

IMPLEMENTACJA ALGORYTMÓW POMIAROWYCH I DECYZYJNYCH ZABEZPIECZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

Wiesław NOWAK¹, Rafał TARKO², Andrzej MAKUCH³

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel: 12 617 28 24 e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel: 12 617 36 53 e-mail: rafal.tarko@agh.edu.pl tel: 12 617 37 73
e-mail: andrzej.makuch@agh.edu.pl

Streszczenie: Jednym z najgroźniejszych zakłóceń występującym w systemie elektroenergetycznym są zwarcia wielkopiętrowe, które jeżeli nie są szybko wyłączone, mogą doprowadzić do poważnych w skutkach awarii. W celu eliminacji zakłóceń stosuje się szybkie urządzenia do odłączenia obwodów zwartych oraz automatykę zabezpieczeniową, której zadaniem jest wykrycie, rozpoznanie oraz wyłączenie zwarcia w określonym czasie. Sprawdzenie poprawności działania algorytmów decyzyjnych zastosowanych w zabezpieczeniach elektroenergetycznych jest możliwe na drodze obliczeniowej. Dzięki wykorzystaniu programu symulacyjnego EMTP – ATP, możliwe jest wyznaczenie przebiegów przejściowych oraz interpretacja wyników osiągniętych za pomocą modeli cyfrowych. W artykule przedstawiono wyniki analizy działania algorytmów decyzyjnych, mających istotny wpływ na funkcjonowanie modelu matematycznego zabezpieczeń elektroenergetycznych. Zostaną również przedstawione realizacje algorytmów pomiarowych wielkości kryterialnych i procesów decyzyjnych dla modeli zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego oraz zabezpieczenia odległościowego.

Słowa kluczowe: zabezpieczenia elektroenergetyczne, modele cyfrowe, metoda uśredniania, metoda korelacji.

1. WSTĘP

W niniejszej publikacji przedstawiono implementację algorytmów działania wybranych zabezpieczeń elektroenergetycznych w programie EMTP – ATP. W szczególności dotyczy to programowej realizacji, w języku MODELS, algorytmów pomiarów wielkości kryterialnych i procesów decyzyjnych. W części pierwszej artykułu przedstawiono zagadnienia teoretyczne, które związane są z algorytmami pomiarowymi wielkości elektrycznych. Opisano w niej metodę uśredniania oraz metodę korelacji. W części drugiej zaprezentowano wyniki obliczeń symulacyjnych, które miały na celu zbadanie wpływu częstotliwości próbkowania wyznaczanych wielkości elektrycznych na błąd względny oraz szybkość ustalania się przebiegu. W trzeciej części przedstawiono wyniki implementacji wyżej wymienionych algorytmów w modelach zabezpieczeń elektroenergetycznych oraz przetestowano działanie opracowanych modeli zabezpieczeń.

2. ALGORYTMY POMIAROWE

Jedną z metod wyznaczenia wielkości amplitudy badanego przebiegu okresowego jest metoda dyskretyzacji sygnału ciągłego czyli uśrednianie wartości bezwzględnej na przedziale czasu, która stanowi wielokrotność półokresu badanego sygnału. Jeżeli dostępna jest określona liczba próbek sygnału, można obliczyć odpowiednie sumy dyskretne [1].

Dane są próbki składowej podstawowej o częstotliwości 50 Hz napięcia lub prądu wyrażone równaniem:

$$u(n) = U_m \cdot \cos(n\Omega + \varphi_U) \quad (1)$$

$$i(n) = I_m \cdot \cos(n\Omega + \varphi_I) \quad (2)$$

oraz

$$\Omega = \omega \cdot T_p = 2\pi \cdot \frac{T_p}{T_1} = \frac{2\pi}{N_1} = 2\pi \cdot \frac{f_p}{f_1} \quad (3)$$

gdzie:

T_p – okres próbkowania sygnału;

T_1 – okres badanego sygnału;

N_1 – liczba próbek w okresie sygnału o częstotliwości 50Hz;

φ – początkowa faza sygnału;

f_p – częstotliwość próbkowania sygnału

f_1 – częstotliwość badanego sygnału (50Hz)

Amplitudę sygnału napięcia i prądu otrzymuje się z równań:

$$U_m = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u^2(n-k)} \quad (4)$$

$$I_m = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i^2(n-k)} \quad (5)$$

Algorytm ten posiada dwie zalety. Niezależność wyniku od fazy φ sygnału oraz eliminację drugiej harmonicznej z sumy dyskretnej próbek sygnału [1].

Wyznaczenie mocy opiera się na dyskretyzowanej postaci wzoru [5, 6]:

$$P_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(n-k) \cdot i(n-k) \quad (6)$$

$$Q_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u\left(n-k - \frac{N-1}{4}\right) \cdot i(n-k) \quad (7)$$

$$S_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} u^2(n-k) \cdot i^2(n-k) \quad (8)$$

Impedancje i jej składowe wyznaczono korzystając z równań [1, 2]:

$$Z^2 = \frac{U^2}{I^2} = \frac{U_m^2}{I_m^2} \quad (9)$$

$$R = |Z| \cdot \cos\phi = \frac{U_m \cdot I_m \cdot \cos\phi}{I_m^2} = \frac{2P}{I_m^2} \quad (10)$$

$$X = |Z| \cdot \sin\phi = \frac{U_m \cdot I_m \cdot \sin\phi}{I_m^2} = \frac{2Q}{I_m^2} \quad (11)$$

Kolejnym sposobem wyznaczenia amplitudy jest metoda korelacji sygnału. W obwodach liniowych, w którym występuje pobudzenie sinusoidalne, przebiegi prądów i napięć mają charakter sinusoidalny. Przebiegi te można zastąpić szeregiem funkcji wzajemnie ortogonalnych. Ich zaletą jest uzyskanie składowych amplitudy, które są niezależne od siebie. Do obliczenia poszczególnych składowych stosuje się dyskretną transformatę Fouriera. W obliczeniach zajęto się głównie składową o częstotliwości podstawowej [1, 3, 4].

$$X_C = \frac{2}{N_1} \sum_{n=0}^{N_1-1} x(n) \cdot \cos\left(n \frac{2\pi}{N_1}\right) \quad (12)$$

$$X_S = \frac{2}{N_1} \sum_{n=0}^{N_1-1} x(n) \cdot \sin\left(n \frac{2\pi}{N_1}\right) \quad (13)$$

gdzie: N_1 – liczba próbek w okresie składowej podstawowej

Dzięki zastosowaniu metody korelacji, z rzeczywistego sygnału przemiennego uzyskuje się wielkości stałe. Istotną możliwością jaką daje nam ta metoda jest określenie wybranych harmonicznym zawartych w sygnale a ortogonalność składowych do funkcji korelujących (10) oraz (11) daje dodatkową zaletą jaką jest tłumienie pozostałych harmonicznym do zera. Jeżeli równania użyte są do wyznaczenia wielkości w czasie rzeczywistym, w którym zmienia się dyskretna chwila n wraz z upływem czasu, to równania można zapisać w postaci:

$$X_C = \frac{2}{N_1} \sum_{m=0}^{N_1-1} x(n-m) \cdot \cos\left[(n-m) \frac{2\pi}{N_1}\right] \quad (14)$$

$$X_S = \frac{2}{N_1} \sum_{m=0}^{N_1-1} x(n-m) \cdot \sin\left[(n-m) \frac{2\pi}{N_1}\right] \quad (15)$$

Powyższe równania można przekształcić w proste algorytmy rekursywne:

$$X_C = X_C(n-1) + \frac{2}{N_1} [x(n) - x(n-N_1)] \cos\left(\frac{2\pi}{N_1}\right) \quad (16)$$

$$X_S = X_S(n-1) + \frac{2}{N_1} [x(n) - x(n-N_1)] \sin\left(\frac{2\pi}{N_1}\right) \quad (17)$$

gdzie:

N_1 – liczba próbek w okresie sygnału o częstotliwości 50 Hz;

Do wyznaczenia amplitudy sygnału wykorzystuje się pary składowych ortogonalnych:

$$X_C(n) = X_C = X_m \cos(n\Omega + \phi_1) \quad (18)$$

$$X_S(n) = X_S = X_m \cos(n\Omega + \phi_1) \quad (19)$$

Impedancje i jej składowe otrzymuje się z równań:

$$Z = \sqrt{\frac{U_C^2 + U_S^2}{I_C^2 + I_S^2}} \quad (20)$$

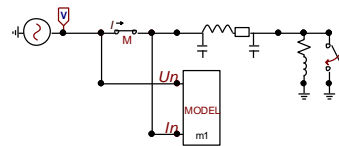
$$R = \frac{U_C I_C + U_S I_S}{I_C^2 + I_S^2} \quad (21)$$

$$X = \frac{U_S I_C - U_C I_S}{I_C^2 + I_S^2} \quad (22)$$

3. BADANIA SYMULACYJNE ALGORYTMÓW POMIAROWYCH

Modele procedur wyznaczania określonych wielkości elektrycznych zostały opracowane w programie EMTP-ATP. Schemat do badania działania modeli przedstawia rysunek 1. Model ma za zadanie wyznaczenie impedancji układu. W przykładowych obliczeniach przyjęto, że, układ zasilany jest napięciem znamionowym 110 kV i zasilą odbiornik $Z_O = (80 + j60) \Omega$ poprzez linie napowietrzną o długości 1 km o parametrach jednostkowych $Z_L = (0,12 + j0,41) \Omega$.

Założono, że łącznik jednofazowy TSWITCH zamyka się w czasie $t = 0,1$ s, doprowadzając do zwarcia. Założono, że zwarcie jest odległe od generatora.

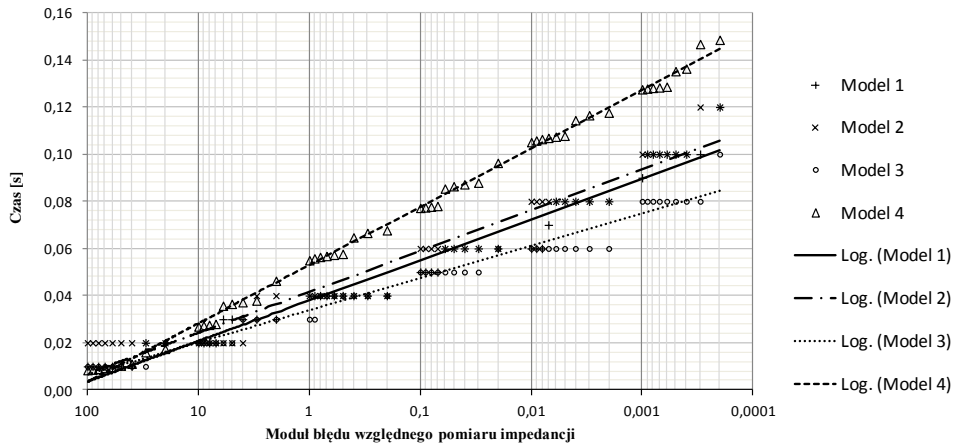


Rys. 1 Schemat układu do pomiaru wielkości elektrycznych

Dokonano sprawdzenia poprawności działania czterech modeli:

- *Model 1* – bazujący na metodzie uśredniania zgodnie z równaniem (4), (5) oraz (9);
- *Model 2* – bazujący na metodzie korelacji zgodnie z równaniem (12), (13) oraz (20) (pełno okresowy);
- *Model 3* – bazujący na metodzie korelacji zgodnie z równaniem (12), (13) oraz (20) (półokresowy);
- *Model 4* – bazujący na metodzie korelacji rekursywnej zgodnie z równaniem (14), (15) oraz (20).

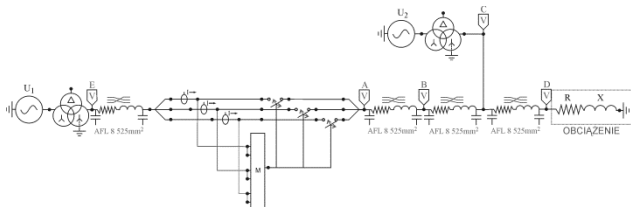
Z przeprowadzonej analizy można wywnioskować, że częstotliwość próbkowania nie ma wpływu na błąd względny pomiaru impedancji wyżej wymienionych algorytmów. Wykonane pomiary wykazały, że dla dowolnej częstotliwości próbkowania błąd ten wynosi $7,86e^{-5}$. W następnym kroku sprawdzono ile czasu zajmuje algorytmom ustalanie wartości wielkości wyznaczanej oraz jaki jest przebieg tej stabilizacji. Charakterystykę czasu potrzebnego do uzyskania błędu względnego na określonym poziomie przedstawiono na rysunku 2. Im mniejsze nachylenie wykresu, tym ostrzejsze ustalanie się przebiegu. Najszybsze ustalenie się przebiegu zanotowano dla *modelu 3* – 0,01 s, a najdłuższe dla *modelu 4* – 0,149 s. Ustalanie się przebiegu w *modelu 1, 2* i *3* następuje w sposób aperiodyczny. W *modelu 4* przebieg ustala się w sposób oscylacyjny. Modele zbadano również pod względem wpływu kierunku przepływu mocy na działanie algorytmu. Wszystkie dobrze określały znak zarówno mocy czynnej jak i biernej.



Rys. 2 Charakterystyka czasu potrzebnego do uzyskania błędu względnego impedancji na określonym poziomie.

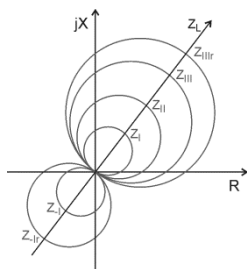
4. Implementacja algorytmów pomiarowych w zabezpieczeniach elektroenergetycznych

Zabezpieczenia elektroenergetyczne zostały opracowane w programie EMTP – ATP, a algorytmy decyzyjne zaimplementowano w obiektach typu MODELS. Algorytmy decyzyjne wykorzystują algorytmy pomiarowe, które zostały omówione w poprzednim punkcie. Schemat do badania działania zabezpieczenia odległościowego przedstawia rysunek 3. W układzie modelowym sieć elektroenergetyczna 400 kV zasila odbiór poprzez trójzwojowy transformator sieciowy 400/128/31,5 kV i linie napowietrzną wyposażonych w przewody AFL 8 525mm² o długości 40 km. Parametry jednostkowe linii dla składowej zgodnej wynoszą $\underline{Z}_{(1)} = (0,14 + j0,8) \Omega/\text{km}$ oraz dla składowej zerowej $\underline{Z}_{(0)} = (0,06 + j0,42) \Omega/\text{km}$.



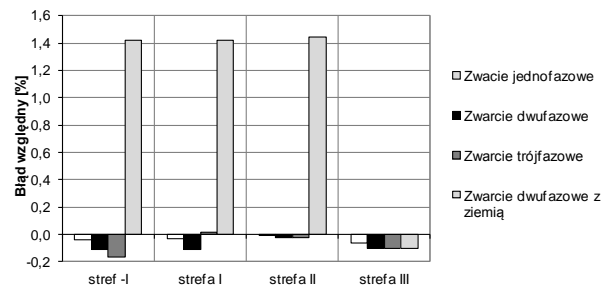
Rys. 3 Schemat układu do badania zabezpieczenia odległościowego. M – zabezpieczenie odległościowe

Zabezpieczenie odległościowe umieszczono w punkcie A. Charakterystykę impedancyjną członu rozruchowego realizowanego w kształcie okręgu. Strefy pomiarowe i rozruchowe przekaźnika przedstawiono na rysunku 4.



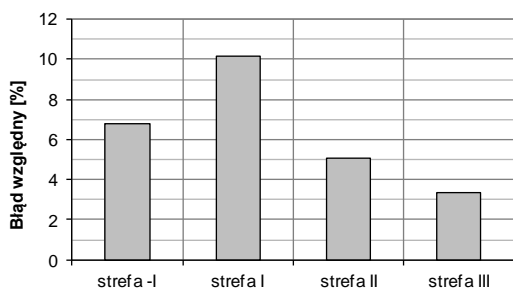
Rys. 4 Charakterystyka impedancyjna członów pomiarowych i rozruchowych

Każda ze stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego posiada sześć pętli pomiarowych, z których trzy przystosowane są do zwarcí międzyfazowych oraz trzy przystosowane do zwarcí z udziałem ziemi. Zbadano zasięg działania poszczególnych stref pomiarowych. Wyznaczono błąd względny zasięgu oraz czasu działania. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

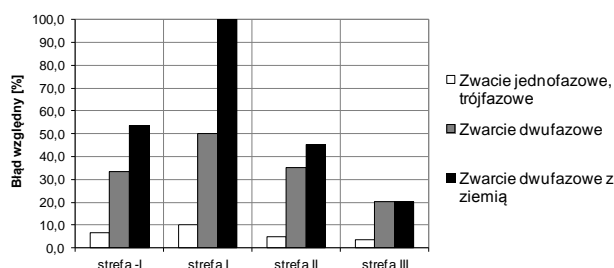


Rys. 5 Błąd względny zasięgu poszczególnych stref pomiarowych.

Algorytm pomiarowy prawidłowo określa zasięg poszczególnych stref. Błąd względny dodatni oznacza wydłużenie a ujemny skrócenie strefy działania. Błąd względny jest poniżej poziomu 0,2% dla każdego rodzaju zwarcí z wyjątkiem zwarcia dwufazowego z udziałem ziemi. W tym przypadku błąd względny wynosi 1,4% i związane jest to z wpływem pętli pomiarowej algorytmu, która odpowiada za detekcję zwarcí jednofazowych z udziałem ziemi. Jedną z impedancji mierzona przez pętlę pomiarową algorytmu, która odpowiada za detekcję zwarcí jednofazowych z udziałem ziemi jest mniejsza niż impedancja mierzona przez pętlę pomiarową algorytmu, która odpowiada za detekcję zwarcí dwufazowych z udziałem ziemi. Powoduje to wydłużenie działania stref -I, I oraz II. W przypadku strefy III, gdzie występuje zjawisko splotu prądu, błąd względny jest poniżej poziomu 0,1%. Zmniejszenie błędów związane jest z uwzględnieniem współczynnika rozgałęzienia oddzielnie dla zwarcia jednofazowego oraz oddzielnie dla pozostałych typów zwarcí.



Rys. 6. Błąd względny czasu działania stref pomiarowych.



Rys. 7. Maksymalny błąd względny czasu na granicy działania stref pomiarowych.

Błąd względny czasu działania stref kształtuje się poniżej poziomu 10,5% i zależy od czasu nastawy działania poszczególnych stref zabezpieczenia oraz szybkości ustalania się przebiegu impedancji. Charakterystyki błędu względnego czasu zadziałania zabezpieczenia przedstawione są na rysunku 6 oraz 7. Im większy czas działania strefy tym mniejszy błąd względny. Na granicy działania stref pomiarowych błąd względny dochodzi do 100% w przypadku zwarcia dwufazowego z udziałem ziemi oraz do 50% w przypadku zwarcia dwufazowego. Związane jest to ze sposobem ustalania się przebiegu impedancji.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania wykazały, że istotny wpływ na funkcjonowanie automatyki zabezpieczeniowej ma właściwy dobór algorytmów decyzyjnych i pomiarowych. Uzyskanie małych błędów względnych działania algorytmów pozwala przypuszczać a nawet stwierdzić, że opisane w tym artykule algorytmy spełniają powierzoną im funkcję. Stworzone oraz zaimplementowane w programie EMTP – ATP modele matematyczne zabezpieczeń elektroenergetycznych stanowią istotne rozszerzenie jego możliwości obliczeniowych i mogą znaleźć zastosowanie w analizie zakłóceń stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Szafran J., Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne 2001, ISBN 83-204-2524-7
2. Kay S.M.: Fundamentals of Statistical Signal Processing: Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993
3. Szafran J.: Rozpoznawanie sygnałów w cyfrowej automatyce zabezpieczeniowej. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1990, ISSN 0324-976X
4. Krakowski M.: Elektrotechnika teoretyczna. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1995, ISBN 83-01-11953-5
5. Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne 2002, ISBN 83-204-2750-9
6. Lal – Jadziak J.: Korelacyjne metody pomiarowe i ich dokładność. Zielona Góra, Wydawnictwo wyższej szkoły inżynierskiej w Zielonej Górze 1995, monografia nr 75

IMPLEMENTATION OF MEASURING AND DECISION-MAKING ALGORITHMS FOR POWER PROTECTIONS

Key-words: digital models, averaging method, correlation method

One of the most dangerous disturbances occurring in the power system are short-circuit high current, which if not quickly turned off, can lead to serious consequences of failure. In order to eliminate distortions shall be quick disconnect device and compact circuit protection automatics, whose task is to detect, identify and turn off the circuit as soon as possible. Through the use the EMTP-ATP, it is possible transient determination and interpretation of results obtained using digital models. The publication will be presented the results of the analysis of decision algorithms implemented in the EMTP-ATP, which have a significant impact on the functioning of the mathematical model of power protection. It will also be presented realization algorithms for measuring the size criterion and decision-making models and the time delay overcurrent and distance protection. The above analysis requires the selection of appropriate electric quantities corresponding to the correct measurement of the amplitude of the current in case of the time delay overcurrent protection and impedance in case of distance protection.