

Bernard WITEK

ANALIZA ALGORYTMÓW DWUKRYTERIALNEGO ZABEZPIECZENIA CYFROWEGO DLA ELEKTROENERGETYCZNYCH LINII PRZESYŁOWYCH

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest sformułowanie i analiza kryterium pomiarowego wykrywania zwarcí elektroenergetycznych linii przesyłowych, bazującego na jednoczesnym pomiarze dwóch wielkości: względnego przesunięcia w czasie przebiegów prądów na obu końcach chronionej linii oraz różnicy wartości chwilowych tych prądów. Rozpatrzone zostaną dwa warianty zabezpieczenia: jedno- i trójsystemowy.

W ramach weryfikacji algorytmów w stanach zwarciovych, na podstawie symulacji EMTP, przedstawiony zostanie wpływ takich czynników jak: wielkość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, obciążenia wstępnego linii chronionej oraz zjawiska nasycenia przekładników prądowych na czas pomiaru, selektywność i niezawodność zabezpieczenia.

COMBINED PHASE AND CURRENT COMPARISON PROTECTION FOR TRANSMISSION LINES

Summary. A new concept of a high-speed phase/current comparison protection based on the digital evaluation of the difference both in phase angle and instant value of current waveforms measured at two transmission line terminals is proposed. Results of EMTP simulations for two types of Phase-Current Comparison Protection Scheme (PCCPS), realised either as segregated or non-segregated schemes, are presented for in-zone and out-zone faults. The qualitative analysis is based on the influence of fault resistance, pre-fault load current and CTs saturation phenomena on the measuring time, selectivity and reliability of the PCCPS algorithms.

ANALYSE NEUER FEHLERERFASSUNGSKRITERIEN FÜR DEN DIGITALEN STROMVERGLEICHSSCHUTZ VON HOCHSPANNUNGSFREILEITUNGEN

Zusammenfassung. Die Arbeit behandelt Untersuchungen eines verbesserten Verfahrens zum kombinierten Strom- und Phasenvergleichsschutz (SPVS) von Übertragungsleitungen, das entweder als dreiphasige oder ein-systemige Ausführung realisiert werden kann.

Ausgehend von der EMTP-Simulation wurde die Schutzfunktion off-line bestimmt und Wirkungsweise der SPVS Algorithmen bei verschiedenen Kurzschlußarten analysiert. Gegenstand dieser Analyse war der Einfluß des Laststromes vor dem Kurzschluß, der Kurzschlußresistenz sowie Sättigung der Stromwandler sowohl auf die Meßzeit als auch Selektivität und Sicherheit des Schutzes.

1. WPROWADZENIE

W warunkach ciągłego wzrostu mocy przesyłanych w systemie elektroenergetycznym (SEE) konieczna jest możliwie szybka likwidacja występujących tam zakłóceń zwarciovych w celu uniknięcia uszkodzeń wywołanych przepływem wielkich prądów oraz zagrożenia (w skrajnym przypadku utraty) stabilności układu. Z drugiej strony wymagana jest pełna wybiórczość likwidacji zwarć, bowiem niepotrzebne wyłączenie prowadzi do trudnych do oszacowania strat ekonomicznych. To wymaganie, znane pod pojęciem selektywności, stanowi wraz z szybkością, czułością i niezawodnością podstawowe kryterium oceny układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ).

Zabezpieczenia stosowane obecnie do ochrony linii przesyłowych WN i NN, realizowane zarówno w technice analogowej, jak i cyfrowej, bazują najczęściej na kryterium odległościowym, porównawczo-fazowym lub różnicowym. Ze względów niezawodnościowych wskazane jest łączenie różnych kryteriów pomiarowych w jednym zabezpieczeniu, np. odległościowego z porównawczo-fazowym lub różnicowym.

Proponowane zabezpieczenie dwukryterialne oparte jest na dyskretnym porównywaniu wartości chwilowych oraz pomiarze kąta względnego przesunięcia przebiegów prądów na obu końcach linii chronionej. Takie rozwiązanie, charakteryzujące się dużą prostotą, powinno łączyć w sobie zalety zabezpieczeń porównawczo-fazowego i różnicowego, zapewniając szybką i niezawodną likwidację zwarć w chronionej linii przy zachowaniu pełnej wybiórczości, bez konieczności pomiaru napięcia.

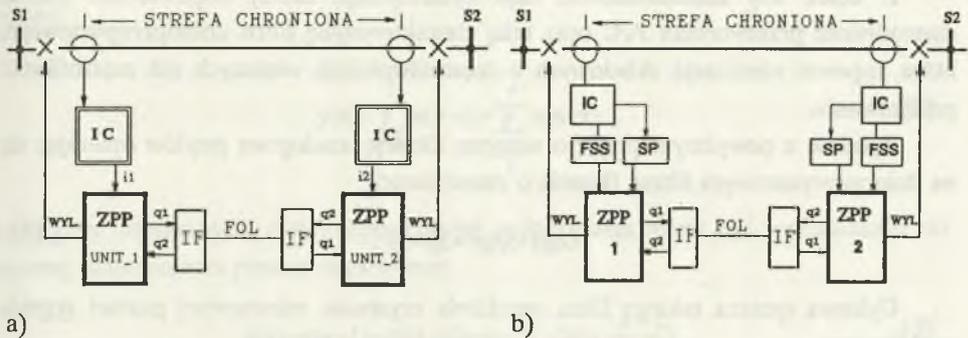
Dla weryfikacji tak sformułowanego kryterium zbadano na drodze symulacji cyfrowej wpływ takich czynników jak: rodzaj i lokalizacja zwarcia, wstępne obciążenie linii chronionej, rezystancja zwarcia oraz zniekształcenie sygnałów pomiarowych na skutek np. nasycenia przekładników prądowych (PP) na działanie zabezpieczenia porównawczo-prądowego (ZPP).

W celu zapewnienia rezerwy (również dla zabezpieczeń odcinków sąsiednich) zakłada się uzupełnienie tego algorytmu kryterium nie wymagającym łącza (np. odległościowym), a dla zapewnienia dokładnej i niezawodnej transmisji danych między stacjami krańcowymi linii przewidziano zastosowanie łącza światłowodowego oraz założono możliwość pełnej synchronizacji próbkowania w obu stacjach [1].

2. KONCEPCJA ALGORYTMÓW POMIAROWYCH ZABEZPIECZENIA

W opracowaniu wykonano analizę porównawczą dwóch wariantów zabezpieczenia: trójsystemowego, w którym pomiar wielkości kryterialnych odbywa się w każdej

fazie chronionej linii (rys.1a), oraz jednosystemowego, wykorzystującego liniową kombinację prądów fazowych i składowych symetrycznych (rys.1b).



Rys. 1. a) Zabezpieczenie trójsystemowe, b) zabezpieczenie jednosystemowe

Fig. 1. Block diagram: a) segregated protection, b) non-segregated protection

W obu wariantach prądy fazowe zostają doprowadzone do obwodów wejściowych (IC), w których dokonywana jest wstępna filtracja dolnoprzepustowa, konwersja analogowo-cyfrowa oraz filtracja składowej podstawowej. W wariantcie jednosystemowym zostają następnie utworzone dyskretne sygnały będące liniową kombinacją prądów fazowych (SP) oraz składowych symetrycznych (FSS). Kryteria pomiarowe w obu wariantach są realizowane w procesorze umieszczonym w bloku ZPP. Dla celów transmisji sygnałów pomiarowych wykorzystano układ interfejs (IF) - łącze światłowodowe (FOL). Zgodnie z przyjętymi założeniami w badaniach symulacyjnych przyjęto, że czas transmisji sygnałów kodowanych w trybie PCM nie przekracza 4 ms [3] przy długości linii chronionej wynoszącej 100 km [7].

3. CYFROWA FILTRACJA SYGNAŁÓW PRĄDOWYCH

3.1. Filtracja składowej podstawowej

Przebiegi prądów doprowadzane do obwodów wejściowych ZPP są sygnałami sinusoidalnymi o częstotliwości podstawowej 50 Hz, zawierającymi jednakże często składowe zakłócające wyższych harmonicznnych i składowe nieokresowe. W procesie filtracji tych prądów należy wyodrębnić składową podstawową przy maksymalnym stłumieniu pozostałych składowych, które należy traktować jako informację zbędną przy detekcji stanów zwarciovych, a często nawet uniemożliwiającą selektywne i niezawodne działanie zabezpieczenia.

Szeroki zakres częstotliwości sygnałów wejściowych stwarza konieczność wprowadzenia do toru ich przetwarzania wstępnej filtracji analogowej, wynikającej ponadto z twierdzenia Shannona o próbkowaniu oraz ograniczonej częstotliwości próbkowania.

Z kolei, aby zminimalizować błąd dyskretyzacji, należy odpowiednio dobrać częstotliwość przetwornika A/C oraz taką charakterystykę filtru dolnoprzepustowego, która zapewni eliminację składowych o częstotliwościach większych niż częstotliwość próbkowania.

Zgodnie z powyższym przyjęto wstępną filtrację analogową prądów opierając się na dolnoprzepustowym filtrze Bessela o transmitancji

$$G(p) = 3/(p^2 + 3p + 3) . \quad (1)$$

Cyfrowa synteza takiego filtru umożliwia uzyskanie rekursywnej postaci sygnału wyjściowego:

$$y(n) = b_{11}y(n-1) + b_{12}y(n-2) + b_{21}x(n) + b_{22}x(n-1) + b_{23}x(n-2) \quad (2)$$

gdzie:

b_{ij} - współczynniki rzeczywiste, zależne od częstotliwości odcięcia i próbkowania,
 $x(n)$ - n -ta próbka sygnału wejściowego filtru.

Wartości współczynników b_{ij} dla częstotliwości odcięcia $f_c = 100\text{Hz}$ wynoszą odpowiednio: $b_{11} = 0.3530$, $b_{12} = -0.0988$, $b_{21} = 0.1865$, $b_{22} = 0.3729$, $b_{23} = 0.1865$.

Cyfrową filtrację składowej podstawowej zrealizowano opierając się na algorytmie filtru FIR z oknem pomiarowym w postaci funkcji Walsha I rzędu o transmitancji

$$H(z) = \sum_{k=0}^s a_k z^{-k} . \quad (3)$$

Sygnał wyjściowy filtru jest zatem splotem sygnału wejściowego z odpowiednią funkcją Walsha, co w ciągłej i dyskretnej dziedzinie czasu przedstawiają zależności:

$$y(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-s}^{t+s} x(\tau) w(t-\tau) d\tau , \quad (4)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^s a_k x(n-k) \quad (5)$$

gdzie:

$s+1$ - liczba próbek w oknie pomiarowym,

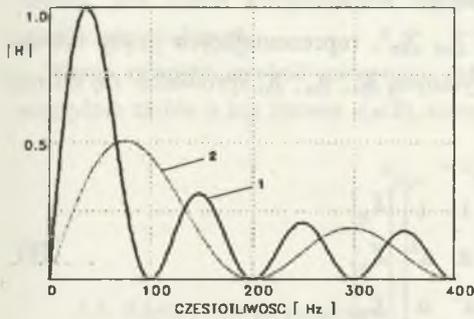
a_k - kolejne wartości obwiedni okna pomiarowego.

Zatem dla funkcji Walsh I rzędu sygnał wyjściowy filtra można zapisać w postaci

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\frac{s-1}{2}} x(n-k) - \sum_{k=\frac{s+1}{2}}^s x(n-k), \quad (6)$$

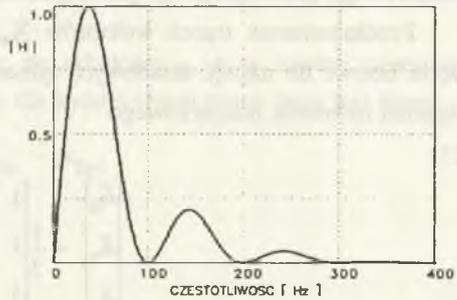
która przy odpowiednio dużej częstotliwości próbkowania może być sprowadzona do szybszej obliczeniowo postaci rekursywnej

$$y(n) = y(n-1) + x(n) + x(n-p-1) - 2x(n - \frac{s}{2} - \frac{1}{2}). \quad (7)$$



Rys. 2. Charakterystyki amplitudowe filtra składowej podstawowej dla: (1) $T=T_1$, (2) $T=1/2T_1$

Fig. 2. Frequency characteristics of the basic waveform of filter for (1) $T=T_1$, (2) $T=1/2T_1$



Rys. 3. Wypadkowa charakterystyka amplitudowa filtra, ($T=T_1$, $N_m=0$)

Fig. 3. Frequency characteristic of the combination the Bessel low-pass filter and Walsh-I recursive algorithm

Jak widać z charakterystyki amplitudowej filtra (rys.2.)¹⁾, dla okna o długości $T=T_1$ (okres składowej podstawowej) występuje stosunkowo słabe tłumienie 3 harmonicznej. Poprawienie własności filtra w tym zakresie można uzyskać np. poprzez skrócenie okna ($T=1/2T_1$), co również poprawia właściwości dynamiczne filtra, lub modyfikację kształtu okna pomiarowego, polegającą na "wycięciu" środkowej jego części [5].

¹⁾ Przyjęto oznaczenia: $\underline{H} = \underline{H}(\omega) / \underline{H}_{max}(\omega)$, $\underline{H}(\omega) = \underline{W}(j\omega) / e^{j\omega T/2}$

Przedstawiony algorytm filtracji składowej podstawowej prądów przy swojej prostocie, gwarantującej dużą szybkość obliczeń, charakteryzuje się wystarczającą dokładnością (rys.3). Należy jednak zaznaczyć, że zagadnienie to pozostaje otwarte, dopuszczające inne, efektywniejsze rozwiązania (np. wykorzystujące okna pomiarowe o zmiennej długości). Warto również zauważyć, że przyjęte założenia, zwłaszcza w stosunku do wstępnej filtracji analogowej, stanowią daleko idące uproszczenie problemu, który w praktyce wiąże się ze złożoną syntezą szybkich filtrów aktywnych.

3.2. Filtracja składowych symetrycznych

Zastosowanie składowych symetrycznych napięć i prądów lub ich kombinacji liniowych w analogowych układach automatyki zabezpieczeniowej sprowadza się do syntezy filtrów elektrycznych, wchodzących w skład obwodów wejściowych różnych zabezpieczeń (np. impedancyjnych, kierunkowych, różnicowych i porównawczo-fazowych) [5], umożliwiając ich realizację na podstawie wspólnego dla wszystkich faz układu pomiarowego (zabezpieczenie jednosystemowe).

Przekształcenie trzech wektorów \underline{X}_R , \underline{X}_S , \underline{X}_T ²⁾, reprezentujących prądy lub napięcia fazowe do napięć składowych symetrycznych \underline{X}_0 , \underline{X}_1 , \underline{X}_2 , sprowadza się do rozwiązania równania macierzowego

$$\begin{bmatrix} \underline{X}_0 \\ \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{X}_R \\ \underline{X}_S \\ \underline{X}_T \end{bmatrix} \quad (8)$$

gdzie: $\alpha = e^{j2\pi/3}$, $\alpha^2 = e^{j4\pi/3}$ są operatorami obrotu.

Dla chwilowych, dyskretnych wartości sygnałów wejściowych: x_R , x_S , x_T , przy uwzględnieniu zależności

$$x_{(n-2m/3)} = -x_{(n-m/6)} \quad (9)$$

równanie (8) można zapisać w postaci

²⁾ Przyjęto tradycyjne oznaczenia faz: R, S, T, świadomie rezygnując z przewidzianej przez normę symboliki L₁, L₂, L₃ lub A, B, C.

$$\begin{aligned}
 3x_{0(n)} &= x_{R(n)} + x_{S(n)} + x_{T(n)}, \\
 3x_{1(n)} &= x_{R(n)} - x_{S(n-m/6)} + x_{T(n-m/3)}, \\
 3x_{2(n)} &= x_{R(n)} + x_{S(n-m/3)} - x_{T(n-m/6)},
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

gdzie: m - liczba próbek w okresie składowej podstawowej sygnału $x(t)$.

Analogicznie do równania (8) można zapisać transformatę Clarke'a

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ X_S \\ X_T \end{bmatrix}
 \tag{11}$$

Jak widać, przekształcenie $\alpha, \beta, 0$ nie wykorzystuje zespolonych współczynników obrotu, jest zatem korzystniejsze od przekształcenia 1, 2, 0, zwłaszcza w analizie stanów nieustalonych.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, że składowe α, β są zawsze przesunięte względem siebie o kąt fazowy $-(\pi/2)$, zatem dla każdej chwili czasu dany jest fazor

$$\underline{x}_{C(n)} = x_{\alpha(n)} - jx_{\beta(n)}.
 \tag{12}$$

3.3. Algorytmy pomiarowe

Jak już wspomniano, detekcja zwarcia odbywa się na podstawie dwóch kryteriów: przesunięcia fazowego między prądami oraz różnicy wartości chwilowych. Dla kryteriów tych założono, że porównywane sygnały pomiarowe są przebiegami składowej podstawowej o postaci

$$x_1(t) = X_1 \sin(\omega t), \quad x_2(t) = X_2 \sin(\omega t - \phi).
 \tag{13}$$

W dyskretnej dziedzinie czasu można zapisać

$$x_1(n) = X_1 \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad x_2(n) = X_2 \sin\left(\frac{2\pi n}{N} - \phi\right)
 \tag{14}$$

gdzie N jest liczbą próbek w oknie pomiarowym T .

Po przyjęciu oznaczeń

$$\alpha_d = 90^\circ \rightarrow T_d = \frac{T}{4}, n_d = \frac{N}{4} \quad (15)$$

i dokonaniu prostych przeliczeń trygonometrycznych można otrzymać zależności na wartość funkcji sinus i cosinus kąta przesunięcia fazowego ϕ dla kolejnych próbek sygnałów $x_1(n)$, $x_2(n)$

$$\sin\phi(n) = \frac{x_1(n)x_2(n-n_d) - x_1(n-n_d)x_2(n)}{X_1 X_2}, \quad (16)$$

$$\cos\phi(n) = \frac{x_1(n-n_d)x_2(n-n_d) + x_1(n)x_2(n)}{X_1 X_2}. \quad (17)$$

Moduły fazorów X_1 i X_2 można wyznaczyć z zależności

$$X_i^2 = x_i^2(n) + x_i^2(n-n_d) \quad (18)$$

Ogólnie można zatem zapisać

$$\pm\phi(n) = \arctg \frac{x_1(n)x_2(n-n_d) - x_1(n-n_d)x_2(n)}{x_1(n)x_2(n) + x_1(n-n_d)x_2(n-n_d)} \quad (19)$$

Przy czym jednoznaczne określenie znaku i wartości kąta $\phi(n)$ wymaga obliczenia zależności (16) i (17).

Odnosząc przedstawione rozważania do algorytmów pomiarowych założono, że sygnały otrzymane w ZPP w wyniku filtracji analogowo-cyfrowej w obu stacjach: $q_1(n)$ i $q_2(n)$ mają postać (14). Opierając się na zależnościach (16), (17), (18) można wprowadzić funkcję kryterialną $\phi(n)$ i sformułować kryterium fazowe o postaci

$$\phi[q_1(n), q_2(n)] > \theta \Rightarrow W_\phi(n) = 1 \quad (20)$$

gdzie W_ϕ jest wielkością binarną, sygnalizującą spełnienie kryterium fazowego, a θ kątem blokowania.

W zabezpieczeniu trójsystemowym kryterium to sprawdzane jest dla każdej fazy linii chronionej, natomiast w wersji jednosystemowej sprawdzana jest zależność

$$\Phi[q_{m1}(n), q_{m2}(n)] > \theta \Rightarrow W_{\Phi}(n)=1 , \quad (21)$$

w której $q_m(n)$ stanowi kombinację liniową składowych symetrycznych prądów w danej stacji

$$q_{mi}(n) = P q_{1i}(n) + N q_{2i}(n) + H q_{0i}(n) . \quad (22)$$

Kryterium fazowe można zmodyfikować stosując transformatę (11). W wyniku przekształcenia, dla przyjętych oznaczeń, otrzymuje się fazor

$$\underline{q}_{Ci}(n) = q_{\alpha i}(n) - j q_{\beta i}(n) . \quad (23)$$

Biorąc pod uwagę zależność (19) funkcję kryterialną można wyrazić wzorem

$$\pm \phi(n) = \arctg \frac{q_{\alpha 1}(n)q_{\beta 2}(n) - q_{\beta 1}(n)q_{\alpha 2}(n)}{q_{\alpha 1}(n)q_{\alpha 2}(n) + q_{\beta 1}(n)q_{\beta 2}(n)} . \quad (24)$$

Jak widać, kryterium fazowe oparte na tej zależności korzysta jedynie z bieżących próbek sygnałów wyjściowych filtrów cyfrowych.

Równocześnie z pomiarem przesunięcia fazowego między prądami na obu końcach chronionej linii sprawdzane jest kryterium różnicowe, które można sformułować następująco

$$Q_{\Delta}(n) > k (Q_h(n) + Q_s) \Rightarrow W_{\Delta}(n)=1 \quad (25)$$

gdzie: Q_s - wartość rozruchowa, k - współczynnik hamowania; Q_{Δ} , Q_h - sygnały różnicowy i hamowania, dane zależnościami

$$Q_{\Delta}(n) = |q_1(n) - q_2(n)|, \quad Q_h(n) = |q_1(n) + q_2(n)| . \quad (26)$$

W jednosystemowym ZPP kryterium (25) sprawdzane jest na podstawie sygnału, będącego liniową kombinacją prądów fazowych o postaci

$$q_{msi}(n) = R q_{Ri}(n) + S q_{Si}(n) + T q_{Ti}(n) \quad (27)$$

gdzie: R, S, T - całkowite współczynniki wzmocnienia.

Na podstawie obu opisanych kryteriów ZPP ustala lokalizację zwarcia (w strefie lub poza strefą chronioną), po czym w każdej stacji generowany jest sygnał wyłączający zabezpieczenia zgodnie z warunkiem

$$W(n) = W_{\phi}(n) \vee W_{\Delta}(n) . \quad (28)$$

Przedstawione kryteria pomiarowe poddano weryfikacji operując się na przebiegach prądów na krańcach linii chronionej podczas symulowanych cyfrowo zwarć w modelu układu przesyłowego.

4. CYFROWA SYMULACJA ZWARĆ W UKŁADZIE PRZESYŁOWYM

Weryfikacja przedstawionej koncepcji ZPP wymaga przede wszystkim zbadania zachowania się algorytmu w różnych wariantach pracy układu przesyłowego, w celu sprawdzenia jego selektywności i niezawodności oraz szybkości i czułości.

Ze względu na to, że wyniki tzw. prób zwarciovych, służących do uzyskania informacji o przebiegu wybranych zakłóceń w chronionym obiekcie lub wyniki rejestracji rzeczywistych zwarć mają z natury rzeczy ograniczony charakter, zwłaszcza w odniesieniu do będących przedmiotem badań zabezpieczeń łączowych, istotnego znaczenia nabierają wstępne badania "off-line" algorytmów pomiarowych z wykorzystaniem możliwie wiernego modelu zabezpieczanego układu.

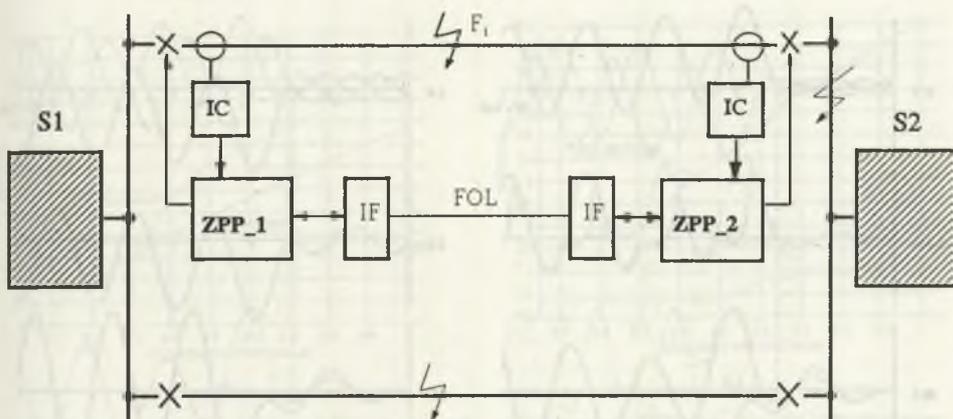
4.1. Model układu przesyłowego

Dla celów analizy symulacyjnej przyjęto model zawierający linię dwutorową (220 kV, 100 km), łączącą systemy 400 kV i 110 kV. Do realizacji modelu wykorzystano odpowiednie karty pakietu EMTP, w szczególności "saturable transformer component" i "Semlyen setup" - oparty na metodzie splotu rekurencyjnego rozwiązania równań falowych linii [10]. Na rys.4 przedstawiono fragment układu przesyłowego z linią chronioną przez ZPP (pominięto symbole transformatorów między linią a systemami S_1 i S_2). Analizę działania algorytmu zabezpieczenia prowadzono opierając się na symulacji różnych rodzajów zwarć (symetrycznych i niesymetrycznych, niejednoczesnych, metalicznych, łukowych) o różnej lokalizacji.

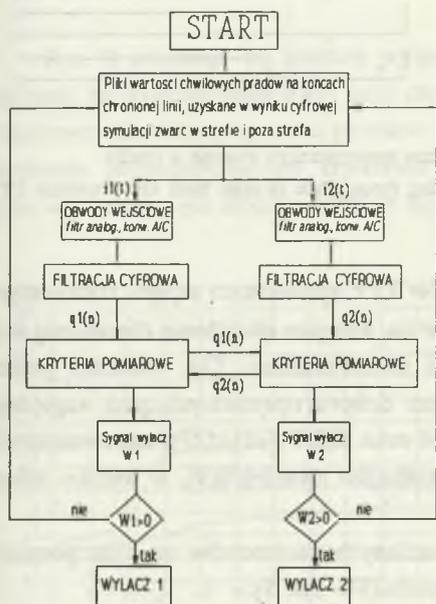
4.2. Weryfikacja algorytmów pomiarowych w stanach zwarciovych

Każdy przypadek zwarciovych w układzie z rys. 4 był przedmiotem analizy algorytmu pomiarowego ZPP (jedno- i trójsystemowego), zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 5. Punktem wyjścia dla tej analizy były pliki dyskretnej wartości prądów zwarciovych, uzyskane w wyniku symulacji EMTP.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnałów wykorzystywanych w zabezpieczeniu podczas 3-fazowego zwarcia w strefie w warunkach jednostronnego



Rys. 4. Model układu przesyłowego dla symulacji EMTP
 Fig. 4. Transmission system model for EMTP simulation

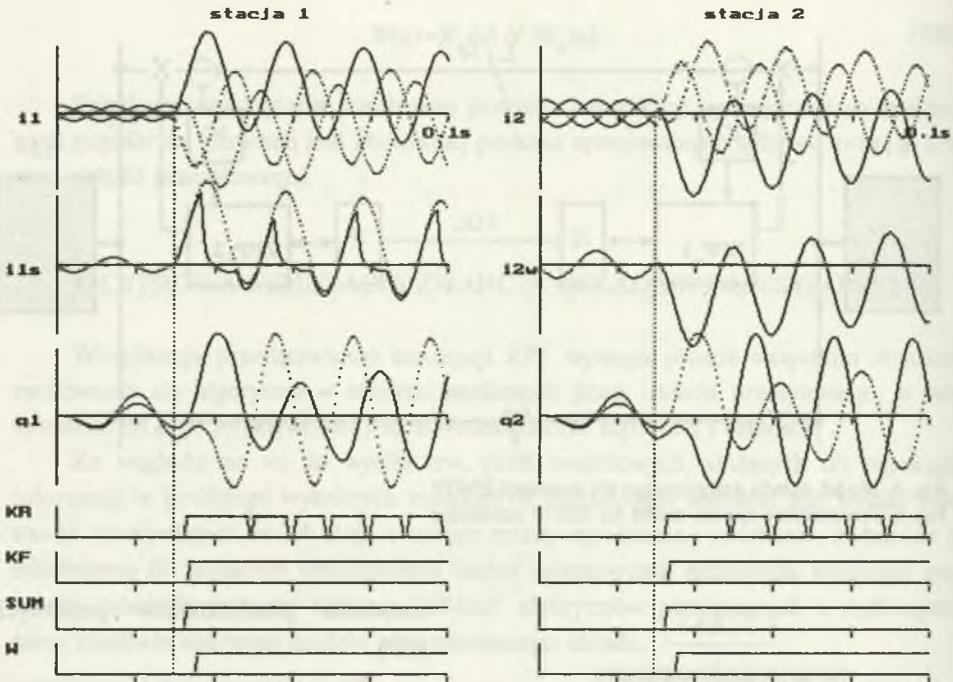


Rys.5. Algorytm testowania ZPP
 Fig.5. Flow-chart of the PCCPS algorithm

nasylenia przekładników prądowych (PP).

Prądy pierwotne (i_1), uzyskane w wyniku symulacji EMTP, są kolejno transformowane w modelu PP (i) i poddane filtracji analogowo-cyfrowej (q). Na podstawie kryteriów pomiarowych otrzymuje się w każdej stacji sygnały logiczne: KR (kryterium różnicowe), KF (kryterium fazowe), które przesyłane są łączem do stacji przeciwnej, oraz sumę logiczną obu sygnałów SUM i sygnał wyłączający W.

W badaniach przyjęto: częstotliwość próbkowania $f_s=800$ Hz, częstotliwość odcięcia filtra analogowego $f_c=100$ Hz oraz $\theta=50^\circ$, $k=0,5$, $Q_i=20 \text{ A} \cdot \text{s}$.



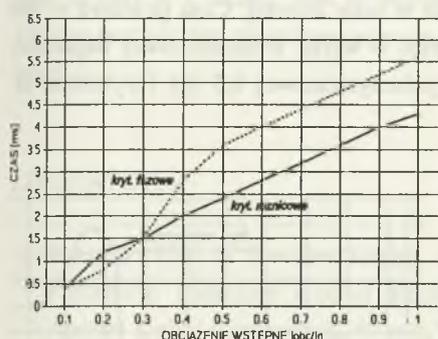
Rys. 6. Przebiegi sygnałów w trójsystemowym ZPP podczas symetrycznego zwarcia w strefie

Fig. 6. Signals processed in the segregated PCCPS during three-phase in-zone fault and transient CT's saturation

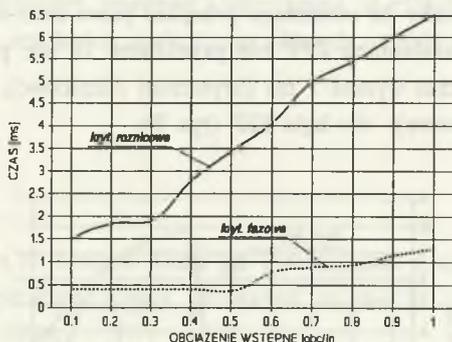
W ramach jakościowej analizy algorytmów ZPP sprawdzono wpływ takich czynników jak: rezystancja przejścia w miejscu zwarcia, wstępne obciążenie chronionej linii oraz kąt załączenia zwarcia na czas reakcji zabezpieczenia. Dla wariantu jedno-systemowego dokonano wstępnej analizy celem doboru optymalnych pod względem szybkości ZPP wartości współczynników P,N,H oraz R,S,T (22), (27), zapewniających zbliżoną czułość zabezpieczenia dla różnych rodzajów zwarć [5],[9], w wyniku której przyjęto: P:N:H=1:7:5, R:S:T=1:2:3.

Na rys. 7-9 przedstawiono wpływ wspomnianych parametrów na czas pomiaru ZPP przy zwarciu jednofazowym (fazy R) w strefie (F_1 - rys. 5).

Z rys. 7 widać, że wartość prądu płynącego w chronionej linii przed zwarcie ma istotny wpływ na czas pomiaru ZPP, który przy obciążeniu prądem znamionowym wzrasta do wartości 4,3 ms dla wariantu trójsystemowego (kryterium różnicowe) oraz 1,2 ms dla wariantu jednosystemowego (kryterium fazowe).



a)

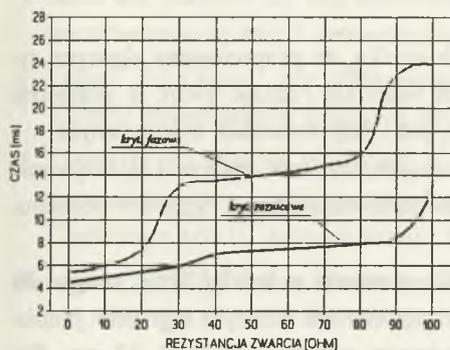


b)

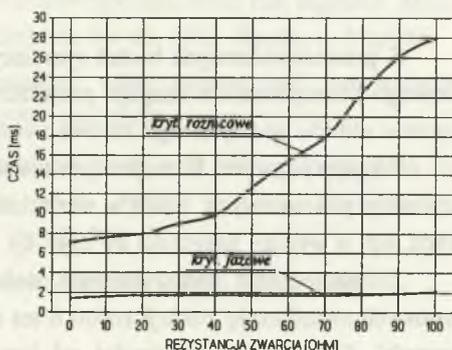
Rys. 7. Wpływ obciążenia wstępnego linii chronionej na czas pomiaru ZPP, przy zwarciu jednofazowym: a) 3-systemowe ZPP, b) jednosystemowe ZPP

Fig. 7. Effect of the pre-fault load current on the PCCPS algorithms measuring time during single-phase-earth fault: a) segregated PCCPS, b) non-segregated PCCPS; ... - phase-criterion, - - differential criterion

Rys. 8 wskazuje na znaczny wpływ rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na szybkość trójsystemowego ZPP, przy czym korzystniejsze w tym przypadku kryterium różnicowe charakteryzuje czas pomiaru < 15 ms ($R_f = 100 \Omega$, $I_{obc} = I_n$), podczas kiedy w wariancie jednosystemowym kryterium fazowe, w przeciwieństwie do różnicowego, tylko w nieznacznym stopniu poddaje się wpływowi rezystancji zwarcia.



a)

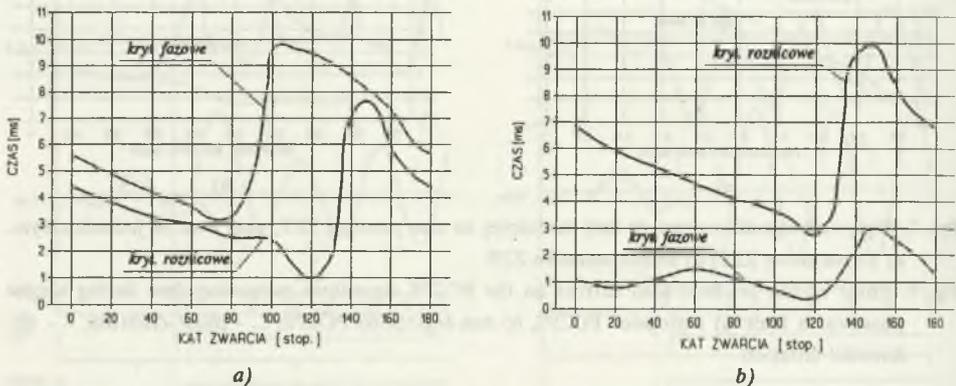


b)

Rys. 8. Wpływ rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na czas pomiaru ZPP, przy zwarciu jednofazowym: a) 3-systemowe ZPP, b) jednosystemowe ZPP

Fig. 8. Influence of fault resistance on the PCCPS algorithms performance during single-phase-earth fault

Na czas pomiaru obu algorytmów wpływa również kąt załączenia zwarcia, odniesiony do ostatniego przejścia przez zero napięcia w fazie zwartej. Czas pomiaru w obu wariantach ZPP nie przekracza 10 ms, przy czym w wersji trójsystemowej najkrótszy czas wynosi 1 ms (kryterium różnicowe), a w jednosystemowej 0,5 ms (kryterium fazowe) - dla kąta 120° (rys. 9).



Rys. 9. Wpływ kąta załączenia zwarcia na czas pomiaru ZPP, przy zwarciu jednofazowym ($I_{\text{obc}}=I_n$, $R_f=0$): a) 3-systemowe ZPP, b) jednosystemowe ZPP

Fig. 9. Performance of the PCCPS algorithms for various fault inception angles during single-phase earth fault ($I_{\text{load}}=I_n$, $R_f=0$).

5. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że proponowany algorytm cyfrowego zabezpieczenia reaguje prawidłowo na wszystkie rodzaje zwarć w przyjętym modelu układu przesyłowego zarówno w strefie, jak i przy zwarciach zewnętrznych.

Przyjęty algorytm filtracji zapewnia wystarczającą szybkość, czułość i selektywność kryteriów pomiarowych, także w warunkach silnego zniekształcenia sygnałów pomiarowych, np. w wyniku nasycenia PP (rys. 6).

Zabezpieczenie dwukryterialne, dokonujące pomiaru w każdej fazie, osiąga dla typowych zwarć czasy reakcji rzędu 8 ms (z uwzględnieniem przesyłu sygnałów pomiarowych). Czas ten w zależności od kąta załączenia zwarcia wynosi 4...12 ms. Dla znacznych wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia ($>20 \Omega$) czas reakcji, zwłaszcza kryterium fazowego, znacznie wzrasta (do ok. 24 ms dla $R_f=100 \Omega$).

Przy optymalnym doborze współczynników wzmocnienia prądów fazowych składowych symetrycznych można uzyskać znaczne zmniejszenie wpływu rezystancji zwarcia i kąta załączenia zwarcia na czas reakcji jednosystemowego ZPP. Czas ten, przy

założonych współczynnikach wzmocnienia, mieści się w przedziale od 4,5 do 7 ms dla zwarcia fazy R z ziemią. Jest to jednakże wynikiem pewnego kompromisu, w efekcie którego wariant ten charakteryzuje się różną szybkością reakcji przy różnych rodzajach zwarcć.

LITERATURA

1. Ryan B.: Use of Satellite Timing Signals in Scheme Tests on Transmission Line Protection including Recent Field Experience. Paper presented at the 60-th Annual Doble Conference, Boston/USA, 1993.
2. Matsuda T. i in.: Experience with maintenance and improvement in reliability of microprocessor-based digital protection equipment for power transmission systems. CIGRE 34-104, Paris, Session 1992.
3. Tulki M., Törmänen J., Kulainen J.: Development of a digital Teleprotection System, CIGRE 35-105, Paris 1992.
4. Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, t.2 - Automatyka eliminacyjna. WNT, Warszawa 1985.
5. Ungrad H., Winkler W., Wiszniewski A.: Schutztechnik in Elektroenergiesystemen. Springer Verlag, Berlin 1991.
6. CIGRE Publications: CIGRE Guide on Protection Systems Using Telecommunications. CIGRE CE/SC34/35, Paris 1987.
7. Koch G., Schmidt E.: Ein numerischer Stromvergleichsschutz mit digitaler Messwertübertragung über Lichtwellenleiter. Elektrie, Nr 45, 1991, Berlin, s. 272-276.
8. Łobos T.: Digital line differential protection using symmetrical components. Electric Power System Research, No.22, 1991, pp. 85-89.
9. Koglin H.-J., Winkler W., Witek B.: Combined phase and current protection for transmission lines. Proceedings of the 11-th Power Systems Computation Conference vol. II, Avignon/France 1993, pp.775-780.
10. Leuven EMTP Center: Alternative Transients Program - Rule Book, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos

Wpłynęło do Redakcji dnia 19 marca 1994 r.

Abstract

The main structure of the studied protective scheme is presented in a simplified form for segregated and non-segregated versions in Fig.1. At each line terminal there exists the same arrangement containing a set of current transformers, input circuits (IC), the main protective units and the interface for the remote communication (IF). It is assumed that for the accurate and reliable data transmission from one line terminal to the other a fibre optic channel is applied and compared discrete signals are exactly synchronized [1].

The filtering of the current waveforms fundamental components is performed through the correlation of measuring signal with Walsh function of the 1-st order (Eqns.(4), (5)) combined with the Bessel low-pass filter (Eqns. (1), (2)). The frequency characteristic of such a filter is presented in Fig.3. For the non-segregated version of the PCCPS the estimation of the symmetrical components of the line currents is convenient, according to the Eqns. (8), (11).

The differential criterion is realised according to the formulas (25) and (26), however in the non-segregated version input signal being a combination of phase quantities (Eqn. 27) is concerned. The phase-comparison criterion is realised according to the formulas (20) and (21) for the segregated and non-segregated version respectively. Phase-shift measurement is realised either according to Eqn. 19 or with Clarke transform application (Eqn. 24) for both PCCPS versions.

The extended fault simulation studies were performed in the transmission system model (Fig. 4) on the basis of the EMTP. Simple and complex faults were simulated and the current waveforms, supplied to the PCCPS input circuits at receiving and sending ends were determined.

The verification of the protective criteria was carried out according to the flow-chart presented in Fig. 5 and the PCCP performance in various fault conditions (including the effect of the transient CT's saturation - Fig. 6) was analysed. Finally, the effect of such parameters as: pre-fault load current (Fig. 7), fault resistance (Fig.8), fault inception angle (Fig. 9) on the PCCP algorithms operation was checked.

The proposed solution offers new possibilities for the protection of EHV and UHV transmission lines, ensuring high reliability as well as speed of combined PCCPS. The non-segregated version is in general faster than the segregated one. The sensitivity of the former version is equal for all phases, and its operating time is for all types of faults shorter than 8 ms., including the communication channel delay time equal to 4 ms. For the segregated version the operating time is in the range from 5 ms to 20 ms. The investigations have also shown that PCCPS operates properly even in case of input signals extremely distorted due to CT's saturation and/or oscillations caused by the line capacities and influence of the parallel line.