

Wykrywanie zwarcí doziemnych w sieciach średnich napięć z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej sygnałów

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób wykrywania niestacjonarnych zwarcí doziemnych łukowych i zwarcí wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć, oparty na zastosowaniu kryterium mocy chwilowej trzecich harmonicznych składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia. Opisano także model zabezpieczenia ziemnozwarciowego z zastosowaniem tego kryterium. Załączono przykłady detekcji zwarcí łukowych przerywanych oraz z udziałem bardzo dużej nieliniowej rezystancji przejścia.

Abstract. The paper presents a method for detecting non-stationary arc earth faults and high-resistance ones in medium voltage networks, based on a criterion of instantaneous power third harmonics zero sequence current and voltage. The model of earth fault protection using this criterion was described also. Examples of detection of arc intermittent short-circuit and with the participation of a very high nonlinear fault resistance were attached. (Detection of earth faults in medium voltage networks using the third harmonic of signals).

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

Keywords: earth fault protection, third harmonic criterion, high nonlinear fault resistance.

Wstęp

Okolo 5÷15% zwarcí jednofazowych z ziemią w sieciach średnich napięć (SN) stanowią zwarcia łukowe oraz zwarcia wysokooporowe o dużej lub bardzo dużej rezystancji zwarcia R_F , przyjmującej wartości od kilku do kilkudziesięciu k Ω [1-3]. Zwarcia tego typu cechują się występowaniem złożonej nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji zwarcia R_F składającej się z rezystancji łuku, rezystancji przeszkody oraz rezystancji ziemi.

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 i prądów asymetrii,
- niestacjonarności zwarcia.

Do wykrywania tego typu zwarcí testuje się nowe sposoby, oparte na wykorzystaniu wyższych harmonicznych, dekompozycji falkowej sygnałów ziemnozwarciowych oraz sztucznych sieci neuronowych [2-11]. Obiecujące wyniki w zakresie wykrywania zwarcí wysokooporowych uzyskano za pomocą zabezpieczenia wykorzystującego kryteria falkowe [3, 9, 10]. Dobrą alternatywą dla tego typu rozwiązań może być proponowane zabezpieczenie, oparte na wykorzystaniu kryterium impulsowego mocy trzeciej harmonicznej składowej symetrycznej zerowej.

Wyższe harmoniczne w przebiegach napięć i prądów powstają na skutek [1, 3, 7]:

- nieliniowości źródeł energii,
- nieliniowości odbiorników,
- nieliniowej charakterystyki magnesowania dławików kompensacyjnych,
- nieliniowości rezystancji zwarcia R_F .

W przypadku zwarcí łukowych i wysokooporowych głównym źródłem wyższych harmonicznych, zwłaszcza trzeciej jest nieliniowa rezystancja zwarcia R_F . Rezystancję tę można aproksymować w pierwszym przybliżeniu uogólnioną statyczną charakterystyką napięciowo-prądową $U_F = f(I_F)$ w postaci zależności [12, 13]:

$$(1) \quad U_F = \begin{cases} I_F R_0, & \text{gdy } |I_F| < I_z \\ \text{sign}(I_F) U_k + I_F R_1, & \text{gdy } |I_F| \geq I_z \end{cases}$$

gdzie: U_k – napięcie załamania charakterystyki, R_0 rezystancja początkowa, R_1 – rezystancja w zakresie dużych prądów, $I_z = U_z/R_0$ – prąd zapłonu łuku odpowiadający napięciu zapłonu U_z . Gdy $U_z = U_k$ charakterystyka odpowiada nieliniowej rezystancji bez udziału łuku.

Ważnym parametrem rezystancji R_F jest także stała czasowa τ , określająca dynamikę jej zmian w dziedzinie czasu.

Zawartość trzeciej harmonicznej w napięciu i prądzie kolejności zerowej zależy od wzajemnej relacji parametrów rezystancji zwarcia i może osiągać kilkadziesiąt procent dla prądów i od kilku do kilkunastu procent dla napięcia [3, 7]. Prądy trzeciej harmonicznej osiągają szczególnie duże wartości, nawet do kilkuset procent podstawowej harmonicznej, na liniach z doziemieniem w sieci kompensowanej, gdyż w przeciwieństwie do podstawowej harmonicznej nie podlegają kompensacji.

Należy zaznaczyć, że wyższe harmoniczne, w tym trzecia, sygnałów składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia są już wykorzystywane w technice zabezpieczeniowej do wykrywania głównie zwarcí doziemnych stacjonarnych [8, 11]. Spotyka się zabezpieczenia nadprądowe lub kierunkowe dedykowane dla poszczególnych pól rozdzielni lub zabezpieczenia grupowe, wspólne dla całej rozdzielni. Zastosowanie trzecich harmonicznych do wykrywania niestacjonarnych zwarcí wysokorezystancyjnych napotyka jednak na trudności, głównie ze względu na brak jednoznacznych kryteriów działania i wytycznych nastaw oraz podatności proponowanych rozwiązań zabezpieczeń na zakłócenia łączeniowe.

Propozycja sposobu i układu do wykrywania wysokooporowych zwarcí doziemnych

Do wykrywania niestacjonarnych zwarcí doziemnych łukowych z udziałem dużej rezystancji przejścia i zwarcí doziemnych wysokorezystancyjnych proponuje się wykorzystać impulsy mocy trzeciej harmonicznej składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia. Wielkością kryterialną zabezpieczenia jest moc wygładzona p_{03w} trzecich harmonicznych prądu doziemnego i_{E3} i składowej zerowej napięcia u_{03} .

Sygnały trzeciej harmonicznej napięcia u_{03} i prądu i_{E3} uzyskuje się drogą cyfrowej filtracji pasmowoprzepustowej składowej zerowej napięcia u_0 i prądu doziemnego i_E :

$$(2) \quad u_{03}(n) = \sum_{k=0}^{N_{pp}-1} u_0(n-k)h_{pp}(k)$$

$$i_{E3}(n) = \sum_{k=0}^{N_{pp}-1} i_E(n-k)h_{pp}(k)$$

gdzie: $h_{pp}(k)$ – funkcja współczynników filtru pasmowoprzepustowego, N_{pp} – liczba współczynników filtru, n – numer bieżącej próbki.

Impulsy mocy chwilowej trzeciej harmonicznej p_{03} otrzymuje się w wyniku przemnożenia próbek prądu i_{E3} i napięcia u_{03op} opóźnionych o liczbę próbek $N_3/4$ odpowiadających ćwierci okresu trzeciej harmonicznej, a wielkość kryterialną, czyli moc wygładzoną p_{03w} – drogą filtracji dolnoprzepustowej sygnału mocy chwilowej p_{03} , tj.:

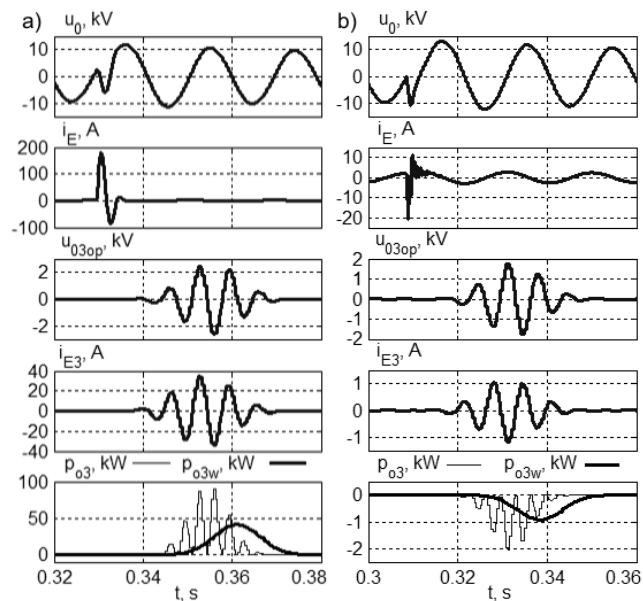
$$(3) \quad p_{03}(n) = i_{E3}(n)u_{03op}(n) = i_{E3}(n)u_{03}(n - N_3/4)$$

$$p_{03w}(n) = \sum_{k=0}^{N_{dp}-1} p_{03}(n-k)h_{dp}(k)$$

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

Zdefiniowany za pomocą zależności (3) sygnał w istocie odpowiada mocy biernej dla składowej symetrycznej zerowej.

Badania symulacyjne zwarć doziemnych w sieci SN wykazały, że przy odpowiednim doborze filtrów, sygnał p_{03w} odznacza się bardzo wysokim stopniem monopolarności przyjmując wartości dodatnie w przypadku zwarcia na rozpatrywanej linii elektroenergetycznej (rys. 1a) oraz wartości ujemne, gdy zwarcie jest w innej części galwanicznie połączonej sieci SN, na przykład na szynach stacji (rys. 1b). W przypadku zwać łukowych przerywanych w sieci kompensowanej sygnał p_{03w} jest nieciągły i występuje w postaci impulsów odpowiadających kolejnym zapłonom łuku. Przy częstych zapłonach łuku sygnał ten jest ciągły pulsujący.

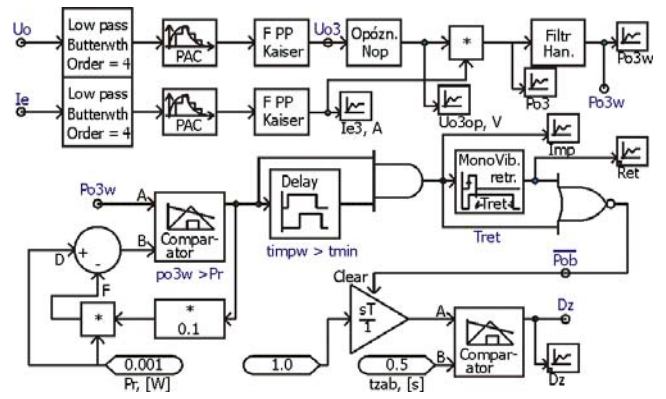


Rys. 1. Przebiegi wielkości ziemnozwarciowych w odpowiedzi na zwarcie łukowe w kompensowanej sieci SN: a) na linii napowietrznej w odległości 10 km od stacji, b) na szynach stacji

Sygnał kryterialny p_{03w} jest porównywany z wartością rozruchową mocy P_r . Pierwszy impuls, spełniający warunek logiczny $Imp = (p_{03w} > P_r)$, powoduje pobudzenie zabezpieczenia i uruchomienie członu czasowego. Natomiast zwarcie jest wykrywane po nastawionej zwłoce czasowej t_{zab} , o ile w tym czasie wystąpi sekwencja impulsów Imp w odstępach czasowych Δt_{imp} , nie większych od czasu retrygeracji (podtrzymania) pobudzenia T_{ret} , co sprowadza się do następujących zależności logiczno-czasowych:

$$(4) \quad Imp = (p_{03w} > P_r), \quad \Delta t_{imp} < T_{ret}, \quad t_{pob} \geq t_{zab}$$

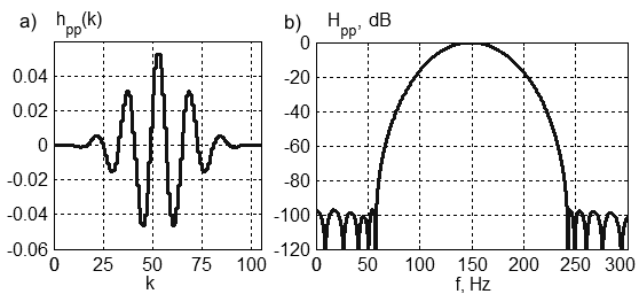
Na rysunku 2 przedstawiono model zabezpieczenia, działającego według przedstawionych algorytmów pomiarowych i decyzyjnych, wykonany w środowisku programu PSCAD [14]. Sygnały napięcia u_0 i prądu i_E poddawane są wstępnej filtracji dolnoprzepustowej w filtrach analogowych Butterwortha czwartego rzędu. Sygnały odfiltrowane kierowane są do przetworników analogowo-cyfrowych PAC w celu digitalizacji, a następnie do bloków filtrów pasmowoprzepustowych, w którym następuje wydzielenie trzeciej harmonicznej sygnałów. Do realizacji tego zadania zastosowano filtry parametryczne z oknem Kaisera. Sygnał u_{03} jest opóźniony o ćwierć okresu, a następnie mnożony przez i_{E3} . Wynikiem tego działania jest sygnał mocy chwilowej p_{03} . Jego filtracja dolnoprzepustowa za pomocą filtru o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI) z oknem Hanninga pozwala uzyskać sygnał wygładzony p_{03w} . Sygnał ten poddawany jest komparacji z wielkością rozruchową mocy P_r , w wyniku której uzyskuje się impuls logiczny $Impw$, który sprawdza się na minimalny czas trwania $t_{impw} > t_{min}$, w celu wstępnego odsiewu krótkotrwałych zakłóceń. Impulsy Imp spełniające warunek czasowy pobudzają monowibrator retrygeralny, który odblokowuje generator podstawy czasu, wykonany na integratorze, odmierzający zadaną zwłokę czasową. Po spełnieniu warunku czasowego pobudzenia $t_{pob} > t_{zab}$ na wyjściu członu opóźniającego pojawia się sygnał logiczny zadziałania zabezpieczenia Dz , oznaczający wykrycie zwarcia.



Rys. 2. Model zabezpieczenia ziemnozwarciowego z kryterium impulsowym mocy trzeciej harmonicznej sygnałów

Wykrywanie zwarć wysokooporowych jest możliwe tylko w przypadku bardzo małej nastawy mocy rozruchowej P_r . Małą wartość P_r , rzędu 1 mW, zapewniającą wysoką czułość zabezpieczenia, można nastawić tylko w przypadku bardzo dobrej filtracji trzeciej harmonicznej prądu i_{E3} i napięcia u_{03} . Na podstawie badań symulacyjnych zwarć doziemnych ustalono, że filtr pasmowy powinien posiadać

wąski listek główny, zawężony do częstotliwości 50 Hz $< f < 250$ Hz i bardzo dobre tłumienie listków bocznych, rzędu 100 dB. Do realizacji tego zadania doskonale nadaje się filtr parametryczny z oknem Kaisera [15]. Przy założonej częstotliwości próbkowania sygnałów $f_p = 2400$ Hz postawione wymagania spełnia filtr o liczbie współczynników $N_{pp} = 106$ i współczynniku kształtu $\beta = 12$. Funkcję współczynników $h_{pp}(k)$ tego filtra oraz jego widmo amplitudowe H_{pp} w decybelach przedstawiono na rysunku 3. Nietrudno zauważyć, że w przypadku zwarcia łukowego przerywanego, przedstawionego na rysunku 1, sygnały u_{03op} i i_{E3} , w odpowiedzi na zapłon łuku, są bardzo zbliżone do przeskalowanych funkcji współczynników $h_{pp}(k)$ filtra. Dla zapewnienia wysokiej czułości zabezpieczenia niezbędne jest przede wszystkim skuteczne tłumienie sygnałów o częstotliwościach zbliżonych do 50 Hz zwłaszcza w sieciach z dużą asymetrią.



Rys. 3. Filtr pasmowprzepustowy trzeciej harmonicznej z oknem Kaisera: a) funkcja współczynników, b) widmo amplitudowe

Do wygładzania impulsów mocy wystarczy zastosować filtr dolnoprzepustowy z oknem Hanninga o liczbie współczynników odpowiadającej jednemu okresowi podstawowej harmonicznej, tj. $N_{dp} = 0,02f_p = 48$.

Istotnym zagadnieniem wpływającym na poprawne działanie zabezpieczenia jest dobór zwłoki czasowej zadziałania t_{zab} i czasu retrygeracji T_{ret} . W przypadku bardzo czułej nastawy $P_r = 1$ mW, zabezpieczenie może pobudzać się pod wpływem operacji łączeniowych na zabezpieczanej linii. Z tego względu nie może ono zadziałać po wykryciu jednego impulsu mocy. Musi wystąpić minimum 2 impulsy w odstępach czasowych nie większych niż czas retrygeracji T_{ret} . Żeby wykrywać zwarcia przerywane w sieci kompensowanej, występujące sporadycznie, czas retrygeracji musi być większy niż maksymalny odstęp czasowy między kolejnymi zapłonami łuku zwarciego Δt_{imp} . Przy założeniu, że $\Delta t_{imp} = 0,2$ s czas retrygeracji z zapasem 1,5 wyniesie $T_{ret} = 0,3$ s. Przy tym zwłoka czasowa zabezpieczenia powinna spełniać warunek $t_{zab} > \Delta t_{imp} + T_{ret} = 0,5$ s.

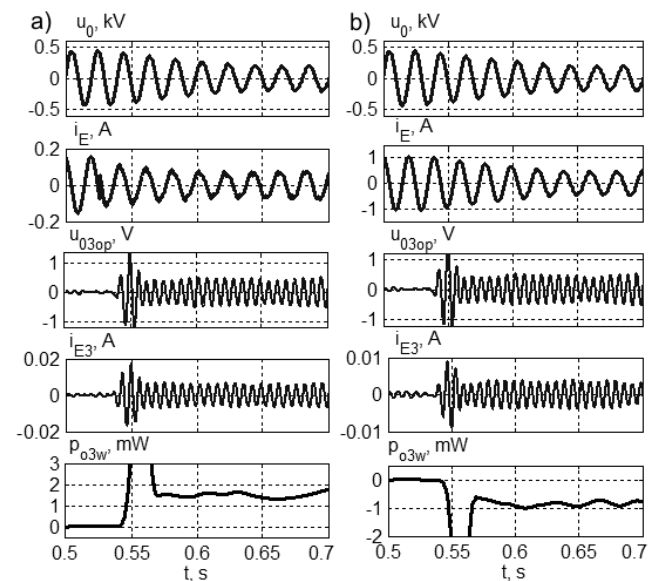
W modelu zabezpieczenia zastosowano, z uwagi na dużą rozpiętość sygnałów prądu i napięcia, 16-bitowe przetworniki PAC z częstotliwością próbkowania $f_p = 2400$ Hz i rozdzielczością prądową 6,1 mA oraz napięciową 0,61 V.

Przykłady wykrywania zwarc łukowych i wysokooporowych

Możliwości omówionego zabezpieczenia ziemnozwarciowego w zakresie wykrywania zwarc doziemnych wysokooporowych przebadano symulacyjnie z wykorzystaniem specjalistycznego programu PSCAD [14]. Zwarcia przeprowadzono w przeciętnej sieci kompensowanej napowietrzno-kablowej 15 kV [3], utworzonej z czterech linii napowietrznych i dwóch linii kablowych o łącznym prądzie pojemnościowym

$I_{CS} = 46,8$ A. W zabezpieczeniu stosowano nastawy: $P_r = 1$ mW, $T_{ret} = 0,2$ s, $t_{zab} = 0,5$ s.

W wyniku licznych badań symulacyjnych ustalono, że proponowane zabezpieczenie może wykrywać selektywnie zwarcia z udziałem bardzo dużej nieliniowej rezystancji R_F . W sieci kompensowanej z naturalną asymetrią parametrów linii napowietrznych odnotowano przypadki poprawnego wykrywania zwarc z rezystancją przejścia nawet 100 k Ω (rys. 4). Jak wynika z rysunku 4a, moc wygładzona trzeciej harmonicznej prądu i napięcia linii uszkodzonej jest dodatnia i większa od wartości rozruchowej, $p_{03w} > P_r = 1$ mW, a moc linii nieuszkodzonej (rys. 4b) jest ujemna. Oznacza to możliwość selektywnego wykrycia zwarcia. Charakterystyczną cechą zwarc wysokooporowych w sieciach kompensowanych niesymetrycznych jest występowanie niskoczęstotliwościowych oscylacji napięcia u_0 i prądów i_E , które wywołują również oscylacje wielkości kryterialnej p_{03w} .

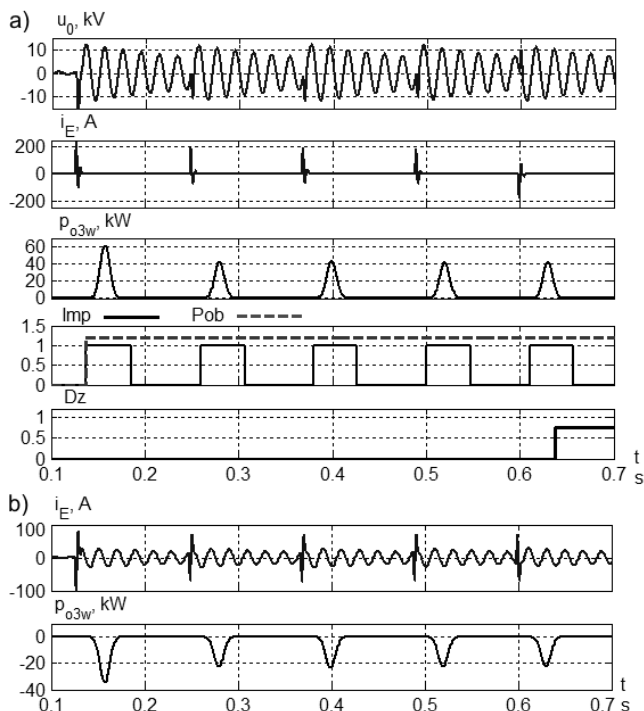


Rys. 4. Przebiegi wielkości pomiarowych linii zwartej (a) i nieuszkodzonej (b). Parametry rezystancji zwarcia: $R_0 = 1$ M Ω , $R_1 = 100$ k Ω , $U_k = 1,5$ kV, $\tau = 0,1$ ms

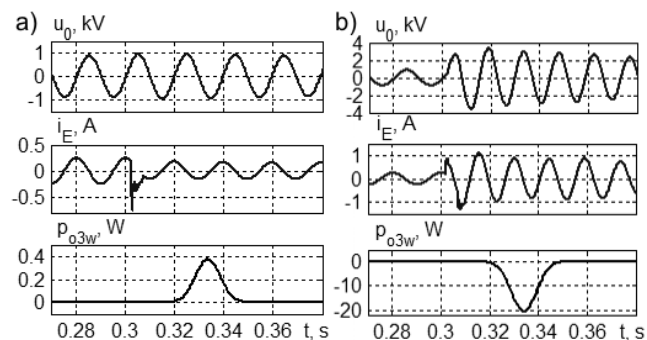
Zaproponowane zabezpieczenie pozwala również selektywnie wykrywać zwarcia łukowe przerywane z udziałem zarówno małej jak i bardzo dużej rezystancji zwarcia. Na rysunku 5 przedstawiono przykład zwarcia łukowego z udziałem małej rezystancji przejścia, zamodelowany w sieci kompensowanej z rozstrojeniem kompensacji $s = 0,05$. Między kolejnymi zapłonami łuku występują tutaj długie przerwy, rzędu 0,1 s, uwarunkowane szybkością narastania napięcia powrotnego na kolumnie połukowej do wartości napięcia zapłonu U_z . Sygnał p_{03w} jest nieciągły i przybiera formę impulsów, których amplituda jest o kilka rzędów większa od mocy rozruchowej P_r . Na linii doziemionej (rys. 5a) impulsy są dodatnie, odstępy między nimi spełniają warunek $\Delta t_{imp} < T_{ret}$. Dlatego sygnał pobudzenia Pob , zainicjowany pierwszym impulsem Imp , jest ciągły i po zwłoce czasowej 0,5 s dochodzi do zadziałania zabezpieczenia (zmiana stanu sygnału Dz). Na linii nieuszkodzonej (rys. 5b) impulsy p_{03w} są ujemne i nie dochodzi ani do pobudzenia, ani do zadziałania zabezpieczenia.

Zabezpieczenie z czułą nastawą $P_r = 1$ mW może się pobudzać zbudnie pod wpływem operacji łączeniowych, zwłaszcza podczas wyłączania obciążonych fragmentów linii (rys. 6a), ponieważ powstają przy tym dodatnie impulsy

mocy o amplitudzie większej od P_r , zależnej od mocy obciążenia i długości wyłączanego fragmentu linii. Skutecznym środkiem zapobiegającym zbędnemu zadziałaniu zabezpieczenia jest stosowanie zwłoki czasowej. Zabezpieczenie jest odporne na zakłócenia łączeniowe w sąsiednich liniach (rys. 6b), gdyż powstają przy tym zawsze ujemne impulsy mocy p_{03w} .



Rys. 5. Przebiegi wielkości pomiarowych zabezpieczenia linii zwartej (a) i nieuszkodzonej (b) podczas zwarcia łukowego. Parametry rezystancji zwarcia: $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 1,1 \Omega$, $U_k = 1,0 \text{ kV}$, $U_z = 10 \text{ kV}$, $\tau = 0,1 \text{ ms}$



Rys. 6. Reakcja zabezpieczenia linii napowietrznej na: a) wyłączenie fragmentu tej linii z obciążeniem 0,27 MVA, b) wyłączenie sąsiedniej linii obciążonej mocą 1,74 MVA

Wnioski

Cechą charakterystyczną zwarć łukowych i wysokoenergetycznych jest obecność wyższych harmonicznych, głównie trzeciej, w prądach i napięciach składowych symetrycznych zerowych, wywołanych nieliniowością rezystancji zwarcia R_r .

Wymienione zwarcia można wykrywać za pomocą kryterium impulsowego mocy trzeciej harmonicznej składowej symetrycznej zerowej, w którym wielkością kryterialną jest moc wygładzona p_{03w} trzecich harmonicznych składowych symetrycznych zerowych prądu i napięcia opóźnionego o ćwierć okresu. W przypadku zwarcia na linii impulsy mocy p_{03w} są dodatnie, a podczas

zwarcia poza linią – ujemne, co stanowi podstawę do odróżniania zwarć wewnętrznych od zewnętrznych.

W zabezpieczeniu można nastawić bardzo małą wartość mocy rozruchowej P_r , rzędu 1 mW, dzięki czemu uzyskuje się możliwość wykrywania zwarć z udziałem rezystancji zwarcia rzędu 100 k Ω .

Zabezpieczenie jest całkowicie odporne na zakłócenia zewnętrzne, powstające poza zabezpieczaną linią, ale może pobudzać się pod wpływem operacji łączeniowych lub skokowych zmian obciążenia na zabezpieczanej linii. Skutecznym sposobem eliminacji błędnych działań pod wpływem wewnętrznych zakłóceń łączeniowych jest stosowanie zwłoki czasowej skojarzonej z wystąpieniem co najmniej dwóch impulsów pobudzeniowych w określonym przedziale czasowym.

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

Autorzy: dr hab. inż. Lubimir Marciniak, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: lubmar@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Synal 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] Marciniak L., Impulsowoprądowe i falkowe kryteria identyfikacji zwarć doziemnych rezystancyjnych oraz łukowych w sieciach średnich napięć. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Monografie nr 273, 2013.
- [4] Łukowicz M., Metody wykrywania zwarć wysokorezystancyjnych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej*, nr 99, Monografie nr 32, 2013.
- [5] 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.
- [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] Kim C.J., Russell B.D., Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, 24 (1988), 219-225.
- [8] Benner C., Russell B.D., Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, No. 3, 635-640.
- [9] 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.
- [10] Marciniak L., Identyfikacja zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8 (2015), 185-189.
- [11] Борковский С.О., Горева Т.С., Горева Т.И., Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю. *Фундаментальные исследования*, № 9 (2014), 954-959.
- [12] Marciniak L., Implementacja modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink. *Przegląd Elektrotechniczny*, 9a (2012), 126-129.
- [13] Sawicki A., Problems of modeling an electrical arc with variable geometric dimensions. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2b (2013), 270-275.
- [14] PSCAD. Power Systems Computer Aided Design. User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2004.
- [15] Zieliński T., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. WKiŁ, Warszawa 2009.