

# ZABEZPIECZENIA RÓŻNICOWE W PRACACH ROZWOJOWYCH INSTYTUTU ENERGETYKI

## 2. Zabezpieczenia różnicowe transformatorów

- Zastosowanie techniki cyfrowej pozwoliło na wyeliminowanie przekładników wyrównawczych i uproszczenie schematu przyłączeniowego. Wszystkie przekładniki łączone są w gwiazdę i uziemiane w miejscu zainstalowania, a grupę połączeń transformatora nastawia się w zabezpieczeniu.
- Zabezpieczenie RRTC-1 stabilizowane jest prądem skrośnym i dodatkowo drugą i piątą harmoniczną. Stabilizowanie drugą i piątą harmoniczną oznacza, że nigdy nie występuje stan zablokowania zabezpieczenia, bez względu na wartość wymienionych harmonicznymi, zmianie ulega tylko czułość zabezpieczenia,
- W zabezpieczeniu RRTC-1 nie zastosowano funkcji porównywania prądów  $I_0$  w zerze transformatora i w przewodach fazowych uzwojeń WN, ponieważ takie zabezpieczenie nie reaguje na zwarcia zwojowe i tym samym nie poprawia właściwości zabezpieczenia różnicowego.
- Zabezpieczenie różnicowe RRTC-1 dla dużych wartości prądu staje się zabezpieczeniem nadprądowym, ale to w żadnym wypadku nie zastępuje zabezpieczeń nadprądowych znajdujących się najczęściej w sterowniku i będących rezerwą dla zabezpieczenia różnicowego. Z tego powodu w RRTC-1 nie ma żadnych dodatkowych prądowych zabezpieczeń zwarciovych, aby nie stwarzać pozornego zrealizowania zabezpieczenia rezerwowego.

### 2.2. Doświadczenia eksploatacyjne

W stosunku do zaprezentowanego rozwiązania zauważyliśmy jednak pewne dodatkowe potrzeby użytkowników:

- W warunkach zasilania elektrowni czasami występuje potrzeba zastosowania zabezpieczeń dla transformatorów czterouzwojeniowych.
- Zabezpieczenie różnicowe nie jest elementem będącym zaangażowanym w sterowanie obiektu, wystarczające jest przekazanie do systemu nadrzędnego stykowej informacji o jego zadziałaniu, jednak do nadzoru inżynierskiego bardzo wskazany jest dostęp do nastawień i zapisów rejestratorów. Ułatwia to analizę nietypowych zdarzeń. Dostęp do zabezpieczenia poprzez sieć ethernet jest koniecznością.
- Zabezpieczenia różnicowe instalowane są bardzo często na stacjach, w których nie ma rejestratorów zakłóceń, jak również nie ma nowoczesnych zabezpieczeń odległościowych zawierających takie rejestratory, wskazane jest zatem wyposażenie zabezpieczeń różnicowych w rejestratory zakłóceń,
- Ocena prawidłowości podłączenia obwodów prądowych na podstawie oscyloskopu wymaga pewnego przygotowania technicznego, znacznie łatwiej jest dokonać takiej oceny na podstawie wektoroskopu. Dlatego wyposażenie zabezpieczenia w wektoroskop jest zasadne
- W niektórych regionach kraju wykonano sprawnie działającą telemechanikę jeszcze przed pojawieniem się nowoczesnych zespołów zabezpieczająco sterujących. W takich sytuacjach można modernizować pole pozostawiając niezależne prądowe zabezpieczenie zwarciovych, oraz umieszczając funkcje zabezpieczeń przeciążeniowych i obsługi sygnalizacji przekaźników gazowo przepływowych w cyfrowym zabezpieczeniu różnicowym. Obniżamy wtedy koszty modernizacji przy zachowaniu prawidłowego rezerwowania zabezpieczeń zwarciovych z zachowaniem cyfrowego zapisu wszystkich zdarzeń.

- Przerwa w obwodach prądowych jest usterką prowadzącą do działania zabezpieczenia różnicowego w sytuacjach dużego obciążenia lub w czasie zwarć zewnętrznych, dlatego kontrola ciągłości obwodów prądowych jest wskazana.

### **2.3. Modernizacja zabezpieczenia**

Uwzględniając wszystkie opisane powyżej uwagi oraz uwzględniając dobre doświadczenia z eksploatacją zabezpieczeń RRTC-1 opracowano zabezpieczenie RRTC-2s/, RRTC-3s/ (cyfra po ukośniku oznacza liczbę uzwojeń transformatora). Literka s oznacza obudowę szafową. Zabezpieczenie RRTC-2 jest już produkowane od kilku lat, natomiast RRTC-3 jest dopiero wdrażane i ma zastąpić RRTC-1, Poniżej przedstawiamy elementy, o które rozbudowaliśmy zabezpieczenie RRTC-2 w stosunku do RRTC-1.

#### *Zabezpieczenia prądowe*

Dla zabezpieczenia prądowego od przeciążeń strony WN, SN1 i SN2 możliwe jest nastawienie wartości rozruchowej, czasu działania i czasu odpadu zabezpieczeń. Można również przez uaktywnienie blokady zabezpieczenia wyłączyć dane zabezpieczenie. W wersji programowej RRTC-2s/2B lub 3B występują trzy dodatkowe zabezpieczenia:

- Zabezpieczenie nadprądowe przełącznika zaczeń,
- zabezpieczenie ziemnozwarciowe transformatora,
- zabezpieczenie od asymetrii prądowej poszczególnych stron transformatora.

Wykrycie asymetrii prądowej (funkcja zaimplementowana w RRTC-3, w RRTC-2 opcja) tylko po jednej stronie transformatora interpretowane jest jako brak ciągłości obwodu prądowego. Zgłaszane jest wtedy uszkodzenie zabezpieczenia, sygnał wychodzi na styki Bs. Dodatkowo automatycznie przestawiany jest prąd rozruchowy zabezpieczenia różnicowego na 5 A lub 1 A, odpowiednio dla przekładników 5 A i 1 A. Dlatego przy jednostronnym i jednofazowym najeżdżaniu zabezpieczenia prądem należy blokować tą funkcję.

## Dodatkowe wyposażenie zabezpieczenia różnicowego

Nastawienia dotyczące zabezpieczeń nadprądowych od przeciążeń	
Prąd rozruchowy strony (It> str. WN)	0,2...50 A
Czas opóźnienia działania (It> str. WN)	0,1...60 s
Czas opóźnienia odpadu (It> str. WN)	0,1...60 s
Prąd rozruchowy strony (It> str. SN1)	0,5...50 A
Czas opóźnienia działania (It> str. SN1)	1...60 s
Czas opóźnienia odpadu (It> str. SN1)	1...60 s
Prąd rozruchowy strony (It> str. SN2)**	0,5...50 A
Czas opóźnienia działania (It> str. SN2)**	1...60 s
Czas opóźnienia odpadu (It> str. SN2)**	1...60 s
Nastawienia dotyczące zabezpieczenia blokady prądowej przełącznika zaczepów***	
Prąd rozruchowy strony (I> str. WN)	0,2...50 A
Czas opóźnienia działania (I> str. WN)	1...60 s
Nastawienia asymetrii prądowej do kontroli ciągłości obwodów prądowych***	
Opcja dla RRTC-2	
Asymetria rozruchowa wszystkich stron transformatora	20....50 %I
Czas opóźnienia działania	10...60 s
Czas opóźnienia odpadu	1.....10 s
Nastawienia dotyczące zabezpieczenia ziemnozwarciowego strony WN***	
Prąd rozruchowy 3I <sub>o</sub> strony WN	0,1...10 A
Czas opóźnienia działania	0,1...60 s
Czas opóźnienia odpadu	0,1....60 s
Nastawienia dotyczące wejść dwustanowych***	
Czas opóźnienia działania	0,0.....60 s
Ilość wejść dwustanowych	4
*nastawienie tylko dla serwisu	
**dotyczy wykonania dla transformatora trójzwojeniowego	
*** dotyczy wersji RRTC-2s/2B lub 3B	

### Wejścia dwustanowe

Dla wersji nRRTC-2s/2B lub 3B dodano cztery wejścia binarne, dowolnie konfigurowalne - czyli każdy sygnał binarny może być przypisany do dowolnego przekaźnika. Wejście WE4 dodatkowo spełnia funkcje wyzwalania rejestratora kryterialnego. Każde pobudzenie WE1..4 jest zapisane do rejestratora zdarzeń.

### 3. Zabezpieczenia różnicowe silników

Aktualnie brak jest przepisów określających zasady stosowania zabezpieczeń silników na napięcie przekraczające 1 kV. Ukształtowała się jedynie wiedza inżynierska, według której każdy silnik powinien być zabezpieczony od zwarć międzyfazowych, przy czym silniki o mocy powyżej 2000 kW z wyprowadzonymi sześcioma końcami uzwojeń powinny być zabezpieczane zabezpieczeniami różnicowymi.

Zaletą zabezpieczenia różnicowego jest duża czułość, czyli możliwość nastawienia prądu rozruchowego w zakresie od 0,1 do 0,5 prądu znamionowego silnika. Z uwagi jednak na znaczne uchyby dynamiczne przekładników prądowych występujące przy rozruchu silnika konieczne jest stosowanie stabilizacji charakterystyk prądem skrośnym. Stabilizacji drugą harmoniczną dla zabezpieczeń różnicowych silników typowo nie stosuje się. Współczynnik stabilizacji od prądu skrośnego nastawia się od 0,3 do 0,5. Jeśli silnik jest zasilany długim kablem, co w konsekwencji powoduje nierównomierne obciążenie przekładników prądowych, stosowanie stabilizowanych prądem skrośnym charakterystyk okazuje się bardzo często niewystarczające. Konieczne jest wtedy stosowanie dodatkowych środków takich jak:

- Wyrównywanie obciążeń przekładników, w celu uzyskania jednakowych błędów wszystkich przekładników,
- opóźnianie zabezpieczeń różnicowych, w celu przeczekania stanów przejściowych w przekładnikach,
- stosowanie dodatkowej stabilizacji zabezpieczenia drugą harmoniczną, w celu zmniejszenia czułości zabezpieczenia, ale tylko w czasie nadmiernego nasycania się przekładników.

Najefektywniejsze jest stosowanie stabilizacji drugą harmoniczną, czyli stosowanie do silników takich samych zabezpieczeń jak dla transformatorów.

Zabezpieczenia różnicowe silników reaguje na zwarcia międzyfazowe, nie reagują na zwarcia zwojowe. Na zwarcia doziemne mogą reagować tylko w przypadku, gdy prądy doziemne są większe od nastawienia prądu rozruchowego.

Takie zagadnienia należy rozwiązywać dla silników zasilanych z bezpośrednio z sieci 50 Hz. Prawdziwe problemy powstają, jeśli silnik zasilany jest z falownika, a użytkownik wymaga, aby zastosowane zostało zabezpieczenie różnicowe.

### **3.1. Zabezpieczenie różnicowego dostosowanego do silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości**

W przemyśle i w energetyce coraz częściej do sterowania silników wysokiego napięcia stosowane są przemienniki częstotliwości. Na rynku nie ma zabezpieczeń różnicowych dostosowanych do zabezpieczenia silników z falownikami pracujących w dużym zakresie częstotliwości. Zabezpieczenie różnicowe dostosowane do zabezpieczenia silników synchronicznych z przemiennikiem częstotliwości postanowiono zrealizować na bazie istniejącego zabezpieczenia RRTC-2 dla transformatorów.

Problemy, które należało rozwiązać to:

- Dobór przekładników prądowych pracujących w obwodach silnika sterowanego falownikiem,
- opracowanie przetworników prądowo-napięciowych pracujących na wejściu zabezpieczenia,
- dostosowanie algorytmów zabezpieczenia do pracy w szerokim przedziale częstotliwości.

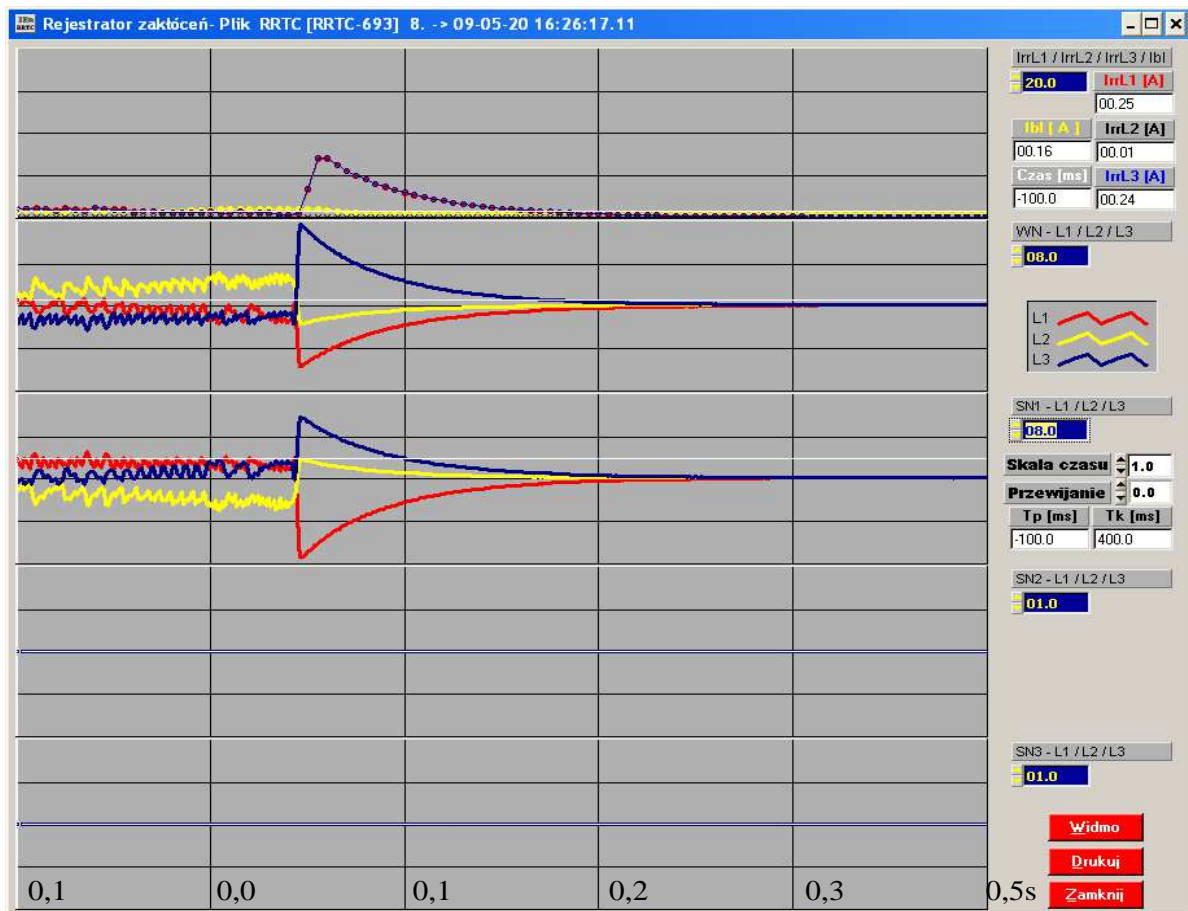
Przekładniki elektroniczne, które dobrze przenoszą przebiegi o niskich częstotliwościach istnieją w literaturze, ale nie są jeszcze rozpowszechnione na rynku. Dlatego zdecydowano się pozostawić przekładniki konwencjonalne pamiętając jednocześnie o wszystkich ich mankamentach ujawniających się szczególnie przy niskich częstotliwościach. Badania prowadzone w Instytucie Energetyki wskazują, że klasyczne przekładniki prądowe można wykorzystywać do celów zabezpieczeniowych nawet do 5Hz, ale pod warunkiem unikania dużych przetężeń i składowych przejściowych. Praca falownika zapewnia takie warunki. Praca falownika w zakresie niskich częstotliwości odbywa się na obniżonych poziomach napięć, które nie zagrażają izolacji silnika. Aby uniknąć w tych warunkach błędnych działań zabezpieczenia przewidziano blokadę zabezpieczenia dla częstotliwości poniżej 20 Hz.

W zabezpieczeniu zrezygnowano z blokowania zabezpieczenia drugą i piątą harmoniczną. Okno pomiarowe algorytmu zabezpieczenia pozostawiono o długości 20 ms. Przy obniżonych częstotliwościach zabezpieczenie jest w pewnym sensie zabezpieczeniem różnicowym działającym na chwilową wartość prądu.

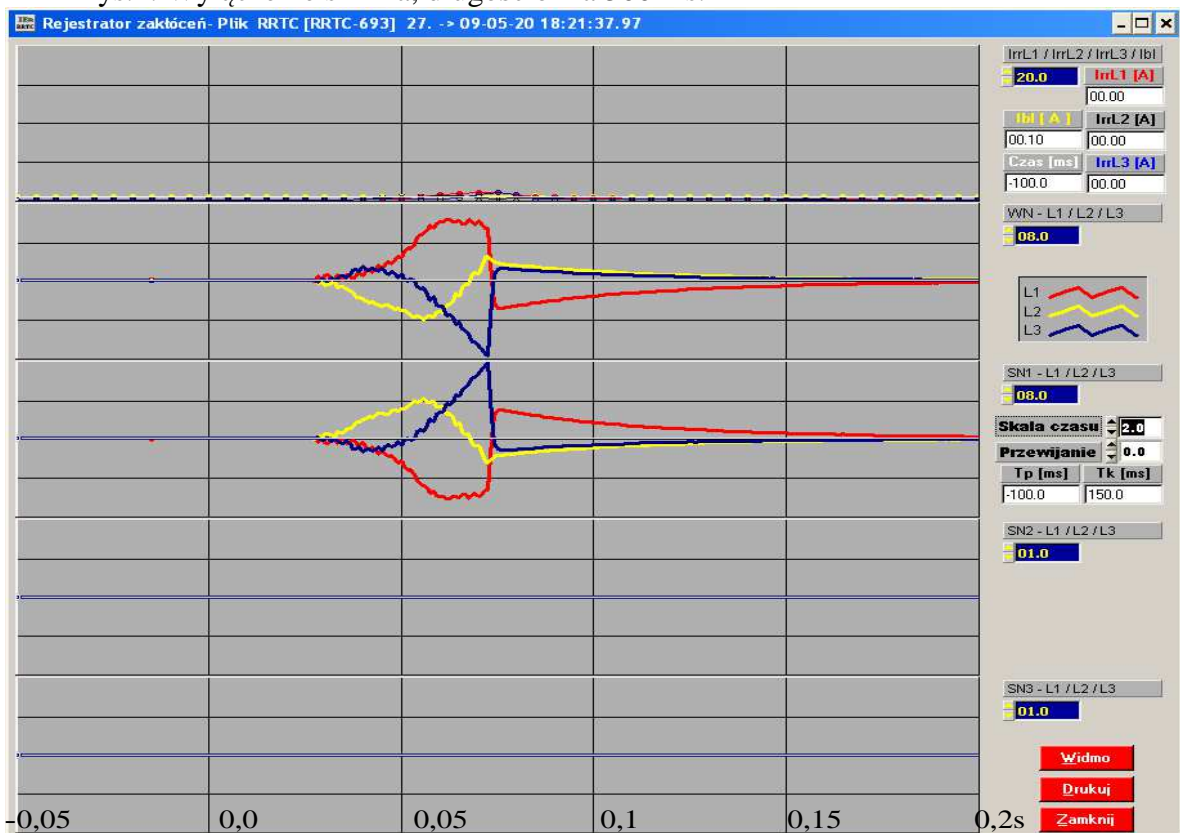
### **3.2. Badania eksploatacyjne**

Badania eksploatacyjne wykonano na rzeczywistym silniku synchronicznym wentylatora zasilanym z przemiennika częstotliwości ACS 5000 firmy ABB. Napięcie sieci zasilającej wynosi 6 kV, a znamionowy prąd przemiennika 320 A. Przemiennik częstotliwości zbudowany na tyrystorach ze zintegrowaną bramką IGCT i zasilany jest z 36-cio pulsowego prostownika.

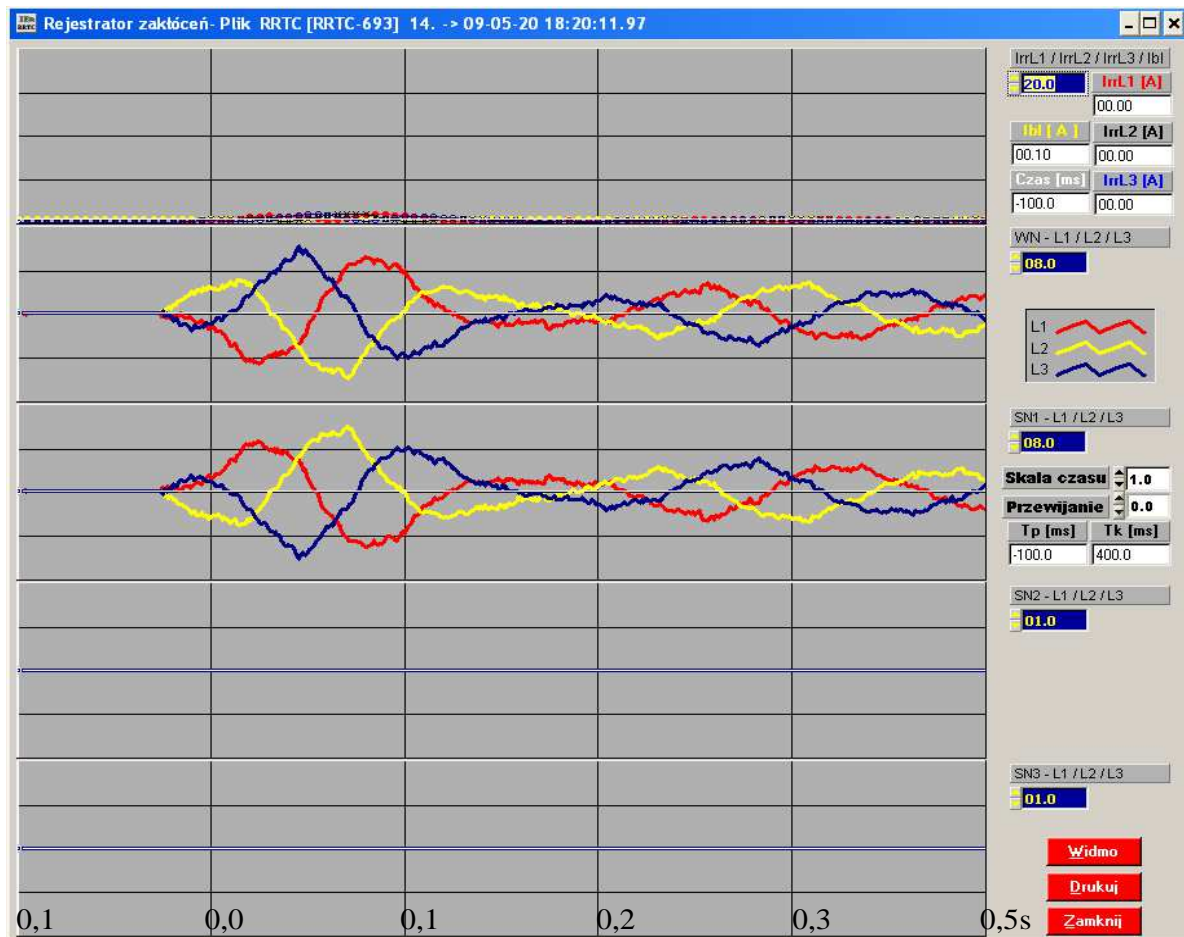
Przemiennik częstotliwości oprócz rozruchów może realizować pracę rewersyjną, może również dokonywać resynchronizacji po chwilowym zaniku napięcia sieci. Różne stany pracy przemiennika zapisano w rejestratorze zakłóceń. Przedstawiają to poniższe oscylogramy. Warunkiem automatycznego pobudzenia się rejestratora i zapisania dynamicznego stanu w pracy przemiennika, jest pojawienie się prądu różnicowego. Przekładniki prądowe funkcjonowały na tyle dobrze, że w celu spełnienia kryterium pobudzenia rejestratora konieczne było wpisanie fałszywej przekładni jednego z przekładników prądowych. Dlatego prądy różnicowe zapisane w górnym oknie są sztucznie powiększone. Testy wykazały, że przekładniki prądowe pracują dobrze i stosowanie blokady zabezpieczenia przy niskich częstotliwościach w badnym układzie jest zbędne.



Rys.1. Wyłączenie silnika, długość okna 500 ms.



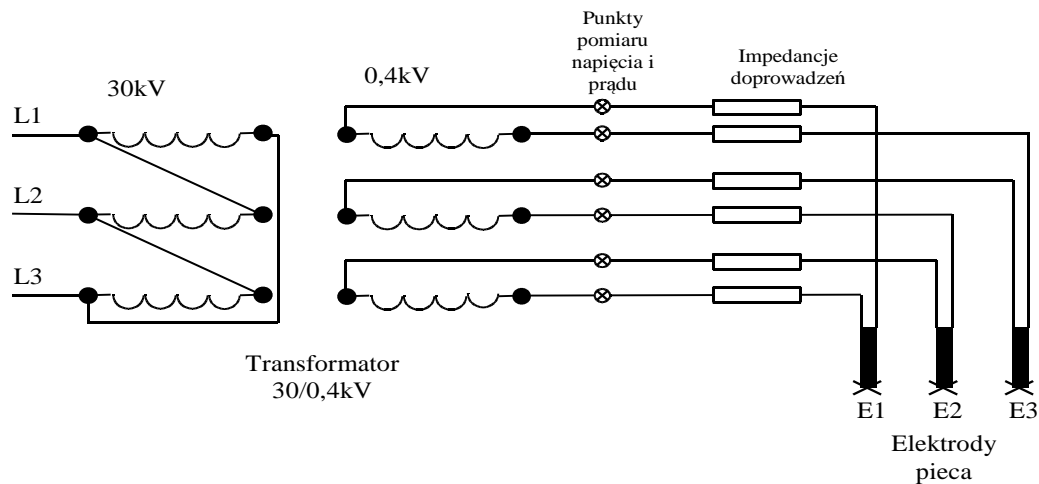
Rys.2. Nieudana resynchronizacja, długość okna =250 ms.



Rys.3. Udana resynchronizacja.

#### 4. Zabezpieczenie różnicowe transformatora piecowego

Dla transformatora 30/0,4kV, 25 MVA zasilającego piec łukowo-oporowy zaistniała potrzeba zbudowania zabezpieczenie różnicowego. Transformator ten posiada od strony 30 kV klasyczne przekładniki prądowe, natomiast od strony niskiego napięcia (0,4 kV) nie ma żadnych przekładników prądowych. Strona niskiego napięcia zasila trzy elektrody pieca. Wsad pieca stanowi obciążenie elektrod. Poszczególne uzwojenia niskiego napięcia transformatora wykonane są w postaci sześciu oddzielnych przewodów rurowych. Wszystkie końce uzwojeń transformatora są doprowadzone do elektrod pieca i połączone w trójkąt.



Rys. 4 Schemat zasilania elektrod pieca

Każde doprowadzenie wykonane jest sześcioma miedzianymi rurami chłodzonymi wodą, , łącznie jest 36 doprowadzeń rurowych.

W pobliżu elektrod rury miedziane zastępowane są elastycznymi połączeniami wykonanymi w postaci przewodzących węży, które umożliwiają swobodne przemieszczanie się elektrod. Znamionowy prąd uzwojenia transformatora wynosił 35 kA, a prąd poszczególnych rur zbliża się do 6 kA. Na instalowanie klasycznych przekładników prądowych nie było miejsca. Zdecydowano się zatem na zastosowanie cewek Rogowskiego .

Zabezpieczenie różnicowe transformatora zbudowano w oparciu o klasyczny przekładnik różnicowy RRTC-1 produkowany w Instytucie Energetyki. W zabezpieczeniu dokonano trzech zmian.

- Układy wejściowe, do których normalnie doprowadzony jest prąd strony niskiego napięcia za pośrednictwem klasycznych przekładników, przerobiono, dostosowując do przyjęcia niskonapięciowych sygnałów z cewek Rogowskiego, reprezentujących pochodną prądu.
- Druga zmiana polegała na dobudowaniu układu, w którym z pochodnej prądu w wyniku biernego całkowania odtwarza się prąd transformatora.
- Trzecia zmiana wynikała z bardzo głębokiej regulacji napięcia transformatora. Normalnie zabezpieczenia różnicowe mają czułość charakterystyki ustawioną tak, aby regulacja napięcia transformatora nie powodowała zbędnego działania. Bardzo głęboka regulacja napięcia transformatora piecowego pomniejszała znacznie tę czułość. Dlatego w zabezpieczeniu wykonano regulację nadążną.

Opisane zabezpieczenie różnicowe ma już za sobą kilka lat pracy. Zbudowana instalacja pracuje prawidłowo – nie było żadnych nieprawidłowych działań.

Jedną z zalet cewek Rogowskiego jest ich liniowość – wynika z niej brak nasycień przy dużych prądach zwarciovych. Konstrukcje tradycyjnych zabezpieczeń zostały dostosowane do sytuacji nasycania się przekładników prądowych, ale odbywa się to kosztem nieznacznego zmniejszenia szybkości działania. Zastąpienie istniejących przekładników cewkami Rogowskiego wpłynęłoby korzystnie na zwiększenie szybkości działania zabezpieczeń różnicowych, szczególnie przy dużych zwarciach, powodujących nasycanie się przekładników prądowych.

## **5. Zabezpieczenie różnicowe kabla.**

W sieciach dużych zakładów przemysłowych, zwłaszcza tych posiadających własną generację, szczególnie ważne jest selektywne działanie zabezpieczeń. Pozwala to utrzymać w pracy zarówno źródła wytwórcze jak i najważniejsze odbiory. Dobrym rozwiązaniem jest stosowanie zabezpieczeń odcinkowych. Naszą propozycją rozwiązania tego problemu jest zabezpieczenie różnicowe odcinka kabla RRTC-1/2zs.

Różni się od typowych zabezpieczeń odcinkowych tym, że dla odcinka kabla, zamiast dwóch pół kompletów, jest jedno zabezpieczenie, a zamiast łącza pilotującego są typowe przewody prądowe od przekładników. Oczywiście w takim przypadku zdecydowanie zalecamy stosowanie przekładników o prądzie wtórnym jeden amper zamiast 5 amper, obwody prądowe mogą być wtedy wydłużone 25 razy. Zabezpieczenie RRTC-1/2zs różni się od typowego zabezpieczenia dla transformatorów głównie zakresem przenoszonych prądu, zakres ten zwiększany jest pięciokrotnie.

Mechanizm stabilizacji drugą harmoniczną pozostaje, ponieważ jest on bardzo pomocny przy nasycaniu się przekładników prądowych. Opisane rozwiązanie jest szczególnie zalecane do krótkich odcinków kabla, np. kilkaset metrów. W stosunku do typowych rozwiązań oszczędzamy na tym, że nie potrzebujemy dwóch pół kompletów oraz eksploatuje praktycznie takie samo zabezpieczenie jak na transformatorze.