

Identyfikacja zwarcí doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób wykrywania wysokooporowych zwarcí doziemnych w sieciach średnich napięć oparty na zastosowaniu kryterium falkowego. Omówiono specyfikę zwarcí wysokooporowych i przedstawiono model zabezpieczenia. Załączono przykłady detekcji zwarcí z udziałem bardzo dużej nieliniowej rezystancji przejścia rzędu 100 kΩ.

Abstract. In the paper was presented the detection method of high resistance earth fault in MV network which is based on using wavelet criterion. Specificity of high resistance earth fault was discussed and protection model to detection such faults were presented. Examples of fault detection with very high fault resistance about 100 kOhm were included. (**Identification of high resistance earth faults in MV networks**).

Słowa kluczowe: zabezpieczenie ziemnozwarciowe, kryterium falkowe, duża nieliniowa rezystancja zwarcia.

Keywords: earth fault protection, wavelet criterion, high nonlinear fault resistance.

Wstęp

Zwarcia jednofazowe doziemne są najczęstszymi zwarciami w sieciach średnich napięć (SN). Znaczna część tych zwarcí, to tzw. zwarcia wysokooporowe o dużej lub bardzo dużej rezystancji zwarcia R_F przyjmującej wartości od kilku do kilkudziesięciu kΩ [1, 2]. Do zwarcí wysokooporowych dochodzi najczęściej z powodu zbliżenia lub zetknięcia się przewodu fazowego z:

- gałęzią drzewa,
- maszyną budowlaną, rolniczą lub eksploracyjną,
- konstrukcją słupa elektroenergetycznego umiejscowionego na suchym piaszczystym lub skalistym gruncie.

Zwarcia wysokooporowe nie są wykrywane przez klasyczne zabezpieczenia ziemnozwarciowe (kierunkowe i admitancyjne), bazujące na wykorzystaniu podstawowych harmonicznych składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia I_0 i U_0 , z powodów:

- zbyt małych wartości wielkości pomiarowych, zwłaszcza prądu I_0 , który jest często mniejszy od prądów uchybowych,
- niestacjonarności zwarcia.

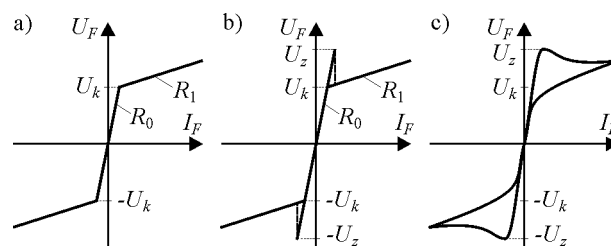
W związku z tym poszukiwane są nowe sposoby wykrywania tego typu zwarcí oparte na wykorzystaniu wyższych harmonicznych oraz transformaty falkowej [3-10].

Obiecujące wyniki w zakresie wykrywania zwarcí wysokooporowych uzyskano za pomocą zabezpieczenia wykorzystującego kryterium falkowe [8-10], po wprowadzeniu do niego kilku modyfikacji.

Specyfika zwarcí wysokooporowych

Zwarcia wysokooporowe cechują się występowaniem złożonej nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji zwarcia R_F . Składa się ona zwykle z rezystancji łuku, rezystancji przeszkody, na przykład drzewa, oraz rezystancji ziemi. Każdy z wymienionych elementów może wykazywać nieliniowość i zmienność w czasie. Z badań eksperymentalnych zamieszczonych w [1] wynika, że rezystancję przejścia R_p do ziemi można aproksymować w pierwszym przybliżeniu statyczną charakterystyką napięciowo-prądową w postaci linii łamanej, przedstawionej na rysunku 1a. Nachylenie odcinka przechodzącego przez początek układu współrzędnych określa rezystancję początkową R_0 , która przyjmuje wartości w granicach 0,8÷13 kΩ. Nachylenie półprostych wychodzących z punktów załamania określa rezystancję przy dużych prądach R_1 , która waha się w granicach 0,07÷0,12 kΩ.

Napięcie U_k , odpowiadające punktom załamania charakterystyki, przyjmuje wartości z zakresu 2÷6 kV. Z podobnej charakterystyki napięciowo-prądowej określa się rezystancję zwarcia w przypadku doziemienia do gałęzi drzewa z tą różnicą, że parametr R_0 osiąga wartości do 1 MΩ, a R_1 – do kilkudziesięciu kΩ [2, 5].



Rys. 1. Charakterystyki napięciowo-prądowe statyczne rezystancji przejścia (a) i łuku (b) oraz charakterystyka dynamiczna całkowitej rezystancji zwarcia (c)

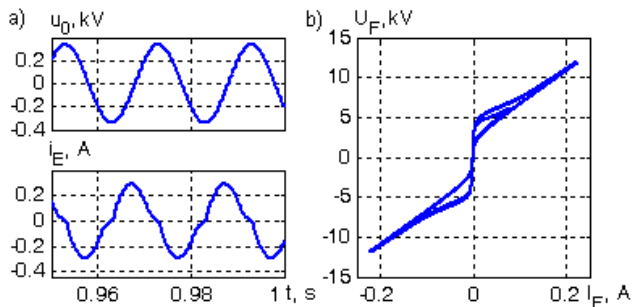
Z kolei rezystancję statyczną łuku zwarciovego można określić z charakterystyki napięciowo-prądowej zbliżonej do charakterystyki triaka (rys. 1b) [11]. Ważnym dodatkowym parametrem tej charakterystyki jest napięcie zapłonu U_z , które, zależnie od długości łuku, przybiera wartości od U_k do maksymalnego napięcia fazowego U_{fmax} . W przypadku $U_z = U_k$ charakterystyka łuku sprowadza się do charakterystyki nieliniowej rezystancji przejścia. Nietrudno zauważyć, że aproksymacja przedstawiona na rysunku 1b pozwala uzyskać charakterystykę całkowitej rezystancji zwarcia R_F ujmującą rezystancję przejścia i rezystancję łuku. Rezystancja R_F wykazuje określoną dynamikę zmian w dziedzinie czasu, co sprawia, że jej charakterystyki dynamiczne zasadniczo różnią się od statycznych (rys. 1c) Rezystancję dynamiczną zwarcia zwykle określa się na podstawie konduktancji, którą oblicza się z równania różniczkowego pierwszego rzędu [12, 13]:

$$(1) \quad dg / dt = (G - g) / \tau$$

gdzie: G – konduktancja statyczna zwarcia, g – konduktancja dynamiczna, $\tau = (50 \div 200)$ ms – stała czasowa zmian konduktancji zwarcia zależna od parametrów sieci, gruntu oraz rodzaju zwarcia.

Wyraźnie zarysowana nieliniowość rezystancji zwarcia ($R_0 \gg R_1$) oraz duże wartości parametrów R_1 i U_k sprawiają, że zarówno prąd doziemny jak i składowa

zerowa napięcia są bardzo małe, znacznie poniżej wartości progowych klasycznych zabezpieczeń. Ponadto, wymienione wielkości są mocno zniekształcone. Powyższe wywody potwierdzają przykładowe przebiegi zwarcia składowej zerowej napięcia u_0 i prądu doziemnego i_E przedstawione na rysunku 2, które uzyskano z symulacji zwarcia wysokooporowego w sieci kompensowanej 15 kV, z rozstrojeniem kompensacji $s = 0,1$. Przy tym parametry rezystancji zwarcia wynosiły: $R_0 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 40 \text{ k}\Omega$, $U_k = 3 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$. W tabeli 1 zamieszczono procentowy udział wyższych harmonicznych w tych przebiegach.



Rys. 2. Przebiegi napięcia u_0 i prądu i_E podczas zwarcia wysokorezystancyjnego (a) oraz charakterystyka napięciowo-prądowa $U_F = f(I_F)$ dynamicznej rezystancji zwarcia (b)

Tabela 1. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegach prądu i_E i napięcia u_0 przedstawionych na rysunku 2

| Nr harmonicznej | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Harmoniczne prądu i_E , % | 11,4 | 5,74 | 2,62 | 0,86 | 0,36 |
| Harmoniczne napięcia u_0 , % | 0,65 | 0,18 | 0,051 | 0,018 | 0,008 |

Obecność wyższych harmonicznych w prądach i napięciach składowych symetrycznych zerowych jest cechą charakterystyczną zwarć wysokooporowych i wynika z nieliniowości charakterystyki rezystancji zwarcia R_F (rys. 2b). Występują głównie harmoniczne nieparzyste o numerach 3, 5 i 7. Ich zawartość jest szczególnie duża podczas zwarć z udziałem łuku zwarcia. Jak wykazały badania własne, można je wykorzystać do skutecznego wykrywania doziemienia.

Sposób i układ do wykrywania wysokooporowych zwarć doziemnych

Do wykrywania wysokorezystancyjnych zwarć doziemnych proponuje się wykorzystać modyfikację sposobu przedstawionego w [8-10]. Wielkością kryterialną zabezpieczenia pozostaje moc wygładzona detali dp_w prądu doziemnego i_E i składowej zerowej napięcia u_0 . Jak wykazano w [10] sygnał dp_w odznacza się wysokim stopniem monopolarności przyjmując wartości dodatnie w przypadku zwarcia na rozpatrywanej linii elektroenergetycznej oraz wartości ujemne, gdy zwarcie jest w innej części galwanicznie połączonej sieci SN, poza rozpatrywaną linią.

Detale napięcia du_0 i prądu di_E uzyskuje się drogą diadycznej dekompozycji falkowej sygnałów, co w przypadku jednostopniowej dekompozycji sprowadza się do filtracji górnoprzepustowej napięcia i prądu za pomocą filtra falkowego do dekompozycji:

$$du_0(n) = \sum_{k=1}^N u_0(n-k)h_g(k)$$

$$di_E(n) = \sum_{k=1}^N i_E(n-k)h_g(k)$$

gdzie: $h_g(k)$ – funkcja współczynników filtra falkowego, N – liczba współczynników filtra, n – numer bieżącej próbki.

Wielkość kryterialną, czyli moc wygładzoną dp_w , uzyskuje się drogą filtracji dolnoprzepustowej sygnału mocy chwilowej dp , utworzonego z iloczynu próbek detalu prądu i opóźnionego o jedną próbkę detalu napięcia, tj.:

$$dp_w(n) = \sum_{k=1}^{N_{DP}} dp(n-k)h_{DP}(k)$$

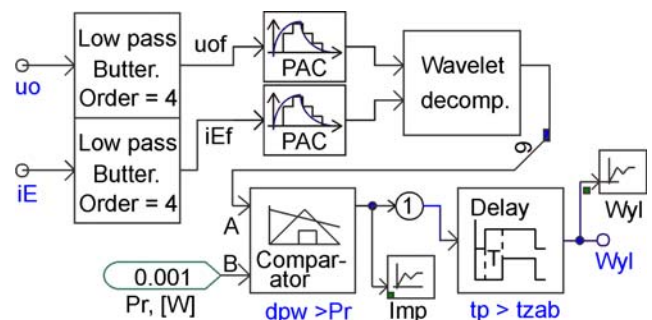
$$dp(n) = di_E(n)du_0(n-1)$$

gdzie: $h_{DP}(k)$, N_{DP} – funkcja okna filtra dolnoprzepustowego i liczba jego współczynników.

W celu wykrycia doziemienia sygnał kryterialny dp_w porównuje się z wartością rozruchową mocy P_r . Warunkiem działania zabezpieczenia jest wzrost wielkości kryterialnej dp_w powyżej wartości rozruchowej P_r , utrzymujący się przez czas pobudzenia komparatora t_p , nie mniejszy niż zadana zwłoka czasowa t_{zab} :

$$dp_w(n) > P_r, \quad t_p \geq t_{zab}$$

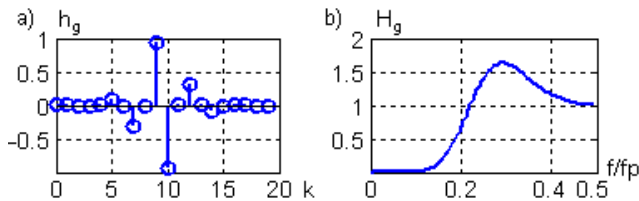
Wykonanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego do wykrywania zwarć wysokooporowych, działającego według przedstawionych algorytmów pomiarowych i decyzyjnych, jest dość proste. Na rysunku 3 przedstawiono model takiego zabezpieczenia wykonany w środowisku programu PSCAD [14]. Sygnały napięcia u_0 i prądu i_E poddawane są wstępnej filtracji dolnoprzepustowej w filtrach analogowych Butterwortha czwartego rzędu. Sygnały odfiltrowane u_{of} i i_{Ef} kierowane są do przetworników analogowo-cyfrowych PAC w celu digitalizacji a następnie do bloku *Wavelet decomp.*, w którym następuje ich dekompozycja falkowa. Obliczane są także moce chwilowe dp i dp_w detali. Sygnał dp_w po komparacji z wielkością rozruchową mocy P_r zostaje przetworzony na impuls logiczny *Imp*, który podawany jest na człon opóźniający. Po spełnieniu warunku czasowego pobudzenia $t_p > t_{zab}$ na wyjściu członu opóźniającego pojawia się sygnał logiczny zadziałania zabezpieczenia *Wyl*, oznaczający wykrycie zwarcia.



Rys. 3. Model zabezpieczenia ziemnozwarciowego do wykrywania zwarć wysokooporowych

Wykrywanie zwarć wysokooporowych jest możliwe tylko w przypadku bardzo dobrej czułości zabezpieczenia, co oznacza, że nastawa mocy rozruchowej P_r musi być bardzo mała. Badania symulacyjne zwarć doziemnych rezystancyjnych wykazały, że do osiągnięcia wysokiej czułości niezbędne jest wydzielenie detali prądu di_E i napięcia du_0 z efektywnym tłumieniem składowych sygnału o częstotliwości 50 Hz oraz składowych o częstotliwościach wyższych od 300 Hz. Tłumienie składowych o częstotliwościach większych od 300 Hz jest niezbędne ze względu na ewentualne oddziaływanie 11 i wyższych

harmonicznych wnoszonych przez przekształtniki energoelektroniczne dużej mocy. Skuteczne ograniczenie pasma przepuszczania z góry zapewniają filtry analogowe dolnoprzepustowe wysokich rzędów, na przykład 4 rzędu z aproksymacją Butterwotha o częstotliwości odcięcia $f_c = 250$ Hz. Przy tym w zabezpieczeniu można zastosować częstotliwość próbkowania $f_p = 600$ Hz. Selektywne wydzielenie detali sygnałów, z bardzo dobrym tłumieniem składowych o częstotliwości 50 Hz, zapewniają filtry falkowe górnoprzepustowe wysokich rzędów (o dużej liczbie współczynników). Doskonale nadaje się do tej roli filtr biortogonalny typu rbio3.9 [15] zawierający 20 współczynników. Jego pseudoczęstotliwość $f_a = 0,263f_p$ jest dobrze skorelowana z częstotliwościami harmonicznych generowanych przez nieliniową rezystancję zwarcia, a tłumienie sygnału o częstotliwości 50 Hz wynosi 54,9 dB. Funkcję współczynników $h_g(n)$ tego filtru oraz jego unormowane widmo amplitudowe H_g przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Filtr falkowy górnoprzepustowy rbio3.9: a) funkcja współczynników, b) unormowane widmo amplitudowe

Istotną czynnością zapewniającą wykrywanie zwarcь wysokorezystancyjnych jest filtracja dolnoprzepustowa mocy chwilowej detali dp . Sygnał ten, w ogólnym przypadku, nie jest ciągły, ani całkowicie monopolarny. Nieciągłość pojawia się podczas zwarcь łukowych przerywanych z łukiem zapalającym się sporadycznie, raz na kilka lub kilkanaście okresów napięcia sieci. Niewielka część sygnału ma znak przeciwny do znaku dominującej części. Zastosowanie wygładzania sygnału za pomocą filtru dolnoprzepustowego z dużym czasem odpowiedzi impulsowej sprawia, że sygnał staje się ciągły i całkowicie monopolarny. Żeby to osiągnąć, należy zastosować filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI) z oknem przetwarzania T_w dłuższym od największego interwału czasowego między kolejnymi zapłonami łuku $\Delta t_{z\max}$. Przy tym wymagana liczba współczynników filtru N_{DP} , z uwzględnieniem zależności $T_w = N_{DP}/f_p$, powinna wynosić:

$$(5) \quad N_{DP} = T_w f_p = \Delta t_{z\max} / f_p$$

Przyjmując rozsądną wartość $\Delta t_{z\max} = 0,2$ s w przypadku $f_p = 600$ Hz uzyskamy $N_{DP} = 120$.

W celu uniknięcia błędnych działań zabezpieczenia pod wpływem krótkotrwałych zakłóceń łączeniowych w sieci należy stosować zwłokę czasową co najmniej dwukrotnie dłuższą od czasu $\Delta t_{z\max}$ zgodnie z zależnością:

$$(6) \quad t_{zab} \geq k_b T_w = k_b \Delta t_{z\max}$$

gdzie: $t_b \geq 2$ – wymagany współczynnik bezpieczeństwa.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że omawiane zabezpieczenie musi z zasady działać zwłocznie. Przy czym im większy czas opóźnienia, tym mniejsze prawdopodobieństwo działań błędnych, ale także mniejsze prawdopodobieństwo wykrycia zwarcia pojawiającego się sporadycznie, w dłuższych odstępach czasu, na przykład

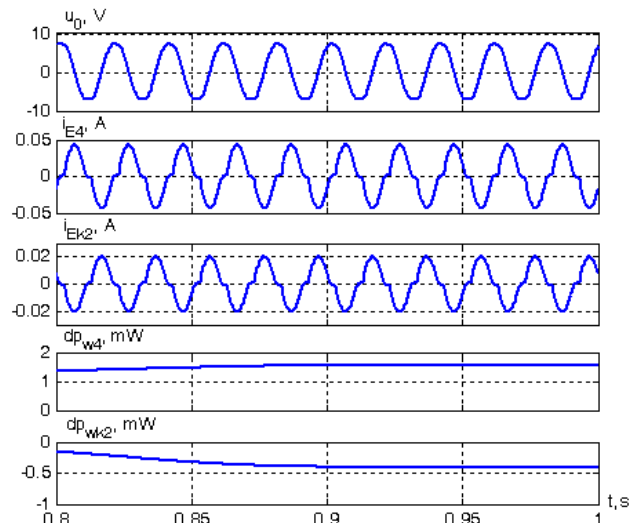
na skutek zbliżenia przewodu fazowego do gałęzi drzewa przy kolejnych podmuchach wiatru.

W wyniku badań symulacyjnych ustalono, że przy przedstawionych założeniach konstrukcyjnych można zastosować nastawę mocy rozruchowej $P_{r\min} = 1$ mW. Jest to wartość o kilka rzędów mniejsza niż proponowano wcześniej, na przykład w [8]. Dzięki przyjętym modyfikacjom algorytmów pomiarowych i decyzyjnych oraz wielokrotnemu obniżeniu progu rozruchowego, uzyskuje się możliwość selektywnego wykrywania zwarcь wysokorezystancyjnych. Przy tym zabezpieczenie zachowuje również zdolność wykrywania zwarcь łukowych przerywanych z udziałem małej rezystancji przejścia.

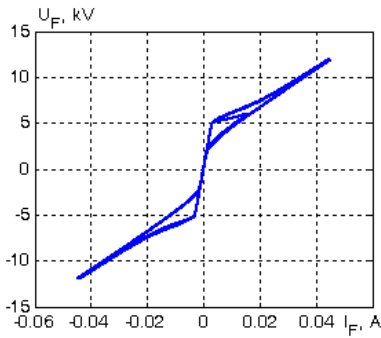
Przykłady wykrywania zwarcь doziemnych wysokorezystancyjnych

Możliwości omówionego zabezpieczenia ziemnozwarciowego w zakresie wykrywania zwarcь doziemnych wysokooporowych przebadano symulacyjnie z wykorzystaniem specjalistycznego programu PSCAD [14]. Zwarcia przeprowadzano w przeciętnej sieci kompensowanej napowietrzno-kablowej 15 kV [9], utworzonej z czterech linii napowietrznych i dwóch linii kablowych o łącznym prądzie pojemnościowym $I_{CS} = 46,8$ A. W modelu zabezpieczenia zastosowano: filtry analogowe Butterwotha 4 rzędu z $f_c = 250$ Hz, przetworniki PAC 16-bitowe z częstotliwością próbkowania $f_p = 600$ Hz i rozdzielczością prądową 6,1 mA oraz napięciową 0,61 V, filtry falkowe rbio3.9, filtr dolnoprzepustowy z oknem Hanninga o liczbie współczynników $N_{DP} = 120$ ($T_w = 0,2$ s). Podczas badań stosowano nastawy: $P_r = 1$ mW, $t_{zab} = 1$ s.

W wyniku licznych badań symulacyjnych ustalono, że proponowane zabezpieczenie może wykrywać selektywnie zwarcia z udziałem bardzo dużej nieliniowej rezystancji R_F . Potwierdzają to przykłady zamieszczone na rysunkach 5 i 7. Odnotowano przypadki poprawnego wykrywania zwarcь z rezystancją przejścia nawet 200 k Ω (rys. 5 i 6). Jak wynika z rysunku 5, moc wygładzona detali prądu i napięcia linii uszkodzonej jest dodatnia i większa od wartości rozruchowej, $dp_{w4} > P_r = 1$ W, a moc detali linii nieuszkodzonej dp_{wk2} jest ujemna. Oznacza to możliwość selektywnego wykrycia zwarcia.

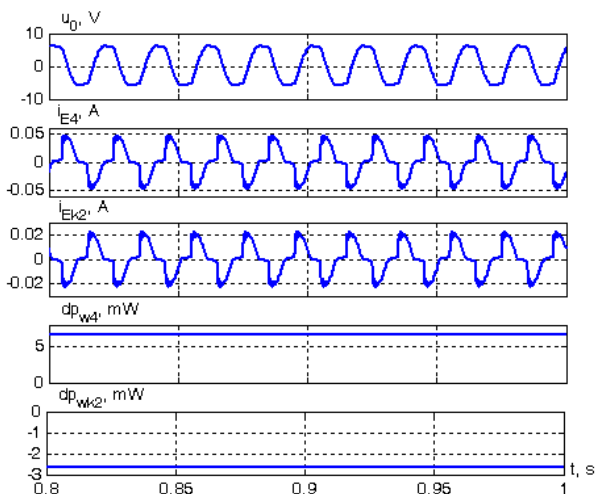


Rys. 5. Przebiegi napięcia u_0 , prądu ziemnozwarciowego linii zwartej i_{E4} i nieuszkodzonej i_{E2} oraz wielkości kryterialnej zabezpieczenia linii zwartej dp_{w4} i nieuszkodzonej dp_{wk2} . Parametry rezystancji zwarcia: $R_0 = 1$ M Ω , $R_1 = 200$ k Ω , $U_k = 3$ kV, $\tau = 0,1$ ms

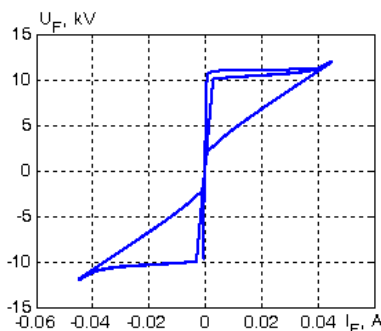


Rys. 6. Charakterystyka napięciowo-prądowa dynamicznej rezystancji zwarcia odpowiadająca przebiegom z rysunku 5: $R_0 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $U_k = 3 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$

Identyfikacja zwarcia wysokorezystancyjnego z jednoczesnym występowaniem łuku ($U_z > U_k$) jest znacznie łatwiejsza od poprzedniego przypadku, gdyż większe są przy tym wartości wielkości kryterialnych, o czym świadczą przykładowe przebiegi pokazane na rysunku 7. Większe wartości mocy dp_w są konsekwencją większej nieliniowości charakterystyki rezystancji zwarcia (rys. 8) i, tym samym, występowania większej ilości wyższych harmonicznych.



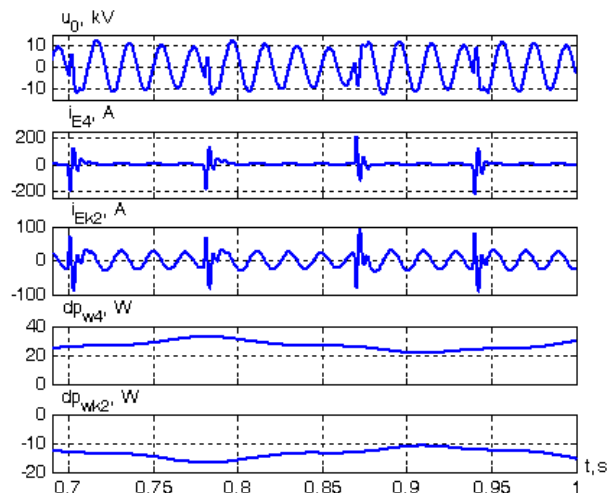
Rys. 7. Przebiegi podczas zwarcia łukowego: napięcia u_0 , prądu ziemnozwarciowego linii zwartej i_{E4} i nieuszkodzonej i_{EK2} oraz wielkości kryterialnej zabezpieczenia linii zwartej dp_{w4} i nieuszkodzonej dp_{wk2} . Parametry rezystancji zwarcia: $R_0 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $U_k = 3 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$



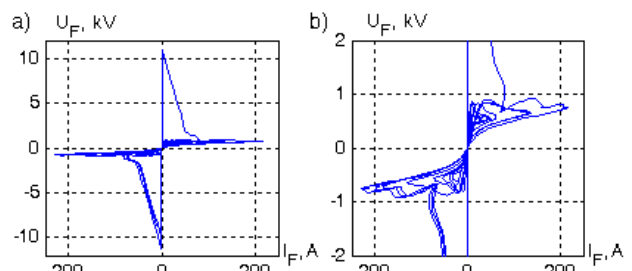
Rys. 8. Charakterystyka napięciowo-prądowa dynamicznej rezystancji zwarcia odpowiadająca przebiegom z rysunku 7: $R_0 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$, $U_k = 3 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$

Zaproponowane zabezpieczenie pozwala również selektywnie wykrywać zwarcia łukowe przerywane z udziałem małej rezystancji zwarcia. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykład takiego zwarcia zamodelowany w sieci kompensowanej z rozstrojeniem kompensacji $s = 0,1$. Załączone przebiegi odpowiadają zwarcia z wysokonapięciowymi zapłonami łuku, który gaśnie samoistnie po kilku półokresach drgań własnych prądu. Między kolejnymi zapłonami występują długie przerwy, rzędu 0,1 s, uwarunkowane szybkością narastania napięcia

powrotnego na kolumnie połukowej do wartości napięcia zapłonu U_z . Na skutek małej wartości napięcia progowego U_k i bardzo małej wartości rezystancji R_1 (tylko $1,1 \Omega$) składowe zerowe prądów i napięć są duże, wielokrotnie większe niż w poprzednich przypadkach. O kilka rzędów wielkości większa jest także moc wygładzona detali dp_w . Niestacjonarność zwarcia powoduje zmienność tej wielkości kryterialnej w funkcji czasu. Jednak wysoki stopień monopolarności impulsów mocy chwilowej detali dp w połączeniu z filtracją dolnoprzepustową w oknie przetwarzania o długości T_w większej od największego interwału czasowego między kolejnymi zapłonami łuku $\Delta t_{z \text{ max}}$ sprawiają, że sygnały mocy wygładzonej są całkowicie monopolarne. Jak wynika z rysunku 9, moc wygładzona detali prądu i napięcia linii uszkodzonej jest dodatnia i o kilka rzędów większa od wartości rozruchowej, $dp_{w4} \gg P_r = 1 \text{ mW}$, a moc detali linii nieuszkodzonej dp_{wk2} jest ujemna. Zachodzące relacje między wielkościami kryterialnymi linii uszkodzonej dp_{w4} oraz zdrowej dp_{wk2} w stosunku do mocy rozruchowej P_r świadczą o możliwości selektywnego wykrycia zwarcia.



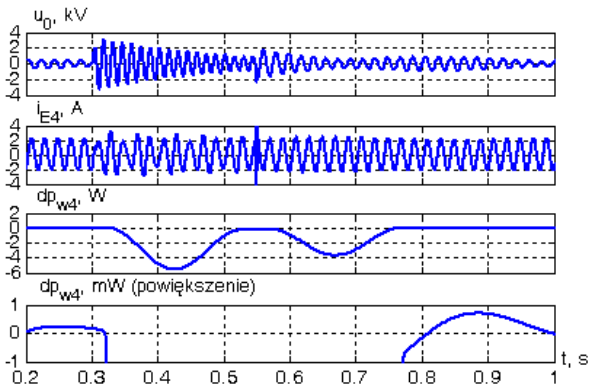
Rys. 9. Przebiegi podczas zwarcia łukowego: napięcia u_0 , prądu ziemnozwarciowego linii zwartej i_{E4} i nieuszkodzonej i_{EK2} oraz wielkości kryterialnej zabezpieczenia linii zwartej dp_{w4} i nieuszkodzonej dp_{wk2} . Parametry rezystancji zwarcia: $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1,1 \Omega$, $U_k = 0,5 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$



Rys. 10. Charakterystyka napięciowo-prądowa - pełna (a) i powiększony fragment (b) - dynamicznej rezystancji zwarcia odpowiadająca przebiegom z rysunku 9: $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1,1 \Omega$, $U_k = 0,5 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$

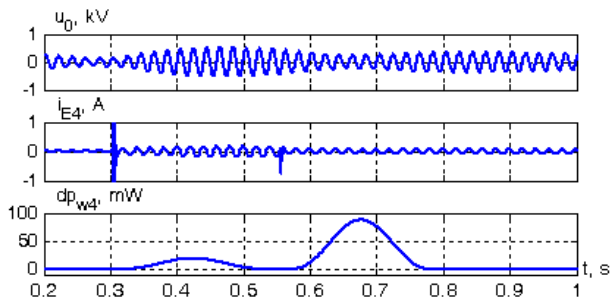
Bardzo mała nastawa mocy rozruchowej $P_r = 1 \text{ mW}$ może prowadzić do wrażliwości zabezpieczenia na niektóre zakłócenia łączeniowe, wyładowania atmosferyczne i skokowe zmiany obciążeń linii. Badania symulacyjne wykazały, że jest ono wyjątkowo odporne na zakłócenia powstające podczas operacji łączeniowych przeprowadzanych poza zabezpieczoną linią.

W odpowiedzi na wyłączenie lub załączenie sąsiedniej linii w sygnale mocy detali zabezpieczenia dp_w pojawiają się impulsy ujemne, blokujące jego działanie (rys. 11). Sygnał mocy może jednak przyjmować niewielkie wartości dodatnie, nie przekraczające wartości rozruchowej, na wskutek oddziaływania prądów i napięć asymetrii sieci oraz prądów i napięć uchybowych filtrów składowych symetrycznych zerowych. Skutecznym środkiem zaradczym na ograniczenie dodatniej wartości mocy dp_w w takich przypadkach jest dodatkowa filtracja górnoprzepustowa sygnałów u_0 i i_{E4} .



Rys. 11. Reakcja zabezpieczenia linii LN4 na wyłączenie i załączenie linii LK2: wyłączenie linii $t_1=0,303$ s, załączenie linii $t_2=0,55$ s, sieć z naturalną asymetrią, stosunek przekładni przekładników filtra składowej zerowej prądu 1,03/1,0/0,97

Zabezpieczenie może zbędne pobudzać się przy załączaniu linii objętej ochroną oraz przy skokowych zmianach obciążenia na tej linii (rys. 12). Skutecznym sposobem eliminacji błędnych działań zabezpieczenia w takich przypadkach jest stosowanie dużej zwłoki czasowej.



Rys. 12. Reakcja zabezpieczenia linii LN4 na załączenie tej linii i wyłączenie dużego odbioru: załączenie linii $t_1 = 0,303$ s, wyłączenie odbioru $t_2 = 0,55$ s, sieć z naturalną asymetrią

Do nieprawidłowego działania zabezpieczenia może dojść także pod wpływem wyższych harmonicznych prądu, wnoszonych przez przekształtniki energoelektryczne dużej mocy, i składowej zerowej napięcia asymetrii (w sieci niesymetrycznej). Należy zaznaczyć, że wytwarzane przez przekształtniki wyższe harmoniczne prądu są składowymi kolejności zgodnej, ale niewielka ich część pojawia się na wyjściu filtra składowej zerowej prądu w postaci błędu prądowego. Niekorzystne oddziaływanie przekształtników na zabezpieczenie ziemnozwarciowe można ograniczyć stosując wysokiej klasy filtry składowej zerowej prądu (z małym błędem prądowym i kątowym) oraz przeciwdziałając nadmiernej asymetrii sieci.

Wnioski

Znaczną część zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć przebiega z udziałem wysokooporowej nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji zwarcia. Cechą

charakterystyczną zwarć wysokooporowych jest obecność wyższych harmonicznych (głównie 3, 5 i 7) w prądach i napięciach składowych symetrycznych zerowych.

Do wykrywania zwarć wysokooporowych można wykorzystać kryterium falkowe, w którym wielkością kryterialną jest moc wygładzona dp_w detali składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia. Dzięki możliwości zastosowania bardzo małej wartości nastawy mocy rozruchowej zabezpieczenia P_r , rzędu 1 mW, uzyskuje się możliwość wykrywania zwarć z udziałem rezystancji zwarcia rzędu 100 k Ω .

Zabezpieczenie z zasady musi być zwłoczne, w celu eliminacji błędnych działań pod wpływem zakłóceń łączeniowych i wyładowań atmosferycznych.

Przy realizacji zabezpieczenia niezbędne jest zastosowanie wysokiej klasy filtrów oraz przetworników analogowo-cyfrowych zapewniających pomiar prądu i napięcia z dużą rozdzielczością.

LITERATURA

- [1] Sygal B., Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach o małym prądzie zwarcia doziemnego. *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej*, nr 31, Monografie nr 4, 1975.
- [2] Hänninen S., Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location. *Technical Research Centre of Finland*, Espoo 2001.
- [3] Musierowicz K., Niekonwencjonalne metody detekcji zwarć w systemach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, 2004, 555-559.
- [4] Michalik M., Okraszewski T.M., Application of the wavelet transform to backup protection of MV networks - wavelet phase comparison method, *IEEE Bologna Power Tech Conference*, paper No. 154, Bologna, Italy, 23-26 June 2003.
- [5] Elkalashy N.I., Lehtonen M., Darwish H.A., Izzularab M.A., Taalab A.M., Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14 (2007), No. 2, 375-383.
- [6] Elkalashy N.I., Lehtonen M., Advancing DWT-Bayesian technique for earth fault protection in MV networks, *OJEEE*, 1 (2009), No. 2, 89-93.
- [7] Łukowicz M., Metody wykrywania zwarć wysokorezystancyjnych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej*, nr 99, Monografie nr 32, 2013.
- [8] Marciniak L., Wavelet criteria for identification of arc intermittent faults in medium voltage networks, *Proceedings of the International Symposium „Modern Electric Power Systems, MEPS'10”*, paper 09.1, Wrocław, 20-22 September 2010.
- [9] Marciniak L., Application of signal wavelet decomposition for identification of arc earth fault, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(2011), nr 2, 101-104.
- [10] Marciniak L., Impulsowoprądowe i falkowe kryteria identyfikacji zwarć doziemnych rezystancyjnych oraz łukowych w sieciach średnich napięć. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Monografie nr 273, 2013.
- [11] Marciniak L., Implementacje modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink. *Przegląd Elektrotechniczny*, 9a (2012), 126-129.
- [12] Sawicki A., Problems of modeling an electrical arc with variable geometric dimensions. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2b (2013), 270-275.
- [13] Kizilcay M., Pniok T., Digital simulation of fault arc in power system. *ETEP*, 1 (1991), No. 1, 55-60.
- [14] PSCAD. Power Systems Computer Aided Design. User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2004.
- [15] Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J.M., Wavelet Toolbox 4. User's Guide. The MathWorks, Inc, 2010.

Autorzy: dr hab. inż. Lubomir Marciniak, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: lubmar@el.pcz.czest.pl