

Możliwości konfiguracyjne urządzeń rodziny iZAZ – rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego stuprocentowego stojana generatora

Zygmunt Kuran, Marcin Lizer, Michał Krzęcio

W artykule przedstawiono możliwości konfiguracyjne urządzeń rodziny iZAZ produkcji firmy ZAZ-En oraz propozycję rozwiązania zabezpieczeń ziemnozwarciowych stojana generatora średniej i dużej mocy.

Firma ZAZ-En w ścisłej współpracy z dr. inż. Zygmuntem Kuraniem z Instytutu Energetyki w Warszawie rozpoczęła prace nad własnym rozwiązaniem zabezpieczenia stuprocentowego stojana, bazującego na iniekcji sygnału pomiarowego w punkcie zerowym generatora. Przedstawiono koncepcję działania zabezpieczenia oraz sposób realizacji układu pomiarowego.

ZAZ-En jest jedną z wielu firm, działających na polskim rynku produkcji i usług w zakresie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Została stworzona zaledwie kilka lat temu i początkowo mogła oferować wyłącznie usługi – przede wszystkim badania okresowe i obsługę serwisową urządzeń rodziny ZAZ i CZAZ, wyprodukowanych przez ZEG oraz ZEG-Energetyka, a więc firmy w których przez wiele lat pracowali konstruktorzy, tworzący obecnie zespół firmy ZAZ-En. Równocześnie z działalnością usługową prowadziliśmy intensywne prace, mające na celu opracowanie nowej rodziny urządzeń automatyki zabezpieczeniowej, nazwanej iZAZ – krótko, w nawiązaniu do zespołów automatyki zabezpieczeniowej, a równocześnie nie bez sentymentu do lat pracy w ZEG-Energetyka i urządzeń, w których konstruowanie i produkcję włożyliśmy wiele zaangażowania i pasji.

Oprócz wieloletnich doświadczeń, zdobytych w trakcie konstruowania oraz wdrażania do produkcji aparatury elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, wpływ na kształt i możliwości funkcjonalne urządzeń rodziny iZAZ miały, i wciąż mają, wszelkie uwagi zgłaszane przez personel obsługujący aparaturę, a także przez projektantów. Możliwość dostosowania sposobu działania do zmiennych wymagań zabezpieczanego obiektu oraz zdobywanych doświadczeń eksploatacyjnych jest jedną z podstawowych cech oferowanych przez nas urządzeń.

Rodzina urządzeń iZAZ powstała na podstawie wspólnego założenia funkcjonalnego, a istotnym tego efektem i równocześnie zalecą jest spójność sposobu konfigurowania, co oznacza w praktyce ten sam sposób tworzenia logiki działania funkcji zabezpieczeniowych we wszystkich programowalnych rozwiązaniach, począwszy od iZAZ200, a także możliwość wymienności fragmentów konfiguracji pomiędzy nimi. Zastosowanie rozwiązania modułowego pozwala na konfigurację sprzętową urządzeń, co umożliwia dostosowanie: liczby wejść analogowych, wejść dwustanowych oraz wyjść przekaźnikowych do określonego układu, a co za tym idzie – daje możliwość optymalizacji kosztów. Otwarta biblioteka funkcji zabezpieczenio-

Lista funkcji zabezpieczeniowych

Nazwa zabezpieczenia	TYP	ANSI
Nadprądowe	I>	50/51
Nadprądowe przeciążeniowe zależne	Ip>inv	51
Nadprądowe szczytowe (szeroki zakres częstotliwości)	Im>	50/51
Nadprądowe zależne	IR>inv	49R
Nadprądowe cieplne	Ic>inv	49M
Nadprądowe składowej przeciwnej	IA>	46
Nadprądowe składowej przeciwnej zależne	IA>inv	46
Nadnapięciowe	U>	59
Nadnapięciowe szczytowe (szeroki zakres częstotliwości)	Um>	59
Podnapięciowe	U<	27
Nadnapięciowe składowej zerowej	Uo>	59N
Nadnapięciowe składowej przeciwnej	UA>	47
Podnapięciowe składowej zgodnej	UIf<	27D
Nadprądowe ziemnozwarciowe	Io>	50N/51N
Nadprądowe ziemnozwarciowe zależne	Io>inv	51N
Ziemnozwarciowe kierunkowe (SN)	IoKs>	59N/67N
Ziemnozwarciowe admitancyjne bezkierunkowe	Yo>	21N
Ziemnozwarciowe admitancyjne kierunkowe	YoK>	21N
Częstotliwościowe	f	81H/81L
Częstotliwościowe stromościowe	df	81S
Częstotliwościowe przyrostowe	Δf	81SA
Częstotliwościowo-napięciowe	Uf>inv	24
Mocowe, od mocy zwrotnej	P>	32R
Mocowe, od zrzutu mocy	P<	32L
Od nieprawidłowej kolejności wirowania faz	Usp>	47
Od utraty wzbudzenia generatora	Zuw<	40/27
Podimpedancyjne kołowe	Z<	21
Od załączenia niewzbudzonego generatora	Inw>	50/27
Różnicowe generatora, transformatora, bloku	ΔI>	87G/87B
Ziemnozwarciowe różnicowe ($I_{L1}+I_{L2}+I_{L3}-3I_o$)	ΔIo>	87REF
Ziemnozwarciowe wimnika	R_64R	64R
Ziemnozwarciowe stojana 100% (różnica 3 h)	R_64S	64S
Od utraty synchronizmu/poślizg biegunów	Zpb<	78
Funkcja kontroli współczynnika mocy tgφ	tg>	55
Automatyka samoczynnego częstotliwościowego odciążania	SCO	-
Automatyka lokalnej rezerwy wyłącznikowej	LRW	50BF
Funkcja kontroli synchronizmu	SCK	25

Dr inż. Zygmunt Kuran, mgr inż. Marcin Lizer – Instytut Energetyki w Warszawie, mgr inż. Michał Krzęcio – ZAZ-En Sp. z o.o., Tychy (lab.eaz@ien.com.pl)

wych wraz z prostym i w pełni kontrolowanym sposobem aktualizacji wewnętrznego oprogramowania, stanowią dodatkowy atut – pozwalają na unowocześnianie urządzeń, a właściwie ich algorytmów również w okresie eksploatacji.

Możliwości konfiguracyjne rodziny urządzeń iZAZ

Biorąc pod uwagę nadrzędny cel, jakim była spójna i przejrzysta prezentacja konfiguracji urządzeń, przygotowano graficzny interfejs, umożliwiający analizę sposobu działania urządzenia oraz wprowadzanie zmian w konfiguracji. Kompleksowa obsługa urządzeń rodziny iZAZ jest możliwa dzięki oprogramowaniu iZAZ Tools w środowisku Windows XP/7/8.

Program ten umożliwia podgląd lub edycję konfiguracji i nastaw w trybie graficznym, kontrolę stanu urządzenia i chronionego obiektu oraz sterowanie stanem zespołu oraz złącznikami, a także interpretację i analizę rejestracji zakłóceń i zdarzeń. Do komunikacji z urządzeniami iZAZ program może wykorzystywać jeden z dostępnych interfejsów komunikacyjnych:

- port USB (iZAZ400, 600) lub miniUSB (iZAZ200, 300) – znajdujący się na płycie czołowej, wykorzystywany głównie do lokalnej komunikacji z komputerem PC,
- port szeregowy RS-485 – znajdujący się na tylnej płycie złączy, używany do lokalnej komunikacji z komputerem PC lub zdalnej komunikacji z systemem nadrzędnym,
- port Ethernet (iZAZ400, 600) – dostępny w wariancie przewodowym lub światłowodowym do komunikacji w protokole MODBUS TCP lub IEC 61850.

Różne poziomy uprawnień dają możliwość zabezpieczenia systemu przed nieuprawnionym dostępem. Co istotne, dostęp do edycji poszczególnych funkcji konfiguracji jest rozróżniony.

Użytkownik podstawowy, w trybie edycji ma możliwość zmiany: sterowania wyjść przekaźnikowych, diod świecących oraz sposobu działania wejść dwustanowych. Odbywa się to w sposób graficzny przez edycję lub tworzenie nowych zależności logiczno-czasowych. Natomiast na poziomie konfiguracyjnym użytkownik może zmieniać sposób działania zabezpieczeń, dodawać nowe zabezpieczenia lub automatyki z dostępnej biblioteki funkcji (tabela) oraz modyfikować zależności logiczno-czasowe.

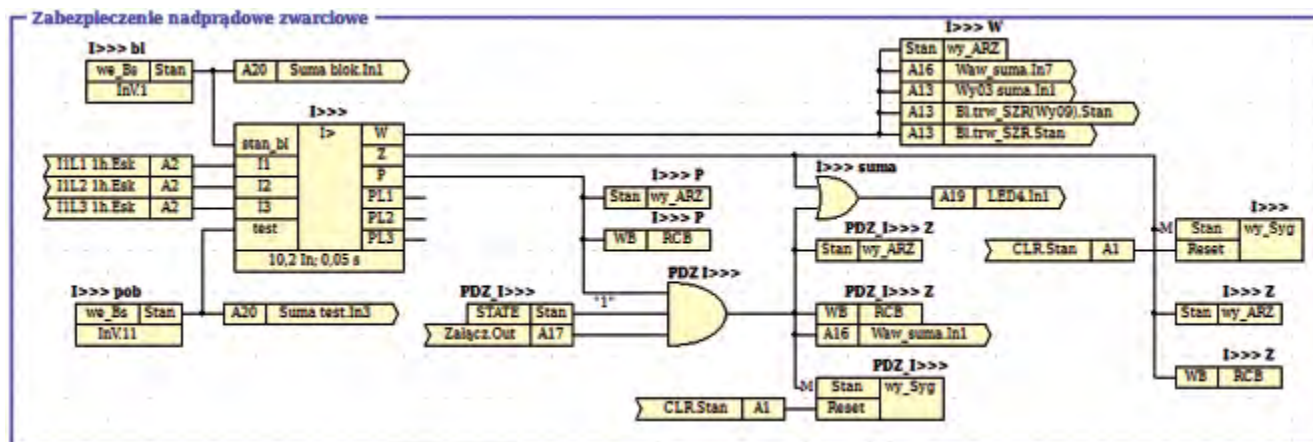
Jako przykład przedstawiono zrzut fragmentu konfiguracji z programu iZAZ Tools (rys. 1) – zabezpieczenie nadprądowe zwarciove z automatyką przyspieszenia wyłączenia po załączeniu na zwarcie

(PDZ). Cała konfiguracja jest zgromadzona na zakładkach numerowanych od A1. Nawigacja między zakładkami odbywa się przez etykiety z oznaczeniami adresowymi. Przykładowa funkcja nadprądowa I>>> ma wejścia służące do blokady i pobudzenia testowego zabezpieczenia sygnałami wejść wirtualnych (we_Bs) oraz wejścia estymat składowych podstawowych prądu I1. Natomiast na wyjściach wyprowadzone są pobudzenia poszczególnych faz (PL1, 2, 3), pobudzenie sumaryczne (P), zadziałanie po nastawionym czasie (Z) i wyłączenie (W). Rozróżnienie sygnału zadziałania i wyłączenia umożliwia, dzięki nastawie parametru W, wybór czy funkcja będzie działała na wyłączenie czy też nie. W dolnej części bloczka funkcyjnego prezentowane są podstawowe nastawy funkcji, w tym przypadku prąd rozruchowy (możliwość ustawienia w wartościach względnych, pierwotnych lub wtórnych) i czas opóźnienia. Dzięki podstawowym funkcjom logicznym (AND, OR, XOR, BUF) istnieje możliwość tworzenia dowolnych zależności logiczno-czasowych pomiędzy wszystkimi sygnałami dostępnymi w konfiguracji. Na schemacie znajdują się również sygnały do rejestratora zdarzeń (wy_ARZ), zakłóceń (RCB) oraz sygnalizacje tekstowe na wyświetlaczu (wy_SYG).

Należy podkreślić fakt, że wszystkie nazwy sygnałów są edytowalne – użytkownik może dostosować nazewnictwo zabezpieczeń, sygnalizacji, zdarzeń itd. do optymalnego, najbardziej czytelnego z jego punktu widzenia. Takie podejście ułatwia osobom obsługującym urządzenia przeprowadzenie szybkiej analizy zachodzących zjawisk i wskazanie przyczyny wyłączenia.

Konfiguracja urządzenia prezentowana w trybie graficznym jest kompletna. Oznacza to, że w urządzeniu nie ma ukrytych fragmentów logiki dedykowanej, które nie są ujęte w prezentowanej logice działania. Takie podejście ułatwia analizę działania, na schemacie graficznym znajduje się bowiem cała konfiguracja, którą w każdej chwili można wyeksportować do pliku PDF. Dowolne fragmenty można zapisywać na dysku i importować w innym urządzeniu, również innego typu. Edycja konfiguracji jest kompatybilna pomiędzy urządzeniami iZAZ200 – iZAZ600.

Każde urządzenie przy dostawie jest wstępnie skonfigurowane, zgodnie z wybranym przez użytkownika typem konfiguracji standardowej. Jeżeli na etapie produkcji zostaną określone indywidualne założenia konfiguracyjne lub projektowe, to producent przygotowuje plik konfiguracyjny tak, że użytkownik otrzymuje urządzenie skonfigurowane zgodnie z przekazaną dokumentacją. Również na



Rys. 1. Przykład konfiguracji w trybie graficznym

etapie pierwszego uruchomienia na obiekcie niejednokrotnie pojawia się konieczność wprowadzenia zmian w konfiguracji. Zmiany takie użytkownik może wprowadzić sam, ewentualnie wykorzystując wsparcie producenta, przy czym najbardziej efektywnym sposobem jest przesłanie aktualnej konfiguracji e-mailem wraz z opisem wymaganych zmian.

Firma ZAZ-En zapewnia wsparcie klientowi w każdym momencie – począwszy od analizy założeń projektowych, przez dobór odpowiedniego wariantu sprzętowego i programowego, dostosowanie konfiguracji do specyfiki obiektu, a także podczas pierwszego uruchomienia i eksploatacji. Naturalnie do dyspozycji użytkownika są wszelkie szkolenia, prezentacje oraz pokazy w zakresie eksploatacyjnym lub rozszerzonym (konfiguracyjnym). Swobodnie programowalna logika działania, również w zakresie funkcji torów analogowych, typu estymat składowej podstawowej, wyższych harmonicznych, a co istotne liczby i typów funkcji zabezpieczeniowych oraz automatyk, daje ogromne możliwości adaptacji i dostosowania do potrzeb i wymagań projektowych. Takie podejście daje ogromne możliwości wykorzystania urządzeń zarówno w sposób typowy jak też indywidualnie dostosowany do wymagań zabezpieczanego obiektu.

Kompletny plik konfiguracyjny (konfiguracja zabezpieczeń, nastawy oraz konfiguracja wyświetlacza graficznego) można zapisać na dysku (plik formatu *.izaz), natomiast w przypadku zapisu do urządzenia, następuje przesłanie tylko fragmentu konfiguracji, który uległ modyfikacji. Zmniejsza to ilość przesyłanych danych i znacznie skraca czas przesyłania konfiguracji. Co istotne, dane są zabezpieczone sumami kontrolnymi oraz buforowane w pamięci urządzenia, co zapewnia bezpieczny i stabilny zapis pliku konfiguracyjnego.

W przypadku edycji nazw funkcji lub elementów graficznych na panelu LCD, przesłanie zmian do urządzenia nie powoduje odstawienia działania zabezpieczeń. Jedynie przesyłanie zmian w obrębie nastaw lub logiki działania zabezpieczeń wymaga krótkiego czasowego restartu procesora DSP, przy czym odbywa się to dopiero po przesłaniu pliku konfiguracji i sprawdzeniu jego integralności.

Program obsługi iZAZ Tools, przy zapisie nastaw, weryfikuje zmiany i wyświetla do akceptacji zanim wyśle zmieniony plik do urządzenia. Istnieje również możliwość porównania dwóch zapisanych konfiguracji w trybie off-line. Takie podejście ogranicza możliwość popełnienia błędu przez obsługę przy przesyłaniu zmian nastaw do urządzenia. Opisane powyżej możliwości konfiguracyjne sprawiają, że urządzenia rodziny iZAZ mogą być wykorzystywane w różnorodnych aplikacjach. Jako przykład uzupełnienia zabezpieczeń generatorów średnich i dużych może posłużyć iZAZ300, który dzięki trójfazowemu wejściu prądowemu i napięciowemu może posłużyć do realizacji funkcji – od poślizgu biegunów (78), utraty wzbudzenia (40/27), impedancyjnego (21), mocy zwrotnej (32R), zrzutu mocy (32L) oraz pozostałych funkcji prądowych, napięciowych czy częstotliwościowych, dostępnych w bibliotece zabezpieczeniowej. Takie rozwiązanie zostało zastosowane w jednej z pierwszych aplikacji urządzenia iZAZ300 i pracuje jako zabezpieczenie generatora od jesieni 2012 r. Innym przykładem kompleksowego zabezpieczenia bloków małej i średniej mocy jest zastosowanie dwóch redundantnych zespołów zabezpieczeń iZAZ400 (rys. 2).

Zastosowanie w każdym z urządzeń dwóch prądów trójfazowych, prądu ziemnozwarciowego $3I_0$ oraz dodatkowo napięcia trójfazo-



Rys. 2. Zespół zabezpieczeń iZAZ400

wego i napięcia $3U_0$ i dodatkowego napięcia U_2 , daje możliwość skonfigurowania kompletu wymaganych zabezpieczeń, z uwzględnieniem zabezpieczenia różnicowego bloku lub generatora. Zastosowanie zespołu zabezpieczeń iZAZ400 oczywiście nie ogranicza się jedynie do zabezpieczeń generatorów. Urządzenie to dzięki różnorodnym kartom torów analogowych jest z powodzeniem stosowane jako uniwersalne zabezpieczenie pól średnich napięć różnego typu wraz ze sterownikiem pola, również dużych silników synchronicznych, gdzie wymagane jest zabezpieczenie różnicowe.

Należy nadmienić, że w specjalnym wariantcie sprzętowym, iZAZ400 może pełnić rolę zabezpieczenia odległościowego dla linii WN z pięciostrefową funkcją impedancyjną poligonalną lub kołową, wraz z wymaganymi funkcjami typu: lokalizator miejsca zwarcia, wykrywania kołysań mocy, blokady od uszkodzeń w obwodach napięciowych, automatyką SPZ w wykonaniu jednofazowym lub trójfazowym, automatyką przyspieszonego wyłączenia przy załączeniu na zwarcie. Istotną cechą urządzeń iZAZ400 oraz iZAZ600 jest panel operatora, który umożliwi czytelną wizualizację stanu pracy układu oraz selektywną diagnostykę zakłóceń. Siedmiocalowy, kolorowy wyświetlacz graficzny pozwala na czytelną prezentację stanu łączników bądź innych, zdefiniowanych stanów układu oraz pomiarów wartości głównych sygnałów, odzwierciedlających stan pracy obiektu.

Ponadto sygnalizacja zadziałań jest możliwa przez wykorzystanie 16 dwukolorowych diod świecących oraz użycie (w pełni edytowalnych) tekstowych komunikatów, pojawiających się w dolnej części wyświetlacza.

Klawiatura numeryczna umożliwia szybkie wprowadzanie wartości liczbowych (nastaw, haseł dostępu, adresu IP, itp.), natomiast cztery programowalne przyciski funkcyjne pozwalają w szybki sposób przejść do interesującego użytkownika miejsca menu, np. do rejestratora zdarzeń, zdarzeń, do pomiarów czy też nastaw.

Dla dużych i największych bloków generator – transformator przygotowano rozwiązanie w postaci urządzenia iZAZ600. Przewiduje się typowo zastosowanie dwóch rezerwujących się zespołów. Kompleksowe wykonanie w dwóch szafach zabezpieczeń z zabudowanymi zespołami zabezpieczeń iZAZ600 oraz aparaturą pomocniczą i pośredniczącymi listwami podłączeniowymi występuje pod nazwą iZAZ800 (rys. 3). Jednym z podstawowych zabezpieczeń układów blokowych jest zabezpieczenie od zwarć doziemnych stojana generatora.



Rys. 3. Szafy zabezpieczeń iZAZ800

Zabezpieczenia ziemnozwarciowe stojana generatora – przegląd rozwiązań i propozycja firmy ZAZ-En

Zwarcia doziemne w obwodach stojana generatora są jednym z typów zakłóceń najczęściej występujących w pracy bloków wytwórczych [6]. Aby zmniejszyć wartość prądu ziemnozwarciowego i związane z tym ryzyko uszkodzenia żelaza rdzenia stojana, punkt neutralny generatora jest zwykle izolowany od ziemi. Taki układ jest jednak bardzo wrażliwy na przepięcia feroresonansowe. Dlatego układ jest często uziemiany przez znaczną impedancję (np. $R = 1000 \Omega$). Ogranicza on prądy zwarcia doziemnego w uzwojeniach stojana generatora do bardzo małych wartości, zależnych również od pojemności doziemnej obwodów bloku, zwłaszcza pojemności uzwojeń stojana generatora, uzwojenia dolnego napięcia transformatora blokowego i pojemności dodatkowych zainstalowanych na biegunach wyłącznika generatorowego.

Zabezpieczenie zerowonapięciowe stojana

Podstawowym zabezpieczeniem ziemnozwarciowym stojana generatora jest zabezpieczenie zerowonapięciowe (59N lub 59GN), mierzące składową zerową za pomocą przekładnika napięciowego w punkcie neutralnym generatora lub na jego zaciskach [6]. Jest to jedno z podstawowych zabezpieczeń zaimplementowanych w zespołach rodziny iZAZ. W przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego w uzwojeniach stojana generatora, zmierzona przez zabezpieczenie 59N składowa zerowa napięcia będzie tym większa, im dalej od punktu neutralnego wystąpi zwarcie. Zatem, w przypadku zwarcia występującego na zaciskach generatora, zmierzone w punkcie neutralnym lub na zaciskach maszyny napięcie zerowe (U_0) będzie największe i równe w przybliżeniu napięciu fazowemu stojana. Natomiast, jeśli zwarcie doziemne wystąpi w pobliżu punktu neutralnego, zmierzona składowa zerowa będzie niewielka, a w przypadku zwarcia w punkcie neutralnym równa zero. W związku z tym napięcie rozruchowe zabezpieczenia 59N powinno być jak najniższe, ponieważ pozwoli to zmniejszyć jego strefę nieczułości na zwarcia doziemne w pobliżu punktu neutralnego [7].

Zabezpieczenie 59N nie może działać podczas zwarcia po stronie górnego napięcia transformatora blokowego (w sieci, na której pracuje blok). W czasie tego typu zakłóceń, niewielka wartość składowej zerowej napięcia przenosi się przez pojemności między uzwojeniami transformatora blokowego z jego strony górnego napięcia (GN) na stronę dolnego napięcia bloku (DN). To, jak dużo napięcia zerowego przeniesie się ze strony GN na stronę DN bloku zależy od pojemności doziemnej generatora, transformatora oraz od pojemności dodatkowych wyłącznika generatorowego i rezystora w zerze generatora, o ile jest zastosowany. Zatem, w zależności od stanu wyłącznika, poziom napięcia zerowego przeniesionego na stronę DN bloku będzie się zmieniał. Przeniesione napięcie zerowe będzie niższe przy zamkniętym wyłączniku oraz większe, kiedy jest on otwarty (np. kiedy potrzeby własne bloku zasilane są z sieci) [7]. W związku z tym, zabezpieczenie 59N musi być odstrojone od spodziewanego maksymalnego napięcia zerowego mierzonego po stronie DN bloku w czasie zwarcia doziemnego po stronie GN [7].

Aby spełnić to wymaganie zabezpieczenie 59N nastawiane jest zwykle na napięcie rozruchowe w zakresie 2–25 V (po stronie wtórnej przekładnika napięciowego), co odpowiada objęciu strefą działania 98–75% uzwojenia stojana (patrząc od strony zacisków generatora). Zatem, pozostałe 2–25% uzwojeń stojana pozostaną, w tej sytuacji bez ochrony [7]. Stan taki jest dopuszczalny dla jednostek wytwórczych małej mocy chłodzonych powietrzem, w przypadku których ryzyko wystąpienia zwarcia doziemnego w rejonie punktu neutralnego generatora jest bardzo małe.

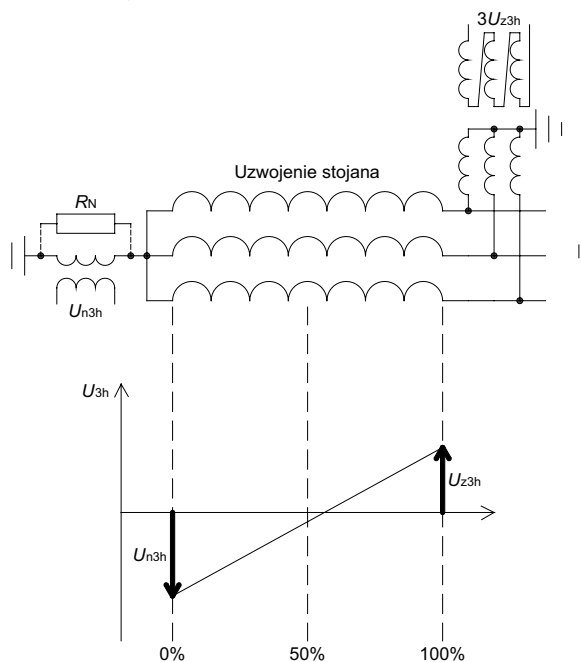
Układ zabezpieczeniowy bloków wyposażonych w wyłącznik generatorowy, powinien mieć również zabezpieczenie zerowonapięciowe zainstalowane pomiędzy tym wyłącznikiem i zaciskami strony DN transformatora na wypadek pracy z potrzebami własnymi zasilanymi z sieci.

W przypadku jednostek wytwórczych większej mocy, zwłaszcza tych z wodnym chłodzeniem uzwojeń, wymagane jest zapewnienie zabezpieczenia ziemnozwarciowego stojana obejmującego 100% jego uzwojeń. Doziemienie punktu naturalnego powoduje przepływ prądu tylko resztkowego, ale ze względu na zagrożenie powstania drugiego doziemienia nie dopuszcza się do takiej pracy. Nie ma jednak presji na skracanie czasów własnych i czasów opóźnienia tych zabezpieczeń. Zabezpieczenie obejmujące całość uzwojeń stojana realizowane jest obecnie jako uzupełnienie zabezpieczenia 59N na dwa sposoby: przez dobezpieczenie jednostki wytwórczej dzięki zabezpieczeniu ziemnozwarciowego stojana reagującego na 3. harmoniczną napięcia lub dzięki zastosowaniu zabezpieczenia ziemnozwarciowego, wprowadzającego do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci [6]. Powyższe zabezpieczenia obejmują całość uzwojeń stojana, tylko gdy występują łącznie z zabezpieczeniem 59N, bo same są zbyt wolne lub mają swoje własne martwe strefy.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana reagujące na 3. harmoniczną napięcia

W stanie normalnym, napięcia stojana są nieznacznie odkształcone na skutek występowania nieliniowości obwodu magnesowania generatora. Odkształcenie to powstaje głównie przez obecność 3. harmonicznego napięcia. Przekładnik napięciowy w punkcie neutralnym i przekładniki połączone w układ otwartego trójkąta na zaciskach generatora mierzą wartość 3. harmonicznego napięcia względem

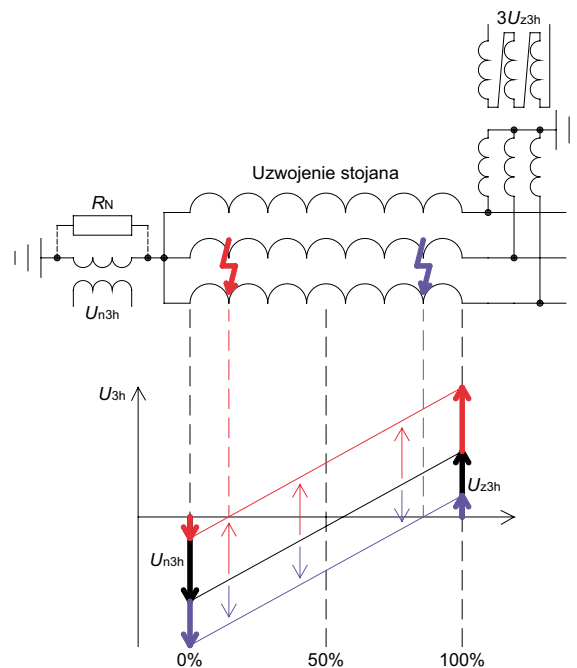
ziemi. Wartości te, w odróżnieniu od składowej zerowej napięcia 50 Hz, nie są sobie równe. 3. harmoniczna w każdej fazie generatora ma taką samą wartość – tak w odniesieniu do amplitudy – jak również fazy. Nie tworzy zatem układu trójfazowego, tak jak robi to składowa 50 Hz. Dlatego w stanie normalnym, składowa 50 Hz ma punkt o zerowym potencjale w zerze generatora, a 3. harmoniczna napięcia rozkłada się w taki sposób, że jej zerowa wartość w stosunku do ziemi występuje mniej więcej w połowie uzwojenia stojana (w zależności od pojemności doziemnych elementów bloku). Na zaciskach generatora występuje jej maksymalna wartość dodatnia (np. kąt 0°), a w punkcie neutralnym minimalna wartość ujemna (np. kąt 180°) – rys. 4 [6].



Rys. 4. Przykładowy rozkład 3. harmonicznej składowej zerowej napięcia stojana w stanie normalnym

Poziom oraz rozkład 3. harmonicznej napięcia stojana zależy od wielu czynników, zwłaszcza od: wartości pojemności doziemnych generatora, transformatora blokowego, rezystora uziemiającego punkt naturalny oraz od pojemności dodatkowych wyłącznika. Rozkład ten będzie się zatem istotnie zmieniał w zależności od stanu wyłącznika generatorowego. Ponadto, poziomy 3. harmonicznej napięcia stojana zmieniają się w zależności od obciążenia generatora mocą czynną i bierną [6, 7].

W sytuacji powstania zwarcia doziemnego w uzwojeniu stojana generatora rozkład 3. harmonicznej napięcia stojana również ulegnie zmianie. W tej sytuacji, jej zerowa wartość wystąpi w miejscu powstania zwarcia doziemnego. Jej wartości mierzone na zaciskach generatora (U_{z3h}) oraz w punkcie neutralnym (U_{n3h}) ulegają zmianie zgodnie z rys. 5 [6]. Zwarcie nie zmienia wartości 3. harmonicznej generowanej w uzwojeniach, a jedynie przemieszcza ten potencjał względem ziemi. Zatem, jeśli zwarcie doziemne wystąpi blisko punktu neutralnego, to wartość 3. harmonicznej napięcia mierzona na zaciskach stojana generatora (U_{z3h}) ulegnie zwiększeniu, a w punkcie neutralnym (U_{n3h}) zmniejszeniu (w odniesieniu do modułu). W przypadku zwarcia występującego bezpośrednio w punkcie neutralnym stojana wartość U_{n3h} będzie zerowa [6].



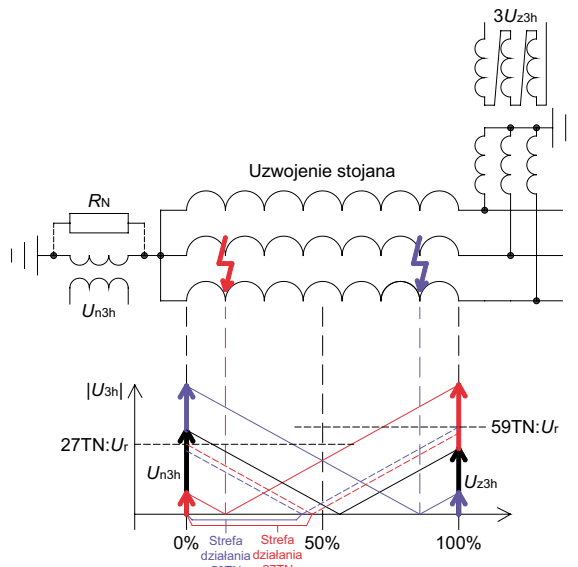
Rys. 5. Przykładowy rozkład 3. harmonicznej napięcia stojana w stanie zwarcia doziemnego w pobliżu punktu neutralnego (przebieg czerwony) i zacisków (przebieg niebieski) generatora

Jeśli zwarcie doziemne wystąpi w pobliżu zacisków generatora, wartość U_{z3h} zmniejszy się, a U_{n3h} (w odniesieniu do modułu) zwiększy się. W przypadku zwarcia doziemnego na zaciskach stojana wartość U_{z03h} będzie zerowa [6]. Natomiast zwarcie w punkcie uzwojenia, w którym 3. harmoniczna w stosunku do ziemi ma wartość bliską zero, nie spowoduje istotnych zmian w pomiarach (jest to strefa martwa).

Zgodnie z tym, aby opisywane zabezpieczenie czule wykrywało zwarcia doziemne w rejonie punktu neutralnego generatora (i uzupełniało tym samym zabezpieczenie 59N), może ono zostać rozwiązane jako funkcja podnapięciowa (27TN), mierząca moduł 3. harmonicznej napięcia w punkcie neutralnym generatora. Alternatywnie może ono być zrealizowane jako funkcja nadnapięciowa (59TN), mierząca moduł 3. harmonicznej napięcia na zaciskach generatora [8, 9]. Rozwiązanie takie ilustruje rys. 6.

Opisywane zabezpieczenie często jest realizowane też jako funkcja wyznaczająca różnicę modułów lub sumę wektorów 3. harmonicznej napięcia (64S), mierzonej w punkcie neutralnym i na zaciskach generatora ($\Delta U_{3h} = |U_{z3h}| - |U_{n3h}|$ lub $\Delta U_{3h} = U_{z3h} - U_{n3h}$) [8, 9]. Suma wektorów pozwala uzyskać najczulsze zabezpieczenie, dlatego tą metodę zastosowano w zabezpieczeniach rodziny iZAZ.

W niektórych przypadkach w układzie pomiarowym występuje przesunięcie fazowe pomiędzy porównywanymi sygnałami. Dla prawidłowej pracy zabezpieczenia konieczne jest wprowadzenie dodatkowej korekty fazowej. Algorytm zaimplementowany w urządzeniach iZAZ umożliwia wprowadzenie korekty fazowej oraz amplitudowej na poziomie estymaty 3. harmonicznej sygnału pomiarowego, co daje możliwość kompensacji napięcia różnicy 3. harmonicznej w normalnych warunkach pracy generatora. Niezależnie od sposobu realizacji opisywanego zabezpieczenia, będzie ono nieczułe na zwarcia doziemne w pobliżu zacisków i środka uzwojenia stojana (rys. 6) [7]. Wartość napięć U_{n3h} i U_{z3h} może się



Rys. 6. Wielkości mierzone przez zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana reagujące na 3. harmoniczną napięcia, zrealizowane jako podnapięciowe (27TN) i nadnapięciowe (59TN)

zmieniać w stanie normalnym, w zależności od obciążenia bloku. Ponadto rozkład 3. harmonicznego napięcia zależy od wartości często nieznanymi pojemności elementów bloku. W związku z tym, poprawne nastawienie opisywanego zabezpieczenia (niezależnie od sposobu realizacji) na etapie projektowym może być trudne lub niemożliwe. Zwykle wymagana jest weryfikacja poprawności jego nastawienia podczas uruchomienia układu zabezpieczeń. Niektórzy producenci na powyższą okoliczność wyposażają opisywane zabezpieczenie w algorytm korygujący wartości mierzone w zależności od obciążenia bloku [8]. Również firma ZAZ-En umożliwia realizację zabezpieczenia jako wielostopniowego, uzależnionego od wartości prądu obciążenia generatora.

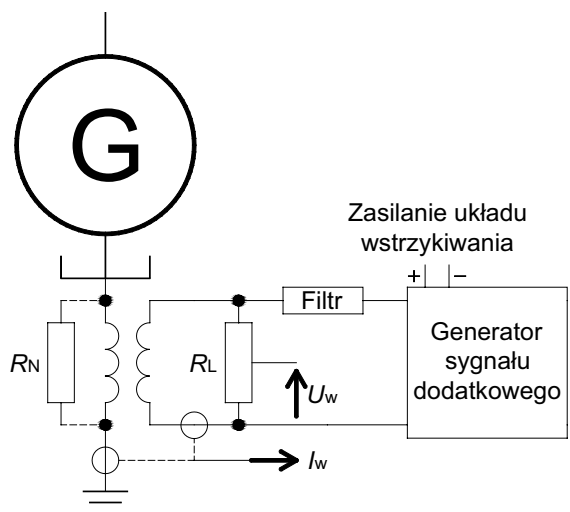
W przypadku bloków wytwórczych wyposażonych w wyłącznik generatorowy wartość rozruchowa zabezpieczenia musi być zależna od stanu tego wyłącznika (lub muszą być zastosowane dwa stopnie zabezpieczenia aktywowane w zależności od jego położenia). Jeżeli punkt neutralny generatora uziemiony jest przez rezystor, strefa działania zabezpieczenia może ulec zmniejszeniu. Można przypuszczać, że różnica pomiędzy U_{3h} mierzonymi w stanie normalnym i przy zwarciu będzie niewielka, ponieważ miejsce występowania zerowej wartości U_{3h} będzie przesunięte w stronę punktu neutralnego.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana wprowadzającego do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana reagujące na 3. harmoniczną napięcia ma wiele wad związanych ze zmiennością parametrów ziemnozwarciowych układu w zależności od aktualnego obciążenia oraz od stanu wyłącznika generatorowego. Ponadto, zabezpieczenie takie swoją strefą działania obejmuje tylko fragment uzwojenia stojana w pobliżu punktu neutralnego generatora – nie jest ono w stanie wykrywać zwarć doziemnych w środku uzwojenia stojana lub na zaciskach generatora. Nie działa również na niewzbudzone generatorze, jak również dużym ograniczeniem jest rezystor w zerze generatora.

Powyższych wad nie ma zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana, wprowadzającego do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci. Zabezpieczenie takie powszechnie nazywane jest zabezpieczeniem ziemnozwarciowym ze wstrzykiwaniem lub iniekcją [7]. W przybliżeniu, można to rozwiązanie porównać do zwykłego omomierza, przy czym nie można wymuszać prądu stałego, bo nie pozwalają nam na to przekładniki napięciowe. Musi to być częstotliwość niska, żeby wymuszanego prądu nie bocznikowały pojemności doziemne, a dodatkowo musi ona być łatwa do odfiltrowania od składowych 50 Hz. Zatem, do realizacji opisywanego zabezpieczenia niezbędny jest układ wymuszający dodatkowy sygnał pomiarowy, połączony z punktem neutralnym generatora przez układ sprzęgający (rys. 7).

Zwykle, dodatkowy sygnał pomiarowy jest napięciem sinusoidalnym lub prostokątnym o niewielkim potencjale (np. 100 V) i obniżonej częstotliwości np. 20 Hz [8, 9]. Zabezpieczenie może działać na zasadzie pomiaru prądu I_w wymuszonego przez dodatkowe napięcie o obniżonej częstotliwości, przepływającego przez układ wstrzykiwania i uzwojenia stojana. W stanie normalnym prąd ten jest bardzo mały i zależy od pojemności doziemnej (upływności) układu oraz od dużej (w stanie normalnym) rezystancji izolacji stojana. Jeśli rezystancja izolacji stojana ulegnie obniżeniu lub kiedy pojawi się zwarcie doziemne prąd I_w wzrośnie [6, 7]. Zatem, natężenie prądu I_w zależy od rezystancji izolacji uzwojeń stojana generatora i może to zostać wykorzystane jako kryterium działania zabezpieczenia. Ponieważ prąd I_w zawiera również składową pojemnościową, w niektórych rozwiązaniach, oprócz pomiaru wymuszanego prądu I_w , mierzone jest także wprowadzane do układu napięcie U_w o obniżonej częstotliwości. Na podstawie tych wielkości wyznacza się rezystancję izolacji stojana [9]. Układ wstrzykiwania wymaga dodatkowego zasilania ze źródła zewnętrznego (z napięcia pomocniczego DC lub z jednego z przekładników napięciowych). Zaletą opisywanego zabezpieczenia jest taka sama czułość wykrywania osłabienia izolacji lub zwarcia doziemnego niezależnie od tego, gdzie wystąpi to zakłócenie. Zabezpieczenie takie nie jest jednak szybkie i działa ze stosunkowo dużym opóźnieniem. Przy zwarcia w pobliżu zacisków generatora zawsze szybsze będzie zabezpieczenie 59N. Ponadto opisywane zabezpieczenie może wykrywać osłabienia izo-



Rys. 7. Przykładowa realizacja układu wstrzykiwania zabezpieczenia ziemnozwarciowego stojana

lacji lub zwarcia doziemnego również w czasie, kiedy generator nie pracuje lub jest niewzbudzony (tylko kiedy zasilanie układu wstrzykiwania zapewnione jest z zewnętrznego źródła napięcia).

Wadą powyższego rozwiązania jest potrzeba wyposażenia układu zabezpieczeń bloku w dodatkowy układ generujący sygnał pomiarowy (wymagający dodatkowego zasilania), filtr oraz układ sprzęgający. Urządzenia te muszą wytrzymać przepływ prądu I_w przy zwarciach doziemnych oraz próbach zabezpieczeń ziemnozwarciowych (sprowadzających się do uziemienia jednej z faz stojana) rzędu kilku amperów, w zależności od sposobu uziemienia punktu neutralnego generatora i przy przyjętym w układzie wstrzykiwania napięciu U_w . Daje to stosunkowo dużą moc transformatora sprzęgającego (rzędu kilkuset wołtoamperów) oraz moce, jakie muszą wytrzymać elementy strony wtórnej układu wstrzykiwania (filtr i generator sygnału pomiarowego). Transformator sprzęgający układu wstrzykiwania musi również mieć odpowiednią izolację.

Prezentacja rozwiązań zabezpieczeń ziemnozwarciowych stojana firmy ZAZ-En

W urządzeniach iZAZ przewidziano zastosowanie rozwiązania zabezpieczenia ziemnozwarciowego opartego na wstrzykiwaniu sygnału prostokątnego o częstotliwości 12,5 Hz i wartości +/-100 V. Ma to wiele zalet: obniża koszty urządzenia, ułatwia filtrację sygnałów, zwiększa dokładność. Pomysłodawcą powyższego rozwiązania jest dr inż. Zygmunt Kuran z Instytutu Energetyki, inspirowany współpracą z firmą ZAZ-En. Sposób działania algorytmu został opracowany przez Instytut Energetyki w Warszawie jako zgłoszenie patentowe P401220.

Celem pracy było stworzenie algorytmu o zwiększonej dokładności pomiaru rezystancji doziemnej oraz zwiększonej odporności na niekontrolowane wzrosty napięć, występujących w stanie zwarc doziemnych. Ideą pomysłu jest wstrzykiwanie naprzemiennie sygnału o napięciu dodatnim i ujemnym przez transformator separująco-dopasowujący, z częstotliwością synchronizowaną z siecią w zakresie od 10 do 15 Hz, dostosowaną do bieżącej częstotliwości mierzonego sygnału $3U_0$ jako 4. subharmoniczna sygnału odniesienia. Daje to możliwość dokładniejszej filtracji składowej podstawowej z mierzonego sygnału prądowego. Algorytm oblicza wynik rezystancji doziemienia, uwzględniając eliminację stanu przejściowego po zmianie polaryzacji i bazując na wartości średniej części dodatniej i ujemnej, z odpowiednią liczbą powtórzeń. Dodatkowo wyniki są wybierane na podstawie mediany za odpowiedni okres pomiarowy, co ostatecznie daje stabilny wynik pomiaru rezystancji izolacji, niezależny od zakłóceń wynikających z nakładania dużej składowej podstawowej w sygnale mierzonym. Przy projektowaniu algorytmu zabezpieczenia przede wszystkim postawiono na stabilny wynik pomiaru rezystancji w zakresie do ok. 10% uzwojeń stojana, kosztem dłuższego czasu własnego, tak aby ograniczyć do minimum możliwość wystąpienia nieselektywnego wyłączenia układu w wyniku błędnego pomiaru wartości rezystancji.

Istotnym problemem przy projektowaniu części generującej sygnał, jest zagrożenie uszkodzeniem w wyniku nałożenia na układ generujący wstecznego napięcia składowej podstawowej, pojawiającego się w przypadku doziemienia uzwojeń stojana. Układ został odpowiednio zabezpieczony przez wprowadzenie dodatkowego układu przejmującego obciążenie przy wzroście napięcia powyżej wartości wynikających z generowanego sygnału pomiarowego.

Prototypowa wersja zabezpieczenia zostanie zainstalowana na dużym bloku energetycznym w jednej z największych elektrowni w Polsce. Pozwoli to na praktyczną weryfikację działania układu modelowego, a także umożliwi sprawdzenie odporności na zakłócenia pojawiające się w typowych warunkach eksploatacyjnych.

Podsumowanie

Rodzina urządzeń iZAZ została zaprojektowana z pełnym wykorzystaniem 50-letnich doświadczeń z opracowania, produkcji, eksploatacji zabezpieczeń ZAZ i CZAZ tak, aby umożliwić dostosowanie się do rosnących wymagań i potrzeb użytkownika. Otwarta platforma programowa daje duże możliwości optymalizacji sposobu funkcjonowania urządzeń. Elastyczne podejście konstruktorów, ciągle zdobywanie doświadczeń eksploatacyjnych i wykorzystywanie ich do aktualizacji rozwiązań sprzętowych i programowych, dają gwarancję możliwości implementacji nowych rozwiązań w dłuższej perspektywie czasu eksploatacji urządzeń.

Współpraca z Instytutem Energetyki w Warszawie daje możliwość opracowania nowych algorytmów i unowocześnianie zabezpieczeń. Pomimo krótkiej historii istnienia na rynku, urządzenia rodziny iZAZ są coraz częściej stosowane w układach automatyki zabezpieczeniowej. Pierwsze pracują z powodzeniem od 2012 r. Mamy nadzieję, że kolejne instalacje zwiększą naszą wiarygodność. Zachęcamy do zapoznania się ze szczegółami oferty firmy ZAZ-En.

LITERATURA

- [1] Wróblewska S., Szwiecer W., Dytry H.: Aktualizacja algorytmów funkcji zabezpieczeniowych bloku generator-transformator blokowy – transformator odczepowy
- [2] Zgłoszenie patentowe P401220 „Sposób i urządzenie do zabezpieczenia przed zwarcem doziemnym, synchronicznego generatora wielkiej mocy zwłaszcza synchronicznego generatora wielkiej mocy bloku zasilającego sieć elektroenergetyczną”
- [3] Funkcje konfiguracji iZAZ
- [4] Dokumentacja techniczno-ruchowa iZAZ100, iZAZ200, iZAZ300, iZAZ400, iZAZ600
- [5] Instrukcja obsługi iZAZ Tools
- [6] Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 2004
- [7] Szwiecer W.: Wybrane zagadnienia związane z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi obwodów dolnego napięcia bloku generator-transformator. *Automatyka Elektroenergetyczna* 2008 nr 4
- [8] Siemens: Multifunctional Machine Protection 7UM62 Manual (V4.6), 2003
- [9] ABB: Generator protection REG670 Technical reference manual, 2012



ZAZ-En Sp. z o.o.

ul. Grota Roweckiego 32

43-100 Tychy

tel. 32 726 69 23, faks 32 494 48 85

e-mail: biuro@zaz-en.pl

<http://zaz-en.pl>