

Marian MIKRUT, Zygmunt PILCH, Marian SAUCZEK

IDENTYFIKACJA I ELIMINACJA ZWARĆ JEDNOFAZOWYCH Z ZIEMIĄ W SIECIACH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Streszczenie. W artykule przedstawiono najistotniejsze problemy związane z efektywnością działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć. Rozpatrzono m. in. możliwości wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenia wykorzystujące różne kryteria decyzyjne (nadprądowe, kierunkowe, admitancyjne) oraz wrażliwość tych zabezpieczeń na wyższe harmoniczne w przebiegach ziemnozwarciowych. Ustosunkowano się do nowych, produkowanych w technice mikroprocesorowej, zabezpieczeń ziemnozwarciowych w aspekcie możliwości zwiększenia skuteczności wykrywania jednofazowych zwarć rezystancyjnych.

IDENTIFICATION AND ELIMINATION OF EARTH-FAULTS IN MEDIUM-VOLTAGE NETWORKS

Summary. The most substantial problems connected with earth-fault protection system operation effectiveness in MV networks are presented in the paper. Among others possibility of resistive earth faults detection by protection systems based upon different decision criteria (overcurrent, directional and admittance criteria) as well as sensitivity of these systems to higher harmonics in earth-fault transients have been considered. An attitude towards new earth-fault protection performed in microprocessor technique from the point of view of single-phase resistive fault detection has also been assumed.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się duże zainteresowanie problematyką ziemnozwarciową, a w szczególności zagadnieniami związanymi z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi w sieciach średnich napięć. Dzieje się tak dlatego, ponieważ wymagania stawiane sieciom rozdzielczym z punktu widzenia ciągłości dostawy energii elektrycznej do odbiorców wzrastają, a niezawodność i selektywność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych są nadal niezadowalające, mimo znacznych postępów w konstrukcji zabezpieczeń.

Powodów tego niesłabnącego zainteresowania, szczególnie wśród polskich elektroenergetyków, należy się doszukiwać także w różnorodności sposobów pracy punktu neutralnego sieci średnich napięć w krajowej elektroenergetyce. Jest oczywiste, że zwarć jednofazowych z ziemią uniknąć się nie da, niezależnie od stosowanego rozwiązania sieci, ale jest też oczywiste, iż właśnie od sposobu pracy punktu neutralnego sieci zależy prostota czy też złożoność metod ich wykrywania.

2. SPOSOBY PRACY PUNKTU NEUTRALNEGO SIECI ŚREDNICH NAPIĘĆ

Cechami charakterystycznymi krajowych sieci średnich napięć (SN) są występowanie kilku poziomów napięć znamionowych (6, 10, 15, 20, 30 kV) oraz duża różnorodność sposobów pracy punktu neutralnego. O ile ta pierwsza cecha nie wpływa bezpośrednio na rozwiązania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych, o tyle sposób pracy punktu neutralnego posiada w tym względzie znaczenie decydujące.

W polskiej elektroenergetyce zawodowej, a także w zakładach przemysłowych, sieci średnich napięć pracują:

- z punktem neutralnym izolowanym,
- z punktem neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny (tzw. sieci kompensowane) oraz
- z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

Dominujący udział mają sieci z punktem neutralnym izolowanym lub uziemionym przez dławik kompensacyjny, przy czym te drugie stanowią ponad 70% [3, 16] wszystkich sieci średnich napięć. Z punktem neutralnym izolowanym pracują przede wszystkim sieci rozdzielcze 6 kV w kopalniach węgla kamiennego oraz mało rozległe sieci komunalne o napięciu 6 kV i 15 kV.

Uziemienie punktu neutralnego przez dławik, czyli stosowanie kompensacji ziemnozwarciowej, ma, oprócz pozytywnych cech (ograniczenie składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego, gaszenie większości zwarć z ziemią), także cechy negatywne związane z niezawodnym i selektywnym wykrywaniem zwarć doziemnych. Trudności te pokonywane są m. in. przez stosowanie układów do krótkotrwałego wymuszania składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego na czas działania zabezpieczeń (tzw. automatyki wymuszania składowej czynnej AWSC), bądź - w mniejszym zakresie - przez krótkotrwałe odłączenie dławika kompensacyjnego, czyli tzw. dekompensację. W celu uzyskania pełnych efektów kompensacji ziemnozwarciowej (chodzi głównie o samolikwidację zwarć przemijających) w niektórych sieciach przemysłowych wprowadzono automatyczną regulację tej kompensacji [3, 7, 10].

W latach osiemdziesiątych zaczęto wprowadzać trwałe uziemienie punktu neutralnego przez rezystor. Sieci o takim sposobie pracy punktu neutralnego pracują już w kilku zakładach energetycznych oraz w niektórych zakładach przemysłowych [6, 12, 14]. W zależności

od wykonania i przeznaczenia sieci średnich napięć stosuje się różne wartości rezystancji rezystora wymuszającego, a więc i różne wartości wymuszanej składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego. W sieciach napowietrznych wartości tego prądu zawierają się w przedziale od 20 A do 160 A, natomiast w sieciach kablowych nie przekraczają wartości 500 A [12]. Zasadę uziemiania punktu neutralnego przez rezystor preferuje się głównie dla nowo budowanych bądź modernizowanych kablowych sieci miejskich 15 kV i 20 kV. Ocenia się, że obecnie kilka procent krajowych sieci średnich napięć pracuje z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym [16]. Czynnikiem mogącym mieć wpływ na rozpowszechnienie uziemienia punktu neutralnego przez rezystor, także w sieciach kablowo–napowietrznych i napowietrznych, jest zauważalna zmiana poglądu w sprawie możliwości pracy sieci średnich napięć z doziemioną jedną fazą. Wśród fachowców ugruntowuje się bowiem przekonanie, że niezależnie od sposobu pracy punktu neutralnego i wartości prądu ziemnozwarciowego każde zwarcie doziemne powinno być wyłączone w czasie możliwie krótkim. Taka koncepcja wymaga jednak stosowania pewnych w działaniu i selektywnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, w przeciwnym razie jej realizacja nie przyczyni się do zwiększenia niezawodności zasilania odbiorców.

3. RODZAJE ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH I ICH WIELKOŚCI WEJŚCIOWE

Różnorodność sposobów pracy punktu neutralnego sieci średnich napięć, wykonanie i konfiguracja sieci oraz warunki eksploatacyjne zdecydowały o stosowaniu wielu różnych kryteriów wykrywania zwarcí jednofazowych z ziemią. Zabezpieczenia realizowane w oparciu o te kryteria można podzielić na:

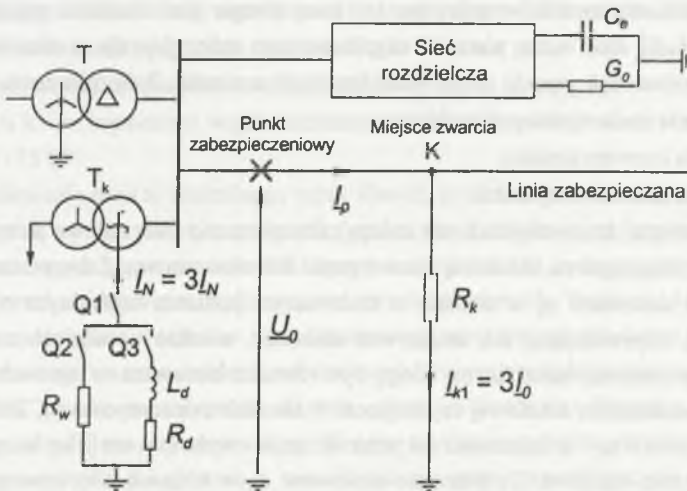
- rozwiązania konwencjonalne,
- rozwiązania niekonwencjonalne.

Do rozwiązań konwencjonalnych należą zabezpieczenia nadprądowe zerowe i kierunkowe zerowe, reagujące na składową zerową prądu lub moc zerową. Zabezpieczenia nadprądowe zerowe stosowane są w sieciach z izolowanym punktem neutralnym o konfiguracji promieniowej, zapewniającej ich selektywne działanie, a także w sieciach z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym. Mogą być również stosowane w sieciach kompensowanych z wymuszaniem składowej czynnej oraz w sieciach z dekompensacją. Zabezpieczenia kierunkowe zerowe są - w zależności od przeznaczenia - wykonywane jako bierno–mocowe, bądź jako czynno–mocowe. Te pierwsze stosowane są w sieciach z izolowanym punktem neutralnym i w sieciach z dekompensacją, te drugie natomiast w sieciach kompensowanych z AWSC i w sieciach o uziemionym przez rezystor punkcie neutralnym.

Rozwiązania niekonwencjonalne, do których należą zabezpieczenia ziemnozwarciowe wykorzystujące różne zjawiska (ustalone i nieustalone) towarzyszące zwarciom doziemnym,

są na razie mało rozpowszechnione, ale niektóre z nich stanowią dobrą konkurencję dla zabezpieczeń konwencjonalnych. Spośród niekonwencjonalnych rozwiązań, reagujących na ustalone wartości wielkości ziemnozwarciowych, nieźle wyniki eksploatacyjne uzyskały już zabezpieczenia porównawczo-prądowe, porównujące amplitudy lub kierunki przepływu prądu ziemnozwarciowego w poszczególnych odplywach, stosowane w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, oraz coraz powszechniej wprowadzane zabezpieczenia admitancyjne, przeznaczone głównie dla sieci kompensowanych z wymuszaniem składowej czynnej. Istnieją również rozwiązania wariantowe wykorzystujące zawartość wyższych harmonicznnych w prądzie ziemnozwarciowym, tj. reagujące na wartość skuteczną sumy prądów wyższych harmonicznnych lub porównujące wartość sumy prądów wyższych harmonicznnych w poszczególnych odplywach. Do rozwiązań niekonwencjonalnych należą również zabezpieczenia wykorzystujące przejściowe przebiegi ziemnozwarciowe, tj. działające pod wpływem przeciwnej biegunowości pierwszych amplitud prądu nieustalonego w linii z doziemieniem i w liniach nieuszkodzonych. Interesującą propozycją dla sieci pracujących z punktem neutralnym uzziemionym przez rezystor jest zabezpieczenie nadprądowe napięciowo-zależne, będące w istocie prostym członem odległościowym i reagujące na ustalone wartości składowych zerowych prądu i napięcia [8].

Do analizy warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średniego napięcia można przyjąć sieć modelową, której schemat pokazano na rys. 1. Sposób pracy punktu neutralnego sieci rzeczywistej odwzorowany jest tu przez odpowiednie położenie łączników Q1, Q2 i Q3.



Rys. 1. Schemat zastępczy sieci średniego napięcia z wydrebnioną linią promieniową ze zwarcieziemnym

Fig. 1. MV network equivalent diagram with marked radial line in which ground fault occurs

W ogólnym przypadku, niezależnie od sposobu pracy punktu neutralnego, prąd ziemnozwarciowy wyraża się zależnością

$$\underline{I}_{k1} = 3 \underline{I}_0 = \frac{\underline{Y} \underline{U}_f}{1 + R_k \underline{Y}} \quad (1)$$

w której: $\underline{Y} = \underline{Y}_N + \underline{Y}_0$ - admitancja sumaryczna sieci względem ziemi, będąca sumą admitancji uziemienia punktu neutralnego i admitancji sieci dla składowej zerowej, R_k - rezystancja przejścia w miejscu zwarcia, \underline{U}_f - napięcie fazowe źródłowe.

Składowa zerowa napięcia przy zwarciu jednofazowym określona jest natomiast wzorem

$$\underline{U}_0 = - \frac{\underline{U}_f}{1 + R_k \underline{Y}} \quad (2)$$

Dla różnych sposobów pracy punktu neutralnego sieci admitancja sumaryczna \underline{Y} po odpowiednich uproszczeniach, opisana jest zależnościami:

- sieć o izolowanym punkcie neutralnym ($\underline{Y}_N = 0$, $G_0 \cong 0$).

$$\underline{Y} = \underline{Y}_0 = j3\omega C_0 \quad (3)$$

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny

$$\underline{Y} = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + 3G_0 - j3s\omega C_0 \quad (4)$$

gdzie $s = (I_L - I_C)/I_C$ jest współczynnikiem rozstrojenia kompensacji, przy czym $I_C = 3\omega C_0 U_f$, natomiast $I_L = U_f / \omega L_d$;

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny zbocznikowany rezystorem ($R_d \ll \omega L_d$)

$$\underline{Y} = \frac{R_d}{\omega^2 L_d^2} + \frac{1}{R_w} - j3s\omega C_0 \quad (5)$$

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor ($G_0 \ll \omega C_0$)

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_w} + j3\omega C_0 \quad (6)$$

Jedną z wielkości wejściowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych może być składowa zerowa napięcia określona wzorem (2), drugą - składowa zerowa prądu na początku linii doziemionej \underline{I}_p . Wartość prądu \underline{I}_p w punkcie zabezpieczeniowym zależy oczywiście od admitancji sieci \underline{Y} , charakteru zwarcia (bezzystancyjne, rezystancyjne) oraz miejsca zwarcia w linii. Wprowadzając współczynnik lokalizacji zabezpieczenia α ($0 \leq \alpha \leq 1$), określający udział admitancji zabezpieczanej linii w admitancji całej sieci galwanicznie połączonej, prąd \underline{I}_p w sieciach o różnych sposobach pracy punktu neutralnego można określać z poniższych zależności:

- sieć o izolowanym punkcie neutralnym

$$\underline{I}_p = \underline{U}_f \frac{j(1-\alpha)I_C}{U_f + jR_k I_C} \quad (7)$$

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny

$$\underline{I}_p = \underline{U}_f \frac{-j(\alpha+s)I_C}{U_f + jsR_k I_C} \quad (8)$$

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny z bocznikowany rezystorem

$$\underline{I}_p = \underline{U}_f \frac{I_R - j(\alpha+s)I_C}{(U_f + R_k I_R) - jsR_k I_C} \quad (9)$$

gdzie $I_R = U_f / R_w$ jest wymuszonym prądem czynnym;

- sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor

$$\underline{I}_p = \underline{U}_f \frac{I_R + j(1-\alpha)I_C}{(U_f + R_k I_R) + jR_k I_C} \quad (10)$$

Zależność (2), z uwzględnieniem (3)÷(6), opisująca składową zerową napięcia oraz zależności (7)÷(10) określające prąd ziemnozwarciowy w punkcie zabezpieczeniowym umożliwiają przeprowadzenie analizy warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, których kryteria oparte są na ustalonych przebiegach ziemnozwarciowych.

4. PROBLEMY EFEKTYWNOŚCI DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH

W badaniach efektywności działania zabezpieczeń, w tym i zabezpieczeń ziemnozwarciowych, można wyróżnić trzy zasadnicze grupy przyczyn błędnego ich zachowania się podczas zwarc:

- niedostateczne rozpoznanie zjawisk towarzyszących zwarciom w sieciach rzeczywistych, a w rezultacie inne (ilościowo i jakościowo) wielkości wejściowe od przyjmowanych na etapie projektowania zabezpieczeń;
- niewłaściwy dobór zabezpieczeń do warunków pracy sieci (np. dobór nieodpowiedniego rodzaju zabezpieczenia lub niewłaściwego progu rozruchowego);
- niezadowolająca jakość zabezpieczenia oraz błędy montażowe.

Dwie pierwsze przyczyny - jak wykazano np. w [3, 7] - stanowią znaczący udział nieprawidłowego zachowania się zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Jednym z częściej zdarzających się powodów niedziałania zabezpieczeń jest ich mała wrażliwość na zwarcia rezystancyjne. Ten problem autorzy niniejszego artykułu starali się

wyjaśnić w cyklu publikacji [8, 9, 10], z których wynika, że podstawową przyczyną małej wrażliwości zabezpieczeń na zwarcia rezystancyjne są ich progi rozruchowe, prądowy lub napięciowy, w zależności od rodzaju zabezpieczenia.

Wpływ progu rozruchowego na obejmowanie zwarcí rezystancyjnych można ocenić wyznaczając tzw. rezystancję graniczną dla danego rodzaju zabezpieczenia. Jeśli np. przyjmą, że próg rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego zerowego wynosi I_r , to graniczną rezystancję przejścia R_{kg} w sieci o uziemionym przez rezystor punkcie neutralnym można wyznaczyć przyjmując we wzorze (1) $\left| \underline{I}_p \right| = I_r$. Po rozwiązaniu tej równości otrzymuje się:

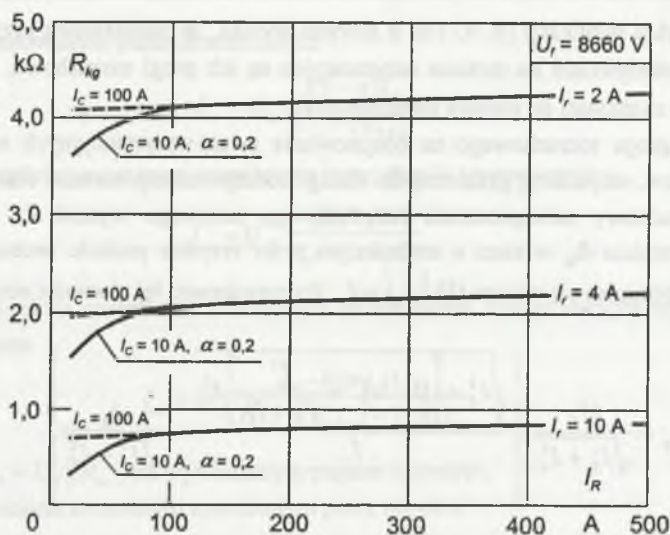
$$R_{kg} = \frac{U_f}{\sqrt{I_R^2 + I_C^2}} \left\{ \frac{\sqrt{I_R^2 + \left[(1-\alpha)^2 - \frac{I_r^2}{I_R^2 + I_C^2} \right] I_C^2}}{I_r} - \frac{I_R}{\sqrt{I_R^2 + I_C^2}} \right\} \quad (11)$$

Jest to wprawdzie dość złożona zależność, ale jeśli uwzględnić, że w sieci takiej wymuszany prąd czynny spełnia nierówność $I_r > I_C$, otrzymuje się uproszczoną postać:

$$R_{kg} \cong U_f \left(\frac{1}{I_r} - \frac{1}{I_R} \right) \quad (12)$$

Z przeprowadzonych szczegółowych analiz, których wyniki opublikowano w [8], wynika np., że w sieciach o niewielkich prądach pojemnościowych (do ok. 40 A) graniczna rezystancja przejścia R_{kg} zależy praktycznie tylko od progu rozruchowego zabezpieczenia nadprądowego zerowego. Przy wymuszanych prądach czynnych o wartościach większych od 100 A obszar wykrywanych zwarcí rezystancyjnych przez zabezpieczenia nadprądowe jest już prawie niezależny od wartości tego prądu. Ilustruje to pokazany na rys. 2 wykres zależności granicznej rezystancji przejścia w funkcji wymuszanego prądu czynnego (sporządzony dla sieci o napięciu znamionowym 15 kV). Z rysunku tego wynika ponadto, że zabezpieczenia nadprądowe o dużych wartościach prądowego progu rozruchowego ($I_r \geq 10$ A) mogą działać tylko podczas doziemień rezystancyjnych, charakteryzujących się relatywnie małymi wartościami rezystancji przejścia. Niewielki wpływ na wykrywanie zwarcí rezystancyjnych ma w takich przypadkach wartość wymuszanego prądu czynnego.

Zabezpieczenia ziemnozwarciowe kierunkowe i admitancyjne posiadają podobne właściwości pod względem wrażliwości na wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, a mianowicie zarówno admitancja dla składowej zerowej (na którą rąguje zabezpieczenie admitancyjne), jak i argument tej admitancji (na który reaguje zabezpieczenie kierunkowe) w punkcie zabezpieczeniowym nie zależą od tej rezystancji [10]. Teoretycznie rzecz ujmując, zabezpieczenia te mogą zatem wykrywać zwarcia doziemne o dowolnie dużej wartości rezystancji przejścia. Jest jednak oczywiste, że zabezpieczenia kierunkowe i admitancyjne mogą



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

Fig. 2. Limit values of the transient resistance for the ground fault overcurrent protection depending on a forced active current component of the neutral current

działać tylko wtedy, gdy składowa zerowa napięcia posiada wartość większą od ich napięciowego progu rozruchowego. Musi więc być spełniony warunek

$$U_o = \left| -\frac{U_f}{1 + R_k Y} \right| \geq k_r U_f \quad (13)$$

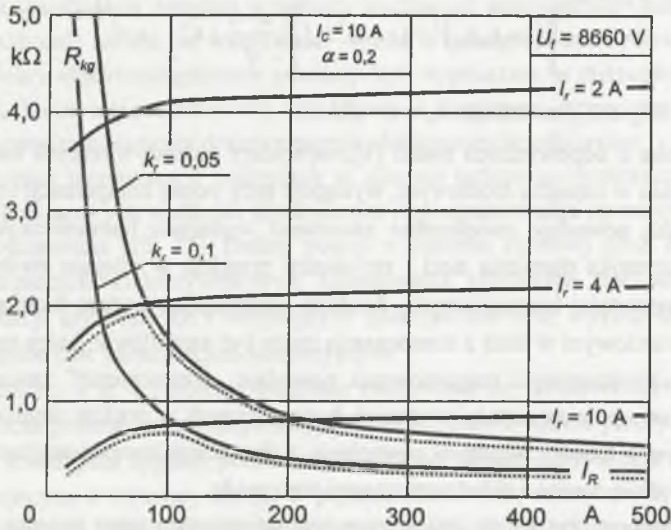
w którym $k_r = U_o / U_f$ jest tzw. napięciowym współczynnikiem rozruchowym, równym stosunkowi napięciowego progu rozruchowego zabezpieczenia do napięcia fazowego sieci.

W oparciu o warunek (13) można wyznaczyć wartość graniczną rezystancji przejścia w miejscu doziemienia, przy której następuje kres działania zabezpieczenia kierunkowego lub admitancyjnego, z uwagi na ich napięciowy próg rozruchowy. Przykładowo, w sieci z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym, dla której $I_R > I_C$, wartość granicznej rezystancji w przybliżeniu określa zależność

$$R_{kg} \cong \frac{U_f}{I_R} \left(\frac{1}{k_r} - 1 \right) \quad (14)$$

Ocenę możliwości wykrywania zwarc rezystancyjnych przez zabezpieczenia kierunkowe czy admitancyjne można najprościej przeprowadzić w sposób graficzny, wyznaczając strefy graniczne dla określonych progów rozruchowych: napięciowego i prądowego, jak to pokazano na rys. 3. Z rysunku, sporządzonego podobnie jak rys. 2 dla sieci o napięciu

znamionowym 15 kV, wynika, że omawiane zabezpieczenia mogą wykryć graniczną wartość rezystancji przejścia tylko w sieci o określonej wartości wymuszanego prądu czynnego. Dla sieci, w których wartość prądu czynnego będzie większa od wartości optymalnej dla rozpatrywanego zabezpieczenia, obszar wykrywanych rezystancji przejścia ograniczony będzie napięciowym progiem rozruchowym, a dla sieci z prądem wymuszonym o wartości mniejszej od wartości optymalnej - prądowym progiem rozruchowym.



Rys. 3. Obszar wykrywanych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń kierunkowych i admitancyjnych o różnych prądowych i napięciowych progach rozruchowych

Fig. 3. Area of the transient resistance for directional and admittance ground fault protection for different current and voltage threshold values

Przebiegi napięć i prądów w normalnych warunkach pracy sieci SN nie są przebiegami czysto sinusoidalnymi, lecz oprócz harmonicznej podstawowej zawierają także wyższe harmoniczne różnych rzędów. Ich źródłem są przede wszystkim odbiorniki nieliniowe, co szczególnie ma miejsce w sieciach przemysłowych. Ponadto, jak wykazano w [9], dodatkowym źródłem generującym wyższe harmoniczne są niektóre elementy sieci. Występowanie wyższych harmonicznych w przebiegach ziemnozwarciowych jest w dużej mierze uzależnione od sposobu pracy punktu neutralnego sieci. Siecią najbardziej podatną na pojawianie się wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym jest sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny. W takiej sieci poziom wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym jest złożoną funkcją wielu czynników, takich jak: zawartość harmonicznych w napięciu źródłowym ($m_v = E_v/E_1$), współczynnik tłumienia sieci ($k_d = G_o/\omega C_o$), współczynnik rozstrojenia kompensacji s , dobroć dławika kompensacyj-

nego ($q = \omega L_d / R_d$) i rezystancja przejścia w miejscu zwarcia. A zatem, jeśli zawartość ν -tej harmonicznej w napięciu źródłowym wynosi m_ν , wówczas zawartość tej harmonicznej w prądzie ziemnozwarciowym w stosunku do harmonicznej podstawowej składowej pojemnościowej prądu ziemnozwarciowego określa zależność:

$$I_{k\nu}^* = m_\nu \sqrt{\frac{(k_d^2 + k_\nu^2) \left[1 + k_R \left(\frac{s-1}{q} + k_d \right)^2 + s k_R^2 \right]}{\left((1 + k_R k_d)^2 + (s-1)^2 k_\nu^2 \right) \left[\left(\frac{s-1}{q} + k_d \right)^2 + s^2 \right]}} \quad (15)$$

w której: $k_R = 3R_k \omega C_0$, natomiast $k_\nu = \nu - s/\nu$.

Jak wynika z odpowiednich badań [9], najwyższy poziom wyższych harmonicznych, przy ich istnieniu w napięciu źródłowym, występuje przy pełnej kompensacji ($s = 0$). Wzrost dobroci dławika powoduje zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych, natomiast wzrost współczynnika tłumienia sieci i rezystancji przejścia w miejscu zwarcia powoduje ograniczenie zawartości harmonicznych. Źródłem generującym wyższe harmoniczne w prądzie ziemnozwarciowym w sieci z kompensacją może być sam dławik, który przy określonej nieliniowości charakterystyki magnesowania powoduje „wzmocnienie” zawartości harmonicznych. Ograniczenie zawartości wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym powoduje rezystor liniowy włączony równolegle z dławikiem kompensacyjnym dla wymuszania odpowiedniej wartości składowej czynnej tego prądu.

Sieci o punkcie neutralnym izolowanym oraz uzziemionym przez rezystor nie zawierają elementów dodatkowo generujących wyższe harmoniczne. Jediną przyczyną występowania wyższych harmonicznych jest nieliniowa rezystancja przejścia w miejscu zwarcia przy doziemieniach o charakterze łukowym. Interesującym spostrzeżeniem jest fakt, że w sieci o izolowanym punkcie neutralnym zawartość wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym przy zwarcu bezpośrednim jest zawsze większa niż przy zwarcu rezystancyjnym.

Odkształcenie wielkości wejściowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych wskutek zawartości wyższych harmonicznych może być powodem błędnego ich działania, ale może też być wykorzystane jako kryterium wykrywania zwarcć doziemnych. Takie niekonwencjonalne rozwiązanie zabezpieczeń nadaje się szczególnie dla sieci o punkcie neutralnym uzziemionym przez dławik kompensacyjny. Poziom wyższych harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w takiej sieci można zwiększyć włączając równolegle z dławikiem kompensacyjnym nieliniowy rezystor bocznikujący [9].

5. TENDENCJE ROZWOJOWE W AUTOMATYCE ELIMINUJĄCEJ ZWARCIA DOZIEMNE

Podobnie jak w całej elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej (EAZ), również w automatyce od zwarć doziemnych wdrażane są powszechnie zabezpieczenia mikroprocesorowe. Rozwój EAZ koncentruje się na rozwiązaniach mikroprocesorowych z uwagi na ich bardzo dobre właściwości użytkowe wraz ze wszystkimi korzyściami informatycznymi oraz dużą niezawodnością osiąganą w wyniku możliwości samokontroli i autotestowania [2, 11, 13, 15]. Obecnie nie ma już wątpliwości - mimo iż zabezpieczenia cyfrowe nie są tanie - że nowe obiekty elektroenergetyczne powinny być wyposażane w mikroprocesorowe urządzenia EAZ, które mają możliwości współpracy z systemem sterowania i nadzoru, co zapewnia poprawienie ciągłości dostawy energii elektrycznej do odbiorców.

Zagadnienia teoretyczne i praktyczne w zakresie cyfrowego przetwarzania sygnałów, algorytmów pomiarowych wielkości kryterialnych i oprogramowania operacyjnego uznaje się obecnie za opanowane [15, 17]. Dalszy postęp w zakresie cyfrowej EAZ dotyczy między innymi zabezpieczeń wielokryterialnych, zastosowania sztucznych sieci neuronowych do realizacji funkcji kryterialnych i decyzyjnych zabezpieczeń oraz wykorzystania systemów ekspertowych dla tzw. zabezpieczeń adaptacyjnych.

Wymienione w p. 4 problemy błędnego zachowania się zabezpieczeń ziemnozwarciowych, zwłaszcza podczas zwarć rezystancyjnych oraz zwarć z łukiem przerywanym, którym to zwarciom towarzyszą sygnały pomiarowe obciążone harmonicznymi oraz udarami prądowymi wynikającymi z wymiany energii w pojemnościach linii, zainspirowały konstruktorów mikroprocesorowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych do ich odfiltrowania i użycia dla tworzenia algorytmów decyzyjnych tylko pierwszych harmonicznymi składowych zerowych prądu i napięcia [2, 11, 18].

Zastosowanie dla celów pomiarowych dwuetapowej filtracji analogowej i cyfrowej (numerycznej), przy zastosowaniu procesorów sygnałowych, pozwala na precyzyjne wyznaczenie wartości kryterialnych składowych podstawowych sygnałów pomiarowych [2, 11]. W oparciu o te sygnały w zabezpieczeniach mikroprocesorowych stosuje się tradycyjne kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, a mianowicie nadprądowe, kierunkowe oraz admitancyjne [2, 4, 11]. Kryteria te mogą być dowolnie łączone. Skuteczna, analogowo-cyfrowa eliminacja zakłóceń z sygnałów pomiarowych pozwala na skuteczniejsze działanie tych zabezpieczeń w przypadkach zwarć wysokorezystancyjnych i łukowych. Dotyczy to zwłaszcza zabezpieczeń kierunkowych i admitancyjnych, dla których istnieje możliwość ustawienia niskiego napięciowego progu rozruchowego już od 5 V, co istotnie zwiększa zakres wykrywanych doziemień rezystancyjnych, szczególnie w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor (por. rys. 3). W sieciach z automatyką AWSC podczas zwarć wysokorezystancyjnych napięcie składowej zerowej podczas wymuszania prądu może obniżyć się poniżej 5 V; wówczas w celu wykrycia miejsca doziemienia możliwe jest zastosowanie dekompensacji sieci i wykorzystanie uaktywnionego kryterium admitancyjnego. Widać

więc, że wykorzystanie techniki mikroprocesorowej i metod numerycznych przetwarzania sygnałów pozwala efektywniej wykrywać zwarcia doziemne w sieciach, niezależnie od sposobu pracy ich punktu neutralnego. Uwzględniając ponadto ich funkcję diagnostyczno-informacyjną dla zjawisk występujących w zabezpieczanych sieciach są one - mimo nie najniższej ceny - coraz powszechniej wprowadzane do eksploatacji [11].

Dla sieci o izolowanym punkcie neutralnym wprowadzane są również zbiorcze zabezpieczenia ziemnozwarciowe [13], których zasada działania oparta jest na porównywaniu prądów we wszystkich polach chronionej rozdzielni i wybieraniu pola z prądem o największej wartości. Zaletą zabezpieczenia jest to, że nie wymaga ono nastawiania wartości rozruchowej i posiada wysoką czułość. Może być np. stosowane w rozdzielniach potrzeb własnych bloków energetycznych, gdzie prądy ziemnozwarciowe są niewielkie. Wadą tego rozwiązania jest wymagana minimalna liczba pól rozdzielni nie mniejsza od trzech, jak również ograniczona dokładność pomiarów prądów doziemnych do ok. 10% sumarycznego prądu ziemnozwarciowego sieci. W celu usunięcia tych wad i ograniczeń opracowano mikroprocesorowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe [13], dla którego kryterium lokalizowania linii doziemionej oparto na stwierdzonym fakcie, że prądy w poszczególnych liniach są pochodnymi napięcia zerowego, uzależnionymi od wartości pojemności doziemnej danej linii. Mając do dyspozycji te sygnały o zbliżonym kształcie, dokonuje się ich porównania. W zależności od tego czy porównania dokonuje się dla linii doziemionej czy też nieuszkodzonej, przebiegi sygnałów są ze sobą w fazie lub przeciwfazie. Praktycznie dokonywany jest pomiar kierunku przepływu prądu w każdym chronionym polu względem napięcia składowej zerowej występującej podczas doziemienia.

Innym eksperymentalnym rozwiązaniem opracowanym w 1995 r. [17, 19] są stałoprądowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe dla sieci kompensowanych pracujących z automatyką AWSC. System tych zabezpieczeń wymaga galwanicznego odizolowania sieci od ziemi, wprowadzenia między punkt neutralny sieci a ziemię źródła napięcia stałego oraz wyposażenia wszystkich odpływów, które mają być selektywnie wyłączone przy doziemieniach, w przekładniki prądowe przenoszące składową stałą prądu oraz przekaźniki reagujące na tę składową. Wadą tego rozwiązania zabezpieczeń ziemnozwarciowych wydają się być dość duże koszty, które należy ponieść celem adaptacji sieci do ich zastosowania, choć w przypadku konieczności przeprowadzenia z innych powodów niezbędnej modernizacji sieci mogą być znacznie obniżone.

Innym eksperymentalnym rozwiązaniem zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla sieci kompensowanych z automatyką AWSC są zabezpieczenia oparte na pomiarze impulsowych zmian prądu kolejności zerowej, wywołanych cyklicznym załączaniem rezystora wymuszającego [1, 5]. W wyniku badań eksperymentalnych ustalono proste kryterium wykrywania linii z doziemieniem w oparciu o to, że załączenie rezystora wymuszającego powoduje dodatnie przyrosty prądu kolejności zerowej dla linii ze zwarcie oraz ujemne przyrosty tego prądu w liniach nieuszkodzonych.

6. WNIOSKI

1. Możliwość wykrywania zwarć rezystancyjnych przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe najprościej można ocenić na podstawie rezystancji granicznej, której wartość zależy od rodzaju zabezpieczenia i jego progu rozruchowego. Dla zabezpieczeń nadprądowych zero-owych wartość tej rezystancji można obliczyć korzystając z podanej w niniejszym artykule przybliżonej zależności (12). Dla zabezpieczeń dwujeściowych (kierunkowych lub admitancyjnych) ocenę możliwości wykrywania zwarć rezystancyjnych wygodniej jest przeprowadzić w sposób graficzny, pokazany na rys. 3.

2. Odształcenie przebiegów wielkości wejściowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych wskutek zawartości wyższych harmonicznnych może być powodem błędnego działania zabezpieczeń. Siecią najbardziej podatną na pojawienie się wyższych harmonicznnych jest sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny.

3. Produkowane w ostatnich latach zabezpieczenia mikroprocesorowe są praktycznie niewrażliwe na wyższe harmoniczne w przebiegach wielkości ziemnozwarciowych dzięki temu, że algorytmy decyzyjne wykorzystują tylko harmoniczną podstawową. Ponadto zabezpieczenia mikroprocesorowe, szczególnie te, które w algorytmach realizują kryterium kierunkowe lub admitancyjne, charakteryzują się znacznie lepszą skutecznością wykrywania zwarć rezystancyjnych.

LITERATURA

1. Cieślęwicz K.: Zdalna lokalizacja zwarć w rozgałęzionych sieciach elektroenergetycznych spełniająca funkcję zabezpieczenia. *Archiwum Energetyki* nr 3–4, 1987, s. 211–226.
2. Juszczak A.: Systemy zabezpieczeń a problematyka ziemnozwarciowa. *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej* nr 89, Wrocław 1997, s. 21–24.
3. Kowalski J.: Możliwości eliminowania błędnych działań zabezpieczeń ziemnozwarciowych kierunkowych czynnomocowych w kompensowanych sieciach SN. *Energetyka* nr 4, 1995, s. 146–149.
4. Lorenc J.: Admitancyjne kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. *Automatyka Elektroenergetyczna* nr 2, 1994, s. 6–8.
5. Marciniak L.: Wykrywanie oporowych zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć na podstawie pomiaru impulsowych zmian prądu zerowego. *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej* nr 89, Wrocław 1997, s. 147–157.
6. Miedziński B., Okraszewski Z., Szkoła S., Szymański A.: Zabezpieczenia ziemnozwarciowe sieci promieniowej z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym. *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej* nr 89, Wrocław 1997, s. 25–35.
7. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Problemy efektywności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w krajowych sieciach średnich napięć. *Materiały Międzynarodowego Sympozjum nt. „Aktualne problemy automatyki w energetyce”*, Gliwice 1986, s. 125–135.

8. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Wykrywanie jednofazowych zwarc rezystancyjnych w sieciach średnich napięć o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor. ZN Pol. Śląskiej, Elektryka nr 127, Gliwice 1992, s. 63–78
9. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Poziom harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w sieciach przemysłowych średnich napięć. ZN Pol. Śląskiej, Elektryka nr 137, Gliwice 1994, s. 75–92
10. Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Wykrywanie doziemień rezystancyjnych w kompensowanych sieciach średnich napięć z wymuszaniem składowej czynnej prądu. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej nr 89, Wrocław 1997, s. 137–145.
11. Pytlak J.: Zwiększenie skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w cyfrowym systemie sieci średnich napięć SMAZC. Materiały Konferencji nt. „Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa w Polsce u progu XXI wieku”, Książ 1995, s. XIV/1–XIV/4.
12. Rankiewicz W., Wilk J.: Doświadczenia projektowe z wdrażaniem do eksploatacji sieci średnich napięć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej nr 89, Wrocław, 1997, s. 43–58.
13. Rodoń F., Głowocz R., Talaga M.: Mikroprocesorowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe typu ZIo. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej nr 89, Wrocław, 1997, s. 75–86.
14. Synal B., Floryn J.: Zabezpieczenia ziemnozwarciowe sieci z uziemionym przez rezystor punktem zerowym - doświadczenia eksploatacyjne z terenu Zakładu Energetycznego SA. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej nr 89, Wrocław 1997, s. 9–20.
15. Synal B.: Stan obecny i tendencje rozwojowe elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Materiały Konferencji nt. „Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa w Polsce u progu XXI wieku”, Książ 1995, s. I/1–I/9.
16. Synal B.: Sposoby pracy punktu zerowego i zabezpieczenia ziemnozwarciowe sieci średniego napięcia energetyki krajowej. Materiały Seminarium nt. „Wybrane zagadnienia z eksploatacji skompensowanych sieci średniego napięcia”. Opole 1997, s. 1–23.
17. Stefankiewicz Z., Skrodzki S., Woliński K.: Stałoprądowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe sieci SN już pracują. Wyniki prób i doświadczenia eksploatacyjne. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Pol. Wrocławskiej nr 89, Wrocław 1997, s. 67–73.
18. Szafran J.: Cyfrowe zabezpieczenia stacji SN - struktura i algorytmy. Materiały Konferencji nt. „Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa w Polsce u progu XXI wieku”, Książ 1995, s. V/1–V/5.
19. Wróblewski J.: Selektywne stałoprądowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe skompensowanych sieci SN. Materiały IV Konferencji Naukowo–Technicznej nt. „Automatyzacja sieci rozdzielczych krajowego systemu elektroenergetycznego”, Zamość 1995, s. 23–32.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Szymański, prof. Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dn. 15 września 1998 r.

