ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ELEKTRYKA z. 164 Nr kol. 1409

Zbigniew WYSOCKI

CYFROWA DETEKCJA ZWARCIA W LINII NAPOWIETRZNEJ

Streszczenie. Prezentowany artykuł poświęcony jest tematyce cyfrowego wykrywania zwarcia w elektroenergetycznej linii napowietrznej wysokiego napięcia w oparciu o kryterium impedancyjne dla potrzeb cyfrowego zabezpieczenia odległościowego. Głównym celem pracy jest przedstawienie sposobu rozwiązania problemu poprawnego określania „kierunku zwarcia" podczas zwarć bardzo bliskich miejsca zainstalowania zabezpieczenia linii.

DIGITAL DETECTION OF FAULT ON OVERHEAD HV LINE

Summary. The paper presents deals with digital detection of the fault on overhead line. The main subject of the work is presentation of solving the problem of a directionality of the distance relay in case of fault placed closely to the line protection.

1. WPROWADZENIE

Podstawową funkcją Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej (EAZ) jest detekcja stanu zwarciowego elementu systemu elektroenergetycznego (se) w trybie on-line celem szybkiego wyłączenia go spod napięcia. Spełnienie zatem tej ważnej funkcji wymaga opracowania i wdrożenia do praktyki poprawnych metod wykrywania zwarć w poszczególnych elementach se. Konwencjonalna, stosowana od kilku dziesięcioleci Analogowa EAZ wykorzystuje szereg standardowych sposobów detekcji zwarć w elementach se. W przypadku linii napowietrznej tym standardem jest metoda odległościowa [1],[2] polegająca na szacowaniu odległości zwarciowej i określaniu tzw. kierunku zwarcia, który jest niezbędnie potrzebny dla bezspornego „stwierdzenia", że zwarcie wystąpiło „z przodu", tzn. na rozpatrywanej linii. W praktyce ww. metoda realizowana jest przez zabezpieczenie odległościowe, którego idea działania polega na permanentnym sprawdzaniu, czy impedancja linii Z („widziana" przez przekaźnik odległościowy), będąca miarą odległości zwarciowej, znajduje się w obszarze (charakterystyka rozruchowa) świadczącym, że zwarcie wystąpiło „z przodu"; biorąc pod uwagę różne rodzaje zwarć, jakie mogą wystąpić na linii, detekcja zwarcia wyma-

ga, aby poddawana komparacji z charakterystyką rozruchową impedancja Z była skorelowana z pętlą zwarciową odpowiadającą zaistniałemu zwarciu. Przy opracowywaniu zabezpieczenia odległościowego należy uwzględnić dodatkowo kilka czynników mających wpływ na fałszowanie pomiaru impedancji Z; najistotniejsze z nich to:

- sprzężenia magnetyczne między torami,
- rezystancja przejścia w miejscu zwarcia,
- duże obciążenie wstępne linii.

Dynamiczny rozwój techniki mikroprocesorowej sprawił, iż możliwa stała się w ostatnich latach realizacja skomplikowanych zabezpieczeń elektroenergetycznych metodami cyfrowymi. Sytuacja ta była impulsem do opracowania szeregu algorytmów, które w oparciu o spróbkowane przebiegi prądów i napięć umożliwiają detekcję zwarć w poszczególnych elementach se. W większości przypadków algorytmy Cyfrowej EAZ bazują na metodach wykrywania zwarć wykorzystywanych w rozwiązaniach analogowych. Stwierdzenie to dotyczy również cyfrowej automatyki zabezpieczeniowej linii napowietrznych, która dla detekcji zwarć w linii posługuje się metodą odległościową. Prezentowany artykuł omawia w zwięzły sposób podstawowe zadania związane z cyfrową detekcją zwarcia w linii napowietrznej bazującą na tej metodzie, a jego głównym celem jest przedstawienie rozwiązania problemu poprawnego określania kierunku zwarcia dla zwarć bardzo bliskich miejsca zainstalowania zabezpieczenia odległościowego.

2. CYFROWA DETEKCJA ZWARCIA W LINII NAPOWIETRZNEJ

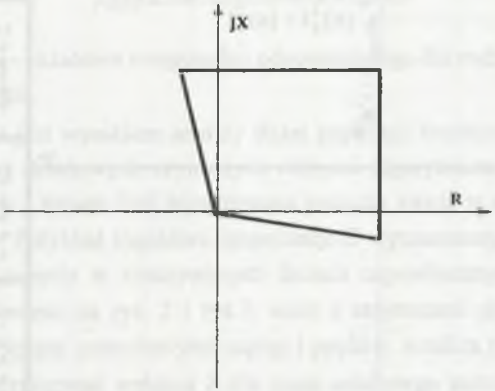
Cyfrowa detekcja zwarcia w linii napowietrznej metodą odległościową wymaga w pierwszym rzędzie:

- określenia na płaszczyźnie $\{R, jX\}$ obszaru usytuowań impedancji Z dla przypadków zwarć na linii,
- uzyskania procedury dla estymacji impedancji Z,
- zapewnienia sprawdzania usytuowania - względem charakterystyki rozruchowej - impedancji Z estymowanej w oparciu o pętlę zwarciową odpowiadającą zaistniałemu rodzajowi zwarcia i zwartym fazom.

2.1. Obszar usytuowań impedancji Z

Określenie obszaru usytuowań impedancji zwartej linii jest w EAZ standardem polegającym na przyjęciu odpowiedniej charakterystyki rozruchowej, której wnętrze stanowi interesujący nas obszar. Istotnym elementem charakterystyki rozruchowej jest jej kształt, który ma zapewnić również objęcie impedancji zwarciowych linii zafałszowanych przez wymienione w pkt.1. czynniki (z wyłączeniem zwarć wysokoomowych). Należy podkreślić, że technika

cyfrowa umożliwia kreowanie charakterystyk rozruchowych o praktycznie dowolnych kształtach. Rys. 1 przedstawia na płaszczyźnie {R, jX} nieosiągalną w rozwiązaniach analogowych, poligonalną charakterystykę rozruchową, powszechnie stosowaną w cyfrowych zabezpieczeniach odległościowych linii napowietrznych WN [3], [4], [5], [6].



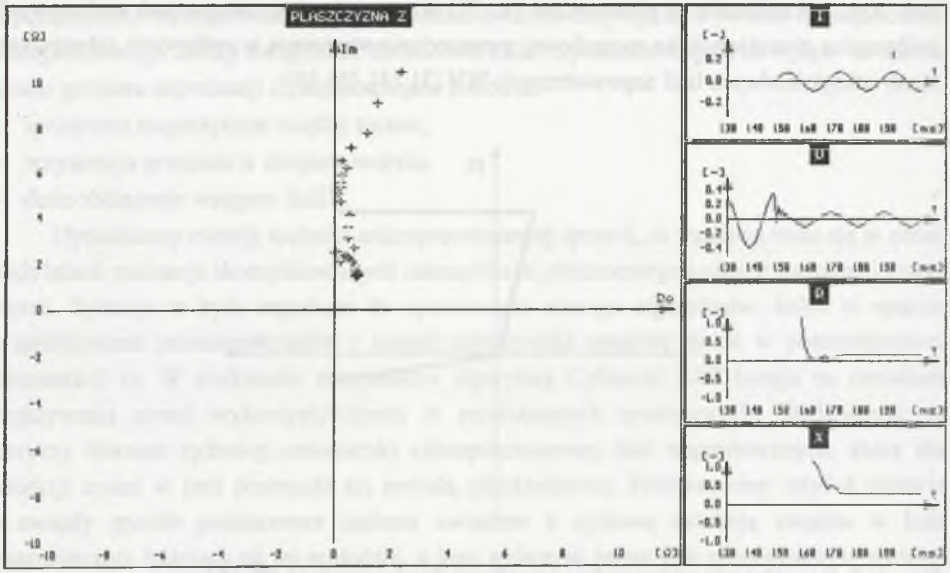
Rys. 1. Poligonalna charakterystyka rozruchowa na płaszczyźnie {R, jX}
Fig. 1. Polygonal starting characteristic on the {R, jX} plane

2.2. Estymacja impedancji Z

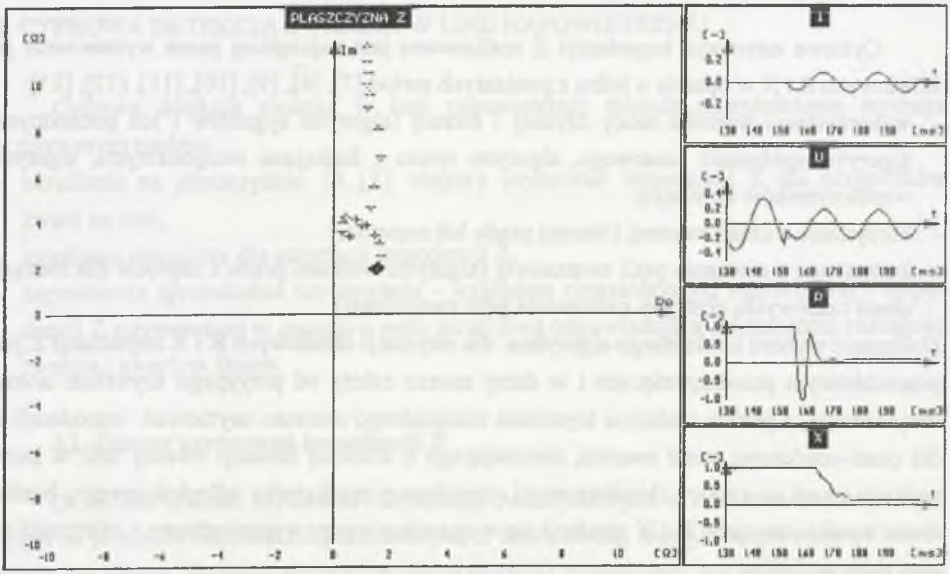
Cyfrowa estymacja impedancji Z realizowana jest najczęściej przez wyznaczanie jej składowych R i X w oparciu o jedną z poniższych metod [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]:

- wykorzystanie wartości mocy czynnej i biernej (algorytm sygnałów i ich pochodnych, algorytm opóźnienia czasowego, algorytm splotu z funkcjami ortogonalnymi, algorytm współczynników korelacji),
- korzystanie z części czynnej i biernej prądu lub napięcia,
- korzystanie z równania pętli zwarciowej (algorytm wartości prądu i napięcia dla różnych chwil czasowych, algorytm całkowania pętli zwarciowej).

Dokonanie wyboru konkretnego algorytmu dla estymacji składowych R i X impedancji Z jest pracochłonnym przedsięwzięciem i w dużej mierze zależy od przyjętego kryterium oceny. Przykładowo, z punktu widzenia kryterium minimalnego rozrzutu usytuowań impedancji Z dla quasi-ustalonego stanu zwarcia, decydującego o stabilnej detekcji zwartej linii w przypadkach zwarć na granicy charakterystyki rozruchowej przekaźnika odległościowego, bardzo dobre wyniki estymacji R i X uzyskuje się w oparciu o wzory wyprowadzone z zależności na moc czynną i bierną:



Rys. 2. Trajektoria impedancji Z dla jednofazowego zwarcia na linii 220 kV
Fig. 2. Trajectory of Z impedance for a one-phase fault on 220 kV line



Rys. 3. Trajektoria impedancji Z dla dwufazowego zwarcia na linii 110 kV
Fig. 3. Trajectory of Z impedance for a two-phase fault on 110 kV line

$$R(n) = \frac{u_a(n)i_a(n) + u_b(n)i_b(n)}{i_a^2(n) + i_b^2(n)}$$

$$X(n) = \frac{u_b(n)i_a(n) - u_a(n)i_b(n)}{i_a^2(n) + i_b^2(n)}$$

w których u_a, u_b, i_a, i_b - składowe ortogonalne odpowiedniego dla rodzaju zwarcia i zwartych faz, napięcia i prądu linii.

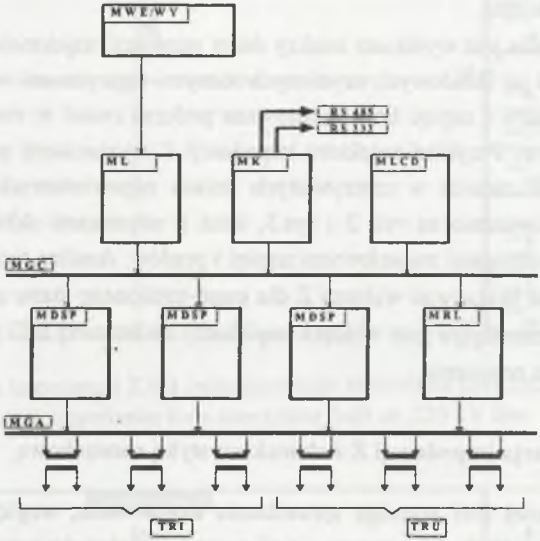
Ocena powyższa jest wynikiem analizy dużej populacji trajektorii impedancji Z uzyskiwanych z estymat jej składowych czynionych różnymi algorytmami w oparciu o spróbkowane przebiegi prądów i napięć linii rejestrowane podczas zwarć w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym. Przykład trajektorii impedancji Z wyznaczanej powyższą metodą dla przejściowego stanu zwarcia w rzeczywistych liniach napowietrznych 220 kV i 110 kV przedstawiono odpowiednio na rys. 2 i rys.3, wraz z estymatami składowych R i X oraz spróbkowanymi przebiegami zwarciowymi napięć i prądów. Analiza tych rysunków pozwala zauważyć, iż rozrzut usytuowań wektora Z dla quasi-ustalonego stanu zwarcia linii jest niewielki; punkty reprezentujące grot wektora impedancji zwarciowej linii plasują się wewnątrz okręgu o niewielkim promieniu.

2.3. Komparacja impedancji Z z charakterystyką rozruchową

Detekcja zwartej linii wymaga sprawdzania usytuowania, względem charakterystyki rozruchowej, impedancji Z estymowanej z pętli zwarciowej skorelowanej z rodzajem zwarcia i zwartymi fazami. Problem spełnienia tego wymagania można rozwiązać na dwa sposoby: selektywny i eliminujący. Sposób selektywny bazuje na tzw. wybiorniku fazowym, który określa rodzaj zwarcia i zwarte fazy linii i jednoznacznie wybiera skorelowaną z zaistniałym zwarciem pętlę zwarciową, co w konsekwencji umożliwia estymację właściwej, wymaganej dla komparacji z charakterystyką rozruchową zabezpieczenia impedancji Z. Sposób eliminujący polega na jednoczesnej komparacji charakterystyki rozruchowej z impedancjami Z estymowanymi dla wszystkich przyjętych do realizacji pętli zwarciowych; takie podejście w sposób samoczynny odrzuca komparacje charakterystyki rozruchowej z „nie skorelowanymi" impedancjami Z, ponieważ tylko impedancje „skorelowane" dają spodziewane wyniki w postaci stabilnego plasowania się impedancji Z we wnętrzu charakterystyki rozruchowej.

W aktualnych rozwiązaniach cyfrowych zabezpieczeń odległościowych stosowane są oba sposoby zapewniające komparację charakterystyki rozruchowej ze „skorelowaną" z zaistniałym zwarciem impedancją Z, aczkolwiek z uwagi na pewność detekcji zwarcia preferowany jest „sposób eliminujący". Praktyczna realizacja tego sposobu z uwagi na konieczność wykonywania w trybie on-line wielu czasochłonnych obliczeń - estymacja impedancji Z dla 6 pętli zwarciowych oraz 6-krotna jej komparacja z charakterystyką rozruchową - rozwiązy-

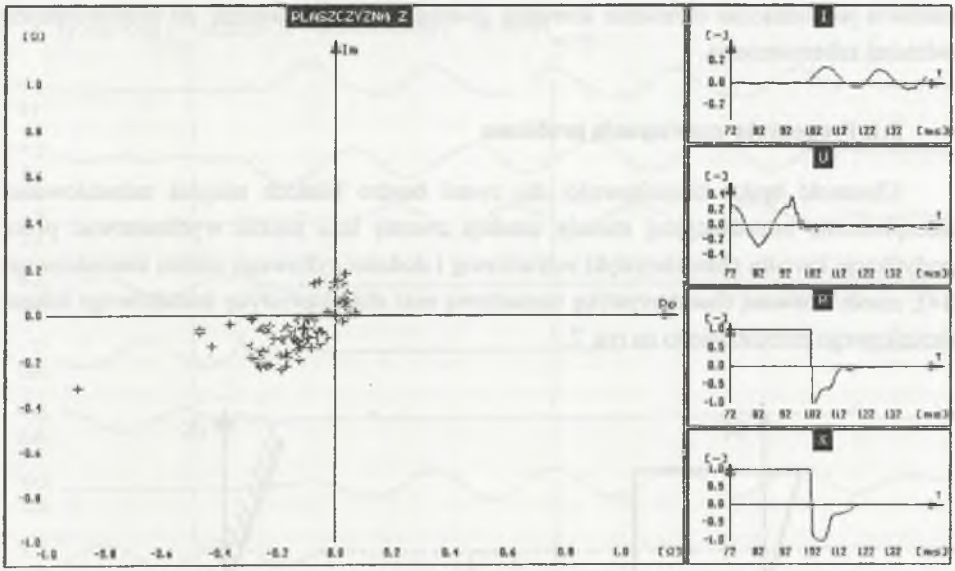
wana jest przez wykorzystanie kilku mikroprocesorów, które wykonują zadania cząstkowe w sposób równoległy lub quasi-równoległy; w tym drugim przypadku magistrala cyfrowa występuje jedynie po stronie sygnałów logicznych sygnalizujących zwarcie w danej pętli zwarciowej. Schemat blokowy cyfrowego zabezpieczenia odległościowego CZAZ-RL, wykorzystującego dla detekcji zwarcia w linii napowietrznej mikroprocesory DSP pracujące quasi-równolegle, przedstawiono na rys. 4.



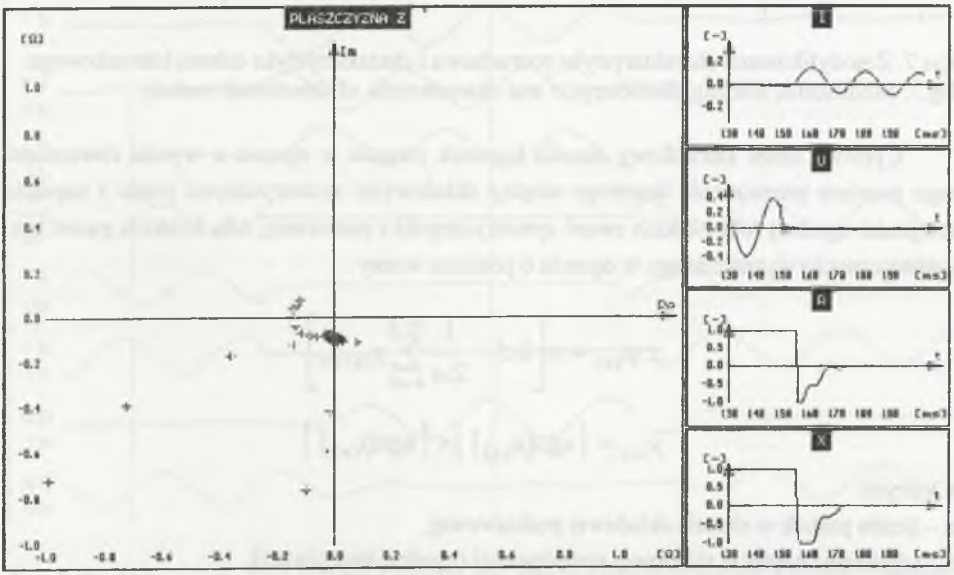
Rys. 4. Schemat blokowy cyfrowego zabezpieczenia odległościowego CZAZ-RL
Fig. 4. Block diagram of digital distance protection CZAZ-RL

3. DETEKCJA ZWARĆ WYSTĘPUJĄCYCH W POBLIŻU ZABEZPIECZENIA

Dla zapewnienia selektywności działania zabezpieczenia odległościowego metoda detekcji zwarcia musi posiadać cechę kierunkowości, tzn. odróżniać zwarcia występujące „z przodu" zabezpieczenia od zwarć „z tyłu" również w przypadkach zwarć bardzo bliskich miejsca zainstalowania zabezpieczenia: np. zwarcie na końcu linii „poprzedzającej" daną linię. Przeprowadzone testy wykazały, że zaprezentowana w artykule metoda detekcji zwartej linii, bazująca na estymacji impedancji Z i charakterystyce rozruchowej z rys.1, może utracić cechę kierunkowości w przypadku takiego zwarcia z uwagi na praktycznie zerową wartość zwarciowego napięcia pomiarowego; z przedstawionych na rys. 5 i 6 trajektorii impedancji Z dla bliskich zabezpieczenia zwarć „z tyłu" (na szynach stacji elektroenergetycznej) wynika, iż



Rys. 5. Trajektoria impedancji Z dla trójfazowego zwarcia na szynach stacji 400 kV
Fig. 5. Trajectory of Z impedance for a three-phase fault on busbur of 400 kV station

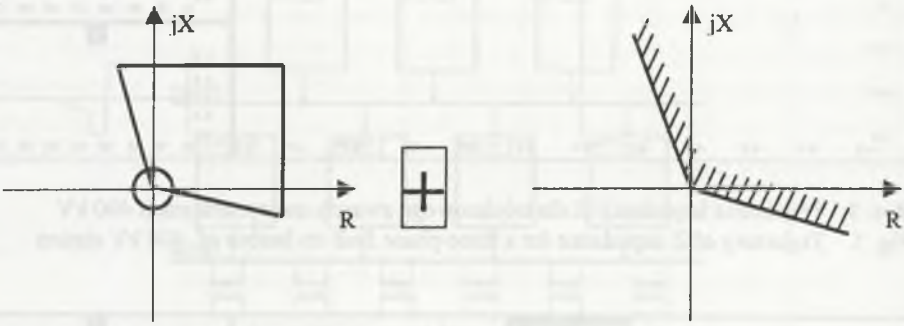


Rys. 6. Trajektoria impedancji Z dla trójfazowego zwarcia na szynach stacji 220 kV
Fig. 6. Trajectory of Z impedance for a three-phase fault on busbur of 220 kV station

impedancja Z tworzy czasami mgławicę wokół początku układu współrzędnych, co uniemożliwia jednoznaczne określenie kierunku zwarcia i może prowadzić do niepotrzebnych zadziałań zabezpieczenia.

3.1. Propozycja rozwiązania problemu

Ułomność braku kierunkowości dla zwarć bardzo bliskich miejsca zainstalowania zabezpieczenia impedancyjnej metody detekcji zwartej linii można wyeliminować przez modyfikację kształtu charakterystyki rozruchowej i dodanie cyfrowego członu kierunkowego [14]; zmodyfikowaną charakterystykę rozruchową oraz charakterystykę dodatkowego członu kierunkowego przedstawiono na rys. 7.



Rys.7. Zmodyfikowana charakterystyka rozruchowa i charakterystyka członu kierunkowego
Fig.7. Modificated starting characteristic and characteristic of directional module

Cyfrowy człon kierunkowy określa kierunek zwarcia w oparciu o wyniki równoczesnego pomiaru przesunięcia fazowego między składowymi symetrycznymi prądu i napięcia kolejności zgodnej (dla bliskich zwarć symetrycznych) i przeciwnej (dla bliskich zwarć niesymetrycznych) wyznaczanego w oparciu o poniższe wzory:

$$\pm\varphi_{(n)} = \pi\left[0.5 - \frac{1}{2m}\sum_{k=0}^{m-1} y_{(n-k)}\right]$$

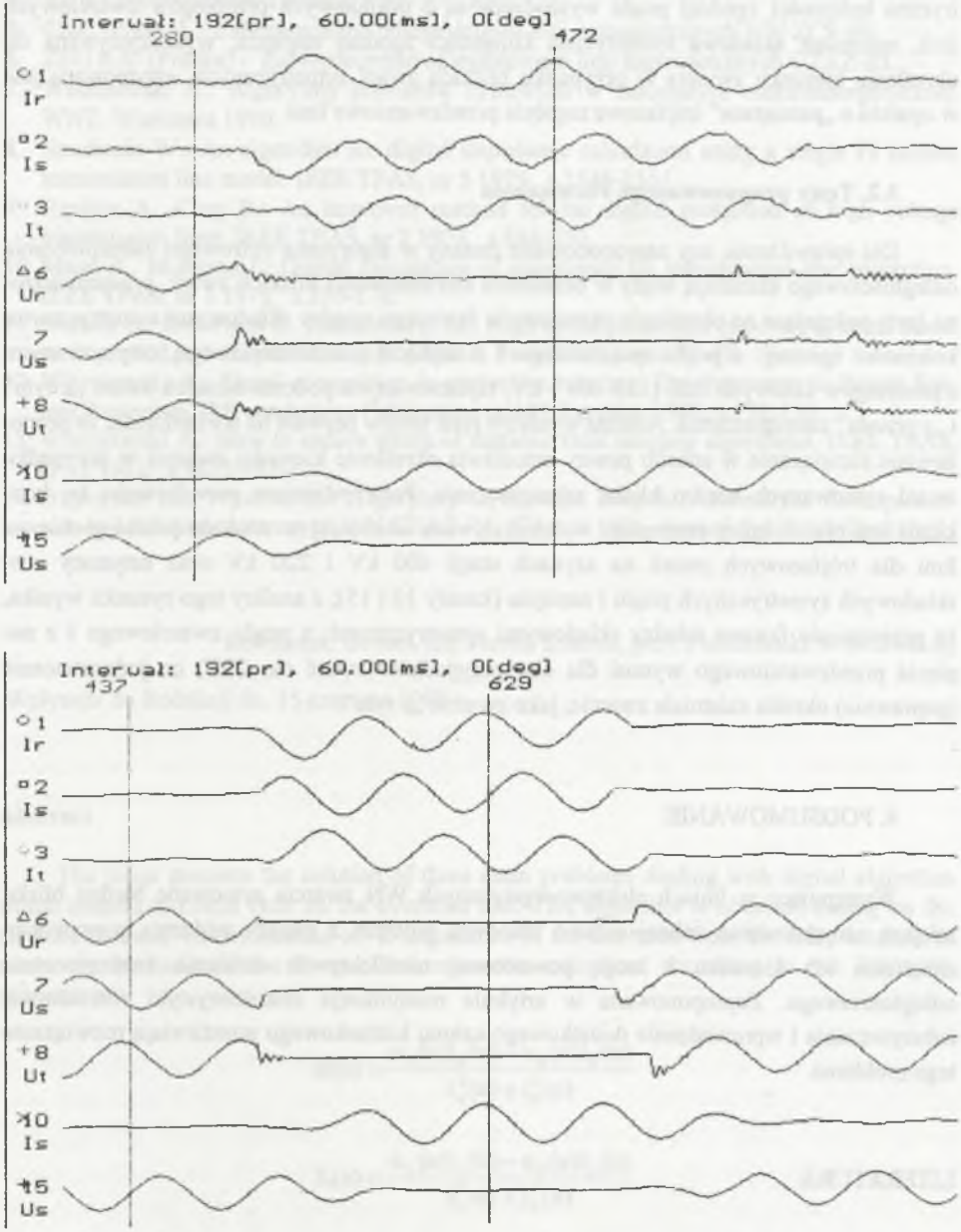
$$y_{(n)} = \left\{\operatorname{sgn}[u_{(n)}]\right\} \times \left\{\operatorname{sgn}[i_{(n)}]\right\}$$

w których:

m – liczba próbek w okresie składowej podstawowej,

$u_{(n)}$ – dyskretne napięcie składowej symetrycznej (zgodnej/przeciwnej),

$i_{(n)}$ – dyskretny prąd składowej symetrycznej (zgodnej/przeciwnej).



Rys.8. Prądy i napięcia linii 400 kV i 220 kV dla zwarcia symetrycznego na szynach stacji
Fig.8. The currents and voltages of a 400 kV and 220 kV line for a three-phase fault on busbar

Składowe symetryczne kolejności przeciwnej prądu i napięcia oraz składowa symetryczna kolejności zgodnej prądu wyznaczane są z trójfazowych przebiegów zwarciowych linii, natomiast składowa symetryczna kolejności zgodnej napięcia, wykorzystywana do określenia kierunku zwarcia w przypadku bliskich zwarć symetrycznych, estymowana jest w oparciu o „pamiętane" trójfazowe napięcie przedzwarciowe linii.

3.2. Testy proponowanego rozwiązania

Dla sprawdzenia, czy zaproponowane zmiany w algorytmie cyfrowego zabezpieczenia odległościowego eliminują błędy w określaniu kierunkowości bliskich zwarć, przeprowadzono testy polegające na określaniu przesunięcia fazowego między składowymi symetrycznymi kolejności zgodnej: z prądu zwarciowego i z napięcia przedzwarciowego, estymowanymi z przebiegów fazowych linii (110-400) kV, rejestrowanych podczas bliskich zwarć „z tyłu" i „z przodu" zabezpieczenia. Analiza wyników tych testów zezwala na stwierdzenie, że proponowane rozwiązanie w sposób pewny umożliwia określenie kierunku zwarcia w przypadku zwarć sytuowanych bardzo blisko zabezpieczenia. Potwierdzeniem prawdziwości tej konkluzji jest rys. 8, który prezentuje wykorzystywane wcześniej w artykule przebiegi fazowe linii dla trójfazowych zwarć na szynach stacji 400 kV i 220 kV oraz estymaty ww. składowych symetrycznych prądu i napięcia (kanały 10 i 15); z analizy tego rysunku wynika, że przesunięcie fazowe między składowymi symetrycznymi: z prądu zwarciowego i z napięcia przedzwarciowego wynosi dla obu przypadków zwarć ok. 270°, co jednoznacznie (poprawnie) określa zaistniałe zwarcie, jako zwarcie „z tyłu".

4. PODSUMOWANIE

Występujące w liniach elektroenergetycznych WN zwarcia sytuowane bardzo blisko miejsca zainstalowania zabezpieczenia stanowią problem z punktu widzenia poprawnego określenia ich kierunku i mogą powodować nieselektywne działania zabezpieczenia odległościowego. Zaproponowana w artykule modyfikacja charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia i wprowadzenie dodatkowego członu kierunkowego umożliwiają rozwiązanie tego problemu.

LITERATURA

1. Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa. WNT, Warszawa 1966.
2. Ungrad H., Winkler W., Wiszniewski A.: Protection techniques in electrical energy system. Marcel Dekker, New York 1995.

3. AEG Distanzschutzeinrichtung PD 551.
4. ABB Line Protection Terminal REL 501, REL 521.
5. C&C (Polska) - Zabezpieczenie odległościowe linii napowietrznych WN ZCS 4E.
6. ZEG S.A. (Polska) - Zabezpieczenie odległościowe linii napowietrznych CZAZ-RL.
7. Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarów cyfrowych w automatyce elektroenergetycznej. WNT, Warszawa 1990.
8. Smolinski W.: An algorithm for digital impedance calculation using a single PI section transmission line model. IEEE TPAS, nr 5 1979, s.1546-1551.
9. Ranjbar A., Cory B.: An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines. IEEE TPAS, nr 2 1975, s.544-550.
10. Mann B., Morrison I.: Digital calculation of impedance for transmission line protection. IEEE TPAS, nr 1 1971, s.270-278.
11. Slemon G., Robertson S., Ramamoorty M.: High speed protection of power systems based on improved power system models. CIGRE, Paris 1968, paper 31-09.
12. Wiszniewski A.: Signal recognition in protective relaying. Developments in Power System Protection, IEE conference Publication nr 185, London, 1980, s.132-136.
13. Wiszniewski A.: How to reduce errors of distance fault locating algorithms. IEEE TPAS, nr 12 1981, s.4815-4820.
14. Przybylski M., Wysocki Z.: Algorytmy Cyfrowego Zespołu Automatyki Zabezpieczeniowej Linii Napowietrznych WN CZAZ-RL. Gliwice 1996 (materiały niepublikowane).

Recenzent: Dr hab. inż. Janusz Szafran, prof. Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dn. 15 czerwca 1998 r.

Abstract

The paper presents the solution of three main problems dealing with digital algorithm which enables to detect fault on the overhead line. This algorithm is obtained basing on the distance method. The estimation of Z impedance of the line seen from the relay location is made on the basis of the R and X components calculated according to the following expressions:

$$R(n) = \frac{u_a(n)i_a(n) + u_b(n)i_b(n)}{i_a^2(n) + i_b^2(n)}$$

$$X(n) = \frac{u_b(n)i_a(n) - u_a(n)i_b(n)}{i_a^2(n) + i_b^2(n)}$$

where u_a, u_b, i_a, i_b are orthogonal current and voltage components.

The shape of Z impedance trajectory for a quasi-stable state of faulted line is used to select the method for R and X components calculation. The problem of directionality of the distance method in case of fault on busbar of the HV station is solved by modification of starting

characteristic and applying the directional digital module based on the positive and negative-sequence components of the phase voltages and currents of the line. The simultaneous estimation of Z impedance of the line for six fault-loops, which is required to make the proper detection of fault on the line, is based on quasi-parallel work of two DSP processors.