

dr inż. Zygmunt Kuran      Instytut Energetyki w Warszawie  
mgr inż. Michał Krzęcio    ZAZ-En sp. z o.o.

## **BADANIE NOWEGO ROZWIĄZANIA ZABEZPIECZENIA ZIEMNOZWARCIOWEGO OBEJMUJĄCEGO 100% UZWOJEŃ STOJANA GENERATORA**

### **Streszczenie**

W referacie przedstawiono koncepcję nowego rozwiązania zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% uzwojeń stojana generatora oraz porównano jego zasadę działania z obecnie stosowanymi układami, bazującymi na wstrzykiwaniu sygnału pomiarowego w punkcie zerowym generatora, uziemionego przez rezystor.

Firma ZAZ-En, w ścisłej współpracy z dr. Zygmuntem Kuranem z Instytutu Energetyki w Warszawie, rozpoczęła prace nad własnym rozwiązaniem zabezpieczenia stuprocentowego stojana, wykorzystującym opisaną poniżej metodę.

### **1. Wprowadzenie**

Zwarcia doziemne w obwodach stojana generatora są jednym z typów zakłóceń najczęściej występujących w pracy bloków wytwórczych [5].

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 ferorezonansowe. Dlatego układ jest często uziemiany przez znaczną impedancję (np.  $R=1000 \Omega$ ). Ogranicza to prądy zwarcia doziemnego w uzwojeniach stojana generatora do bardzo małych wartości, zależnych również od pojemności doziemnej obwodów bloku, w szczególności: pojemności uzwojeń stojana generatora, uzwojenia dolnego napięcia transformatora blokowego i pojemności dodatkowych, zainstalowanych na biegunach wyłącznika generatorowego.

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 [5]. Jest to jedno z podstawowych zabezpieczeń zaimplementowanych w zespołach rodziny iZAZ [1].

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 zeru. 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 [4].

Zabezpieczenie 59N nie może działać podczas zwarcia po stronie górnego napięcia transformatora blokowego (w sieci, na którą 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. 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) [4]. W związku z powyższym, zabezpieczenie 59N musi być odstrojone od spodziewanego maksymalnego napięcia zerowego mierzonego po stronie DN bloku w czasie zwarcia doziemnego po stronie GN [4].

W przypadku jednostek wytwórczych większej mocy, zwłaszcza tych z wodnym chłodzeniem uzwojeń, wymagane jest zapewnienie zabezpieczenia ziemnozwarciowego stojana obejmującego 100% jego uzwojeń. Doziemienie punktu neutralnego 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 100% uzwojeń stojana realizowane jest obecnie, jako uzupełnienie zabezpieczenia 59N, na dwa sposoby: poprzez zastosowanie dodatkowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego stojana reagującego na trzecią harmoniczną napięcia lub przez użycie zabezpieczenia, wprowadzającego do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci [5]. Powyższe zabezpieczenia stanowią ochronę 100% uzwojeń stojana, tylko wtedy, gdy występują łącznie z zabezpieczeniem 59N, same są zbyt wolne lub mają swoje własne strefy nieczułości.

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

Główną wadą takiego rozwiązania jest to, że zabezpieczenie pracuje dopiero po wzbudzeniu generatora, a znamionową czułość uzyskuje dopiero po obciążeniu generatora. Dodatkowo zabezpieczenie wykorzystujące trzecią harmoniczną traci swoją czułość jeśli punkt neutralny generatora jest uziemiony przez rezystor, a takie uziemienie eliminuje możliwość powstawania ferorezonansów z przekładnikami napięciowymi. W związku z tym daje się zauważyć wzrost zainteresowania nowymi zabezpieczeniami, opartymi o wstrzykiwanie sygnału pomiarowego, które powyższych wad nie posiadają.

## **2. Zabezpieczenie ziemnozwarciowe stojana wprowadzającego do układu dodatkowy sygnał o częstotliwości niższej od częstotliwości sieci**

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

1. pomiędzy napięcia fazowe generatora a ziemię podłączone są przekładniki napięciowe, które nie powinny mieć wpływu na wynik pomiaru,
2. w punkcie zerowym generatora, gdzie najłatwiej przyłączyć jest urządzenie pomiarowe, w normalnych warunkach występuje napięcie bliskie zeru, ale w czasie zwarcia jednej z faz do ziemi pojawi się w tym punkcie napięcie fazowe generatora - układ zabezpieczeniowy nie powinien w tym momencie ulec uszkodzeniu,
3. pojemności doziemna generatora i transformatora blokowego nie powinny mieć wpływu na pomiar rezystancji doziemnej.

Pierwsze z uwarunkowań powoduje, że nie można wykonać omawianego zabezpieczenia bazując na prądzie stałym, gdyż wtedy zostanie zmierzona rezystancja przekładników napięciowych, a ponadto „popsujemy” charakterystyki przekładników.

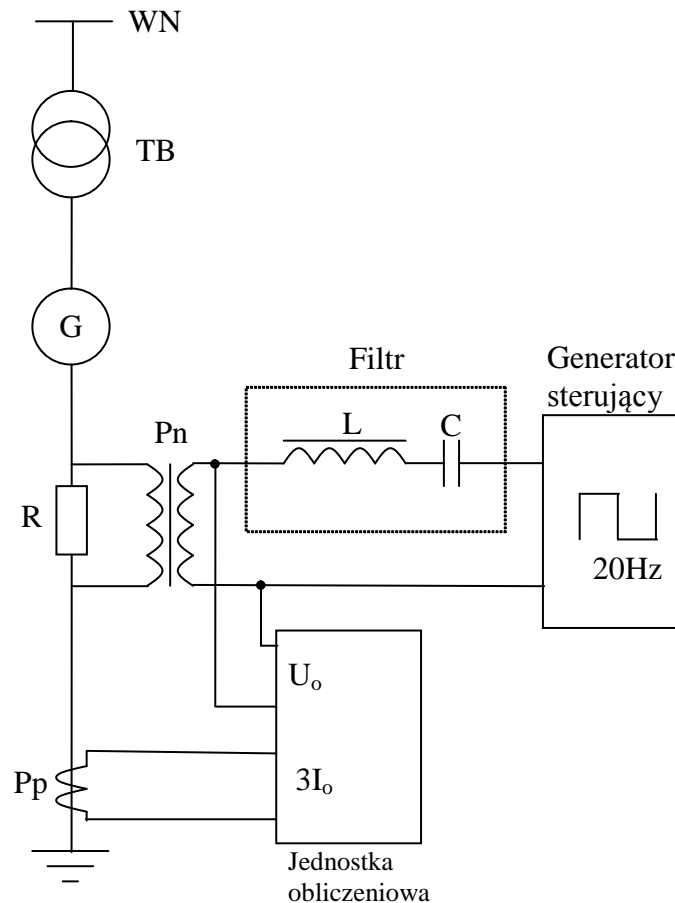
Drugie uwarunkowanie powoduje, że jeżeli dołączymy nasz układ pomiarowy równolegle do rezystora uziemiającego zero generatora, to układ ten musi wytrzymać całe napięcie fazowe pojawiające się przy doziemieniach. Natomiast jeśli nasz układ włączymy szeregowo z rezystorem uziemiającym, to musi być on przygotowany na przepływ całego prądu płynącego przez rezystor przy doziemieniu generatora.

Trzecie uwarunkowanie powoduje, że trzeba stosować wyszukane algorytmy zabezpieczeniowe, dla sinusoidalnych przebiegów pomiarowych trzeba wyliczać rezystancje z płaszczyzny impedancyjnej, natomiast dla przebiegów pomiarowych prostokątnych można stosować algorytmy oparte na pomiarze prądu w wybranych okresach czasu.

## **3. Opis układu znanego zabezpieczenia [6], [7].**

Typowy schemat układu kontroli rezystancji izolacji stojana generatora przedstawiono na rys 1. Punkt zerowy generatora  $G$  jest uziemiony przez rezystor  $R$ . Równolegle do rezystora  $R$  dołączony jest przekładnik napięciowy  $P_n$  o przekładni  $Un/\sqrt{3} \times 500V$ , przy czym do rezystora  $R$  dołączona jest strona wysokiego napięcia przekładnika, a do strony niskiego napięcia przekładnika, poprzez szeregowy filtr  $LC$  dostrojony do częstotliwości 20 Hz, dołączony jest generator sterujący przebiegu prostokątnego o częstotliwości 20 Hz. Filtr powoduje, że prąd 20 Hz ma kształt sinusoidalny. Napięcie generatora sterującego dobrane jest tak, aby wartość napięcia 20 Hz na rezystorze  $R$  nie przekraczała 1 % napięcia zabezpieczanego generatora  $G$ . Informacja o tym napięciu doprowadzona jest do jednostki obliczeniowej.

Prąd o częstotliwości 20 Hz w czasie pracy zabezpieczenia przepływa przez rezystor  $R$ , a dzięki napięciu odkładającemu się na nim, również przez pojemności doziemne generatora  $G$  i połączone z nim pojemności doziemne uzwojeń transformatora. Jeśli pojawi się zwarcie doziemne, to także przez rezystancję doziemną. Przekładnik prądowy  $Pp$  włączony jest tak, aby do jednostki obliczeniowej docierała informacja o prądzie pojemnościowym i prądzie przepływającym przez rezystancję zwarcia doziemnego, prądu rezystora  $R$  nie uwzględniamy w obliczeniach. Jednostka obliczeniowa nieustannie analizuje wartości wektorowe otrzymanego prądu i napięcia 20 Hz i na tej podstawie wylicza rezystancję doziemną.



Rys. 1. Zasada działania znanego zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% uzwojeń stojana generatora

W czasie zwarcia doziemnego generatora  $G$  na rezystorze  $R$  może pojawić się napięcie fazowe generatora  $G$ . W tym przypadku tylko filtr  $RC$  chroni generator sterujący przed przepływem dużego prądu 50 Hz. Napięcie 50 Hz pojawia się na rezystorze  $R$  również w czasie zwarcia doziemnych w sieci za transformatorem blokowym. Dlatego jednostka obliczeniowa musi odfiltrowywać przebiegi 50 Hz od przebiegów sygnału pomiarowego 20 Hz. Przebiegi prądowe i napięciowe 20 Hz mają charakter tylko sygnałów pomiarowych i dlatego przekładnik napięciowy  $Pn$  i przekładnik prądowy  $Pp$  mierzą poprawnie napięcie  $U_o$  i prąd  $3I_o$ . Jeśli przekładnik napięciowy zamienimy na transformator napięciowy, to rezystor uziemiający  $R$  można przenieść na stronę niskiego napięcia transformatora, oczywiście po odpowiednim przeliczeniu jego rezystancji. Nie wpływa to na zasadę działania całego układu.

### Podstawowe problemy metody:

1. Sposób wprowadzenia sygnału równoległe do rezystora uziemiającego powoduje, że dla rezystancji izolacji większych niż rezystancja rezystora  $R$ , prąd pomiarowy szybko maleje, zmniejszając radykalnie dokładność metody. Dla rezystancji izolacji o wartości powyżej dziesięciokrotnej wartości rezystancji uziemienia dokładne wyznaczenie rezystancji izolacji staje się niemożliwe. Można jedynie stwierdzić iż rezystancja ta jest większa niż w/w wartość.

2. Wraz ze wzrostem pojemności doziemnej bloku generator/transformatorem wzrasta udział prądu pojemnościowego w prądzie pomiarowym, a tym samym jego wpływ na wynik wyliczeń szczególnie dla większych wartości rezystancji doziemnej. Błąd można niwelować dokładniejszym dostrojeniem układu (np. co do wartości uwzględnianej impedancji źródła, parametrów przekładników napięciowych i prądowych, rezystancji doprowadzeń sygnałów, temperatury otoczenia itd.), ale przy wielości parametrów wpływających staje się to dość uciążliwe.
3. Bardzo mały sygnał pomiarowy prądu (rzędu mA) mierzony poprzez przekładnik prądowy. W związku z koniecznością stosowania przekładników dużej mocy dla prądów pomiarowych rzędu kilka miliamper przekładnik prądowy pracuje na silnie nieliniowej części charakterystyki magnesowania. Prowadzi to do znacznych błędów wyliczania wartości rezystancji. Kształt charakterystyki można korygować, ale jest to żmudne i wymaga stosowania wyszukanych metod. Dodatkowo na punkt pracy przekładnika wpływają inne czynniki takie jak pojemność sieci, prąd doziemny 50Hz czy długość połączeń pomiędzy urządzeniem mierzącym a przekładnikiem. Powoduje to konieczność dokładnego strojenia układu w miejscu zainstalowania.
4. Stosowanie jako sygnału pomiarowego przebiegu o sztywnej częstotliwości 20Hz powoduje pojawienie się trudności z wyeliminowaniem wpływu prądu doziemnego 50Hz w przypadku jego nawet drobnej odchyłki od wartości 50Hz. Dokładniejsze wyeliminowanie wymaga znacznego wydłużenia czasu okna pomiarowego obliczeń.

#### **Dodatkowe cechy aplikacji.**

Sposób wprowadzenia sygnału pomiarowego z jednej strony minimalizuje wpływ układu pomiarowego na sposób uziemienia punktu gwiazdowego z drugiej strony powoduje konieczność stosowania wysokonapięciowego transformatora (Pn) i przekładnika prądowego dużej mocy (Pp) co wyraźnie podnosi koszty aplikacji.

#### **4. Opis nowego układu zabezpieczenia**

Pomysłodawcą nowego rozwiązania zabezpieczenia 100% jest dr Zygmunt Kuran z Instytutu Energetyki.. Sposób działania algorytmu został opracowany przez Instytut Energetyki w Warszawie jako zgłoszenie patentowe P401220 [2].

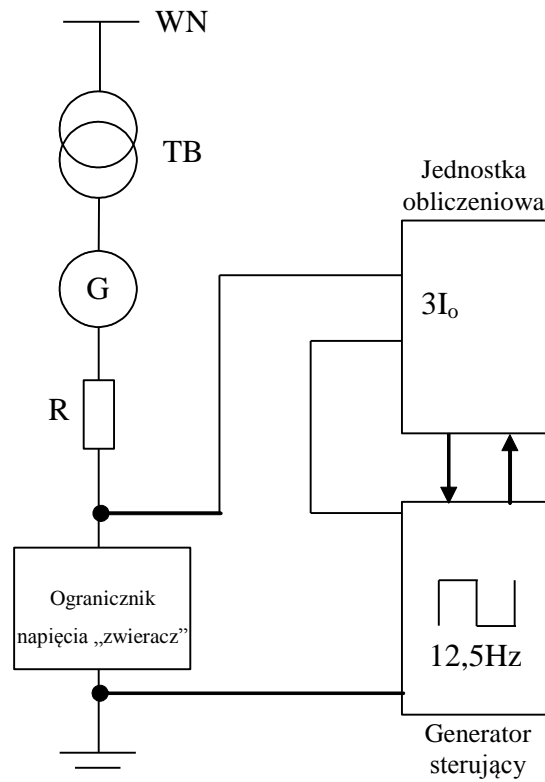
Celem pracy jest stworzenie algorytmu o zwiększonej dokładności pomiaru rezystancji doziemnej oraz zwiększonej odporności na niekontrolowane wzrosty napięć występujących w stanie zwarć doziemnych.

Ideą pomysłu jest wstrzykiwanie naprzemiennie sygnału o napięciu dodatnim i ujemnym, z częstotliwością synchronizowaną z siecią w zakresie od 10Hz do 15Hz, dostosowaną do bieżącej częstotliwości mierzonego sygnału  $3U_0$  jako czwarta subharmoniczna sygnału odniesienia.

Zasada działania nowego rozwiązania zabezpieczenia 100% przedstawiona jest na rys.2. Podstawowa różnica, w stosunku do wcześniej opisanego rozwiązania, polega na tym, że w układzie pomiarowym nie występuje filtr LC, a rezystor R dołączony jest do potencjału ziemi poprzez generator sterujący przebiegu prostokątnego 12,5 Hz.

Generator nie ma filtra, który by go osłaniał przed możliwym wysokim napięciem zwarcia doziemnego, taką osłonę stanowi rezystor R, który ogranicza prąd. Rozwiązanie to nie wykorzystuje również przekładnika napięciowego Pn, bo generator sterujący został zbudowany na częstotliwość 12,5 Hz, z którą taktują dwa silne klucze IGBT, przełączając wyjście generatora pomiędzy dwoma zasilaczami o napięciu plus i minus 100 V. Zasilacze zaopatrzone zostały w dodatkowe duże pojemności wyjściowe. Dzięki temu prąd zwarcia 50 Hz w równym stopniu rozładowuje i doładowuje te kondensatory nie powodując wahania napięcia 100 V. Nie przypadkowo wybrano częstotliwość 12,5 Hz, aby ten opisany mechanizm funkcjonował poprawnie. Dla bezpieczeństwa, równolegle do generatora sterującego, włączono zwieracz tyrystorowy, który w każdych warunkach, np. uszkodzenie generatora sterującego, zapewni, że w miejscu dołączenia rezystora do ziemi nie pojawi się napięcie wyższe od 200 V. W związku z powyższym, jeśli rozpatrywać usytuowanie generatora sterującego w stosunku do rezystora R, można to rozwiązanie nazwać „szeregowym” w odróżnieniu do rozwiązania poprzedniego, które można nazwać „równoległym”.

Podstawą obliczania rezystancji zwarcia doziemnego generatora G jest tylko prąd mierzony przez przekładnik prądowy Pp. Brak filtra LC powoduje, że wymuszony przebieg prądu 12,5 Hz nie ma kształtu sinusoidy i jest raczej zbliżony do prostokąta. Jednostkę obliczeniową zdecydowano się połączyć z generatorem sterującym i usytuować w pomieszczeniu wyprowadzenia zera generatora G. Uzyskuje się dużo korzyści - łatwo można wymieniać informacje pomiędzy tymi jednostkami, a ze względu na małe odległości maleją uchyby przekładnika prądowego Pp.



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

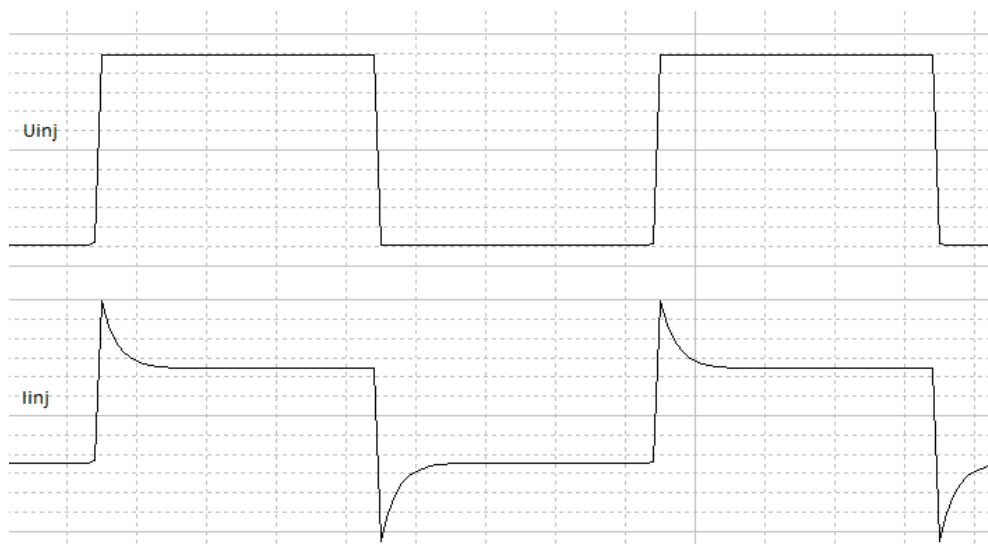
Algorytmy obliczeniowe sprowadzają się do analizy wartości prądu przekładnika Pp w czasie. Potrzebna jest tylko eliminacja częstotliwości innych niż 12,5 Hz. Nie trzeba nawet uwzględniać wartości napięcia generatora sterującego, bo jest ono praktycznie stałe, nawet w czasie zwarcia doziemnego w generatorze G. W literaturze [5] [4] wspomina się o możliwości powstania ferorezonansów na przekładnikach napięciowych i konieczności okresowego przełączania generatora sterującego na inną częstotliwość, jednak z naszych obserwacji wynika, że taka sytuacja jest możliwa w generatorach izolowanych od ziemi, natomiast rezystor uziemiający zero generatora wyklucza taką możliwość.

Opisane dwa rozwiązania zabezpieczenia 100% uzwojenia stojana generatora zabezpieczą uzwojenie generatora i transformatora blokowego w stu procentach tylko wtedy, gdy generator jest nie wzbudzony. Natomiast przy zwarcu na zaciskach generatora wzbudzonego wzrost napięcia  $U_0$  i prądu  $I_0$  będzie tak jednoznaczny, że podstawowe zabezpieczenia ziemnozwarciowe zadziałają selektywnie.

Długi czas własny zabezpieczenia 100% w tym przypadku nie jest wadą, bo zwarcie doziemne w pobliżu zera generatora samo w sobie nie stanowi zagrożenia dla generatora, bardzo groźne jest natomiast drugie zwarcie.

Poniżej przedstawiono kształt napięcia  $U_{inj}$  i prądu  $I_{inj}$  wstrzykiwanego przy wykonywanych testach dla rezystancji zwarcia  $1k\Omega$ . Pojemność w układzie  $1\mu F$ .





Rys. 3. Przebiegi sygnałów napięcia i prądu pomiarowego nowego zabezpieczenia.

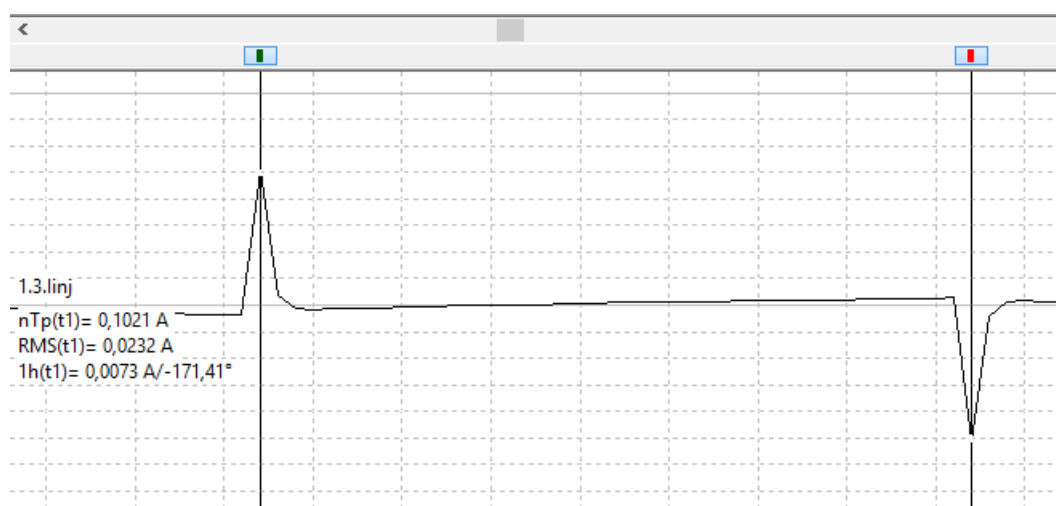
Jak widać na rys.3 przełączenie polaryzacji napięcia powoduje przeładowanie pojemności układu i ustabilizowanie wartości mierzonego prądu. Uwzględniając specyficzne właściwości algorytmu, uzyskano stabilny wynik pomiaru rezystancji, odporny na krótkotrwałe zakłócenia w układzie oraz na znaczną zawartości prądu składowej podstawowej oraz trzeciej harmonicznej.

### 5. Wstępne próby działania nowego układu zabezpieczenia 100% produkcji ZAZ-En

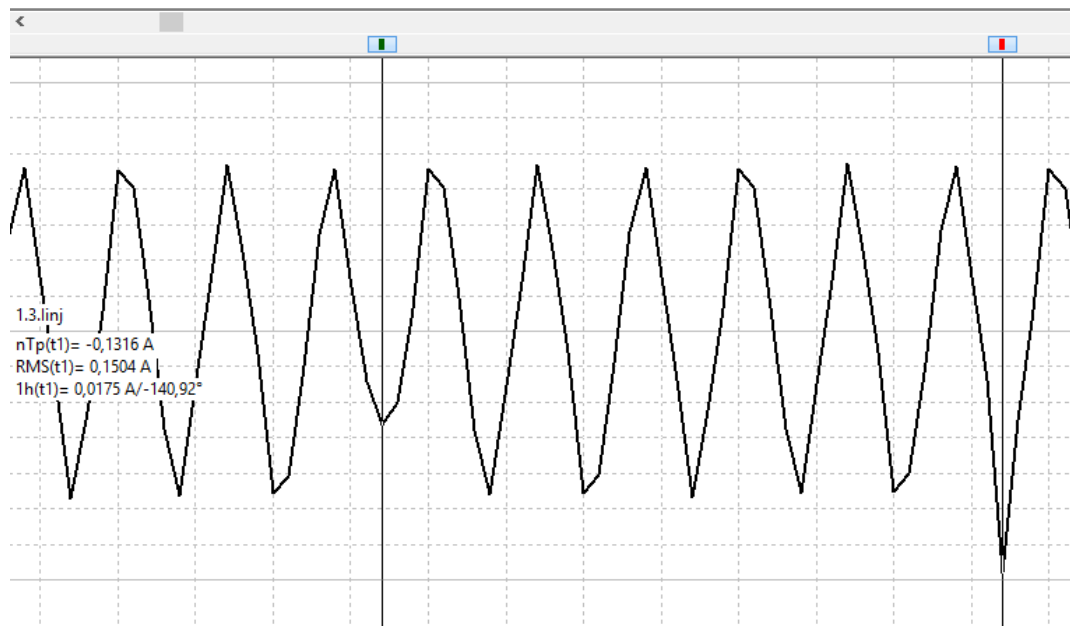
Wykorzystując metodę realizacji zabezpieczenia ziemnozwarciowego, przedstawioną w pkt.4 wykonano prototypowe urządzenie, zainstalowane wiosną 2015 r. w Elektrowni Kozienice. Jako układ pomiarowy został wykorzystany zespół iZAZ400. Rozpoczęto testy funkcjonalne w rzeczywistym układzie pracy zabezpieczenia. Dotychczasowe wyniki działania są pozytywne.

Poniżej przedstawiono przebieg prądu w układzie przy nie wzbudzonym generatorze.

Impulsy w sygnale prądowym odpowiadają przeładowaniu układu przy zmianie polaryzacji impulsu napięcia prostokątnego.



Przy wzbudzonym generatorze, w normalnym układzie pojawia się w prądzie mierzonym składowa prądu trzeciej harmonicznej, która zamyka się przez rezystor uziemiający. Mimo to, algorytm stabilnie wyznacza rezystancję mierzoną układu. Wskaźniki określają jeden półokres wstrzykiwanego sygnału pomiarowego (40ms). W miejscach tych można również zauważyć nałożone impulsy przeładowania sygnału pomiarowego.



W celu potwierdzenia poprawności działania zabezpieczenia w dłuższym okresie czasu oraz w różnych stanach pracy bloku konieczne jest kontynuowanie testów.

Warto dodać, że firma ZAZ-En uczestniczy w dostawie zabezpieczeń dla jednego z bloków w Elektrociepłowni EDF w Krakowie. Zainstalowane zostały tam zespoły iZAZ600, a jednym z realizowanych zabezpieczeń jest zabezpieczenie ziemnozwarciowe 100% stojana, wykonane w oparciu o tradycyjny układ wstrzykiwania, zgodnie z opisem w pkt.3. Algorytm pomiarowy zabezpieczenia jest realizowany w pełni przez moduły zespołu iZAZ600.

Uruchomienie bloku planowane jest na przełomie października / listopada br. Będzie to okazja do oceny sposobu pomiaru rezystancji doziemnej uzwojenia stojana w oparciu o wybraną metodę, a także, uwzględniając doświadczenia z pracy układu prototypowego, do bezpośredniego porównania tych metod.

Mamy nadzieję, że ewentualne pozytywne wyniki badań eksploatacyjnych układu prototypowego pozwolą na rozszerzenie oferty firmy ZAZ-En o zabezpieczenie 100% ziemnozwarciowe stojana generatora wykonane w oparciu o nową koncepcję i będzie to ciekawa alternatywa do rozwiązań obecnie dostępnych na rynku.



ZAZ-En sp. z o.o. , ul. Grota Roweckiego 32, 43-100 Tychy  
tel. +48 32 726 69 23, faks +48 32 494 48 85  
biuro@zaz-en.pl, <http://zaz-en.pl>

#### Literatura

- [1] S. Wróblewska, W. Szwiecer, H. Dytry: Aktualizacja algorytmów funkcji zabezpieczeniowych bloku generator-transformator blokowy – transformator odczepowy
- [2] Zgłoszenie patentowe P401220 „Sposób i urządzenie do zabezpieczenia przed zwarcim doziemnym, synchronicznego generatora wielkiej mocy zwłaszcza synchronicznego generatora wielkiej mocy bloku zasilającego sieć elektroenergetyczną”
- [3] Z. Kuran, M. Lizer, M. Krzęcio: Możliwości konfiguracyjne urządzeń rodziny iZAZ: rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego 100% stojana generatora, Automatyka Elektroenergetyczna, Nr 9/2014
- [4] W. Szwiecer: Wybrane zagadnienia związane z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi obwodów dolnego napięcia bloku generator-transformator, Automatyka Elektroenergetyczna, Nr 4/2008
- [5] W. Winkler, A. Wiszniewski: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2004
- [6] Siemens: Multifunctional Machine Protection 7UM62 Manual (V4.6), 2003
- [7] ABB: Generator protection REG670 Technical reference manual, 2012