

Nowe rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego, obejmującego 100% uzwojeń stojana generatora iZAZ-INJ produkcji ZAZ-En Sp. z o.o.

Zygmunt Kuran, Michał Krzęcio, Marian Duży

1. Wprowadzenie

Jednym z najczęściej występujących zakłóceń w obwodach stojana generatora są zwarcia doziemne [5]. Większość jednostek wytwórczych w polskim systemie elektroenergetycznym jest wykonana z izolowanym punktem neutralnym, ze względu na dążenie do zminimalizowania prądów ziemnozwarciowych. Takie rozwiązania są wrażliwe na występowanie przepięć ferrozonansowych. Zakłócenia te negatywnie wpływają na pracę układu generatora i selektywność działania układu zabezpieczeń. Stąd coraz częściej stosuje się uziemienie punktu neutralnego generatora przez rezystancję ograniczającą wartość prądu ziemnozwarciowego (np. $R = 1000 \Omega$). Prąd zwarcia doziemnego w uzwojeniach stojana generatora zależy wtedy od pojemności doziemnej obwodów bloku, to znaczy: pojemności uzwojeń stojana generatora, uzwojenia dolnego napięcia transformatora blokowego, dodatkowych pojemności zainstalowanych na biegunach wyłącznika generatorowego i od zainstalowanego rezystora R.

Podstawowym zabezpieczeniem ziemnozwarciowym stojana generatora jest zabezpieczenie zerowonapięciowe (symbol ANSI: 59 N lub 59 GN). Jego kryterium bazuje na pomiarze składowej zerowej napięcia z przekładnika napięciowego w punkcie neutralnym generatora lub na jego zaciskach [5]. Jest to jedno z podstawowych zabezpieczeń zaimplementowanych w zespołach rodziny iZAZ [1].

W przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego w uzwojeniach stojana generatora składowa zerowa napięcia będzie tym większa, im dalej od punktu neutralnego wystąpi zwarcie. W przypadku zwarcia występującego na zaciskach generatora zmierzone w punkcie neutralnym lub na zaciskach maszyny napięcie zerowe ($3U_0$) 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 59 N powinno być jak najniższe, ponieważ pozwoli to zmniejszyć jego strefę nieczułości na zwarcia doziemne w pobliżu punktu neutralnego [4].

Zabezpieczenie 59 N powinno być tak nastawione, aby nie spowodować zadziałania podczas zwarć po stronie górnego napięcia transformatora. W czasie tego typu zakłóceń niewielka wartość składowej zerowej napięcia przenosi się przez

Streszczenie: W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego, obejmującego 100% uzwojeń stojana generatora oraz porównano jego zasadę działania z obecnie stosowanymi układami, bazującymi na wstrzykiwaniu sygnału pomiarowego w punkcie neutralnym generatora uziemionego przez rezystor.

Firma ZAZ-En, w ścisłej współpracy z dr. Zygmuntem Kuraniem, opracowała własne rozwiązanie zabezpieczenia stuprocentowego stojana, w oparciu o nowatorską, opisaną w artykule metodę. Prace zostały wykonane w ramach projektu pt. „Opracowanie, walidacja i wdrożenie do produkcji układu zabezpieczeń ziemnozwarciowych stojana i wirnika generatora, wykorzystującego metodę wstrzykiwania sygnału pomiarowego” w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego; Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014–2020, Działanie 1.2 Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach.

pojemności między uzwojeniami transformatora blokowego z jego strony górnego napięcia na stronę dolnego napięcia bloku. Wartość napięcia zerowego, która przeniesie się z obwodów górnego napięcia do obwodów dolnego napięcia bloku, zależy od pojemności doziemnej generatora, transformatora oraz od pojemności dodatkowych wyłącznika generatorowego i rezystora w zerze generatora. W zależności od stanu wyłącznika generatorowego poziom napięcia zerowego przeniesionego na stronę DN bloku będzie się zmieniał, ze względu na zmieniającą się pojemność układu. Wartość tego napięcia zerowego będzie niższa przy zamkniętym wyłączniku oraz większa, kiedy jest on otwarty (np. dla układu zasilania potrzeb własnych z systemu) [4]. W związku z powyższym zabezpieczenie ziemnozwarciowe zerowonapięciowe musi być odstrojone od spodziewanej maksymalnej wartości napięcia zerowego mierzonego po stronie DN bloku w czasie zwarcia doziemnego po stronie GN [4].

W przypadku jednostek wytwórczych średniej i dużej mocy, zwłaszcza tych z zastosowanym wodnym chłodzeniem uzwojeń stojana, wymagane jest zastosowanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego stojana, obejmującego 100% jego uzwojeń.

Doziemienie punktu neutralnego nie powoduje bezpośredniego zagrożenia dla układu, ale ze względu na możliwość pojawienia się drugiego doziemienia, które mogłoby być wielkopądowe i powodować duże uszkodzenia w obwodach stojana generatora, nie dopuszcza się do takiej pracy.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe 100% uzwojeń stojana realizowane jest obecnie na dwa sposoby. Pierwszy, popularny w polskim systemie elektroenergetycznym, stosowany dla układów z izolowanym punktem neutralnym, to wariant z zastosowaniem kryterium wykorzystującego pomiar trzeciej harmonicznej napięcia zerowego. Drugi wariant, stosowany dla generatorów pracujących z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym, polega na wprowadzeniu do układu dodatkowego sygnału o niższej częstotliwości [5]. Każdy z przedstawionych wariantów zabezpieczeń stanowi kompleksową ochronę uzwojeń stojana tylko wtedy, gdy występuje łącznie z klasycznym zabezpieczeniem zerowonapięciowym.

Idea działania zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% reagującego na trzecią harmoniczną napięcia zerowego została opisana w artykule [3].

Główną wadą takiego rozwiązania jest to, że nie działa przy wyłączonym generatorze, a znamionową czułość uzyskuje dopiero po obciążeniu generatora. Dodatkowo może być nieskuteczne przy stosowaniu dla generatorów pracujących z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

2. Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana wprowadzające do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci – rozwiązanie stare

Dążenie do eliminacji możliwości pojawienia się efektu ferorezonansu i stosowanie w związku z tym uziemienia punktu neutralnego generatora przez rezystor, a także uzyskanie kontroli obwodów niewzbudzonego generatora, wpływają na wzrost zainteresowania zabezpieczeniami opartymi o wstrzykiwanie pomocniczego sygnału pomiarowego.

Dlatego największe firmy zagraniczne obecne na światowych rynkach automatyki zabezpieczeniowej stosują zabezpieczenia ziemnozwarciowe 100% stojana oparte na wstrzykiwaniu sygnału pomiarowego w obwód zera generatora. Generator sygnału o obniżonej częstotliwości podaje napięcie pomiarowe poprzez filtr i transformator separujący, którym jest w praktyce przekładnik napięciowy podłączony równolegle do rezystora uziemniającego zero generatora. Układ musi być zatem przygotowany i odporny na wartość pełnego napięcia fazowego pojawiającego się przy doziemieniach w obwodach wyprowadzenia mocy.

Pomiar sygnału pomiarowego odbywa się poprzez separujący przekładnik prądowy, zainstalowany w punkcie neutralnym generatora. Zasadniczy koszt układu stanowi dodatkowa aparatura pierwotna, niezbędna do działania zabezpieczenia.

3. Nowe rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% firmy ZAZ-En

Firma ZAZ-En, kierując się względami ekonomicznymi, zrealizowała zabezpieczenie ziemnozwarciowe 100% stojana wykorzystujące sygnał o obniżonej częstotliwości, przy czym

jego innowacyjność polega na bezpośrednim wstrzykiwaniu sygnału pomiarowego w punkcie uziemienia generatora – bez konieczności zastosowania transformatora separującego i dodatkowego przekładnika prądowego. Rezystor uziemiający zero generatora w tym rozwiązaniu jest niezbędny. Rozwiązanie to jest szczególnie atrakcyjne dla średnich i mniejszych jednostek wytwórczych.

Zasadę działania zabezpieczenia 100% uzwojeń stojana generatora, wykorzystującego sygnał wstrzykiwany w uzwojenia, można porównać do działania zwykłego omomierza, przy czym istnieją pewne uwarunkowania komplikujące układ pomiarowy i algorytm zabezpieczenia.

Jednym z problemów metrologicznych są przekładniki napięciowe w układzie bloku generator – transformator, które nie powinny mieć wpływu na wynik pomiaru, dlatego ich parametry są uwzględnione w algorytmie pomiarowym. Innym potencjalnym problemem jest możliwość wystąpienia doziemienia w obwodach napięcia generatora, skutkującego przepływem maksymalnego prądu doziemnego wynikającego z oporu rezystora uziemniającego i napięcia fazowego generatora. Wartość prądu składowej podstawowej (50 Hz) jest wtedy na tyle duża, że uniemożliwia selektywny pomiar rezystancji sygnałem o obniżonej częstotliwości. W takim przypadku będzie działać podstawowe zabezpieczenie zerowonapięciowe lub zabezpieczenie nadprądowe, zaimplementowane w zabezpieczeniu ziemnozwarciowym. Istotną cechą rozwiązania jest to, że układ zabezpieczeniowy nie ulega w takim przypadku uszkodzeniu. Dokładność algorytmu pomiaru rezystancji jest niezależna od pojemności występującej w obwodach generatora i wyprowadzenia mocy.

4. Opis nowego rozwiązania zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana

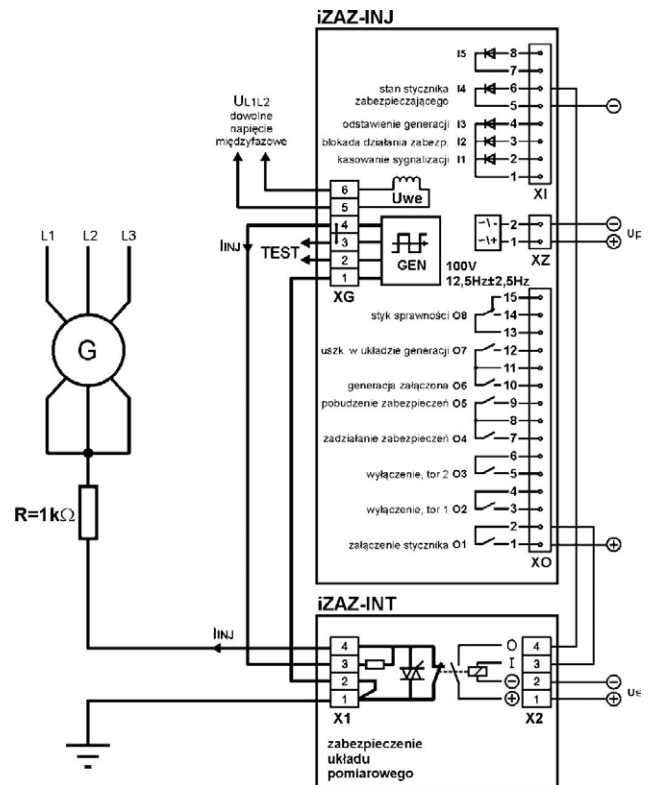
Nowe urządzenie zostało zaprojektowane pod nazwą iZAZ-INJ. Wraz z układem zabezpieczającym iZAZ-INT (rys. 1) stanowi autonomiczne zabezpieczenie ziemnozwarciowe, obejmujące 100% uzwojeń stojana generatora. Układ jest przeznaczony dla generatorów, które są połączone z siecią za pośrednictwem transformatora blokowego, natomiast ich punkt neutralny jest uziemiony poprzez rezystor.

Układ ten nie wymaga stosowania innych zespołów zabezpieczeń, może być uzupełnieniem istniejącego podstawowego systemu zabezpieczeń.

Pomiędzy rezystor uziemiający punkt neutralny generatora a potencjał ziemi, za pośrednictwem układu zabezpieczającego iZAZ-INT, jest włączany generator pomocniczego sygnału pomiarowego, umieszczony w zespole zabezpieczeń iZAZ-INJ (rys. 2). Sygnał pomiarowy jest przebiegiem prostokątnym o stałej amplitudzie ± 96 V i częstotliwości stanowiącej $\frac{1}{4}$ częstotliwości napięcia międzyfazowego. W zakresie częstotliwości od 40 do 60 Hz częstotliwość przebiegu pomiarowego jest modyfikowana nadążnie, zgodnie ze zmianami częstotliwości podstawowej, czyli zmienia się w zakresie od 10 do 15 Hz. W innych warunkach przebieg pomiarowy ma częstotliwość domyślną 12,5 Hz lub działanie generatora pomiarowego jest blokowane. Źródło sygnału pomiarowego ma małą impedancję, uzyskaną przez dołączenie dużych pojemności, dzięki czemu



Rys. 1. Zespół zabezpieczeń iZAZ-INJ wraz z układem iZAZ-INT



Rys. 2. Zasada działania nowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% uzwojeń stojana generatora [2]

duża wartość prądu o częstotliwości sieciowej, pojawiająca się przy zwarciach doziemnych powstających w pobliżu zacisków generatora, praktycznie nie zmienia wartości amplitudy sygnału oraz nie powoduje uszkodzenia zabezpieczenia. Układ iZAZ-INT jest z jednej strony zabezpieczeniem układu pomiarowego

reklama

reklama

przed ewentualnymi przepięciami, z drugiej zaś zapewnia połączenie z potencjałem ziemi rezystora uziemiającego punkt neutralny generatora w przypadku, gdy iZAZ-INJ jest wyłączony bądź występują zakłócenia w jego pracy. O częstotliwości sygnału pomiarowego decyduje układ sterujący w iZAZ-INJ. Częstotliwość ta jest modyfikowana zgodnie z aktualną wartością częstotliwości podstawowej, co ma zapewnić poprawną pracę układu pomiarowo-filtrującego, którego zadaniem jest pomiar prądu stałego IINJ, odrębnie dla każdego spolaryzowania napięciem (+U i -U), oraz tłumienie: składowej przejściowej prądu ładowania pojemności doziemnych generatora, prądu o częstotliwości sieciowej i prądu trzeciej harmonicznej.

W stanie normalnym prąd ten jest bardzo mały i zależy od pojemności doziemnej układu oraz od dużej, w stanie normalnym, rezystancji izolacji stojana. Jeśli wartość rezystancji izolacji stojana obniży się lub jeśli pojawi się zwarcie doziemne, prąd odpowiednio wzrośnie. Zmiana natężenia prądu IINJ zależy od rezystancji izolacji uzwojeń stojana generatora i jest wykorzystana jako kryterium działania zabezpieczenia. Pomiar rezystancji doziemnej uzwojenia stojana generatora jest realizowany w zespole iZAZ-INJ na podstawie pomiaru składowej stałej prądu przy różnych polaryzacjach rezystora napięciem stałym. Odfiltrowane składowe prądu, zarówno ta o częstotliwości podstawowej, jak i trzecia harmoniczna, są wykorzystywane do realizacji dodatkowych zabezpieczeń oraz określenia trybu pracy generatora sygnału pomiarowego.

Zespół iZAZ-INJ do prawidłowej pracy wymaga doprowadzenia pomocniczego napięcia zasilającego 220 V DC lub 230 V AC. Napięcie to jest źródłem zasilania części kontrolno-pomiarowej zespołu oraz układu zasilaczy, wykorzystywanych przy generowaniu pomocniczego sygnału pomiarowego.

Dodatkowym napięciem doprowadzonym do zespołu jest napięcie sterowania wejść dwustanowych (220 V DC). Informacje doprowadzone do wejść dwustanowych układu są wykorzystywane przez część kontrolno-pomiarową, umożliwiając kasowanie sygnalizacji, zewnętrzne blokowanie generacji sygnału pomiarowego, a także określają stan stycznika w układzie iZAZ-INT. Stycznik ten uziemia stykiem biernym rezystor, gdy nie ma zasilania pomocniczego lub gdy układ jest uszkodzony.

Podstawowym członem zabezpieczeniowym urządzenia iZAZ-INJ jest dwustopniowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana $R <$ z kontrolą ciągłości obwodu wstrzykiwania.

Zabezpieczenie to wylicza rezystancję doziemną obwodów stojana generatora na podstawie pomiaru składowej stałej pomocniczego prądu pomiarowego o częstotliwości podharmonicznej wstrzykiwanego pomiędzy rezystor uziemiający punkt neutralny generatora a potencjał ziemi.

Urządzenie to posiada dodatkowe dwie funkcje zabezpieczeniowe:

- $I_{o3h} <$ ziemnozwarciowe podprądowe, bazujące na pomiarze prądu $3h$, przepływającego w układzie pomiarowym w normalnym trybie pracy wzbudzonego generatora. W przypadku obniżenia wartości prądu trzeciej harmonicznej poniżej nastawionej wartości następuje pobudzenie zabezpieczenia, a po nastawionym czasie zadziałanie. Funkcja ta może być stosowana jako rezerwowe kryterium, z ustawieniem

opcjonalnym tylko sygnalizacji bądź wyłączenia. Kryterium to może być wykorzystywane tylko przy wzbudzonym generatorze, stąd funkcja jest aktywowana przy obecności napięcia międzyfazowego doprowadzonego do wejścia pomiarowego Uwe;

- $3I_{o} >$ nadprądowe, kontrolujące składową podstawową prądu ziemnozwarciowego, której wartość, w przypadku wystąpienia doziemienia w układzie wyprowadzenia mocy generatora, zależy od poziomu napięcia zerowego i wartości rezystora uziemiającego.

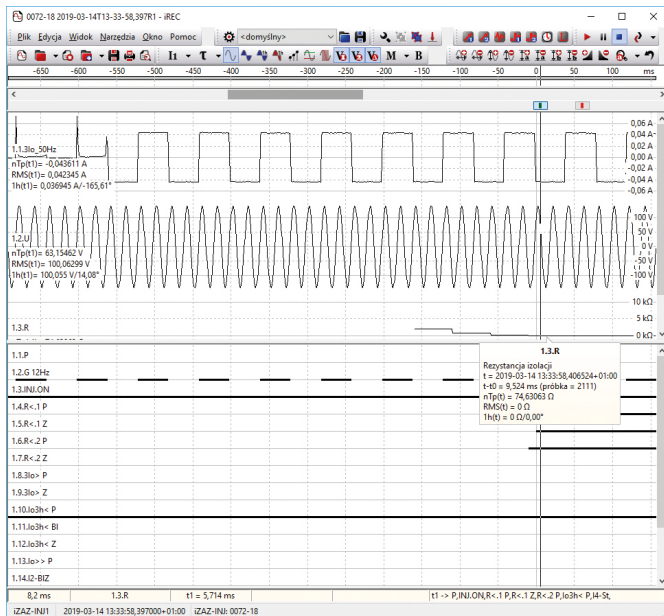
Zespół zabezpieczeń iZAZ-INJ [2] jest wyposażony w trzy różne rejestratory, umożliwiające przeprowadzenie analizy działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych:

- rejestrator zdarzeń – podstawowy rejestrator stanów, zapisywanych w chronologicznym dzienniku zdarzeń z rozdzielczością 1 ms. Bufor okrężny rejestratora ma pamięć o pojemności 500 zdarzeń. Rejestrowane są pobudzenia, odzwbudzenia oraz zadziałania zabezpieczeń, a także zmiany stanów wejść binarnych oraz inne zdarzenia generowane z wewnętrznej logiki;
- rejestrator zadziałań – umożliwia analizę ilościową zakłóceń. Oprócz czasu wystąpienia zakłócenia, rejestrator ten zawiera informacje o granicznych parametrach sygnałów, jakie zostały zmierzone od momentu wystąpienia pobudzenia do odzwbudzenia funkcji, po jej zadziałaniu. Typy i ilość rejestrowanych danych zależą od charakteru funkcji, np. dla zabezpieczenia $R <$ są to czas trwania zakłócenia oraz minimalna wartość zmierzonej rezystancji w tym czasie. Rejestrator zadziałań umożliwia szybką ocenę zjawiska, udostępniając informację o wielkościach kryterialnych, które towarzyszyły zakłóceniu. Daje to również możliwość weryfikacji nastawień. Wewnętrzny bufor okrężny umożliwia zapamiętanie 32 zapisów;
- rejestrator zakłóceń – zestaw rejestratorów przebiegów analogowych i dwustanowych, z funkcją rejestratora kryterialnego, umożliwiającą pełną analizę zjawisk zakłóceń.

Standardowe ustawienia czasu przedbiegu, wybiegu oraz maksymalnego czasu rejestracji umożliwiają odpowiednie ukształtowanie okna zapisu interesującego nas zjawiska. W buforze okrężnym dostępne są maksymalnie 64 rejestracje, przy maksymalnym czasie pojedynczej rejestracji 200 s.

Urządzenie wyposażone jest w kolorowy wyświetlacz graficzny o wielkości 3,2", pozwalający na prezentację podstawowych informacji o stanie pracy zespołu. Dostępne są bieżące pomiary prądów i rezystancji, stany wejść dwustanowych, trybu pracy oraz informacje o pobudzeniach i zadziałaniach poszczególnych funkcji zabezpieczeniowych. Na panelu operatora znajduje się również 5 diod sygnalizujących stan pracy zabezpieczeń i układu wstrzykiwania.

Dostępna jest również komunikacja z komputerem PC lub systemem nadrzędnym poprzez interfejs RS485 lub port LAN (światłowodowy) oraz poprzez standardowe gniazdo USB na płycie czołowej. Urządzenie jest w pełni obsługiwane przez aplikację iZAZ Tools dedykowaną do obsługi wszystkich urządzeń rodziny iZAZ, produkowanych przez ZAZ-En.



Rys. 3. Przykładowy przebieg dla zwarcia 80Ω przy wartości rozruchowej 100Ω dla badań modelu generatora

W przypadku zastosowania kompleksowych zabezpieczeń generatora lub bloku generator – transformator z serii iZAZ (np. iZAZ400 lub iZAZ600) istnieje możliwość wykorzystania dedykowanego łącza światłowodowego, za pomocą którego przekazywane będą bieżące pomiary chwilowe iZAZ-INJ. Takie łącze umożliwi prezentację wyników w głównych jednostkach zabezpieczeniowych – pomiar rezystancji będzie dostępny w zespołach iZAZ400 lub iZAZ600. Dane są przekazywane online, co umożliwi realizację algorytmu zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana również w zespole iZAZ400 lub iZAZ600.

5. Podsumowanie

Nowa propozycja układu zabezpieczeń ziemnozwarciowych stojana generatora produkcji firmy ZAZ-En ma na celu zwiększenie konkurencyjności na rynku, a przede wszystkim umożliwienie zastosowania tego jakże potrzebnego zabezpieczenia, również dla mniejszych bloków generator – transformator, dla których budżety przeznaczone na automatykę zabezpieczeniową są znacznie mniejsze niż dla dużych jednostek wytwórczych.

Zastosowanie układu zabezpieczeń iZAZ-INJ wraz z układem iZAZ-INT nie wymaga stosowania transformatora separującego, przekładnika prądowego w zerze generatora ani filtru LC.

Układ ten stanowi kompletne zabezpieczenie ziemnozwarciowe, nie wymaga stosowania dodatkowego urządzenia – zabezpieczenia, w którym realizowane jest kryterium pomiarowe, jak to ma miejsce w przypadku rozwiązań innych producentów. Pozwala to na realizację zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana przy stosunkowo niedużych nakładach finansowych, dając również możliwość uzupełnienia istniejących układów, bez konieczności ingerowania w istniejący system zabezpieczeń.

Dotychczas stosowane rozwiązania firm konkurencyjnych są narażone na zakłócenia w obwodach pomiarowych, wynikające z udziału pojemności w obwodach stojana, a także z konieczności stosowania przekładnika prądowego, który przy niskich wartościach prądowego sygnału pomiarowego o obniżonej częstotliwości pracował w niekorzystnej nieliniowej części charakterystyki magnesowania przekładnika. Ma to bezpośredni wpływ na dokładność działania zabezpieczenia i ewentualną selektywność działania. Stosowanie jako sygnału pomiarowego przebiegu o sztywnej częstotliwości (np. 20 Hz, bo filtrów analogowych nie można automatycznie dostrajać) powoduje pojawienie się trudności z wyeliminowaniem wpływu prądu doziemnego nawet w przypadku drobnej odchyłki jego częstotliwości od wartości 50 Hz.

Natomiast urządzenie iZAZ-INJ adaptuje częstotliwość wstrzykiwanego sygnału pomiarowego tak, żeby utrzymać stałą wartość stosunku częstotliwości generatora do mierzonej częstotliwości sygnału napięciowego. Zapewnia to minimalizację wpływu składowej podstawowej na cyfrowe algorytmy filtracji sygnałów kryterialnych estymowanej wartości rezystancji.

Istotną zaletą nowego rozwiązania jest zastosowanie dodatkowego kryterium zabezpieczenia, bazującego na funkcji podprądowej składowej 3h oraz typowej funkcji nadprądowej składowej podstawowej. Dodatkowe funkcje mogą stanowić naturalne uzupełnienie funkcjonalne zabezpieczenia ziemnozwarciowego.

Urządzenie iZAZ-INJ wraz z układem zabezpieczającym iZAZ-INT pozytywnie przeszło badania na kompatybilność elektromagnetyczną EMC oraz badania funkcjonalne w Instytucie Energetyki w Warszawie, zakończone wydaniem certyfikatu do zastosowań w energetyce.

Nowe rozwiązanie układu zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana oparte o urządzenie iZAZ-INJ będzie dostępne w czwartym kwartale 2019 roku.

Literatura

- [1] WRÓBLEWSKA S., SZWEICER W., DYTRY H.: *Aktualizacja algorytmów funkcji zabezpieczeniowych bloku generator – transformator blokowy – transformator odzsepowy.*
- [2] ZAZ-En: Karta katalogowa iZAZ-INJ, 2019.
- [3] KURAN Z., LIZER M., KRZĘCIO M.: *Możliwości konfiguracyjne urządzeń rodziny iZAZ: rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana generatora.* „Automatyka Elektroenergetyczna” 9/2014.
- [4] SZWEICER W.: *Wybrane zagadnienia związane z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi obwodów dolnego napięcia bloku generator – transformator.* „Automatyka Elektroenergetyczna” 4/2008.
- [5] WINKLER W., WISZNIEWSKI A.: *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych.* WNT, Warszawa 2004.

dr inż. Zygmunt Kuran

mgr inż. Michał Krzęcio – ZAZ-En Sp. z o.o.

mgr inż. Marian Duży – ZAZ-En Sp. z o.o.