POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 74 Electrical Engineering 2013

Bartosz OLEJNIK*

WYBRANE FUNKCJE ZABEZPIECZENIOWE STEROWNIKA POLOWEGO

W artykule przedstawiono wybrane aspekty pracy algorytmów zabezpieczeniowych sterowników polowych. Opisano funkcje ukryte w głębi algorytmów, jednakże bardzo ważne ze względu na pracę elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej podczas nietypowych awarii w liniach średniego napięcia. Opisywane funkcje do tej pory nie były badane. Typowym przykładem takiego zagadnienia jest działanie zabezpieczeń nadprądowych zwłocznych o charakterystyce zależnej w przypadku, gdy prąd wejściowy zmienia swoją wartość po rozruchu zabezpieczenia. Innym przykładem jest praca zabezpieczenia admitancyjnego przy odkształconych przebiegach składowej zerowej prądu w doziemionej linii. Przedstawiono rozwiązania wiodących firm z rynku polskiego wraz z ich analizą. Praca została w całości oparta na doświadczeniach i pomiarach prowadzonych przez autora w laboratoriach Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej.

1. WSTĘP

System elektroenergetyczny jest zbiorem urządzeń, które służą do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. W celu zapewnienia poprawnego funkcjonowania wszystkich jego elementów musi być nad nimi prowadzony ciągły nadzór – zarówno przez człowieka jak i przez cały szereg układów automatyki. Obecnie ten pierwszy jest wycofywany na rzecz tego drugiego, ze względu na zbyt mało efektywne reakcje człowieka na nagłe zdarzenia, które występują w systemie elektroenergetycznym. Z powyższego wynika, że elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa (EAZ) spełnia niezwykle istotną rolę – rozpoznaje awarię i odpowiednio szybko podejmuje właściwą decyzję, polegającą na przykład na samoczynnym wyłączeniu uszkodzonego elementu.

Przykładem współczesnej aparatury realizującej funkcje elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej są terminale polowe. Tego typu urządzenia mikroprocesorowe posiadają przynajmniej jedno łącze cyfrowe z systemem nadzoru, wykonują zadania w zakresie obsługi wydzielonego pola elementu systemu elektroenergetycznego (linii, transformatora, generatora itp.) związane z EAZ eliminacyjną, prewencyjną bądź restytucyjną. Terminale polowe realizują także funkcje pomiarowe wielkości elektrycznych, sterują łącznikami, rejestrują zdarzenia i zakłócenia, lokalizują miejsce zwarcia itp. Odmianą terminali

* Politechnika Poznańska.

polowych są sterowniki polowe, które wyposażone są dodatkowo w przyciski do sterownia łącznikami oraz, opcjonalnie, w wyświetlacz (zwykle graficzny), na którym pokazywane są aktualne stany tych łączników.

Od sterowników i terminali polowych dla pól rozdzielni średniego napięcia wymaga się realizacji wielu zadań, wśród których najważniejszą część stanowią te, które bezpośrednio wynikają z potrzeb automatyki zabezpieczeniowej. W związku z tym najważniejsze algorytmy pomiarowo – obliczeniowe dotyczą przede wszystkim:

- wyznaczania podstawowych wielkości pomiarowych, takich jak prądy i napięcia fazowe oraz składowe symetryczne prądu i napięcia,
- obliczania wielkości złożonych, jak moc, energia, admitancja,
- obliczania czasu oraz uruchamiania procedur decyzyjnych, które mają wpływ na zmiany stanów łączników,
- określania wartości zmiennych logicznych [2].

Wszystkie algorytmy oparte są na znajomości zjawisk zachodzących w systemie elektroenergetycznym podczas awarii, a także na tzw. wiedzy inżynierskiej oraz doświadczeniu autorów tychże procedur. Istnieje jednak pewna grupa zabezpieczeń, których algorytmy nie są do końca opisywane – najczęściej z przyczyn ich marginalizowania. Należą do nich np. zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne o charakterystyce zależnej czy też zabezpieczenia admitancyjne. Na badaniu tych dwóch funkcji skupił się autor w niniejszej publikacji.

2. ZABEZPIECZENIE NADPRĄDOWE ZWŁOCZNE ZALEŻNE

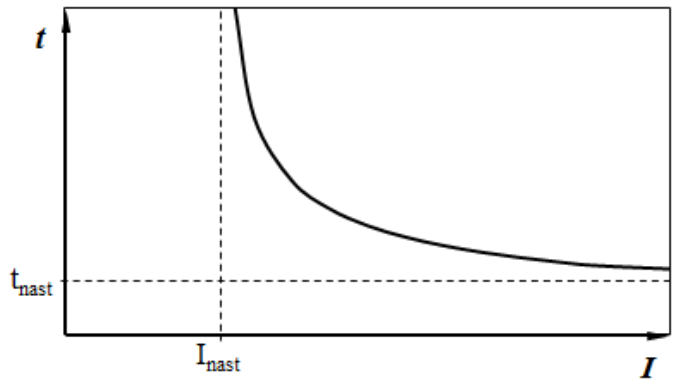
Zabezpieczenia nadprądowe zwłoczne o charakterystyce zależnej pełnią rolę zabezpieczeń podstawowych i rezerwowych od skutków zwarć międzyfazowych czy przeciążeń w liniach, transformatorach i silnikach. Dzięki zastosowaniu członów zależnych możliwe jest ich selektywne działanie. Przykładowa charakterystyka czasowo - prądowa zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego zależnego przedstawiona została na rys. 1.

Producenci urządzeń udostępniają do wyboru szereg charakterystyk wg normy IEEE C37.112 oraz/lub IEC 60255-3. Często implementowane są także własne zależności koncernu, umożliwia się też nastawienie własnej, niestandardowej charakterystyki. Rola użytkownika w konfiguracji tego zabezpieczenia jest niewielka – parametry do nastawienia to wartość t_{nast}, I_{nast} oraz typ charakterystyki.

Czas zadziałania zabezpieczenia obliczany jest według zależności:

$$t = t_{nast}\left(\frac{\beta}{\left(\frac{I}{I_{nst}}\right)^{\alpha} - 1} + L\right) \tag{1}$$

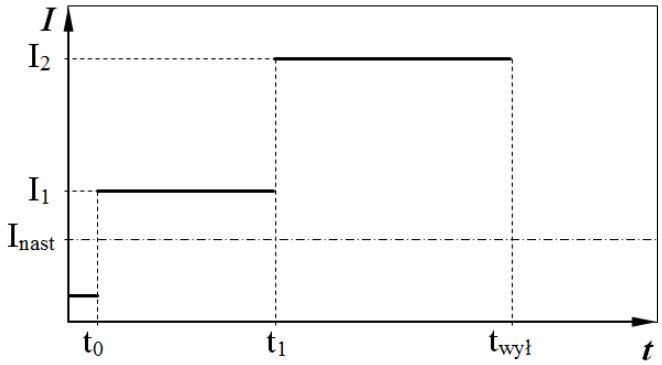
w której: t_{nast} – nastawa czasowa zabezpieczenia; I_{nast} – prądowy próg zadziałania; I – bieżąca wartość prądu; α, β – stałe zależne od rodzaju charakterystyki, L – stała określana tylko w przypadku charakterystyk rodziny IEEE.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka czasowo – prądowa

Problemem jest ustalenie wartości prądu I, ponieważ w rzeczywistych przypadkach podczas awarii wartość ta nie przyjmuje wartości stałej. Producenci urządzeń radzą sobie z tym zjawiskiem bardzo różnie. Bywa nawet, że problem ten pozostaje przez nich niezauważony i zabezpieczenie zadziała z czasem takim, jaki został obliczony przy jego rozruchu. Jest to oczywiście duże nadużycie, choćby ze względu na to, że zwiększanie się wartości prądu zwarciowego już po rozruchu zabezpieczenia może spowodować uszkodzenie elementów sieci, a w skrajnych przypadkach, zniszczenie całej stacji SN.

Wykonany został szereg prób, które miały na celu ustalenie sposobu pracy algorytmu zabezpieczenia nadprądowego zwarciowego o charakterystyce zależnej. W tym celu generowano przebieg wymuszenia prądowego jak na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg wymuszenia prądowego

Mierzony był czas zadziałania odpowiednio skonfigurowanego zabezpieczenia. Czas ten konfrontowano z wynikami obliczeń analitycznych.

Istnieją trzy główne metody obliczania wybranej wielkości:

a) na podstawie średniej arytmetycznej z I,
b) na podstawie średniej arytmetycznej z I^2,
c) na podstawie średniej geometrycznej z I.

Testowane były urządzenia dwóch wiodących producentów wyposażone w algorytm odpowiedniego zabezpieczenia. Sprawdzano działanie sprzętu dla trzech podstawowych charakterystyk: IEC NI (Normal Inverse – normalnie zależna), IEC VI (Very Inverse – silnie zależna), IEC EI (Extremely Inverse – ekstremalnie zależna).

Przykładowe wyniki badań zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Przykładowe wyniki badań zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego

I_1	I_2	t_1	$t_{wyłśr}$	$I_{wyłśr}$	I_{obl1} na podst. średniej arytmetycznej z I		I_{obl2} na podst. średniej arytmetycznej z I^2		I_{obl3} na podst. średniej geometrycznej z I	
					I_{obl1}	δI_1	I_{obl2}	δI_2	I_{obl3}	δI_3
A	A	s	s	A	A	%	A	%	A	%
Urządzenie A, charakterystyka IEC EI										
3,5	7	0,5	2,057	6,313	6,149	2,59	6,330	0,27	5,901	6,53
3,5	7	1,5	2,817	5,419	5,136	5,22	5,424	0,11	4,836	10,76
2	7	1	2,616	5,607	5,088	9,25	5,638	0,57	4,327	22,83
2	7	5	6,376	3,660	3,079	15,88	3,702	1,17	2,621	28,39
Urządzenie B, charakterystyka IEC NI										
2	7	1	4,199	5,204	5,809	11,62	6,181	18,77	5,194	0,18
2	7	1,5	4,523	4,610	5,342	15,89	5,831	26,49	4,619	0,20
5	10	1	3,290	8,116	8,479	4,48	8,777	8,14	8,101	0,20
5	10	2	3,598	6,809	7,220	6,04	7,624	11,97	6,803	0,08
Urządzenie B, charakterystyka IEC EI										
2	7	0,5	2,163	6,209	5,845	5,85	6,213	0,06	5,215	16,01
2	7	2	3,573	4,847	4,201	13,33	4,879	0,67	3,464	28,53
2	7	3,5	4,983	4,136	3,487	15,68	4,170	0,82	2,899	29,91
5	10	1	1,586	7,228	6,850	5,23	7,261	0,46	6,456	10,68
Urządzenie B, charakterystyka IEC VI										
2	7	0,5	2,69	6,069	6,070	0,03	6,374	5,04	5,525	8,96
2	7	2	3,942	4,436	4,463	0,63	5,115	15,32	3,700	16,59
5	10	1	2,072	7,572	7,587	0,21	7,987	5,49	7,142	5,68
5	10	2	2,629	6,182	6,197	0,24	6,553	6,01	5,899	4,58

W tabeli 2.1: I_1, I_2, t_1 – jak na rys. 2, $t_{wyłśr}$ – średni czas zadziałania zabezpieczenia na podstawie serii pięciu pomiarów, $I_{wyłśr}$ – obliczona, na podstawie charakterystyki zabezpieczenia, średnia wartość prądu zadziałania, I_{obl1} - obliczeniowa wartość prądu zadziałania obliczona jako średnia arytmetyczna z wartości prądów zadziałania obliczonych na podstawie średniej arytmetycznej z wartości skutecznych prądu w danej chwili, δI_1 - błąd względny prądu I_{obl1} w stosunku do prądu $I_{wyłśr}$, I_{obl2} - obliczeniowa wartość prądu zadziałania obliczona jako średnia arytmetyczna z wartości prądów zadziałania obliczonych na podstawie średniej arytmetycznej z kwadratów wartości skutecznych prądu w danej chwili, δI_2 - błąd względny prądu I_{obl2} w stosunku do prądu $I_{wyłśr}$, I_{obl3} - obliczeniowa wartość prądu zadziałania obliczona jako średnia geometryczna z wartości prądów zadziałania obliczonych na podstawie średniej geometrycznej z wartości skutecznych prądu w danej chwili, δI_3 - błąd względny prądu I_{obl3} w stosunku do prądu $I_{wyłśr}$.

Jak widać, urządzenia różnych producentów w odmienny sposób traktują zmienną wartość prądu zwarciowego po rozruchu, wykorzystując wszystkie trzy wyżej wspomniane metody. Kontrowersje może budzić stosowanie do obliczeń średniej geometrycznej prądów. W ogólnym przypadku ten rodzaj średniej używany jest wtedy, gdy istotne są nie bezwzględne, a względne zmiany mierzonego parametru. Stosunkowo trudno przenieść te informacje na dziedzinę EAZ. Tego rodzaju metoda nie powinna być zatem stosowana, chociaż sądząc po wynikach prób (obliczenia wg zależności 2), zapewnia większy poziom bezpieczeństwa dla chronionego urządzenia. Obliczanie prądu na podstawie średniej arytmetycznej z kwadratu prądu przebiega wg zależności opisanej wzorem 3. Takie podejście jest właściwie w przypadku zabezpieczania przed skutkami przeciążeń. Zgodnie z prawem Joule'a, w każdym przewodniku ilość wydzielonego ciepła Q jest proporcjonalna do kwadratu płynącego przez niego prądu I, rezystancji R oraz czasu t.

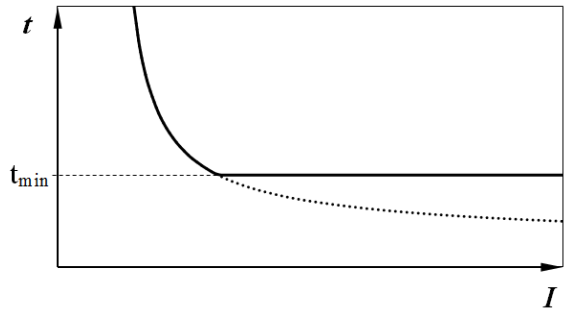
$$I_{obl3} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} I_i} = e^{\frac{\ln(\prod_{i=1}^{n} I_i)}{n}} = e^{\frac{\sum_{i=1}^{n} \ln(I_i)}{n}} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \ln(I_i)}{n}\right) \tag{2}$$

$$I_{obl2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} I_i^2}{n}} \tag{3}$$

W powyższych zależnościach: I_i – wartość prądu i-tej próbki, n – liczba próbek.

Tego rodzaju sposób obliczania prądów można polecać do stosowania w nowych rozwiązaniach terminali i sterowników polowych. Warto ponadto dodać, że w algorytmach często można spotkać funkcję tzw. minimalnego czasu zadziałania. Dla dużych wartości prądów, w celu zachowania selektywności

działania zabezpieczeń, może istnieć potrzeba sztucznego wydłużenia czasu zadziałania. Przykładowa charakterystyka pokazana jest na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka czasowo – prądowa z minimalnym czasem zadziałania na poziomie t_{min}

Wartą podkreślenia jest także funkcja opóźnienia powrotu przekaźnika, przydatna szczególnie w czasie występowania zwarć doziemnych przerywanych, które są trudne do wykrycia. Działanie opiera się na podtrzymywaniu pobudzenia zabezpieczenia przez nastawiony czas t_r po zaniku występowania kryterium rozruchowego (np. zmniejszeniu składowej zerowej prądu poniżej nastawionej wartości). Jeżeli w czasie krótszym od t_r wartość wielkości kryterialnej ponownie zwiększy się powyżej wartości nastawczej, nastąpi zadziałanie zabezpieczenia po czasie równym nastawionemu czasowi zabezpieczenia, przy czym zwłoka ta będzie liczona od chwili wystąpienia pierwszego zakłócenia. Maksymalnie, w przypadku aktywnej funkcji „zamrożenia" zegara, pobudzenie może utrzymywać się przez czas wyrażony zależnością 4.

$$t_{pobudzenie} = t_{nast} + t_r \tag{4}$$

Zastosowanie takiej funkcji, poza oczywistą przydatnością w przypadku zwarć przerywanych, jest korzystne np. w przypadku zachowania selektywności działania zabezpieczeń. Sytuacja taka może wystąpić wówczas, gdy funkcja zależna jednego terminala musi zostać zablokowana w celu umożliwienia niezależnego czasowo zadziałania innego terminala ze względu na uzyskanie selektywności działania zabezpieczeń, zwłaszcza, gdy występuje szereg przekaźników wykonanych w różnych technikach, tj. analogowej i cyfrowej.

3. ZABEZPIECZENIE ADMITANCYJNE

Do wykrywania i lokalizacji zwarć doziemnych w sieciach z punktem neutralnym izolowanym oraz w sieciach skompensowanych, charakteryzujących się małymi prądami zwarcia doziemnego, stosuje się następujące rodzaje zabezpieczeń reagujących na ustalone przebiegi wielkości pomiarowych wykorzystujące:

a) podstawowe harmoniczne składowych zerowych prądów i napięć oraz kierunek składowych czynnych lub biernych prądu zerowego,
b) wyższe harmoniczne zawarte w prądach i napięciach zerowych,
c) zewnętrzne sygnały zmienno- lub stałoprądowe [3].

W admitancyjnych zabezpieczeniach ziemnozwarciowych wartością pomiarowo-rozruchową może być moduł admitancji zerowej linii Y_0 lub jedna z jej składowych: G_0 lub B_0 [1].

Celem prowadzonych w laboratorium pomiarów było sprawdzenie sposobu wyznaczania modułu admitancji Y_0 przez zabezpieczenie implementowane w sterowniku polowym jednego z wiodących producentów. Wszystkie badania wykonywano przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz. W składowej zerowej prądu generowano dodatkowo wyższe harmoniczne. Wynika to z obserwacji przebiegów w praktyce – odkształcany jest najczęściej sygnał *I0*, podczas gdy składowa zerowa napięcia ma przebieg czysto sinusoidalny.

Generowana składowa zerowa prądu, w ogólnym przypadku zawierała wyższe harmoniczne, a opisana jest zależnością:

$$i_N = a_{\%N} I_N \sin(2\pi f N \cdot t + \varphi_N) \tag{5}$$

w której: $a_{\%N}I_N$ – udział N-tej harmonicznej w przebiegu prądu, N – rząd harmonicznej, φ_N – przesunięcie fazowe N-tej harmonicznej prądu względem napięcia, f – częstotliwość podstawowa (50 Hz).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można potwierdzić fakt obliczania przez zabezpieczenie admitancji zerowej na podstawie pierwszej (podstawowej) harmonicznej składowej zerowej prądu. Należałoby jednak zastanowić się nad faktem poprawności zastosowania takiej procedury. Ze względów na charakter zwarcia doziemnego, w jego prądzie bardzo często pojawiają się wyższe harmoniczne. Ponadto z praktyki wiadomo, że niejednokrotnie amplituda składowej o wyższej częstotliwości jest porównywalna, a nawet większa od harmonicznej podstawowej. Z tego powodu uwzględnienie składowych o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej wydaje się być zasadne. Tego typu rozwiązania były już implementowane w automatyce zabezpieczeniowej, jednakże praktyki te zostały zaprzestane. Zaleca się, aby przy konstruowaniu nowych rozwiązań sterowników i terminali polowych ponownie do nich powrócić i rozpatrywać nie tylko podstawową składową admitancji zerowej jako wielkość kryterialną przy rozruchu zabezpieczenia.

4. ZAKOŃCZENIE

Algorytmy zabezpieczeniowe implementowane w nowoczesnych rozwiązaniach sterowników polowych podlegają ciągłym ewolucjom i udoskonaleniom. W niniejszym artykule skupiono się na dwóch z nich: zabezpieczeniu nadprądowym zwłocznym o charakterystyce zależnej oraz admitancyjnym.

Rozstrzygnięty został sposób wyznaczania wartości prądu obliczeniowego w przypadku zmian prądu wejściowego po rozruchu zabezpieczenia. Zaleca się stosowanie średniej arytmetycznej z kwadratów próbek prądowych. Ponadto poleca się używanie funkcji minimalnego czasu zadziałania zabezpieczenia, jeżeli sterownik bądź terminal jest w nią wyposażony. W przypadku zabezpieczenia admitancyjnego zaleca się uwzględnianie wyższych harmonicznych prądu przy obliczaniu wielkości kryterialnych. Wszystkie powyższe funkcje powinny być implementowane w nowych rozwiązaniach sterowników i terminali polowych.

LITERATURA

[1] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007 (in Polish).
[2] Lorenc J., Hoppel W., Kryteria decyzyjne w systemach cyfrowych zabezpieczeń i pomiarów uwzględniające sposób pracy punktu neutralnego sieci średniego napięcia. Problemy systemów elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006 (in Polish).
[3] Winkler W., Wiszniewski A., Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004 r. (in Polish).

SELECTED IED PROTECTION FUNCTIONS

The paper presents some aspects of the work IED protection algorithms. These functions are hidden deep in the algorithms, however, very important for the power protection automation during abnormal failure in the MV lines. These functions have not been tested yet. An example of this problem is action of the IDMT overcurrent protection when the input current changes its value after protection start-up. Another example is the work of an earth fault protection based on Y0> criteria, when Y0 signal is distorted.

The article is entirely based on the experience and measurements conducted by the author in the laboratories of the Institute of Electrical Power Engineering Poznań University of Technology.