[k_{pu} + \eta(k_r - 1)] + j(k_{pu}\eta + 1)} \cdot X_c \quad (6)$$

Impedancję zastępczą dla składowej zerowej obwodu zwarciovwej wyrazić można przy pomocy wzoru:

$$\hat{Z}_o = 3R_z + \hat{Z}'_o \quad (7)$$

Składowe zerowe prądów i napięć w poszczególnych punktach układu zgodnie z oznaczeniami podanymi na rysunku 2 określają relacje (8) - (11):

$$\hat{I}_o = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_o} = \frac{\hat{U}_f}{\hat{Z}_o} \quad (8)$$

$$\hat{U}_o = \hat{U}_f \cdot \frac{\hat{Z}'_o}{\hat{Z}_o} \quad (9)$$

$$\hat{I}_{o1} = \hat{I}_o - \hat{I}_{Y1} = \hat{I}_o(1 - j m \hat{M}) \quad (10)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{L_1}{\sum L}, \\
 \hat{M} &= \frac{\hat{Z}'_o}{\hat{Z}_c}, \\
 \hat{I}_{o2} &= \frac{\hat{U}_o}{\hat{Z}_{o2}} \quad (11)
 \end{aligned}$$

przy czym:

$$\hat{Z}_{o2} = \frac{\hat{Z}_c}{1-m}$$

2.3. Dyskusja parametrów badanego układu sieciowego

Analizę ilościową przeprowadzono dla linii napowietrznych pracujących na napięciu 15 kV w układzie przedstawionym na rys. 1, o całkowitej długości

$$\sum l = 500 \text{ km}$$

jako przeciętnej dla warunków krajowych.

Przyjęto linie napowietrzne o typowych przewodach [1]. Wartość pojemności przewodu 1 fazy względem ziemi dla składowej zerowej takiej linii wynosi średnio

$$C_o = 8,96 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

Wartość konduktancji analizowanej linii jest trudna do ustalenia. Konduktancja linii zależy bowiem od wielu czynników, takich jak: warunki klimatyczne, zabrudzenie izolacji, poziom napięcia itp. Niektóre z tych czynników są ponadto zmienne w czasie. Trudno jest więc ustalić konkretną, chociażby przybliżoną wartość konduktancji jednostkowej lub całkowitej dla danego układu sieci napowietrznej. Analizy jakościowej

dokonano dla $\eta = 10$, czyli $R = 10 X_0$. W sieci o podanym poziomie napięcia nie należy się spodziewać większych wartości konduktancji linii

Na podstawie danych katalogowych dławików kompensacyjnych produkowanych w kraju [3] rezystancja dławików równa jest średnio 1% reaktancji indukcyjnej, a więc przyjęto $k_{pu} = 0,01$.

2.4. Zakres prowadzonych badań

W oparciu o wykonane obliczenia przeprowadzono analizę kształtowania się wielkości pierwotnych prądów i napięć w miejscach zainstalowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w zależności od następujących czynników:

- stopnia rozstrojenia kompensacji,
- lokalizacji miejsca zwarcia,
- wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia.

Wpływ tych czynników rozpatrzono przyjmując w obliczeniach zakresy zmian wartości:

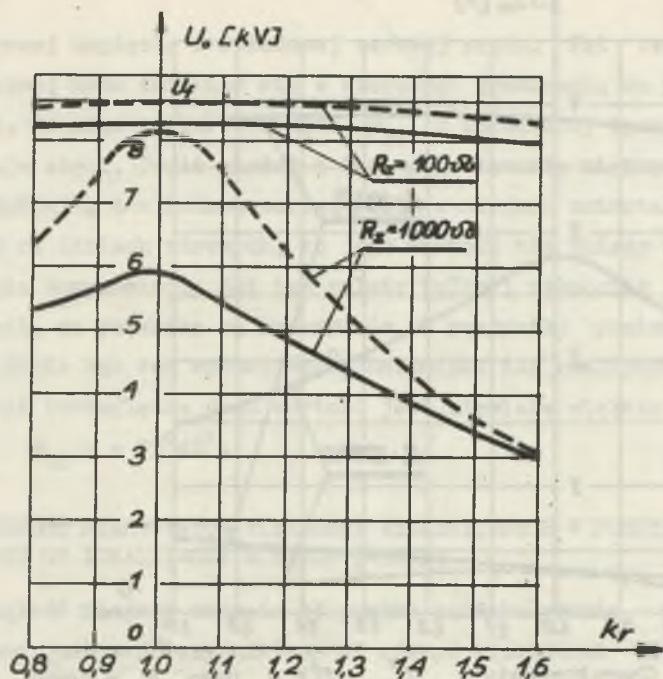
- współczynnika rozstrojenia kompensacji $k_r = 0,8 \div 1,6$
- współczynnika lokalizacji miejsca zwarcia $m = 0,01 \div 0,25$
- wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia $R_z = 0 \div 10 \text{ } \Omega$.

Wyniki obliczeń podano w postaci odpowiednich wykresów. Na wykresach tych dla porównania podano również charakterystyki dla przypadku pominięcia konduktancji linii, gdy $\eta = \infty$.

3. KSZTAŁTOWANIE SIĘ PIERWOTNYCH WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W MIEJSCACH ZAINSTALOWANIA ZABEZPIECZEŃ W ZALEŻNOŚCI OD STOPNIA ROZSTROJENIA KOMPENSACJI

Z punktu widzenia pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych istotne są następujące wielkości elektryczne:

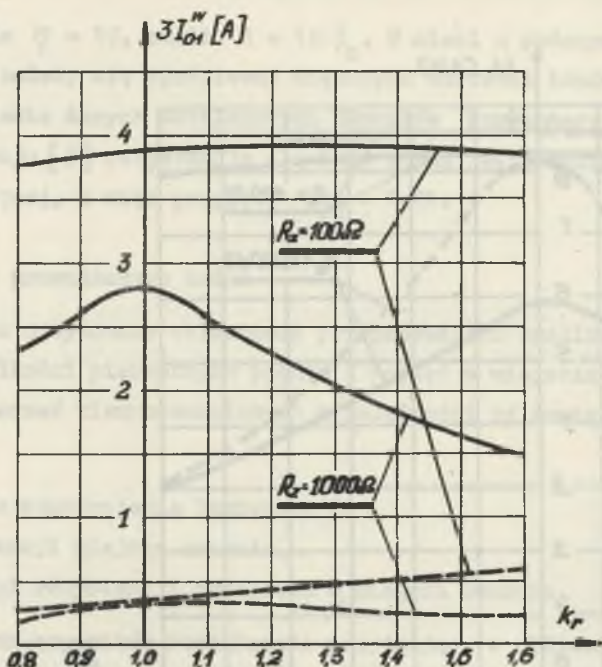
- składowa zerowa napięcia
- składowa zerowa prądu
- kąt zawarty między wektorami tych składowych.



Rys. 3. Charakterystyki $U_0 = f(k_r)$ przy $R_z = \text{const.}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\eta = 10$)
 - - - - dla układu z pominięciem konduktancji linii

Przebieg składowej zerowej napięcia w zależności od stopnia rozstrojenia kompensacji przedstawiono na rysunku 3 dla dwóch różnych wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Liniami ciągłymi podano charakterystyki $U_0 = f(k_r)$ w przypadku uwzględnienia konduktancji sieci (dla $\eta = 10$), natomiast liniami przerywanymi odpowiednie charakterystyki dla układu z pominięciem konduktancji. Na podstawie wykresów podanych na rysunku 3 można stwierdzić, że wartość składowej zerowej napięcia dla rezystancji przejścia mniejszej od 100Ω praktycznie nie zależy od stopnia rozstrojenia kompensacji. Natomiast przy zwarciach za pośrednictwem dużych rezystancji napięcie to zmienia się w do-
 syc szerokich granicach. Z wykresów tych widoczny jest również wpływ konduktancji linii na wartość składowej zerowej napięcia, zwłaszcza przy małym stopniu rozstrojenia kompensacji.



Rys. 4. Charakterystyki $3I_{01}^W = f(k_r)$ przy $R_z = \text{const}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\tau = 10$)
 - - - dla układu z pominięciem konduktancji linii

I_{01}^W - składowa czynna prądu kolejności zerowej

Na rysunku 4 wykreślono przebieg wartości składowej czynnej prądu $3I_{01}^W$ przy zmianach współczynnika k_r . Z wykresów tych widać, że stopień rozstrojenia kompensacji wpływa na kształtowanie się wartości prądu $3I_{01}^W$ podobnie jak na przebieg składowej zerowej napięcia. Przebieg krzywych wskazuje na duży wpływ konduktancji linii na wartość składowej czynnej prądu kolejności zerowej. Przy pominięciu konduktancji sieci prąd $3I_{01}^W$ w mniejszym stopniu zależy od wartości R_z . Nieuwzględnienie w obliczeniach konduktancji linii powoduje kilkukrotne zmniejszenie składowej czynnej tego prądu, co może prowadzić do niewłaściwych wniosków przy analizie pracy omawianych zabezpieczeń.

Czynnikiem decydującym o poprawnym działaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych, zerowo-mocowych jest kąt zawarty między wektorami składo-

wej zerowej napięcia i składowej zerowej prądu. Kąt ten dla linii uszkodzonej może zmieniać się w szerokich granicach, co pokazano na rysunku 5. Również na wartość kąta φ_{01} w zasadniczy sposób wpływa konduktancja sieci. Jeśli chodzi o kąt φ_{02} zawarty między składową zerową napięcia, a składową zerową prądu w miejscu zainstalowania zabezpieczeń na liniach zdrowych, to jego wartość nie zależy od stopnia rozstrojenia kompensacji. Kąt ten zależy tylko i wyłącznie od konduktancji linii, co pokazano na rysunku 6a. W przypadku pominięcia konduktancji linii kąt ten wynosi -90° , natomiast dla realnych wartości konduktancji bezwzględna jego wartość jest niewiele większa od 90° - dla $\eta = 10$, $\varphi_{02} = -95^\circ 40'$.

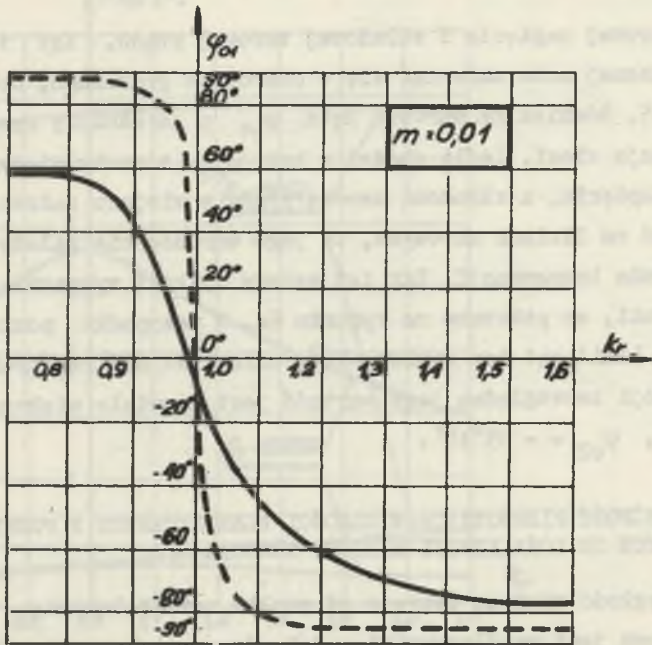
4. ZALEŻNOŚĆ PIERWOTNYCH WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W PUNKTACH PRZEKAŹNIKOWYCH OD LOKALIZACJI MIEJSCA ZWARCIA

Odległość miejsca zwarcia od punktu zainstalowania zabezpieczenia określona jest współczynnikiem "m" równym stosunkowi odległości miejsca zwarcia L_1 do całkowitej długości linii $\sum L$.

Z zależności (9) widać, że składowa zerowa napięcia nie jest funkcją "m", a więc nie zależy od lokalizacji miejsca zwarcia.

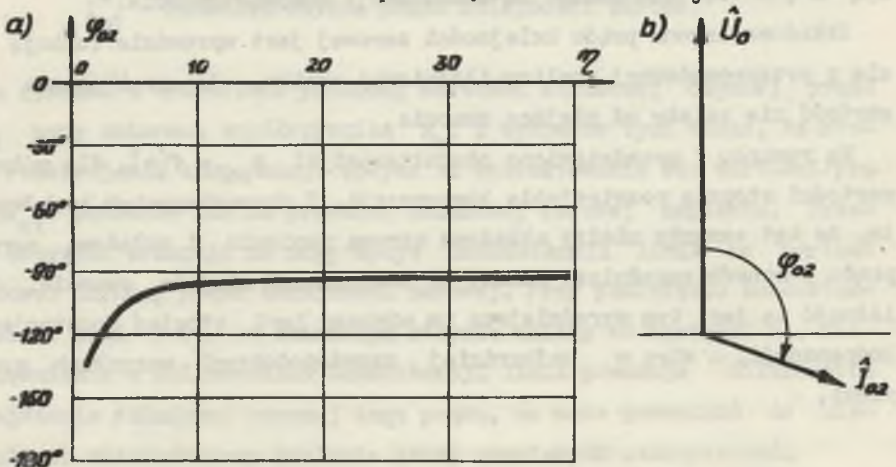
Składowa czynna prądu kolejności zerowej jest wprawdzie funkcją "m" ale z przeprowadzonej analizy ilościowej wynika, że praktycznie jej wartość nie zależy od miejsca zwarcia.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki $\varphi_{01} = f(m)$ dla różnych wartości stopnia rozstrojenia kompensacji. Z charakterystyk tych wynika, że kąt zawarty między składową zerową napięcia i składową zerową prądu w sposób zasadniczy zależy od lokalizacji miejsca zwarcia. Zależność ta jest tym wyraźniejsza im większy jest stopień rozstrojenia kompensacji, a więc w najbardziej prawdopodobnych warunkach pracy sieci.



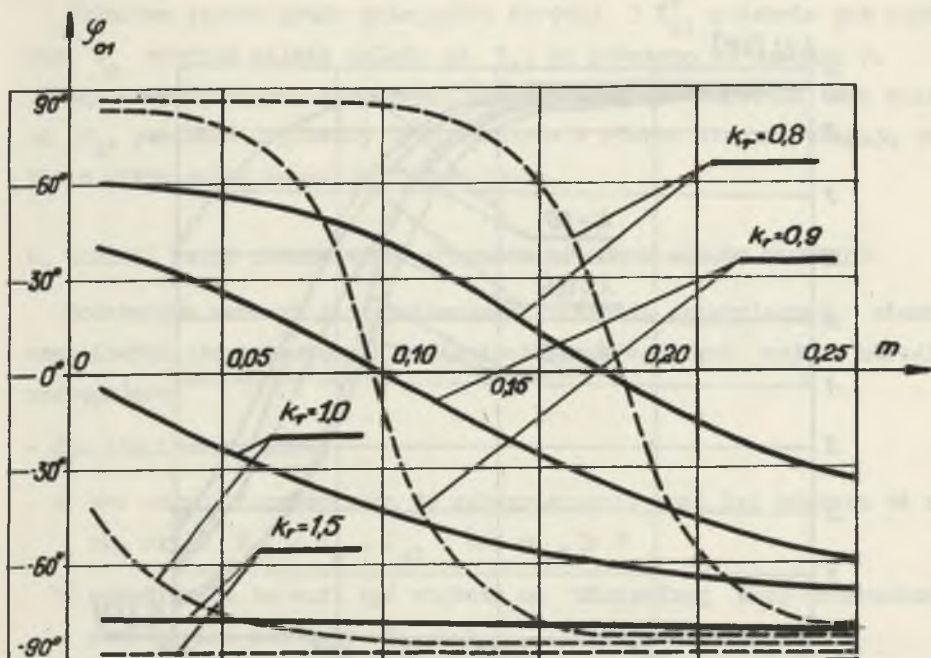
Rys. 5. Charakterystyki $\varphi_{01} = f(k_r)$ przy $m = \text{const}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\eta = 10$)
 - - - dla układu z pominięciem konduktancji linii



Rys. 6. Zależność kąta φ_{02} od konduktancji linii

a) charakterystyka $\varphi_{02} = f(\eta)$, b) wykres wektorowy

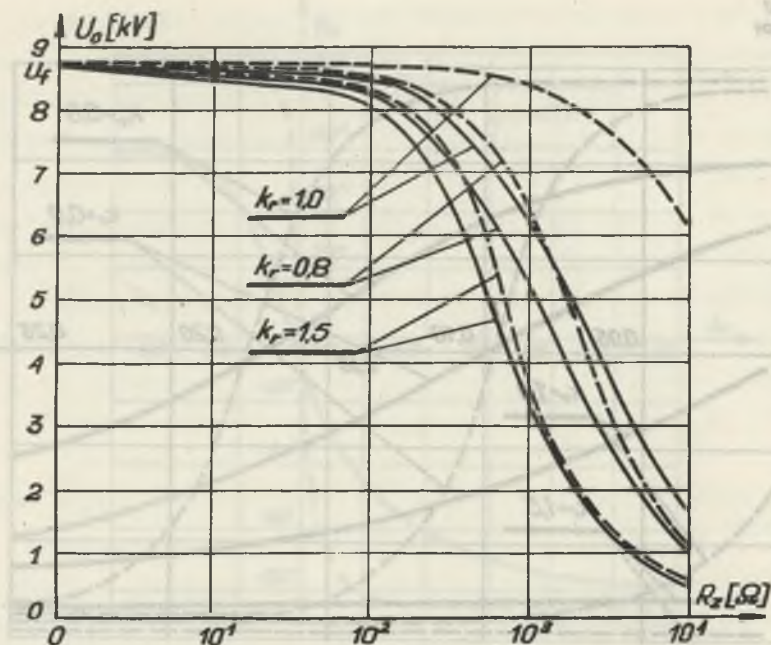


Rys. 7. Charakterystyki $\varphi_{01} = f(m)$ przy $k_r = \text{const}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\eta = 10$)
 ---- dla układu z pominięciem konduktancji linii

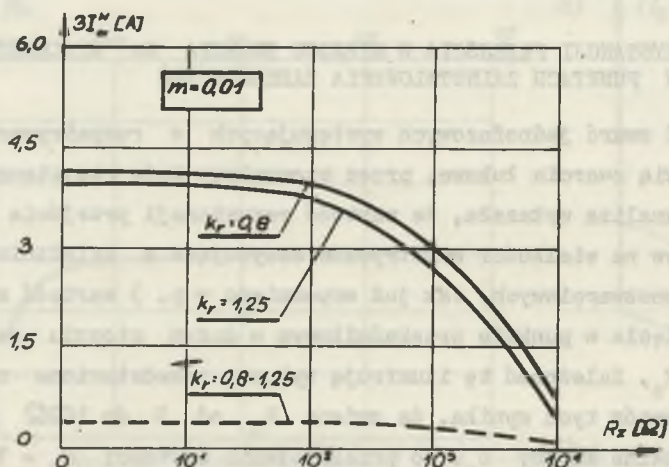
5. WPŁYW REZYSTANCJI PRZEJŚCIA W MIEJSCU ZWARCIA NA WIELKOŚCI ELEKTRYCZNE W PUNKTACH ZAINSTALOWANIA ZABEZPIECZEŃ

Większość zwarcć jednofazowych występujących w rozpatrywanych sieciach stanowią zwarcia łukowe, przez stosunkowo duże rezystancje. Przeprowadzona analiza wykazała, że wartość rezystancji przejścia R_z ma istotny wpływ na wielkości elektryczne decydujące o działaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Jak już wspomniano w p. 3 wartość składowej zerowej napięcia w punkcie przekąźnikowym w dużym stopniu zależy od wielkości R_z . Zależność tę ilustrują wykresy przedstawione na rysunku 8. Z wykresów tych wynika, że zmiana R_z od 0 do 100Ω powoduje tylko nieznaczne zmiany U_0 . Po przekroczeniu wartości $R_z = 100\Omega$ napięcie to szybko maleje w miarę dalszego wzrostu R_z .



Rys. 8. Charakterystyki $U_o = f(R_z)$ przy $k_r = \text{const}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\eta=10$)
 - - - dla układu z pominięciem konduktancji linii



Rys. 9. Charakterystyki $3I_{01}'' = f(R_z)$ przy $k_r = \text{const}$

— dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii ($\eta=10$)
 - - - dla układu z pominięciem konduktancji linii

Składowa czynna prądu kolejności zerowej $3 I_{01}^W$ podobnie jak napięcie U_0 również silnie zależy od R_z , co pokazano na rysunku 9.

Kąt zawarty między składowymi zerowymi prądu i napięcia nie zależy od R_z , ponieważ argumenty tych wektorów w równym stopniu ulegają zmianie w miarę zmian rezystancji przejścia.

6. WARUNKI PRACY ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH ZEROWO-MOCOWYCH

Podstawowe warunki dla wybiórczego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych w sieciach kompensowanych można określić następująco:

- dla linii uszkodzonej

a) moc czynna doprowadzona do zabezpieczenia musi być większa od zera, czyli $P_{01} = U_0 \cdot I_{01} \cdot \cos \varphi_{01} > 0$

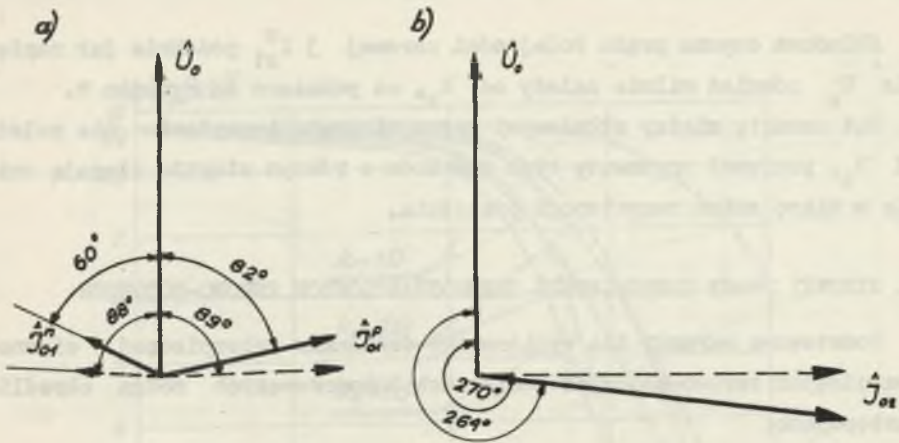
b) ponadto moc ta musi być większa od minimalnej mocy rozruchowej przekaźnika mocowego $P_{01} > P_{\text{rmin}}$

- dla linii zdrowych

c) moc czynna doprowadzona do zabezpieczeń musi mieć kierunek przeciwny, czyli $P_{02} = U_0 \cdot I_{02} \cdot \cos \varphi_{02} \leq 0$.

Z analizy ilościowej przeprowadzonej w p. 3, 4, 5 i z wykresu wektorowego przedstawionego na rysunku 10 sporządzonego na podstawie wyników obliczeń wynika, że pierwotne wielkości elektryczne doprowadzone do zabezpieczeń zawsze spełniają warunki "a" i "c". Warunek "b" może być niespełniony w przypadkach zwarcia za pośrednictwem bardzo dużych rezystancji przejścia kiedy to, jak stwierdzono w p. 5 następuje bardzo duże obniżenie wartości zarówno U_0 jak i I_0 . Nie spełnienie tego warunku jest tymbardziej możliwe im mniejsza jest wartość konduktancji linii. Wniosek ten potwierdza również w pewnym stopniu przebieg krzywych na rys. 12.

W rzeczywistych warunkach pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych przekaźniki nie są zasilane wielkościami pierwotnymi, lecz uzyskanymi z filtrów składowych zerowych prądu i napięcia. Od fil-



Rys. 10. Wykresy wektorowe ilustrujące zakresy zmian kątów między składowymi zerowymi prądu i napięcia

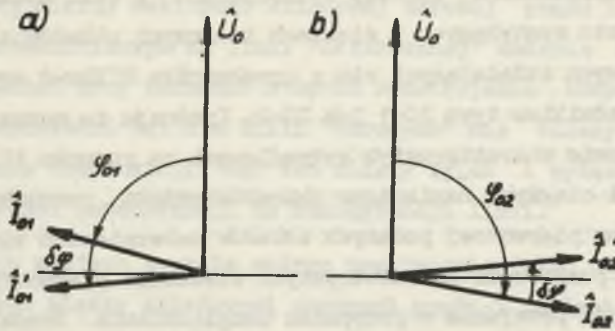
a) dla linii "uszkodzonej" - I_{01}^P - składowa zerowa prądu przy $k_r = 1,5$
 I_{01}^N - składowa zerowa prądu przy $k_r = 0,8$, b) dla linii "zdrowych"

trów tych wymaga się małych uchybów kątowych. Wymaganie to spełniają zadowalająco filtry napięciowe, natomiast przekładniki prądowe typu Ferranti z natury swej budowy posiadają znaczne uchyby kątowe. Uchyby te są z reguły dodatnie i mogą wynosić kilka, a nawet kilkanaście stopni.

Przeprowadzona poprzednio analiza kąta zawartego między składowymi zerowymi napięcia i prądu w miejscu zainstalowania zabezpieczeń wykazała duży zakres zmian tego kąta, co zilustrowano na wykresach wektorowych przedstawionych na rysunku 10.

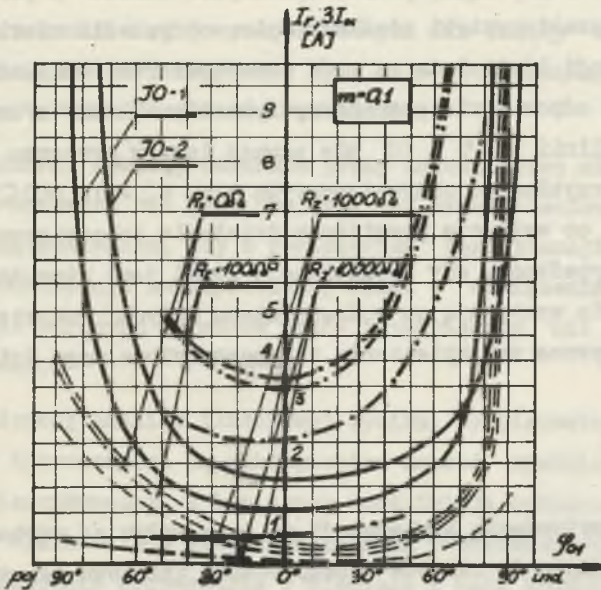
Na rysunku 11 podano wykresy wektorowe napięć i prądów uwzględniające dodatnie uchyby kątowe filtrów prądowych - prądy \hat{I}'_{01} i \hat{I}'_{02} - przy niekorzystnych ale możliwych kątach wektorów prądów pierwotnych \hat{I}_{01} i \hat{I}_{02} . Z wykresów tych widać, że zmiana kąta spowodowana uchybami może prowadzić do:

- niedziałania lub błędnego działania zabezpieczenia na linii uszkodzonej (rys. 11a)
- błędnego działania zabezpieczeń na liniach zdrowych (rys. 11b).



Rys. 11. Wykresy wektorowe wielkości pierwotnych i wtórnych doprowadzonych do zabezpieczeń z uwzględnieniem dodatnich uchybów katowych filtrów składowych zerowego prądu

a) dla linii "uszkodzonej", b) dla linii "zdrowych"



Rys. 12. Porównanie charakterystyk rozruchowych układu przekładnik ziemnozwarciowy - przełącznik RIEsw-2,1 A z charakterystykami wielkości pierwotnych doprowadzonych do zabezpieczenia

———— charakterystyki rozruchowe, - - - - - charakterystyki wielkości pierwotnych z uwzględnieniem konduktancji sieci, - . . . - charakterystyki wielkości pierwotnych z pominięciem konduktancji sieci

Wyniki przeprowadzonej analizy wykorzystano w celu dyskusji warunków pracy często spotykanych w sieciach krajowych układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych składających się z przekładnika RIEsw-2 współpracującego z przekładnikiem typu IO-1 lub IO-2. Dyskusję tę można przeprowadzić na podstawie charakterystyk wykreślonych na rysunku 12. Na rysunku tym liniami ciągłymi naniesiono charakterystyki rozruchowe odniesione do strony pierwotnej podanych układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych, liniami punktowymi charakterystyki wielkości pierwotnych dla różnych rezystancji przejścia w przypadku uwzględnienia konduktancji linii, natomiast liniami przerywanymi charakterystyki wielkości pierwotnych przy pominięciu konduktancji linii. Przy pominięciu pewnych nieistotnych różnic w warunkach wyznaczania charakterystyk pomiarowych i analitycznych możliwe jest ich wzajemne porównanie. Z porównania tego wynika, że charakterystyki wielkości pierwotnych dla nieskończonej konduktancji linii leżą na ogół poza obszarem działania zabezpieczeń. Również odpowiednie charakterystyki dla układu z uwzględnieniem konduktancji linii np. $\eta = 10$ nie zawsze leżą w obszarze działania zabezpieczeń. Przykładowo charakterystyka dla $R_z = 10\ 000\ \Omega$ leży poza tym obszarem, co wyklucza prawidłowe działanie zabezpieczenia. Tak więc w pewnych przypadkach, gdy konduktancja linii jest stosunkowo mała lub też gdy zwarcia występują za pośrednictwem dużych rezystancji przejścia, rozpatrywane zabezpieczenia ziemnozwarciowe mogą działać nieprawidłowo.

7. WNIOSKI

a) Stopień rozstrojenia kompensacji ma duży wpływ na wartości pierwotne doprowadzone do układów zabezpieczeń. Składowa zerowa napięcia w miejscu zainstalowania zabezpieczeń silnie maleje wraz ze wzrostem stopnia rozstrojenia kompensacji, zwłaszcza przy zwiarciach za pośrednictwem dużych rezystancji przejścia.

Podobny wpływ ma stopień rozstrojenia kompensacji, na składową czynną prądu kolejności zerowej.

Kąt zawarty między wektorami składowej zerowej prądu i napięcia w punkcie przekąźnikowym na linii "uszkodzonej" zmienia się w szerokich granicach przy zmianach stopnia rozstrojenia kompensacji. Natomiast odpowiedni kąt dla linii "zdrowych" nie zależy od stopnia rozstrojenia kompensacji. Kąt ten zależy tylko i wyłącznie od stosunku wartości konduktancji do susceptancji linii.

- b) Lokalizacja miejsca zwarcia wpływa praktycznie tylko na wartość kąta zawartego między składowymi zerowymi prądu i napięcia w punkcie przekąźnikowym na linii "uszkodzonej".
- c) Składowe zerowe napięcia i prądu silnie zależą od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Wzrost rezystancji przejścia powoduje znaczne obniżenie się zarówno składowej zerowej prądu jak i napięcia. Natomiast kąt zawarty między tymi składowymi nie zależy od rezystancji przejścia, ponieważ argumenty tych wektorów zmieniają się jednakowo w miarę zmian rezystancji przejścia.
- d) Z punktu widzenia analizy warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych nie jest obojętne czy układ sieciowy rozpatruje się z uwzględnieniem, czy z pominięciem konduktancji linii. Pominięcie konduktancji zabezpieczanej sieci w obliczeniach prowadzi do określenia gorszych warunków pracy zabezpieczeń niż istnieją w rzeczywistości.
- e) Z przeprowadzonej analizy ilościowej wynika, że pierwotne wielkości elektryczne doprowadzone do zabezpieczeń zawsze spełniają warunki właściwej kierunkowości, a tym samym umożliwiają wybiórczą pracę zabezpieczeń. Wielkości te przy zwarciach za pośrednictwem dużych rezystancji przejścia szczególnie w sieciach z małą konduktancją mogą osiągać zbyt małe wartości, by spełnić warunek odpowiedniej czułości zabezpieczeń.
- f) Dla pełnej analizy należy każdorazowo uwzględniać uchyby kątowe filtrów składowych zerowych, które mogą w sposób istotny zmienić warunki pracy zabezpieczeń zerowo-mocowych. Uchyby te mogą być powodem nieprawidłowego działania zabezpieczeń.

LITERATURA

- [1] Informator Energetyka - WNT Warszawa 1965.
- [2] Kończykowski S., Bursztyński J.: Zwarcia w układach elektroenergetycznych WNT Warszawa 1965.
- [3] Dane katalogowe dławików gaszących produkowanych w M-1 Żychlin (wg stanu z kwietnia 1970 r.) - Biuletyn Techniczny "Energoprojekt" Kraków 2/1970.
- [4] Sirota I.M.: Zaszczita od zamykanij na ziemi w elektriceskich sistiemach Kijew 1955.
- [5] Synal B.: Zabezpieczenia ziemnozwarciowe sieci kablowych kompenso-wanych na tle warunków krajowych. Przegląd Elektrotechniczny 9/1970.
- [6] Pytel J., Miedziński B.: Selektyna sygnalizacja zwarć doziemnych w kablowych sieciach kompensowanych. Gospodarka Paliwami i Energią 11, 12/1970.
- [7] Zespół Automatyki i Zabezpieczeń w Energetyce Katedry Elektroener-getyki Politechniki Śląskiej "Analiza wpływu konfiguracji sieci pracującej z kompensacją prądów ziemnozwarciowych na poprawność działania aktualnie stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych" Pol. Śl. Praca nr inw. 7, Gliwice 1970.

Э. ЛАЗЕРА, М. М. КРУТ, З. ЦИЛЬХ
Кафедра Электроэнергетики
Силезского Политехнического Института
Гливице

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ПРАВИЛЬНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ ЗЕМЛЬНЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ МОЩНОСТИ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЯХ

С о д е р ж а н и е

В сетях отечественной энергетической системы, работающей с компенсированной нулевой точкой применяется защита нулевой мощности от действия заземленных коротких замыканий. Как показывает эксплуатационная практика эти защиты довольно часто срабатывают неселективно, т.е. не исполняют основного требования предъявляемого электроэнергетическим системам.

В статье проанализировано влияние на формирование первичных электрических величин \hat{U}_0 , \hat{J}_0 подводимых к земляной защите нижеследующих факторов:

- а) степени расстройки компенсации
- б) местоположения короткого замыкания
- в) значения переходного резистанса в месте короткого замыкания.

Влияние вышеуказанных факторов представлено для сети с компенсированной нулевой точкой с учетом и без учета активной проводимости (кондуктанса). Количественный анализ проведено для типовой воздушной сети с номинальным напряжением 15 кв. Вычисления произведено для практически применяемых степеней расстройки компенсации и переходного резистанса в месте к.з. С целью исследования влияния место-

положения короткого замыкания на интересующие нас величины принято возможность выступления короткого замыкания в разных точках сети.

Для анализа сетевой системы с учетом кондуктанса линии принято ориентировочное значение этого кондуктанса, которое и следует ожидать в сети с принятым уровнем напряжения.

Выводы, вытекающие из проведенного анализа.

1. Степень расстройки компенсации имеет большое влияние на первичные величины, подводимые к защите. Нулевая составляющая напряжения в месте установки защиты очень сильно уменьшается с ростом степени расстройки компенсации, особенно для коротких замыканий с большим переходным сопротивлением. Похожее влияние имеет степень расстройки компенсации на активную составляющую тока нулевой последовательности. Угол между векторами нулевой составляющей тока и напряжения в месте установки реле на "поврежденной" линии изменяется в широких пределах с изменением степени расстройки компенсации. Зато соответствующий угол для "здоровых" линий не зависит от степени расстройки компенсации. Угол этот зависит исключительно и только от отношения значения активной и реактивной проводимости линии.
2. Местоположение короткого замыкания влияет практически только на значение угла между нулевыми составляющими тока и напряжения в месте установки реле на поврежденной линии.
3. Нулевые составляющие напряжения и тока очень сильно зависят от переходного сопротивления в точке к.з. Увеличение переходного сопротивления ведет к значительному уменьшению нулевой составляющей тока и напряжения. Но угол между этими составляющими не зависит от переходного сопротивления, поэтому, что аргументы векторов этих величин изменяются одинаково с изменением переходного сопротивления.

4. С точки зрения анализа условий работы земляных защит нулевой мощности это не безразлично рассматривается ли составная система с учетом или без учета активной проводимости линий. Пренебрежение в расчетах активной проводимости защищаемой линии ведет к определению худших условий работы защиты, чем действительные.
5. Из проведенного количественного анализа следует, что первичные электрические величины, подводимые к защите всегда исполняют условия соответствующей направленности, что делает возможным селективное срабатывание защит. Эти величины при возникновении к.з. с большими переходными сопротивлениями, особенно в сетях с малой активной проводимостью, могут достигать слишком малые значения для получения соответственной чувствительности защиты.
6. Для такого анализа необходимо каждый раз учитывать погрешности фильтров нулевых составляющих, которые могут существенным образом изменить условия работы защиты нулевой мощности. Погрешности эти могут быть причиной неправильного действия защиты.

ОПИСАНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. Схема сети, работающей с компенсированной нулевой точкой.

Рис. 2. Схема замещения для нулевой составляющей сети согласно рис. 1.

Рис. 3. Характеристики $U_0 = f(k_T)$ при $R_z = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 ---- без учета активной проводимости линии

Рис. 4. Характеристики $3I_{01}^W = f(k_T)$ при $R_z = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 ---- без учета активной проводимости линии

- Рис. 5. Характеристики $\varphi_{01} = f(k_T)$ при $m = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 - - - - без учета активной проводимости линии
- Рис. 6. Зависимость угла φ_{02} от активной проводимости линии:
 а) характеристика $\varphi_{02} = f(\eta)$
 б) векторная диаграмма
- Рис. 7. Характеристики $\varphi_{01} = f(m)$ при $k_T = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 - - - - без учета активной проводимости линии
- Рис. 8. Характеристики $3I_{01}^W = f(R_Z)$ при $k_T = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 - - - - без учета активной проводимости линии
- Рис. 9. Характеристики $3I_{01}^W = f(R_Z)$ при $k_T = \text{const}$
 — системы с учетом активной проводимости линии ($\eta = 10$)
 - - - - без учета активной проводимости линии
- Рис. 10. Векторные диаграммы, иллюстрирующие пределы изменений углов между нулевыми составляющими тока и напряжения
 а) для "повреждений" линии - \hat{I}_{01}^P - нулевая составляющая тока для $k_T = 0,8$
 б) для "здоровых" линии
- Рис. 11. Векторные диаграммы первичных и вторичных величин, подводимых к защите с учетом положительных условий погрешностей фильтров нулевых составляющих тока:
 а) для "поврежденной" линии
 б) для "здоровых" линии

Рис. 12. Сравнение пусковых характеристик системы измерительного трансформатор-реле типа RIE_{SW} - 2,1 А с характеристиками первичных величин, подводимых к защите

- пусковые характеристики
- характеристики первичных величин с учетом активной проводимости сети
- характеристики первичных величин без учета активной проводимости сети.

E. LAWERA, M. MIKRUT, Z. PILCH
Chair of Electrical Power Systems
Technical University of Gliwice

SOME FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE
OF ZERO PHASE-SEQUENCE PROTECTION IN NETWORKS
WITH IMPEDANCE GROUNDED NEUTRAL

S u m m a r y

In our state system distribution networks operating with compensated neutral point, earth-fault protections are realized by means of zero-power arrangements. It is well known from practice that these protections often operate non selectively thus not fulfilling the basic requirement for electric protections.

In the paper it was discussed the influence of following factors on primary electrical values \hat{U}_0 , \hat{I}_0 supplied to earth-fault protection:

- a) rate of compensation out - of - adjustment
- b) fault location
- c) contact resistance value in fault point

The influence of above mentioned factors was discussed for distribution network with compensated neutral point and with or without line conductance taken into account. Quantitative analysis was carried out for typical 15 kV overhead distribution network. Calculations were realized for practically encountered rates of compensation out - of - adjustment and contact resistance values in fault point. In order to investigate the influence of fault location on interesting electrical values at protection connection point there were assumed various location points of faults in distribution network. In case of analysis of network system with line conductance taken into account it was accep-

ted the approximate value of this conductance which is to be expected in network of given voltage.

The conclusions from analysis carried out are following:

1. The rate of compensation out - of - adjustment has a big influence on primary values supplied to protections. Zero-sequence voltage at protection connection point strongly decreases at rate of compensation out-of-adjustment increase. It occurs particularly in case of faults through significant contact resistances. Similarly affected by rate of compensation out - of - adjustment is also active component of zero-sequence current. The phase shift between zero-sequence voltage and zero - sequence current at protection connection point on line where fault has occurred is varying within extensive limits according to changes of rate of compensation out-of-adjustment. On the other hand, the corresponding phase shift for lines where no faults have occurred is independent of rate of compensation out - of-adjustment. The phase shift depends only on conductance - susceptance ratio for individual line.
2. The fault location, in practice, affects only the phase shift between zero-sequence current and zero-sequence voltage at protection connection point on line where fault has occurred.
3. Zero-sequence current and zero-sequence voltage are strongly affected by contact resistance values at fault points. Increase of contact resistance results in significant decrease of both zero-sequence current and zero-sequence voltage values. However, the phase shift between them is independent of contact resistance, as the arguments of the vectors vary equally according to changes of contact resistances.
4. From the point of view of operating conditions of zero-power earth-fault protections, it is important whether line conductance is taken into account or not. Neglecting of line conductance of network being protected leads to determining worse protection operating conditions than actually exist.

5. From quantitative analysis carried out, results, that primary electrical values supplied to the protections always comply with requirements of proper directivity, thus making possible selective operation of protections. In case of fault through considerable contact resistances, especially in networks of insignificant conductance, the values mentioned above can be too small to fulfil requirements of sensitivity.
6. For complete analysis the angle errors of zero-sequence filters should be taken into consideration in any individual case, since they can substantially change operating conditions of zero-power earth-fault protections. Due to these errors the protections may operate incorrectly.

FIGURES DESCRIPTIONS

Fig. 1. Schematic diagram of distribution network operating with compensated neutral point

Fig. 2. Equivalent scheme for zero - sequence component of network system given in Fig. 1

Fig. 3. Characteristics $U_0 = f(k_r)$ for $R_z = \text{const.}$

———— for system with line conductance taken into account ($\eta = 10$)

----- for system without line conductance taken into account

Fig. 4. Characteristics $\Re I_{01}^W = f(k_r)$ for $R_z = \text{const.}$

———— for system with line conductance taken into account ($\eta = 10$)

----- for system without line conductance taken into account

I_{11}^W - active component of zero - sequence current

Fig. 5. Characteristics $\varphi_{01} = f(k_r)$ for $m = \text{const.}$

———— for system with line conductance taken into account ($\eta = 10$)

----- for system without line conductance taken into account

Fig. 6. Phase shift φ_{o2} as a function of line conductance

- a) Characteristics $\varphi_{o2} = f(\eta)$
 b) vector diagram

Fig. 7. Characteristics $\varphi_{o1} = f(m)$ for $k_r = \text{const.}$

- for system with line conductance taken into account
 ($\eta = 10$)
 - - - - for system without line conductance taken into account

Fig. 8. Characteristics $U_o = f(R_z)$ for $k_r = \text{const.}$

- for system with line conductance taken into account
 ($\eta = 10$)
 - - - - for system without line conductance taken into account

Fig. 9. Characteristics $\Im I_{o1}^w = f(R_z)$ for $k_r = \text{const.}$

- for system with line conductance taken into account
 ($\eta = 10$)
 - - - - for system without line conductance taken into account

Fig. 10. Vector diagrams presenting ranges of changes in phase shifts between zero - sequence voltage and current

- a) for line on which fault has occurred - I_{o1}^p - zero sequence current for $k_r = 1,5$, I_{o1}^n - zero sequence current for $k_r = 0,8$
 b) for lines where no faults have occurred

Fig. 11. Vector diagrams of primary and secondary values supplied to protections in case of positive angle errors of zero - sequence current filters

- a) for line on which fault has occurred
 b) for lines where no faults have occurred

Fig. 12. Comparison of starting characteristics of arrangement consisting of earth - fault current transformer and RLEsw-2 1A relay, with characteristics of primary values supplied to the protection

- starting characteristics
 - - - - primary values characteristics with network conductance taken into account
 - - - - primary values characteristics without network conductance taken into account.