Seria: ELEKTRYKA z. 127

Nr kol. 1169

Marian MIKRUT Zygmunt PILCH Marian SAUCZEK

WYKRYWANIE JEDNOFAZOWYCH ZWARĆ REZYSTANCYJNYCH W SIECIACH ŚREDNICH NAPIĘĆ O PUNKCIE GWIAZDOWYM UZIEMIONYM PRZEZ REZYSTOR

<u>Streszczenie</u>. W artykule przedstawiono zależności opisujące wielkości wejściowe zabezpieczeń ziemnozwarciowych przy zwarciach pośrednich w sieciach średnich napięć pracujących z uziemionym przez rezystor punktem gwiazdowym. Określono wartości graniczne rezystancji przejścia dla zabezpieczeń nadprądowych, napięciowych i kierunkowych w zależności od wartości składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego i wymuszanego prądu czynnego.

RESISTANCE PHASE-TO PHASE FAULT DETECTION IN MV-NETWORKS WITH THE NEUTRAL RESISTANCE GROUNDING

Summary. The relationships describing input quantities of earth fault protections during resistance single-phase-to-earth faults in medium voltage networks with the resistance neutral grounding are presented. The fault resistance boundary values for overcurrent-, voltage- and directional protections are determined according to capacitive current component values.

ОБНАРУЖИВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЙТРАЛЬЮ ЗАЗЕМЛЕННОИ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

Резюме. В статье представлены зависимости описывающие входные величыны устройств защиты от одножазных замыканий при промежуточных коротких замыканиях на землю в сетях среднего напряжения с нейтралью заземленной через резистор. Определены значения предельного переходного сопротивления для защит тока, напряжения и направленных защит в зависимости от значения емкостной составляющей тока короткого замыкания и активной составляющей тока воздействия.

M. Mikrut, Z. Pilch, M. Sauczek

1. WPROWADZENIE

Dla krajowych sieci średnich napięć poszukuje się od kilkunastu lat optymalnego sposobu pracy punktu gwiazdowego. Do niedawna sieci te pracowały z izolowanym punktem gwiazdowym bądź z punktem gwiazdowym uziemionym przez dławik kompensacyjny. W tym drugim przypadku wprowadzono dość powszechnie przejściowe wymuszenie prądu czynnego, a ostatnio [1,2] także automatyczną regulację kompensacji ziemnozwarciowej. Pojawiły się również tendencje – wzorowane na zagranicznych rozwiązaniach (np. francuskich) – zmierzające do trwałego, rezystancyjnego uziemiania punktu gwiazdowego przynajmniej niektórych sieci średnich napięć, w tym przemysłowych.

W zależności od wykonania i przeznaczenia sieci, stosuje się różne wartości wymuszanego prądu czynnego. W sieciach napowietrznych wartość tego prądu jest rzędu kilkudziesięciu, a najwyżej 150 A, natomiast w sieciach kablowych na ogół nie przekracza 500 A. Istnieje pogląd, że taki poziom prądów zapewnia wykrywanie zwarć jednofazowych z ziemią przez proste zabezpieczenia ziemnozwarciowe, których działanie – zależnie od konfiguracji sieci – jest oparte bądź na pomiarze składowej zerowej prądu, bądź składowej czynnej mocy zerowej. Przy zwarciach metalicznych zabezpieczenia te, z uwagi na wartość wymuszanego prądu czynnego, spełniają, oczywiście, wymagania czułości w stopniu zadowalającym. Powstaje jednak pytanie dotyczące możliwości wykrywania zwarć rezystancyjnych. Odpowiedzią na tak postawione pytanie są właśnie wyniki analizy przedstawione w niniejszym artykule.

2. WIELKOŚCI WEJŚCIOWE ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH

Do analizy przyjęto sieć modelową z wyodrębnioną linią, w której założono zwarcia rezystancyjne. Schemat ideowy tej sieci oraz schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1.

64



ь)



Rys. 1. Schemat ideowy sieci modelowej (a) i schemat zastępczy sieci (b) Fig. 1. Schematic diagram of the model network (a) and equivalent diagram network (b)

Składowa zerowa napięcia przy zwarciu jednofazowym z ziemią określona może być z bilansu napięć dla obwodu z rys. 1b, który ma postać:

$$U_{0} = -U_{c} + 3(I_{1} + I_{1})R_{L}.$$
 (1)

Uwzględniając, że $\underline{I}_0 = -\underline{Y}_0 \underline{U}_0$, $\underline{I}_w = -\frac{1}{3} \underline{Y}_w \underline{U}_0$ oraz że admitancja zastępcza sieci jest równa $\underline{Y} = \underline{Y}_w + 3\underline{Y}_0$, otrzymuje się:

$$U_{0} = -\frac{U_{r}}{1 + R_{r}Y}.$$
 (2)

Składowa zerowa prądu płynącego w miejscu zwarcia z ziemią określona jest związkiem

$$\underline{I} = \underline{I}_{0} + \underline{I}_{w} = \frac{\underline{U}_{f} \left(\frac{\underline{Y}_{w}}{3} + \underline{Y}_{0}\right)}{1 + R_{w} \underline{Y}}, \qquad (3)$$

natomiast prąd ziemnozwarciowy jest równy

$$\underline{I}_{z} = 3\underline{I} = \frac{\underline{U}_{f}\underline{Y}}{1 + R_{L}\underline{Y}}.$$
 (4)

W sieciach średnich napięć $G_0 << B_0$ ($\frac{B_0}{G_0} \approx 10$), a więc przy pominięciu G_0 i uwzględnieniu, że $\underline{Y}_0 = j\omega C_0$, oraz $\underline{Y} = \frac{1}{R} + 3j\omega C_0$ otrzymuje się:

$$\frac{I_{o}}{1} = \frac{j\omega C_{o} \underline{U}_{f}}{1 + R_{k} (\frac{1}{R} + 3j\omega C_{o})},$$
(5)

$$I_{w} = \frac{\bigcup_{n}}{3R_{w} [1 + R_{k} (\frac{1}{R} + 3j\omega C_{0})]}.$$
 (6)

Wprowadzając współczynnik lokalizacji zabezpieczenia α , określający udział admitancji zabezpieczanej linii w admitancji całej sieci galwanicznie połączonej, prąd płynący w miejscu zainstalowania zabezpieczenia P określić można na podstawie zależności:

$$\underline{I}_{n} = 3[(1 - \alpha)\underline{I}_{0} + \underline{I}_{n}].$$
(7)

Po podstawieniu do wzoru (7) zależności (5) i (6) oraz uwzględnieniu, że dla zwarcia metalicznego składowa pojemnościowa prądu jest równa $I_c = 3\omega C_0 U_f$, a składowa czynna wymuszona uziemieniem punktu gwiazdowego sieci przez rezystor R_w wynosi $I_{R} = \frac{U_{f}}{R_{w}}$, otrzymuje się wzór określający prąd płynący w punkcie zabezpieczeniowym P w postaci:

$$\frac{I}{P} = \bigcup_{r} \frac{I_{R} + j(1-\alpha)I_{C}}{(\bigcup_{r} + R_{k}I_{R}) + jR_{k}I_{C}}.$$
(8)

Korzystając zatem z powyższej zależności, można określić wartość wielkości wejściowej zabezpieczenia nadprądowego przy dowolnym miejscu zwarcia doziemnego w wyodrębnionej linii, dla różnych determinowanych wartością współczynnika α , udziałów admitancji własnej linii w stosunku do admitancji całej galwanicznie połączonej sieci (0 $\leq \alpha \leq$ 1). Wartości wielkości wejściowych zabezpieczenia napięciowego można natomiast określić korzystając z zależności (2), a zabezpieczenia kierunkowego - z zależności (2) i (8).

3. GRANICZNE REZYSTANCJE PRZEJŚCIA DLA ZABEZPIECZEŃ NADPRADOWYCH

W celu spełnienia wymagania dotyczącego selektywności, prąd rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego musi spełniać warunek:

$$I_{r} \ge k_{b} \alpha I_{c}$$
, (9)

w którym k_b jest współczynnikiem bezpieczeństwa, przyjmowanym z przedziału 2 + 8, a αI_c - prądem odpowiadającym pojemności linii zabezpieczanej. Rezystancję graniczną w miejscu zwarcia, przy której zabezpieczenie nadprądowe o określonym prądzie rozruchowym może jeszcze zadziałać, można wyznaczyć korzystając z równości:

$$\mathbf{I}_{\Gamma}^{\prime} = \left| \mathbf{I}_{\Gamma} \right|. \tag{10}$$

czyli

$$I_{r} = U_{f} \frac{|I_{R} + j(1-\alpha)I_{C}|}{|(U_{f} + R_{k}I_{R}) + jR_{k}I_{C}|}.$$
 (10a)

Po rozwiązaniu powyższego równania, otrzymuje się:

$$R_{k} = \frac{U_{f}}{T} \left\{ \frac{\sqrt{I_{R}^{2} + \left[(1-\alpha)^{2} - \left(\frac{I_{r}}{T}\right)^{2} \right] I_{c}^{2}}}{I_{r}} - \frac{I_{R}}{T} \right\},$$
(11)

gdzie: $I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$

Dla sieci, w których wymuszany prąd czynny jest dużo większy od prądu pojemnościowego (I_R » I_C), zależność (11) przyjmie prostszą postać:

$$R_{k} \cong U_{f} \frac{I_{R}}{I} \left(\frac{1}{I_{r}} - \frac{1}{I}\right).$$
(12)

Analizę ilościową przeprowadzono dla sieci o pojemnościowym prądzie ziemnozwarciowym w zakresie od 10 A do 100 A przy założeniu, że wymuszany prąd czynny zawiera się w przedziale od 10 A do 400 A. Zakładano przy tym różne wartości rozruchowe zabezpieczenia nadprądowego.

Na rys.2 pokazano wykres zależności granicznej rezystancji przejścia R w funkcji wymuszanego prądu czynnego I_R . Wartości rezystancji R odnoszą się do napięcia znamionowego sieci równego 6 kV. Z charakterystyk widać, że wartość R przy wymuszanym prądzie czynnym o wartościach powyżej 100 A zależy wyłącznie od progu rozruchowego zabezpieczenia. Podobnie jest przy mniejszych wartościach wymuszanego prądu czynnego w sieci o dużym prądzie pojemnościowym

68



Rys. 2. Wartości granicznych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń nadprądowych w zależności od wymuszanego prądu czynnego

Fig. 2. Boundary values of the fault resistance according to the forced active current for overcurrent protections

(dla $I_c = 100$ A charakterystyki są liniami prostymi, równoległymi do osi I_R). W sieci o niewielkim prądzie pojemnościowym ($I_c = 10$ A), wraz ze zmniejszeniem wymuszanego prądu czynnego silnie maleją wartości R_k . Wpływ współczynnika α na wartości R_k jest znikomy i uwidacznia się tylko przy prądach I_R do wartości ok. 100 A. Z charakterystyk $R_k = f(I_c)$, przedstawionych na rys.3, wynika ponadto, że już przy prądach pojemnościowych sieci większych od 30+40 A, wartości rezystancji granicznej są praktycznie niezależne od wymuszanego prądu czynnego. Znaczący wpływ prądu rozruchowego zabezpieczenia na wykrywanie zwarć rezystancyjnych, o którym wspomniano wyżej, jest ewidentny i widać go jeszcze wyraźniej z przebiegów pokazanych na rys.4. Dla sieci o niewielkim prądzie pojemnościowym ($I_c = 10$ A) i dużych wartościach prądu



- Rys. 3. Wartości granicznych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń nadprądowych w zależności od składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego
- Fig. 3. Boundary values of the fault resistance according to the capacitive current component for overcurrent protections

rozruchowego zabezpieczenia $(I_r \ge 10 \text{ A})$, zabezpieczenie nadprądowe może działać albo przy zwarciach metalicznych, albo przy zwarciach pośrednich charakteryzujących się bardzo małymi rezystancjami przejścia. Niewielki już wpływ na wykrywanie zwarć rezystancyjnych w takich przypadkach ma wartość wymuszanego prądu czynnego.





Fig. 4. Depedence of the boundary value of the fault resistance on the overcurrent protection starting current

4. GRANICZNE REZYSTANCJE PRZEJŚCIA DLA ZABEZPIECZEŃ NAPIĘCIOWYCH I KIERUNKOWYCH

Na podstawie zależności (2) oraz przyjętych w p.2 założeń i oznaczeń, wzór określający składową napięcia można przekształcić do postaci:

$$\underline{U}_{0} = - \frac{U_{f}^{2}}{(U_{f} + R_{k} I_{R}) + jR_{k} I_{C}}, \qquad (13)$$

przyjmując ponadto, że k = $\left| \frac{\underline{U}_0}{\underline{U}_c} \right|$ jest względnym napięciem rozruchowym

zabezpieczenia napięciowego lub progiem napięciowym zabezpieczenia kierunkowego, powyższy wzór przyjmie postać

$$\mathbf{k}_{u} = \left| -\frac{\mathbf{U}_{\mathbf{r}}}{(\mathbf{U}_{\mathbf{r}} + \mathbf{R}_{\mathbf{k}} \mathbf{I}_{\mathbf{R}}) + \mathbf{j} \mathbf{R}_{\mathbf{k}} \mathbf{I}_{\mathbf{C}}} \right|, \qquad (14)$$

lub

$$U_{f} = k_{u} \sqrt{(U_{f} + R_{k}I_{R})^{2} + (R_{k}I_{C})^{2}}.$$
 (14a)

W wyniku rozwiązania równania (14a) ze względu na niewiadomą R_k, otrzymuje się:

$$R_{k} = U_{f} \frac{I_{R}}{I^{2}} \left[\frac{\sqrt{1 + (1 - k_{u}^{2}) \left(\frac{I_{c}}{I_{R}}\right)^{2}}}{k_{u}} - 1 \right].$$
(15)

Dla sieci, w której I » I, wzór (15) uprości się do postaci:

$$R_{k} \cong \frac{U_{f}}{I} \left(\frac{1}{k_{u}} - 1 \right) .$$
 (16)

Analizę ilościową przeprowadzono dla tego samego zakresu wartości prądów I i I_C, co w p.3, korzystając z zależności (15). Przyjęto ponadto, że względne napięcie rozruchowe może być zawarte w przedziale 0,05 \div 0,4.

Na rys.5 przedstawiono charakterystyki $R_k = f(I_R)$ dla zabezpieczenia napięciowego o względnym progu rozruchowym k =0,1. Wynika z nich, że w sieciach o niewielkim prądzie pojemnościowym rezystancja graniczna szybko Wykrywanie jednofazowych zwarć rezystancyjnych...



Rys. 5. Wartości granicznych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń napięciowych w zależności od wymuszanego prądu czynnego

Fig. 5. Boundary values of the fault resistance according to the forced active current for voltage protections

maleje wraz ze wzrostem wymuszanego prądu czynnego. Przy prądzie wymuszanym powyżej 100 A, rezystancja R_k jest już praktycznie niezależna od wartości tego prądu. Podobny kształt mają charakterystyki $n_{\rm c} = f(I_{\rm c})$ przedstawione na rys.6. Wartości rezystancji - jak widać - silnie maleją wraz ze wzrostem prądu pojemnościowego sieci, ale tylko przy niewielkich wartościach wymuszanego prądu czynnego ($I_{\rm R}$ =10+40 A). Zwiększenie wartości tego prądu powoduje, że zależności są liniowe, ale - co waźniejsze - zmniejszają się wartości rezystancji granicznej. Wpływ względnej wartości rozruchowej napięcia na wykrywanie zwarć rezystancyjnych pokazano na rys.7 na przykładzie sieci o niewielkim prądzie pojemnościowym. Wraz ze wzrostem k maleją silnie wartości rezystancji granicznej, tym silniej, im większy jest wymuszany prąd czynny.



Rys. 6. Wartości granicznych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń napięciowych w zależności od składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego

Fig. 6. Boundary values of the fault resistance according to the relative starting voltage for voltage protections

Ocenę możliwości wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenie kierunkowe można przeprowadzić najprościej opierając się na strefach granicznych wyznaczonych wyżej dla sieci o danych parametrach, przyjmując określony próg prądowy i napięciowy zabezpieczenia. Przykładowe obszary rezystancji przejścia dla zabezpieczenia kierunkowego o progu napięciowym $k_u=0,1$ i dwóch wartościach progu prądowego $I_r=2$ A i $I_r=8$ A pokazano na rys.8. Przy niższej wartości progu prądowego – jak widać z rysunku – obszar rezystancji przejścia jest ograniczony progiem napięciowym w znacznie szerszym przedziale wartości wymuszanego prądu czynnego, niż przy progu prądowym o wyższej wartości. Widać więc, że zastosowanie zabezpieczeń kierunkowych wyraźnie powoduje ograniczenie obszaru wykrywania zwarć rezystancyjnych.



Rys. 7. Wartości granicznych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń napięciowych w zależności od względnego napięcia rozruchowego

Fig. 7. Boundary values of the fault resistance according to the relative starting voltage for voltage protections

5. WNIOSKI

Obszar wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe (prądowe, napięciowe lub kierunowe) w sieciach o uziemionym przez rezystor punkcie gwiazdowym można wyznaczyć korzystając z zależności (11) lub (12) i (15) lub (16), podanych w niniejszym artykule. Zamieszczone przykładowo wykresy zmienności granicznej rezystancji przejścia i wnioski szczegółowe zawarte w p.3 i 4, dotyczą sieci o napięciu znamionowym 6 kV. Przy ocenie możliwości wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenia



Rys. 8. Obszar rezystancji przejścia dla zabezpieczeń kierunkowych Fig. 8. The range of the fault resistance for directional protections

ziemnozwarciowe w sieciach o napięciu znamionowym $U_{nx} \neq 6$ kV można posługiwać się charakterystykami z rys.2+8, mnożąc wartości rezystancji R_k przez U_{nx} /6. Z przeprowadzonej analizy wynika, że rezystancja graniczna w sieci o danym prądzie pojemnościowym zależy od wymuszanego prądu czynnego oraz progu rozruchowego zabezpieczenia. Dla zabezpieczeń nadprądowych maleje ona silnie wraz ze wzrostem prądu rozruchowego. W sieciach o niewielkich prądach pojemnościowych (do ok.40 A) rezystancja graniczna zależy praktycznie tylko od prądu rozruchowego. Przy wymuszanych prądach czynnych o wartościach większych od 100 A, obszar wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenia nadprądowe jest już prawie niezależny od wartości tego prądu. Dla zabezpieczeń napięciowych rezystancja graniczna silnie maleje ze wzrostem wymuszanego prądu czynnego tylko dla niewielkich wartości tego prądu (do ok.100 A). Dalsze zwiększenie wymuszanego prądu czynnego nie wpływa już na zmianęrezystancji granicznej. Wzrost napięciowego progu rozruchowego powoduje również wyrażne zmniejszenie rezystancji granicznej. Przy stosowaniu zabczpieczeń kierunkowych należy się liczyć z poważnym ograniczeniem obszaru wykrywania zwarć rezystancyjnych w porównaniu z zabczpieczeniami nadprądowymi. Czynnikiem wpływającym na to ograniczenie jest napięciowy próg rozruchowy.

LITERATURA

- [1] Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Automatyczna regulacja kompensacji ziemnozwarciowej w przemysłowych sieciach kablowych 6 kV. Mat. IV Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt. Aktualne problemy automatyki w energetyce, Gliwice 1985, t. B, s.180.
- [2] Sauczek M.: Wykrywanie doziemień rezystancyjnych w sieciach przemysłowych 6 kV z kompensacją ziemnozwarciową. Mat. V Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt. Aktualne problemy automatyki w energetyce, Gliwice 1989, t. II, s.250.
- [3] Lawera E., Mikrut M., Pilch Z.: Wpływ niektórych czynników na poprawność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych zerowo-mocowych w sieciach skompensowanych. ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z. 299, Gliwice 1971, s.261.
- [4] Synal B.: Niskoomowe uziemienie punktu gwiazdowego kablowych sieci średnich napięć - problematyka zabezpieczeniowa. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol.Wroci., nr 8, 1972.
- [5] Synal B.: Porównanie sposobów uziemienia punktu zerowego sieci SN. Biuletyn Elektroprojektu, 1983.

Recenzent : prof dr hab.inż. Tadeusz ŁOBOS Wpłynęło do redakcji dnia 27 stycznia 1992 r. RESISTANCE PHASE-TO-EARTH FAULT DETECTION IN MV NETWORKS WITH THE NEUTRAL RESISTANCE GROUNDING

Abstract

The derivation of formulas concerned with the boundary resistance, starting from the basic relationships of the input quantities, is done. The boundary resistance in the place of fault, when the overcurrent protection operate is still possible, can be determined by the relationships (11) or (12). For the overvoltage protections this resistance is determined by the relationships (15) or (16). Above mentioned equations also make possible determination of resistance fault detection range by the directional protections.

The depedences of the boundary resistance for overcurrent earth protections are shown on the Figs. 2,3 and 4, whereas for overvoltage protections on the Figs. 5,6 and 7. The fault resistance areas for the directional protections having various discrimination current *hresholds $(I_r=2A \text{ and } I_r=8A)$ and one discrimination voltage threshold $(k_u=0,1)$. The graphs of the boundary fault resistance deal with rated $U_n=6kV$ voltage networks. It is also possible to use this graphs to estimate possibility of the resistance fault detections when the rated voltage is different multiplying values of the resistance R by $U_n / 6kV$.