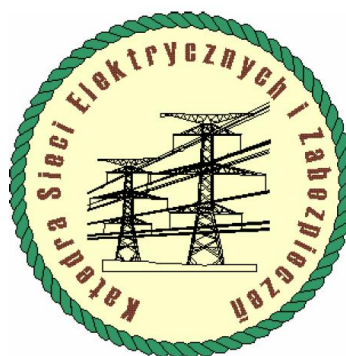


POLITECHNIKA LUBELSKA

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń



Instrukcja Laboratoryjna

Badanie cyfrowych zabezpieczeń firmy ABB, na przykładzie terminala zabezpieczeniowego REF 543

Lublin 2007

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową, zasadą działania, sposobami nastawiania i właściwościami eksploatacyjnymi cyfrowego urządzenia zabezpieczeniowego REF 543.

Zadania do wykonania w domu.

Zadanie 1.

Dobrać nastawy zabezpieczeń zwarciovych i przeciążeniowych linii promieniowej WN o danych: $U_n = 110\text{kV}$, $I_n = 600\text{ A}$, moc zwarciova systemu $S_z = 2000\text{ MVA}$, długość linii $l = 50\text{km}$, $x_{1'} = 0,4\ \Omega/\text{km}$, $\varphi_L = 70\text{ deg}$, $\varphi_S = 90\text{ deg}$, $x_0/x_1 = 2,7$ dla linii, natomiast dla źródła $x_0/x_1 = 1,2$.

Zadanie 2.

Dobrać nastawy zabezpieczeń zwarciovych i przeciążeniowych linii promieniowej WN o danych: $U_n = 220\text{ kV}$, $I_n = 300\text{ A}$, moc zwarciova systemu $S_z = 4000\text{ MVA}$, długość linii $l = 100\text{km}$, $x_{1'} = 0,4\ \Omega/\text{km}$, $\varphi_L = 70\text{ deg}$, $\varphi_S = 90\text{ deg}$, $x_0/x_1 = 2,7$ dla linii, natomiast dla źródła $x_0/x_1 = 1,2$.

Zadanie 3.

Dobrać nastawy zabezpieczeń zwarciovych i przeciążeniowych linii promieniowej WN o danych: $U_n = 110\text{kV}$, $I_n = 800\text{ A}$, moc zwarciova systemu $S_z = 2500\text{ MVA}$, długość linii $l = 70\text{km}$, $x_{1'} = 0,4\ \Omega/\text{km}$, $\varphi_L = 70\text{ deg}$, $\varphi_S = 90\text{ deg}$, $x_0/x_1 = 2,7$ dla linii, natomiast dla źródła $x_0/x_1 = 1,2$.

Zadanie 4.

Dobrać nastawy zabezpieczeń zwarciovych i przeciążeniowych linii promieniowej WN o danych: $U_n = 220\text{kV}$, $I_n = 600\text{ A}$, moc zwarciova systemu $S_z = 3500\text{ MVA}$, długość linii $l = 150\text{km}$, $x_{1'} = 0,4\ \Omega/\text{km}$, $\varphi_L = 70\text{ deg}$, $\varphi_S = 90\text{ deg}$, $x_0/x_1 = 2,7$ dla linii, natomiast dla źródła $x_0/x_1 = 1,2$.

Zadanie dla każdego studenta podaje prowadzący, lub wynika od kolejności studentów w grupie ćwiczącej.

1. Wstęp

Terminale REF 543 są przeznaczone do zabezpieczania, sterowania, pomiarów i nadzoru w sieciach średnich i wysokich napięć. Mogą one pracować w różnych układach sieciowych, np. jednoszynowych, dwuszynowych lub duplex. Funkcje zabezpieczeniowe umożliwiają pracę w różnych sieciach tzn. izolowanych, kompensowanych, uziemianych przez rezystor [2]. Funkcjonalność terminala jest ściśle powiązana z jego fizycznym wyposażeniem. Wymagane funkcje mogą być uaktywniane z bibliotek zabezpieczeń, sterowania, pomiarów, funkcji jakości energii, kontroli i komunikacji w ramach dostępnej pojemności procesora oraz

ilości połączeń wejściowych i wyjściowych. Powiązanie bibliotek z konfiguracją terminala pozwala na łatwe zaadoptowanie REF 543 dla różnych rodzajów aplikacji.

Przy pomocy wyświetlacza graficznego MMI funkcje sterownicze terminala pokazują lokalne stany odłączników i wyłączników. Ponadto, ta informacja może być przesyłana do systemu nadrzędnego. Obiekty sterowalne takie jak wyłączniki mogą być otwierane i zamykane ze zdalnego systemu sterowania. Informacje o stanach i komendy sterujące są przesyłane przez łącze szeregowe. Natomiast sterowanie lokalne możliwe jest również przy użyciu przycisków na panelu czołowym terminala.

Terminal został zaprojektowany jako selektywne zabezpieczenie przed zwarciami międzyfazowymi i doziemnymi. Jeśli jest to konieczne, terminal może zostać wyposażony w funkcję SPZ. Dodatkowo, REF realizuje wiele funkcji niestandardowych np. zabezpieczenia opierające swoje działanie na pomiarach napięcia lub częstotliwości, zabezpieczenia silnikowe, od przeciążeń cieplnych oraz funkcję synchrochecka. Terminal REF 543 mierzy prądy fazowe, napięcia międzyfazowe i fazowe, prąd zerowy, napięcie zerowe, częstotliwość i moc. Moc czynna i bierna jest wyliczana z mierzonych prądów i napięć. Energia może być wyliczana na bazie mierzonej mocy. Wartości mierzone mogą być prezentowane lokalnie i zdalnie wyskalowane w wielkościach pierwotnych.

Dodatkowo, oprócz funkcji zabezpieczeniowych, pomiarowych, sterowniczych i nadzoru, terminal posiada dużą liczbę funkcji PLC, które pozwalają na zintegrowanie w jednym terminalu wielu logik i automatyk stacyjnych.

Terminale REF543 są przystosowywane do poszczególnych aplikacji przy użyciu narzędzia konfiguracyjnego zawartego w programie CAP 505 Tool Box. Narzędzie to jest używane do podstawowej konfiguracji, zabezpieczeń, funkcji logicznych, sterowniczych, pomiarowych, członów czasowych i innych elementów funkcjonalnych zawartych w bibliotekach funkcji [2].

2. Obsługa terminala

MMI jest to tzw. interfejs urządzenie – człowiek. Przy użyciu wyświetlacza LCD z różnymi obrazami zapewnia łatwą i czytelną komunikację z użytkownikiem .

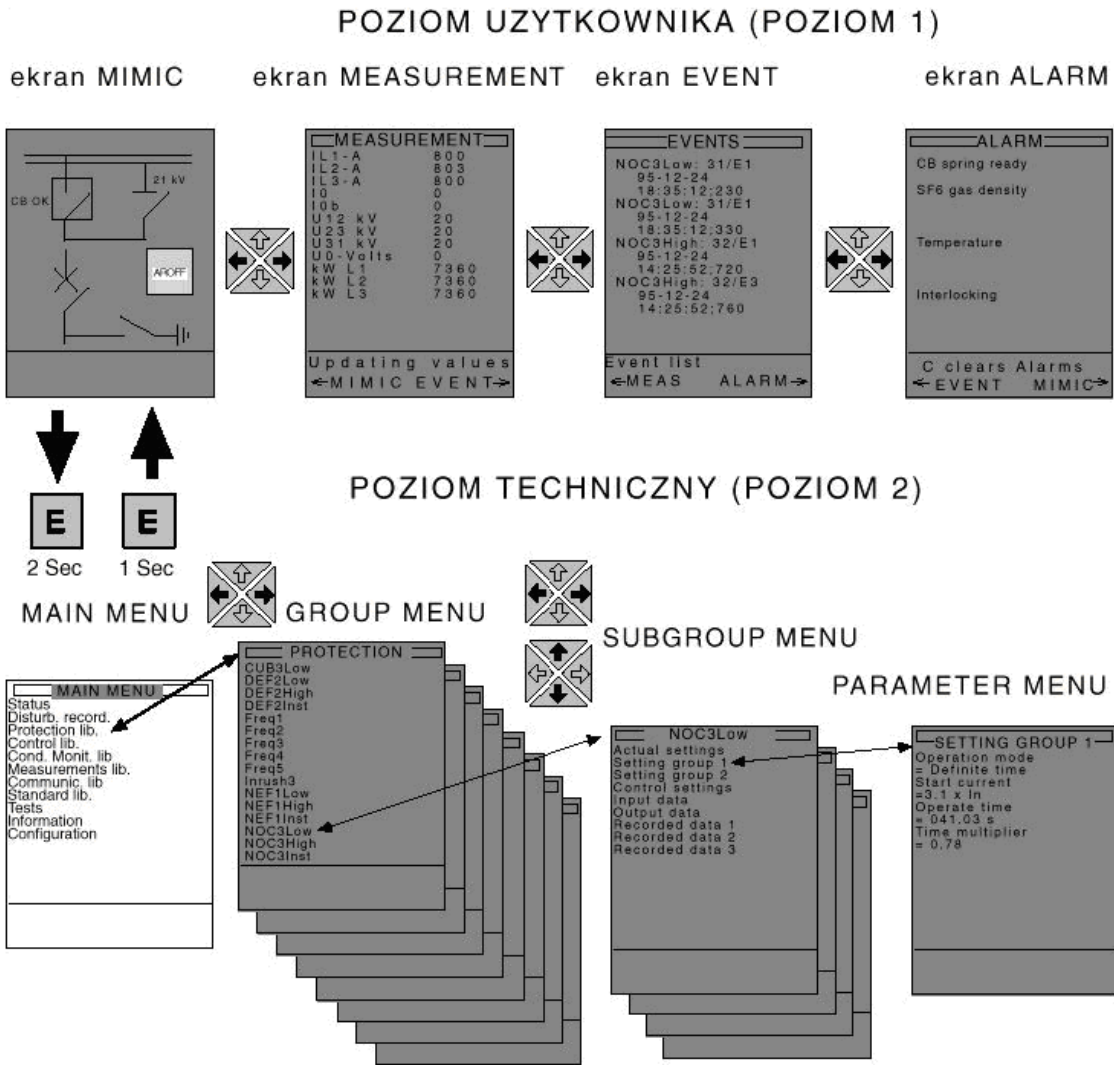


Rys. 2.1 Panel czołowy terminala REF 543

Panel czołowy terminala zawiera wyświetlacz LCD o rozdzielczości 128 x 160 pixeli, zawierający 19 wierszy podzielonych na 2 okna. Główne okno (17 wierszy) dostarcza informacje o obiektach, zdarzeniach, alarmach sterowań, oraz wielkościach w terminalu. Okno pomocnicze (2 wiersze) przydzielone jest dla zabezpieczeń, wskazań i alarmów związanych z terminalem oraz tekstów pomocy. Z prawej strony wyświetlacza znajdują się trzy przyciski do sterowania obiektami w polu. Po prawej stronie wyświetlacza znajduje się osiem dowolnie programowalnych diod alarmowych LED. Mogą one migać lub być zapalone na stałe w jednym z 3 kolorów. Wskaźnik diodowy LED znajdujący się pod grupą ośmiu diod programowalnych sygnalizuje działanie blokad lub tryb testowy. Bezpośrednio pod ekranem znajdują się trzy wskaźniki diodowe dla zabezpieczeń.

Do poruszania się po menu została stworzona sekcja przycisków MMI zawierająca 4 klawisze ze strzałkami oraz przycisk potwierdzenia [E] i przycisk kasowania [C]. Optycznie izolowany port komunikacji szeregowej służy do podłączenia terminala z komputerem. Na płycie czołowej znajduje się także dowolnie konfigurowalny przycisk [F] . Klawisz [R/L] służy do zmiany sposobu sterowania zdalny/ lokalny.

W trybie spoczynku w oknie głównym ekranu jest wyświetlany obraz MIMIC przedstawiający połączenia obiektów w polu oraz aktualne stany łączników, informacje o zdarzeniach, pomiary i alarmy.



Rys. 2.2 Struktura poziomów w menu MMI

Ekran MMI posiada dwa główne poziomy: poziom użytkowy i poziom techniczny. Poziom użytkowy służy do pomiarów i monitoringu, podczas gdy poziom techniczny służy do programowania i nastawiania terminala. Na poziomie użytkowym dane są prezentowane na czterech różnych ekranach: MIMIC - schemat pola, MEASUREMENT- pomiary, EVENT- zdarzenia oraz ekran ALARM. Na poziomie technicznym system menu podzielony jest na trzy lub cztery poziomy (zależnie od dostępu): MAIN menu (menu główne), GROUP menu (menu grupy), SUBGROUP menu (menu podgrupy) oraz PARAMETER menu (menu nastaw) [3].

3. Przegląd zakłóceń objętych działaniem terminala REF 543

Podczas pracy systemu elektroenergetycznego może wystąpić szereg trudnych do przewidzenia zakłóceń. Zakłócenia te mogą spowodować zniszczenie nie tylko elementów systemu dotkniętych zakłóceniem, ale i pozostałych części systemu zwłaszcza tych znajdujących się w bliskim ich sąsiedztwie. Ze względu na wiele czynników takich jak bardzo duży koszt urządzeń, bezpieczeństwo ludzi i zwierząt, stabilność systemu, istnieje konieczność szybkiej eliminacji elementów sieci dotkniętych zakłóceniem. System elektroenergetyczny zbudowany jest z wielu urządzeń pracujących na różnych poziomach napięć, przewodzących różne wartości prądów. Ponadto wartości prądów, zarówno znamionowych jak i zakłóceńowych, zależnie od lokalizacji zakłócenia mogą się zmieniać w szerokich granicach. Te i wiele innych czynników spowodowało konieczność stosowania wielu różnych rozwiązań zabezpieczeń o różnych parametrach dopasowanych do potrzeb chronionych obiektów. Ponadto, ze względu na zróżnicowany charakter zakłóceń oraz konieczność dublowania zabezpieczeń, w większości przypadków konieczne jest zastosowanie kilku typów przekaźników chroniących jeden element systemu.

Początkowo większość zabezpieczeń była wykonywana fizycznie jako oddzielne urządzenia, najczęściej przekaźniki elektromechaniczne. Upowszechnienie elementów elektronicznych dało możliwość integracji kilku zabezpieczeń w pojedynczej jednostce o znacznie mniejszych rozmiarach i mniejszym poborze mocy z obwodów pomiarowych. Obecnie produkowane cyfrowe przekaźniki zabezpieczeniowe zwane terminalami mogą wykonywać wiele różnych funkcji zabezpieczeniowych o różnych parametrach. Fizycznie są one budowane w postaci mikrokomputerów z dużą ilością wejść i wyjść sterowanych przez dowolnie konfigurowalne oprogramowanie.

Jednym z najczęściej stosowanych w polskiej energetyce terminali zabezpieczeniowych jest urządzenie REF 543 produkowane przez międzynarodową korporację ABB. Umożliwia on realizację wielu grup funkcji związanych z działaniem pola rozdzielni elektroenergetycznej a najważniejszą grupę stanowią funkcje zabezpieczeniowe.

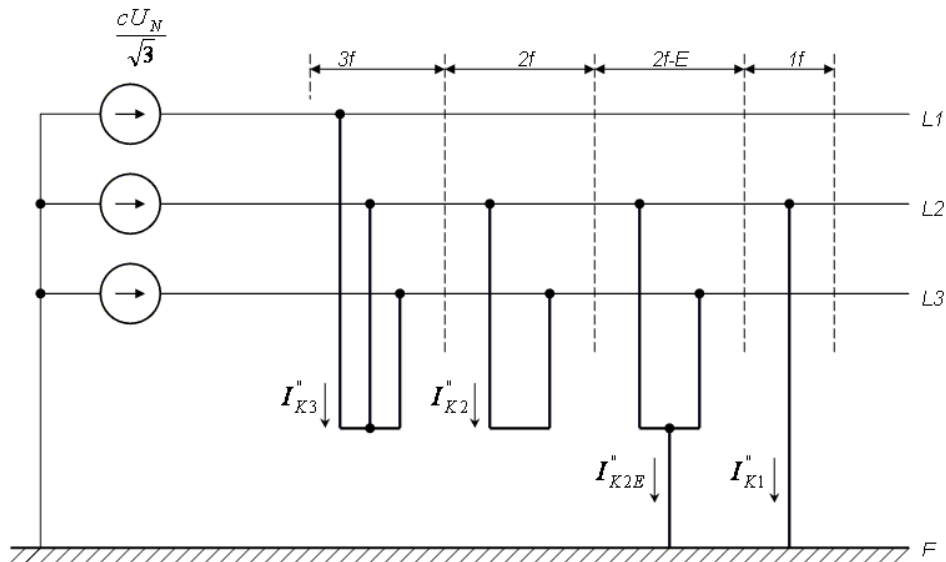
3.1. Zwarcia wielkopiędowe

Za zwarcia wielkopiędowe uznaje się te zwarcia, którym towarzyszą przetężenia prądowe o wartościach wielokrotnie przekraczających znamionowe wartości prądów lub dopuszczalne obciążenia długotrwałe elementów systemu elektroenergetycznego [1].

Do zwarć wielkopiędowych zaliczamy:

- zwarcia międzyfazowe i międzyfazowe doziemne,
- zwarcia jednofazowe w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym bezpośrednio lub za pomocą niewielkiej impedancji.

Na rysunku 5.1 pokazano różne rodzaje wielkopiędowych zwarć bezpośrednich w trójfazowej sieci o bezpośrednio uziemionym punkcie neutralnym.



Rys 3.1 Rodzaje zwarć wielkopiędowych bezpośrednich

Do prawidłowego doboru nastaw zabezpieczeń zwarciovych konieczna jest znajomość wartości początkowego prądu zwarciovego którego wartość dla różnych rodzajów zwarć obliczamy na podstawie wzorów (3.1 – 3.4).

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} \quad (3.1)$$

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad (3.2)$$

$$I_{k2E}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + 2Z_0|} \quad (3.3)$$

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} \quad (3.4)$$

We wzorach (3.1-3.4) Z_1, Z_2, Z_0 oznaczają impedancje systemu odpowiednio dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej.

Zwarcia wielkoprądowe wykrywa się korzystając z następujących wielkości pomiarowych:

- prądu fazowego lub różnicy prądów fazowych,
- prądu zerowego,
- składowej przeciwnej prądów fazowych,
- prądu różnicowego,
- impedancji pętli lub półpętli.

Podstawowy kryterium wykrywania zwarć wielkoprądowych jest kryterium nadprądowe. Podczas zwarć międzyfazowych oraz jednofazowych z ziemią w sieciach z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym prąd zwarciovowy jest najczęściej wielokrotnością dopuszczalnej wartości prądu roboczego określonego elementu układu lub systemu elektroenergetycznego [1]. Ogólny warunek określający możliwość stosowania zabezpieczenia nadprądowego można określić następującą zależnością:

$$I_{k\min}'' > I_r > I_{N\max} \quad (3.5)$$

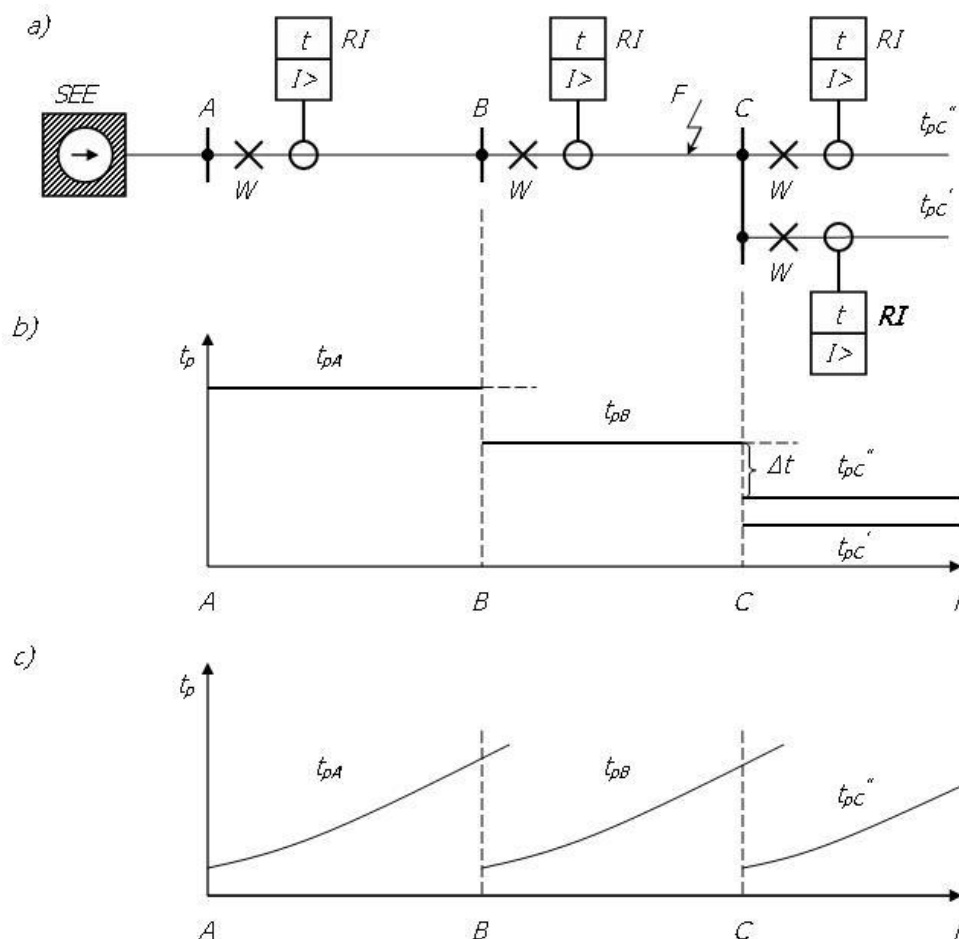
przy czym $I_{k\min}''$ - najmniejsza wartość prądu zwarciovowego, płynącego w punkcie zabezpieczeniowym podczas zwarcia na końcu strefy działania tego zabezpieczenia, I_r -prąd rozruchowy zabezpieczenia, $I_{N\max}$ - największa dopuszczalna wartość długotrwałego obciążenia prądowego obiektu.

Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne to takie, które impuls na wyłączenie chronionego obiektu wysyła bezpośrednio po stwierdzeniu przekroczenia wartości rozruchowej I_r zabezpieczenia. Poprzez bardzo szybkie wyłączenie zabezpieczenie to chroni elementy systemu przed skutkami cieplnego oddziaływania bardzo dużych wartości prądu zwarciovowego. Największą wadą zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego, jest to iż nie obejmuje on swoim zasięgiem działa całego obiektu zabezpieczanego. Ponadto zasięg działania tego zabezpieczenia zależy nie tylko od nastawionej wartości rozruchowej, ale także

od rodzaju zwarcia. Dużą część zwarć wieloprądowych w sieciach elektroenergetycznych stanowią zwarcia dwufazowe. Stosunek prądu zwarcia dwufazowego do prądu zwarcia trójfazowego określa zależność (3.6)

$$\frac{I''_{k2}}{I''_{k3}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 0,86 \quad (3.6)$$

Z zależności (5.6) wynika, że zasięg strefy działania zabezpieczeń bezzwłocznych przy zwarciu dwufazowym jest znacznie krótszy od zasięgu działania przy zwarciu trójfazowym. Konieczność rozciągnięcia strefy działania zabezpieczenia nadprądowego na cały obiekt zmusza do zastosowania dodatkowego zabezpieczenia. Jest nim zazwyczaj zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne.



Rys 3.2 Ilustracja stref działania zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego:

- a) schemat sieci promieniowej
- b) strefy działania przekaźników o charakterystyce niezależnej
- c) strefy działania przekaźników o charakterystyce częściowo zależnej

W celu zapewnienia selektywności zabezpieczeń zainstalowanych na jednym ciągu liniowym stosuje się tzw. stopniowanie czasowe pokazane na rysunku 3.2 b). Innym rozwiązaniem jest zastosowanie przekaźników nadprądowych zwłoczných o charakterystyce zależnej (rys. 3.2 c).

REF 543 umożliwia likwidację zwarć wielkopiędowych za pomocą funkcji korzystających z pomiaru prądu fazowego oraz prądu zerowego. Za likwidację tego typu zwarć odpowiedzialne są bloki funkcji trójfazowego bezkierunkowego zabezpieczenia nadprądowego NOC3low, NOC3High oraz NOC3Inst. Bloki funkcji zabezpieczeń trójfazowych bezkierunkowych nadprądowych są zaprojektowane do wykorzystania jako bezkierunkowe dwu i trójfazowe zabezpieczenia nadmiarowo prądowe i zwarciove gdy wykorzystywana jest zwłoka czasowa DT lub w przypadku bloku NOC3Low charakterystyka zależna IDMT (ang. Inverse Definite Minimum Time). Działanie stopnia oparte jest na dwóch alternatywnych kryteriach pomiarowych: wartość średnia kolejnych wartości chwilowych międzyszczytowych lub cyfrowo wyliczana składowa podstawowa prądu ziemnozwarciowego i napięcia zerowego. Funkcja pobudza się jeżeli prąd w jednej lub więcej fazach przekroczy nastawiony prąd pobudzenia. Kiedy stopień się pobudza, sygnał START ustawia się na logiczne „1”. Jeżeli sytuacja zakłóceniova przekroczy nastawiony czas zadziałania lub, dla charakterystyki zależnej, czas określony przez poziom mierzonego prądu , stopień zadziała. Gdy stopień zadziała sygnał TRIP zmieni się na logiczne „1” . Funkcja odmierzająca czas do zadziałania może odmierzać czas tylko jeżeli sygnał blokujący BS1 jest nieaktywny tzn. jego wartość jest logicznym „0”. Kiedy sygnał BS1 staje się aktywny timer jest zatrzymywany. Kiedy sygnał blokujący BS2 jest aktywny, sygnał TRIP nie może być aktywny.

Dla charakterystyki zależnej w NOC3Low czas działania jest funkcją prądu, im większy prąd tym krótszy czas działania. Dostępne jest sześć rodzajów charakterystyk czasowo prądowych. Cztery z nich są zgodne z normami BS142 i IEC 255, podczas gdy dwa rodzaje krzywych RI oraz RD są specjalnymi typami krzywych opracowanych przez firmę ABB.

Czterema międzynarodowo znormalizowanymi charakterystykami są:

- normalna odwrócona (NI),
- silnie odwrócona (VI),
- bardzo silnie odwrócona (EI)
- Odwrócona długoczasova (LI)

Zależności między czasem i prądem opisuje zależność (3.6)

$$t[s] = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_0}\right)^\alpha - 1} \quad (3.6)$$

Wybór żądanej charakterystyki polega na doborze odpowiedniej wartości parametrów α i β według wartości podanych w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Wartości stałych α i β

Charakterystyka zależna	α	β
Normalna odwrócona	0.02	0.14
Silnie odwrócona	1.0	13.5
Bardzo silnie odwrócona	2.0	80.0
Odwrócona długoczasowa	1.0	120

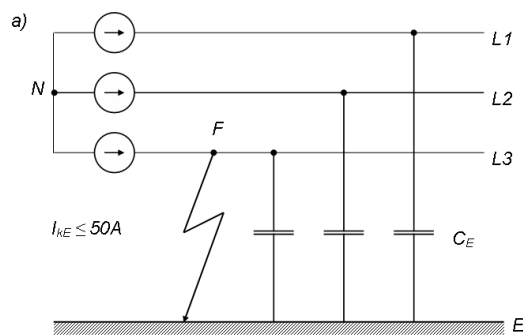
Aby móc korzystać z wybranych funkcji należy uprzednio wybrać i skonfigurować urządzenia pomiarowe oraz typy sygnałów dla kanałów analogowych w specjalnym oknie dialogowym programu konfiguracyjnego Relay Configuration Tool zawartego w CAP 505.

Po wybraniu i skonfigurowaniu kanałów analogowych i wejść binarnych wejścia i wyjścia bloku funkcji są konfigurowane na ekranie graficznym narzędzia konfiguracyjnego. Prądy fazowe I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} są podłączane do odpowiadających im wejść IL1, IL2 i IL3 bloku funkcji. Ponadto wejścia binarne są podłączane do wejść bloku funkcji i w ten sam sposób, wyjścia bloku funkcji są podłączane do sygnałów wyjściowych.

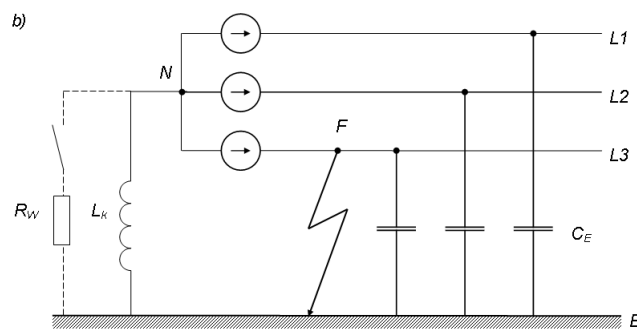
Kiedy stopień pobudzi się lub zadziała wartości przydatne do późniejszej analizy zakłócenia są rejestrowane w wewnętrznym rejestratorze zakłóceń. Zachowywane są trzy ostatnie działania, a wartości najświeższe zastępują dane starsze.

3.2. Zwarcia doziemne małoprądowe

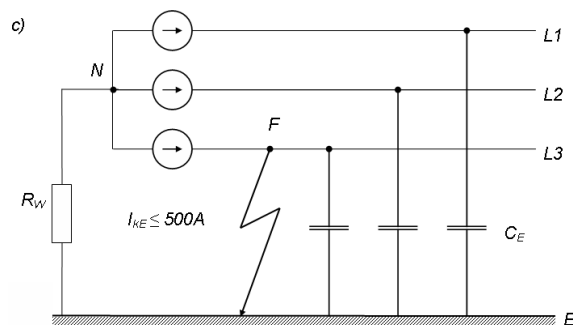
Pojedyncze zwarcia doziemne, występujące w sieciach z nieziemionym bezpośrednio punktem neutralnym, charakteryzujące się małą wartością prądu zwarciovego - nazywamy zwarciami małoprądowymi. Nie powodują one tak nagłych i rozległych skutków jak zwarcia wieloprądowe, ale ze względu na zagrożenie dla ludzi i zwierząt oraz możliwość przerodzenia się w zwarcia wieloprądowe, powinny być one szybko wykrywane, lokalizowane i eliminowane. Na rys 3.4 przedstawiono pojedyncze zwarcia doziemne w sieciach o różnym sposobie pracy punktu neutralnego.



Rysunek 3.4 a) Pojedyncze zwarcie doziemne w sieci o izolowanym punkcie neutralnym



Rysunek 3.4 b) Pojedyncze zwarcie doziemne w sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensacyjny



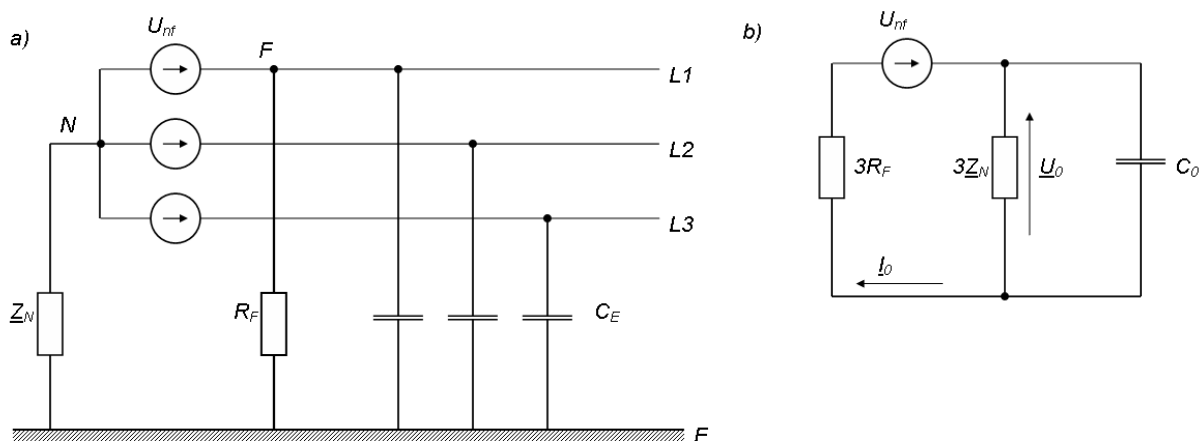
Rysunek 3.4 c) Pojedyncze zwarcie doziemne w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor

Sposób pracy punktu neutralnego wpływa na wartość i charakter prądu ziemnozwarciowego oraz wartość napięć fazowych podczas zwarcia. W przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym (rysunek 3.4 a) maksymalna wartość prądu doziemnego I_{KE} nie powinna przekraczać 50A. Jeżeli punkt neutralny uziemiony jest przez rezystor to jego rezystancję dobiera się tak aby prąd I_{KE} nie był większy niż 500A. Kompensacja prądu ziemnozwarciowego dławikiem powoduje, że wartość prądu doziemnego jest bliska zero.

Do wykrywania małoprądowych zwarć doziemnych wykorzystuje się następujące wielkości elektryczne:

- ustalone przebiegi prądów i napięć zerowych, kąty fazowe między nimi
- impedancje,
- wyższe harmoniczne zawarte w prądzie zerowym,
- przejściowe przebiegi prądów i napięć zerowych [1].

Na podstawie uogólnionego schematu zastępczego sieci (rysunek 3.5) można wyznaczyć ustaloną wartość prądu i napięcia zerowego.



Rys 3.5 Schemat sieci elektroenergetycznej a) uogólniony b) uproszczony zastępczy

Należy zauważyć, że zwarcia doziemne w większości nie są zvarciami metalicznymi, dlatego też przy obliczaniu wartości prądów i napięć zerowych należy uwzględnić rezystancję przejścia R_F co pokazano na rysunku 3.5a. Podstawiając do zależności 3.7 oraz 3.8 odpowiednią wartość impedancji uziemienia punktu neutralnego Z_N można obliczyć wartości prądów i napięć zerowych dla różnych rodzajów sieci.

$$\underline{I_0} = \frac{U_{nf}}{3R_F + \underline{Z_0}} \quad (3.7)$$

$$\underline{U_0} = -\underline{Z_0} \underline{I_0} \quad (3.8)$$

Podstawowym i najczęściej stosowanym kryterium do wykrywania zwarć doziemnych w sieci z izolowanym punktem neutralnym jest ustalony prąd zerowy I_0 . Pomiar tego prądu w sieci izolowanej odbywa się głównie za pomocą przekładnika Ferantiego lub przekładników prądowych w układzie Holmgrena. O skuteczności i celowości stosowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w których jedynym kryterium jest prąd zerowy decyduje spełnienie warunku czułości opisanego zależnością :

$$\frac{I_{0s} - I_0}{k_c} \geq I_r \geq k_b I_0 \quad (3.9)$$

gdzie: I_{0s} - prąd zerowy całej sieci galwanicznie ze sobą połączonej, I_0 - prąd zerowy zabezpieczanego urządzenia, k_b - współczynnik bezpieczeństwa (równy 2 lub 4), I_r - prąd rozruchowy przekaźnika, k_c - współczynnik czułości równy 2.

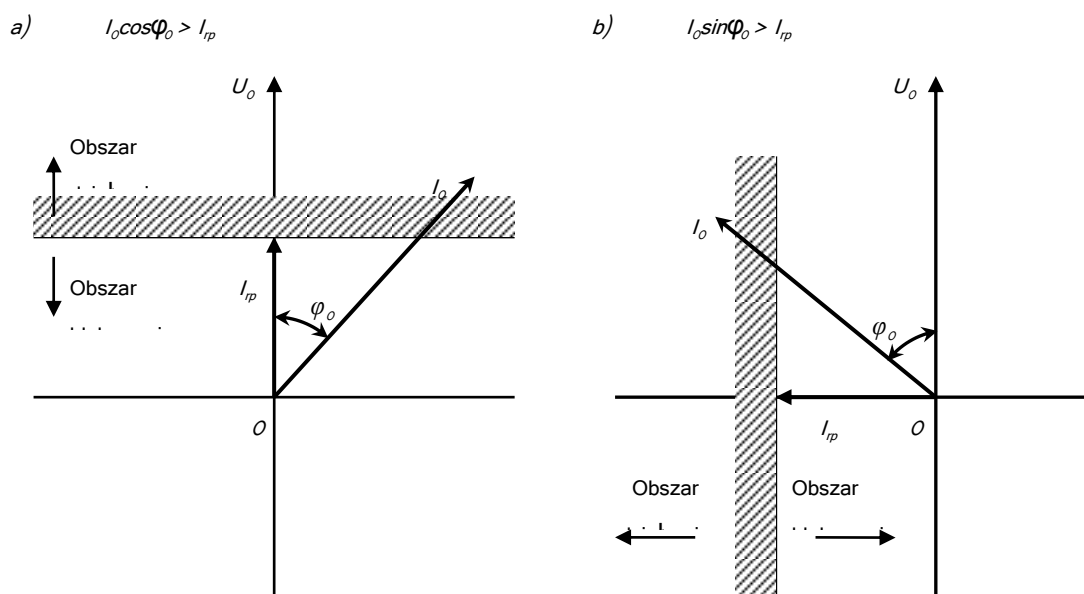
Gdy zwarcie doziemne występuje w obrębie zabezpieczanego urządzenia, wówczas przez miejsce zainstalowania zabezpieczenia płynie prąd zerowy sieci I_{0s} zmniejszony o prąd zerowy urządzenia I_0 . Gdy natomiast zwarcie doziemne występuje poza strefą zabezpieczanego urządzenia przez punkt zabezpieczeniowy płynie prąd zerowy zabezpieczanego urządzenia.

W sieciach elektroenergetycznych pracujących punktem neutralnym nieziemionym bezpośrednio podczas pojedynczych zwarć doziemnych pojawia się napięcie zerowe U_0 . Występowanie tego napięcia może służyć jako kryterium do wykrywania zwarć doziemnych, nie pozwala jednak na zlokalizowanie miejsca doziemienia, dlatego kryterium to stosowane jest jedynie do sygnalizacji.

W przypadku, gdy ze względu na selektywność, nie jest możliwe zastosowanie zabezpieczenia opartego wyłącznie na kryterium zerowoprądowym stosuje się zabezpieczenia oparte na kryterium kątowoprądowym. Kryterium to polega na wyznaczeniu kierunku składowej czynnej lub biernej prądu zerowego. Poniższe zależności przedstawiają warunki zadziałania zabezpieczenia, opartego na omawianym kryterium, w sieciach kompensowanych (3.10) oraz sieciach z izolowanym punktem zerowym (3.11).

$$I_0 \cos \varphi_0 > I_r \quad (3.10)$$

$$I_0 \sin \varphi_0 > I_r \quad (3.11)$$



Rys 5.6 Charakterystyki rozruchowe przekąźników ziemnozwarciowych kątowoprądowych
a) dla sieci kompensowanej b) dla sieci z izolowanym punktem neutralnym

Maksymalną czułość przekąźnika kątowoprądowego można uzyskać poprzez właściwy dobór jego kąta wewnętrznego, który w przypadku sieci z kompensacją wynosi 0° , a dla sieci izolowanej -90° .

W terminalu REF 543 za selektywne wyłączanie zwarć małoprądowych doziemnych są odpowiedzialne trzy bloki funkcji NEF1, DEF2 oraz ROV1. Blok zabezpieczenia zerowo napięciowego nadmiarowego ROV1, ze względu na brak selektywności w wykrywaniu zwarć jest bardzo rzadko stosowany. Jako zabezpieczenie eliminacyjne może on być zastosowany wyłącznie do zabezpieczania uzwojeń stojana generatora synchronicznego pracującego w bloku z transformatorem. Blok ROV1 może być jednak z powodzeniem zastosowany jako sygnalizacja doziemienia w stacjach ze stałą obsługą.

Działanie bloku NEF1, który pełni rolę nadprądowego bezkierunkowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego, jest analogiczne do działania bloku NOC3 opisanego w rozdziale 3.1, dlatego nie będzie ono szerzej omawiane. Zasadnicza różnica polega jedynie na rodzaju i sposobie pobierania sygnałów prądowych, oraz wartości parametrów rozruchowych. Zabezpieczenie NEF1 jako wielkość kryterialną stosuje zwiększoną wartość

prądu zerowego, do którego pomiaru stosuje się najczęściej przekładnik Ferantiego lub klasyczne przekładniki prądowe w układzie Holmgreena. Aby osiągnąć wystarczającą dokładność pomiaru składowej zerowej i wynikającą z tego czułość układu, przekładnik Ferantiego powinien mieć przekładnię przynajmniej 70:1.

Działanie kierunkowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego DEF jest oparte na pomiarze prądu zerowego I_0 oraz napięcia zerowego U_0 . Blok DEF umożliwia nam zastosowanie jednego z sześciu kryteriów działania do których należą:

- BasigAng & U_0 ,
- BasigAng ,
- $I_0 \sin \varphi$ & U_0 lub $I_0 \cos \varphi$ & U_0 ,
- $I_0 \sin \varphi$ lub $I_0 \cos \varphi$,
- Non-dir I_0 ,
- Non-dir U_0 .

Jeżeli jako kryterium działania bloku DEF wybierzemy „BasigAng & U_0 ” to będzie on realizował funkcję której działanie jest oparte na kryterium kątowym i napięcia zerowego. Funkcja ta pobudzi się jeżeli w tym samym czasie:

- prąd zerowy I_0 przekroczy wartość nastawioną,
- napięcie zerowe U_0 przekroczy wartość nastawioną,
- kąt fazowy φ pomiędzy prądem i napięciem zerowym leży w zakresie działania $\varphi = \varphi_b \pm \Delta\varphi$, gdzie φ_b jest kątem podstawowym a $\Delta\varphi$ określonym sektorem działania.

Gdy natomiast jako kryterium wybierzemy „BasigAng” działanie funkcji kierunkowej oparte będzie na kącie fazowym i pobudzi się ona gdy w tym samym czasie:

- prąd zerowy I_0 przekroczy wartość nastawioną,
- kąt fazowy φ pomiędzy prądem i napięciem zerowym leży w zakresie działania $\varphi = \varphi_b \pm \Delta\varphi$, gdzie φ_b jest kątem podstawowym a $\Delta\varphi$ określonym sektorem działania.

Funkcja oparta na kryterium $I_0 \sin \varphi$ & U_0 lub $I_0 \cos \varphi$ & U_0 pobudzi się jeżeli w tym samym czasie:

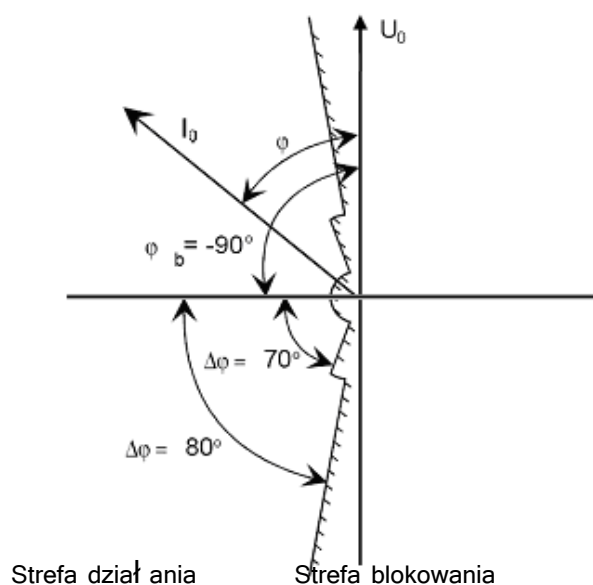
- prąd zerowy $I_0 \sin \varphi$ lub $I_0 \cos \varphi$ przekroczy nastawioną wartość,

- napięcie zerowe U_0 zwiększy się ponad wartość nastawioną.

Funkcja kierunkowa oparta na charakterystyce $I_0 \sin \varphi$ lub $I_0 \cos \varphi$ pobudza się jeżeli prąd zerowy $I_0 \sin \varphi$ lub $I_0 \cos \varphi$ przekroczy wartość nastawioną.

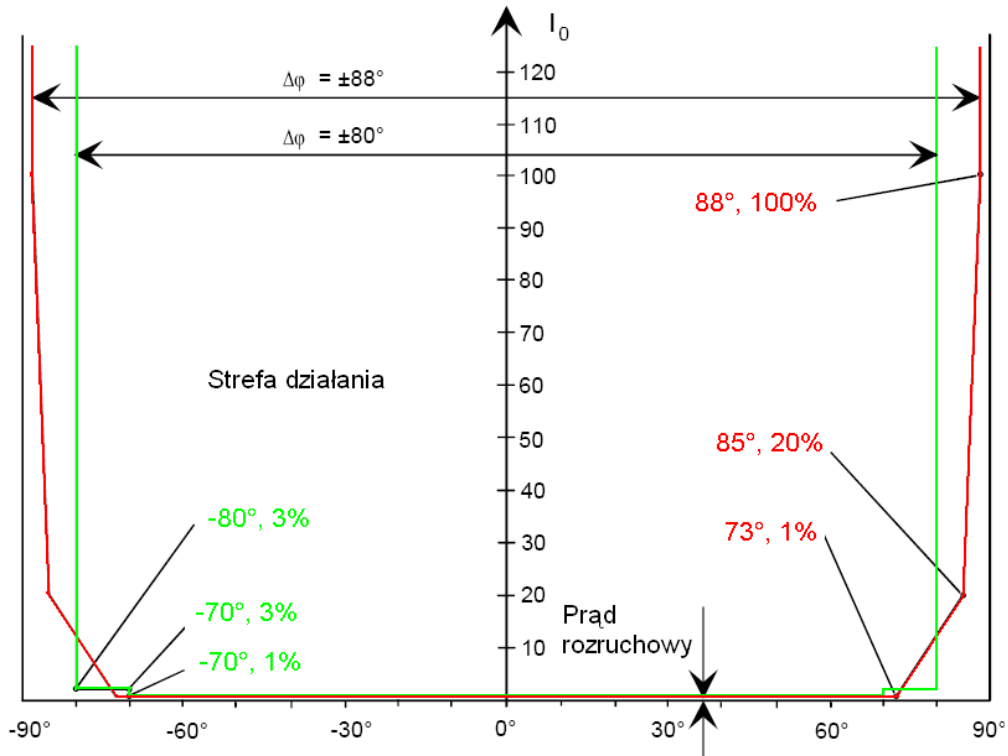
W przypadku gdy kryterium działania bloku DEF2 jest nastawione na Non-dir I_0 lub Non-dir U_0 blok ten działa w analogiczny sposób do opisanych wcześniej bloków funkcji odpowiednio NEF1 oraz ROV1.

Kąt podstawowy działania kierunkowego zależy od sposobu uziemienia sieci tzn. dla sieci izolowanej $\varphi_b = -90^\circ$ a dla kompensowanej $\varphi_b = 0^\circ$. W przypadku zastosowania automatyki AWSC kąt ten może być nastawiony na -60° lub -30° . Sektor działania $\Delta\varphi$ może być nastawiony na $\pm 80^\circ$ lub $\pm 88^\circ$. Kierunek działania przekaźnika „Forward” lub „Reverse” może być wybrany poprzez nastawę „Oper. direction”. Domyślną nastawą jest „Forward”, tzn przekaźnik zadziała kiedy kierunek przepływu mocy jest od szyn. Na rys 3.8 przedstawiono charakterystykę rozruchową dla kąta podstawowego $\varphi_b = -90^\circ$, $\Delta\varphi = 80^\circ$ oraz prądu pobudzenia $I_{0r} = 1.0\% \cdot I_n$.



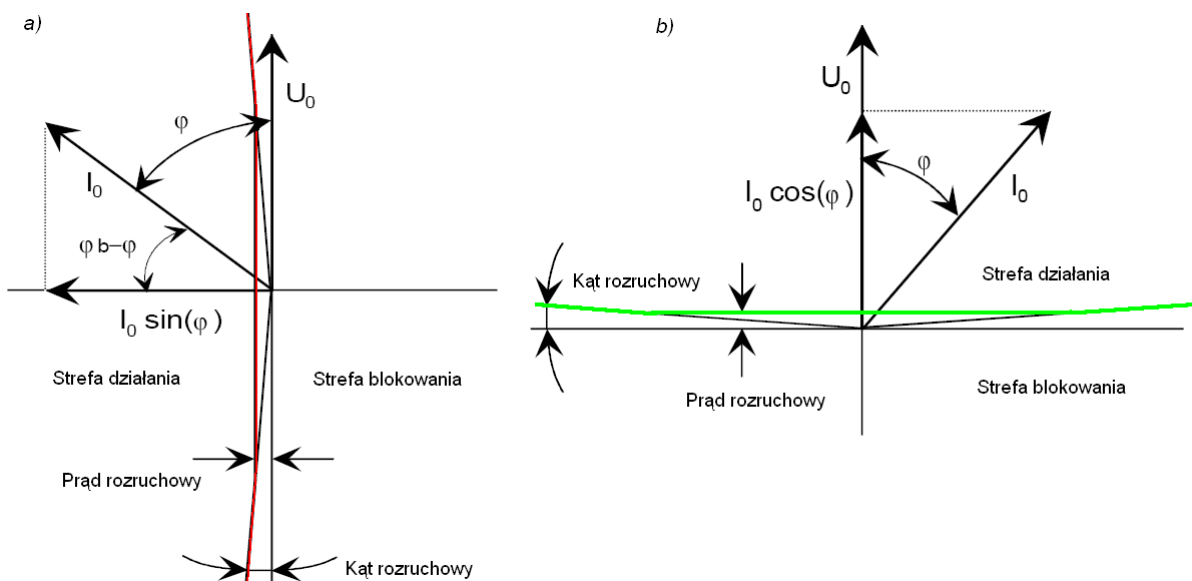
Rys. 3.7 Charakterystyka rozruchowa zabezpieczenia DEF2 dla kryterium podstawowego

$\varphi_b = -90^\circ$, $\Delta\varphi = 80^\circ$ oraz prądu pobudzenia $I_{0r} = 1.0\% \cdot I_n$



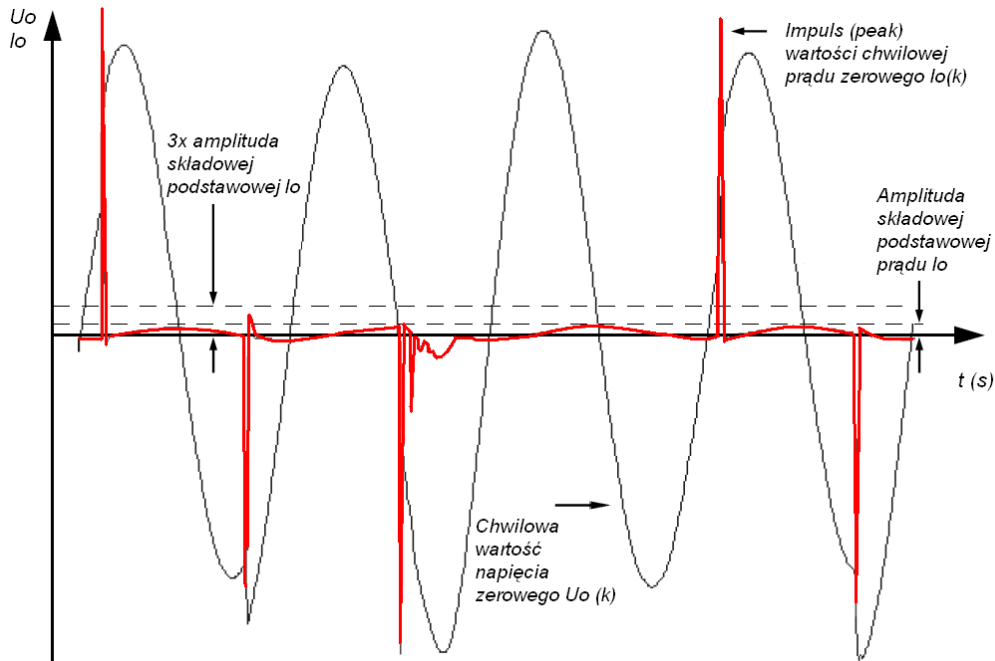
Rys 3.8 Charakterystyka działania funkcji DEF dla kryterium kąta podstawowego na wykresie $I_0 = f(\varphi)$, kiedy kąt podstawowy $\varphi_b = 0^\circ$

W przypadku funkcji kierunkowej opartej na kryterium $I_0 \sin \varphi$ lub $I_0 \cos \varphi$ charakterystyka działania kierunkowego zależy od sposobu uziemienia sieci: i tak dla sieci izolowanej powinna być stosowana charakterystyka $\sin \varphi$, a dla sieci kompensowanej charakterystyka $\cos \varphi$.



Rys. 3.9 Charakterystyki działania a) $I_0 \sin \varphi$ b) $I_0 \cos \varphi$

Jednym z poważnych problemów przy wykrywaniu i likwidacji zwarć doziemnych jest to, iż często są to zwarcia przerywane. Kierunek zwarcia doziemnego przerywanego może być wykryty za pomocą funkcji FSIGN, której działanie obrazuje rysunek 5.10.

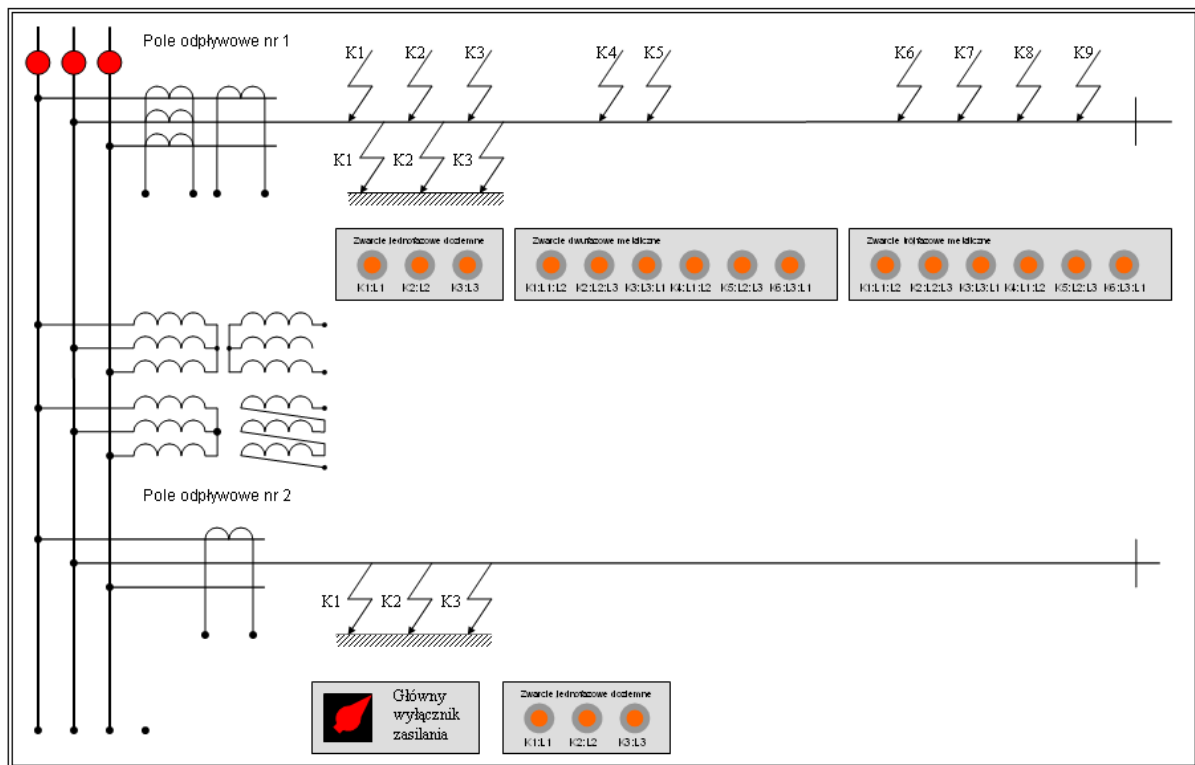


Rys 3.10 Zwarcie przerywane w zabezpieczonym obszarze

Zabezpieczenie od zwarć doziemnych przerywanych może pobudzić stopień zabezpieczeniowy jeżeli przekroczona zostanie określona ilość pików prądowych podczas określonego czasu i prąd zerowy przekroczy nastawioną wartość. Stopień zadziała nawet wówczas gdy kąt pomiędzy prądem i napięciem zerowym nie leży w zakresie działania wybranej charakterystyki. Zabezpieczenie to może być zastosowane tylko dla sieci kompensowanych i tylko w połączeniu z kryterium zwłoki czasowej DT (definite time).

4. Opis stanowiska laboratoryjnego

Opisywany model sieci elektroenergetycznej symuluje fragment sieci promieniowej średniego napięcia i składa się z dwóch linii podłączonych do pojedynczego systemu szyn zbiorczych. Płytę czołową stanowiska przedstawia rysunek 4.4.



Rys. 4.4 Płyta czołowa modelu sieci elektroenergetycznej

Na płycie czołowej znajdują się 3 grupy przycisków służących do symulacji zwarć jedno dwu i trój fazowych. Ponadto zwarcia trójfazowe mogą być zasymulowane w różnych odległościach od początku linii co daje możliwości testowania zabezpieczeń opartych na charakterystyce zależnej prądowo – czasowej. Istnienie dwóch linii podłączonych do jednego systemu szyn zbiorczych stwarza dogodne warunki do testowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych o charakterystyce kierunkowej. Możliwość zmiany sposobu pracy punktu neutralnego transformatora umożliwia zastosowanie przekaźnika REF jako zabezpieczenia służącego do eliminacji zwarć wieloprądowych w sieci WN ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym.

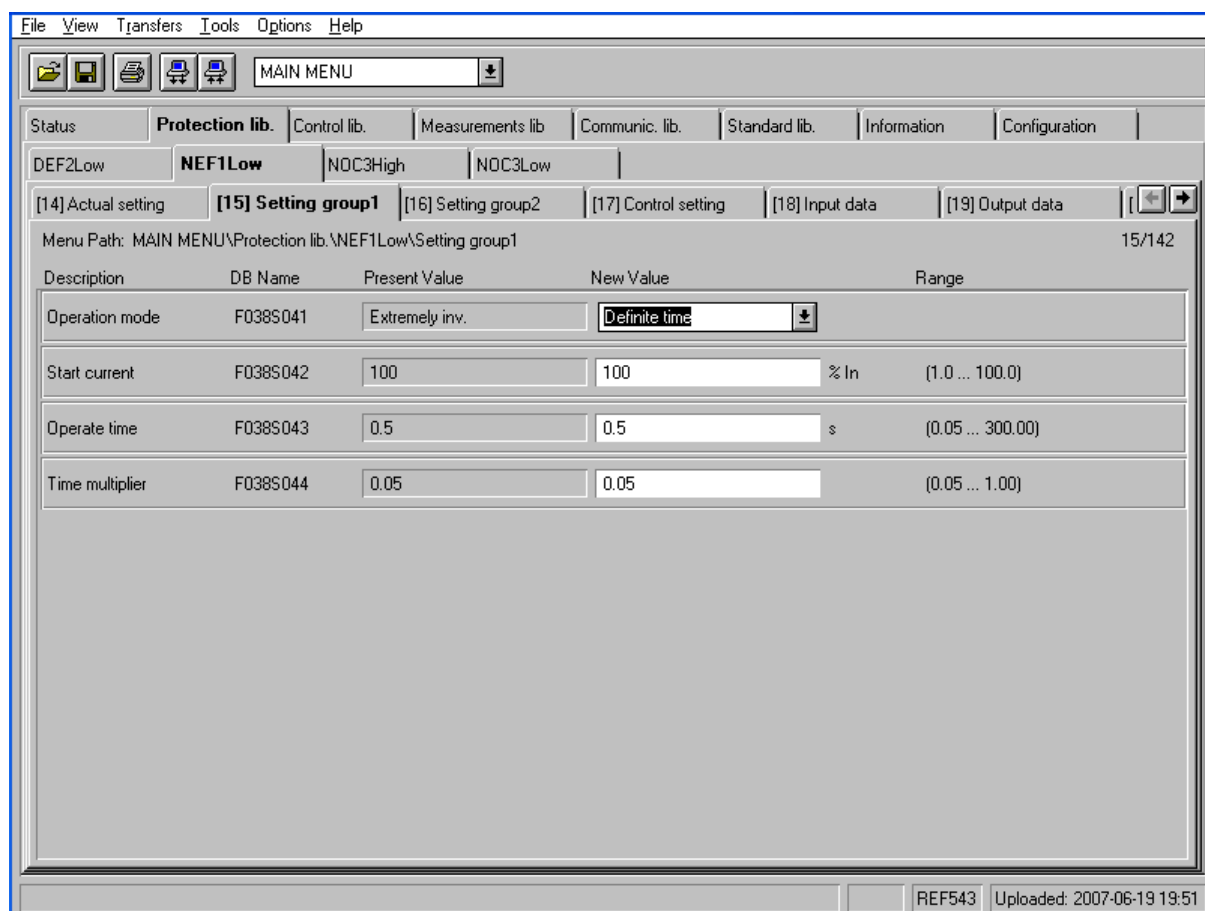
Na rysunku 4.5 pokazany jest schemat elektryczny modelu. Pierwszymi elementami od strony zasilania są trzy transformatory toroidalne jednofazowe o przekładni 230/24V, które

obniżają napięcie zasilające badaną sieć do wartości bezpiecznej dla obsługi i urządzeń. Grupa lampek sygnalizacyjnych ma za zadanie informować obsługę o obecności napięcia oraz w przypadku zwarć jednofazowych wskazuje fazę z doziemieniem. Zestaw trzech kondensatorów połączonych w gwiazdę symuluje pojemność doziemną szyn zbiorczych stacji. Rolę przekładników napięciowych spełniają transformatory 24/110V. Trzy z nich tworzą transformator trójfazowy o grupie połączeń Yy0 i odpowiadają za pomiar napięć fazowych. Kolejne trzy mają uzwojenia wtórne połączone w układ otwartego trójkąta i tworzą filtr składowej zerowej napięcia. Każde z pól odpływowych stacji posiada niezależny układ do pomiaru składowej zerowej prądu. Widoczna na schemacie (rys 4.5) grupa przełączników połączona z rezystorami wielkomocowymi jest odpowiedzialna za symulację różnego rodzaju zwarć. Kondensatory połączone w gwiazdę, których punkt wspólny połączony jest z przewodem symulującym obecność ziemi, służy do zamodelowania pojemności doziemnych przewodów linii. Obie linie zakończone są trzema rezystorami połączonymi w gwiazdę co powoduje przepływ tzw. prądu obciążenia wstępnego.

5. Wprowadzanie nastaw zabezpieczeń.

Jeżeli stworzona została konfiguracja i za pomocą łącza szeregowego wgrana do terminala, to kolejnym krokiem zmierzającym do uruchomienia układu jest wprowadzenie nastaw zabezpieczeń. Jeżeli w czasie eksploatacji sieci jej parametry zmieniają się to istnieje również możliwość zmiany nastaw zabezpieczeń podczas pracy terminala.

Nastawy w przekaźniku REF mogą być zmieniane dwoma niezależnymi drogami. Najprostszą ale jednocześnie najbardziej czasochłonną metodą jest bezpośrednie wprowadzanie nastaw każdego z zabezpieczeń poprzez przedni panel przekaźnika korzystając z klawiatury i wyświetlacza. Znacznie szybciej można wprowadzić nastawy za pomocą komputera PC z oprogramowaniem Relay Setting Tool.



Rys 5.1 Okno programu Realy Setting Tool

Aby dokonać nastaw poprzez menu terminala należy przejść z poziomu użytkowego do poziomu technicznego. Przejścia tego dokonuje się przez przytrzymanie przez dwie sekundy klawisza **E** i podanie hasła. Po wykonaniu tych dwóch czynności na ekranie terminala pojawia się menu główne. Aby wprowadzić nastawy zabezpieczeń należy z menu głównego wybrać **PROTECTION LIB.** i wcisnąć strzałkę w prawo. Zostanie wyświetlona lista wszystkich dostępnych funkcji zabezpieczeniowych. Po wybraniu odpowiedniej funkcji powtórnie wciskamy strzałkę w prawo, co spowoduje otwarcie podmenu tej funkcji. W drugiej linii znajduje się opis **SETTINGS GROUP1**, który umożliwia wprowadzenie nowych nastaw. Po wejściu do podmenu **SETTINGS GROUP1** mamy możliwość wprowadzenia odpowiednich parametrów rozruchowych wybranej funkcji.

Zdalne wprowadzanie nastaw jest możliwe za pośrednictwem komunikacji szeregowej. Optycznie izolowany port komunikacyjny na przednim panelu terminala służy zarówno do wgrywania konfiguracji jak i nastaw zabezpieczeń. Połączenie komputera z przekaźnikiem realizowane jest za pośrednictwem kabla komunikacyjnego 1MKC950001-1. Aby dokonać zmiany nastaw w pierwszej kolejności należy za pośrednictwem programu CAP 505 pobrać

program konfiguracyjny z przekaźnika. Po otwarciu tej konfiguracji w narzędziu Realy Setting Tool mamy bezpośredni dostęp do wszystkich zaimplementowanych funkcji zabezpieczeniowych.

6. Przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na zasymulowaniu różnego rodzaju zwarć oraz zaobserwowaniu reakcji terminala REF 543 na te zakłócenia.

6.1. Badanie funkcji trójfazowego zabezpieczenia bezkierunkowego NOC3

6.1.1. Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne

Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne jest realizowane przez funkcję NOC3high. Prąd rozruchowy tego zabezpieczenia obliczamy z zależności:

$$I_r = \frac{k_b I_{Z_{\max}}^{(3)}}{\eta_i} \quad (6.1)$$

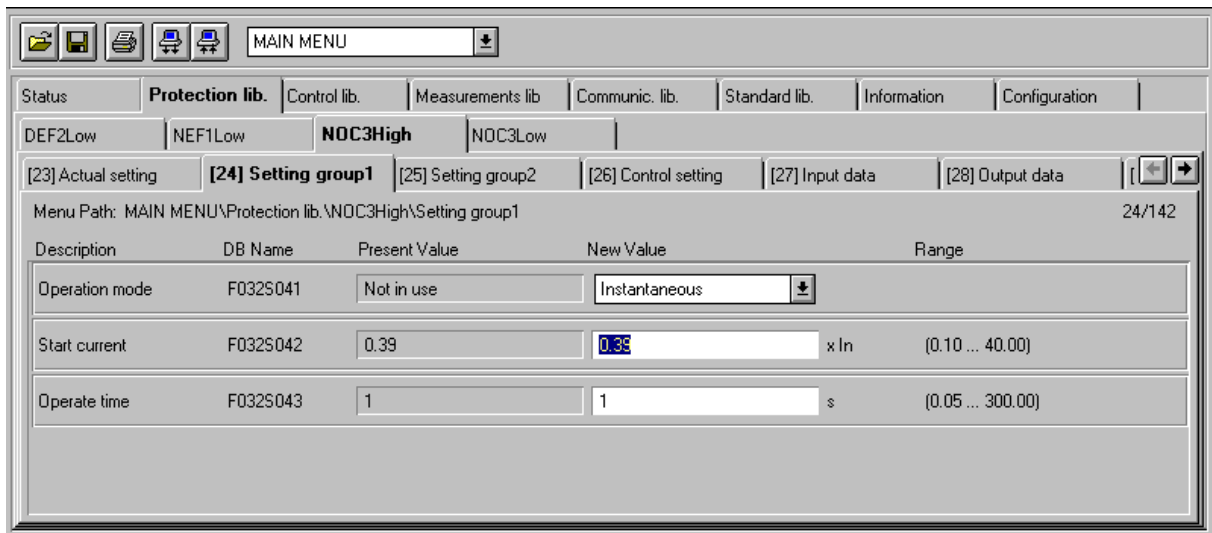
gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (przyjąć 1.5)

$I_{Z_{\max}}^{(3)}$ - prąd zwarcia trójfazowego na końcu zabezpieczanego odcinka czyli w punkcie K15

η_i - przekładnia przekładników prądowych (przyjąć 1).

Obliczoną wartość prądu rozruchowego I_r wprowadzamy do nastaw terminala w polu pokazanym na rysunku 6.1.



Rys. 6.1 Wprowadzanie nastaw zabezpieczenia bezzwłocznego

Po wprowadzeniu nastaw należy je przesłać do terminala za pomocą opcji **Download**. Po wykonaniu tych czynności należy na modelu linii SN zasymulować zwarcia międzyfazowe i w tabeli 6.1 zanotować reakcję zabezpieczeń na powstałe zakłócenia.

Tabela 6.1

Prąd rozruchowy zabezpieczenia bezzwłocznego $I_r = \dots$ A												
Miejsce zwarcia	K15	K14	K13	K12	K11	K10	K9	K8	K7	K6	K5	K4
Działanie (0/1)												

Wnioski:

6.1.2. Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne

Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne jest realizowane przez funkcję NOC3low. Prąd rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego powinien spełniać następującą nierówność:

$$I_r \geq \frac{k_b k_r k_s I_{\max}}{k_p n_i} \quad (6.2)$$

gdzie:

I_{\max} - prąd największego obciążenia zabezpieczanego odcinka linii po stronie pierwotnej przekładników prądowych (ponieważ sieć ma stałą wartość obciążenia wartość tego prądu należy odczytać z przekąźnika),

k_b - współczynnik bezpieczeństwa (przyjąć 1.2),

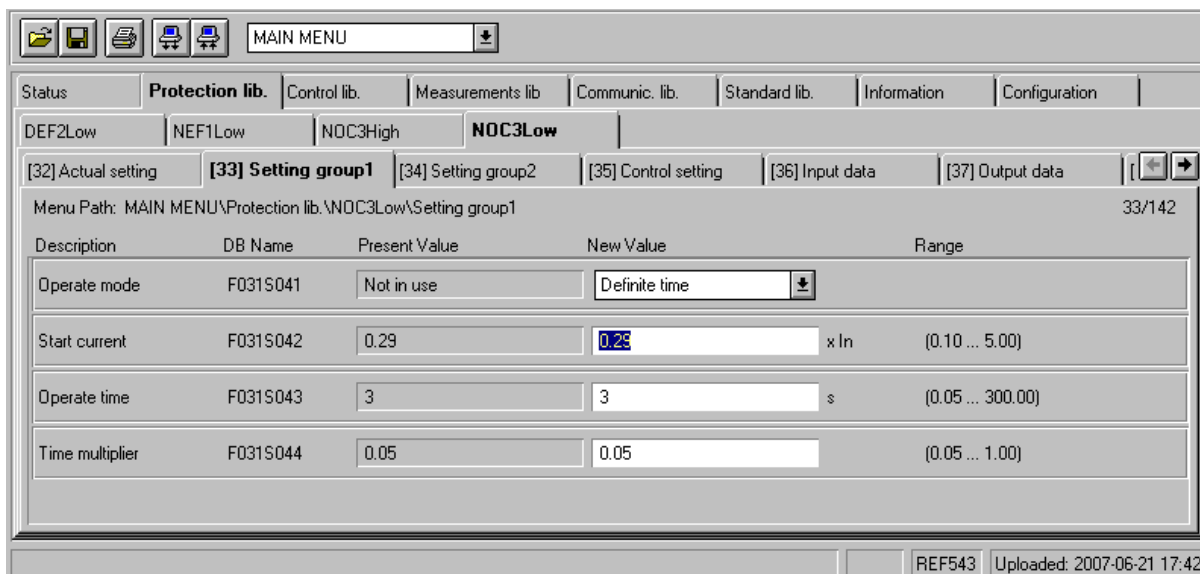
k_r - współczynnik samorozruchu silników (przyjąć 2),

k_s - współczynnik schematowi (przyjąć 1),

k_p - współczynnik powrotu (przyjąć 0.95)

η_i - przekładnia przekładników prądowych (przyjąć 1)

Obliczoną wartość prądu należy wpisać w nastawach przełącznika zgodnie z rysunkiem:



Rys. 6.2 Wprowadzanie nastaw zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego

Tabela 6.2

Prąd rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego $I_r = \dots A$												
Miejsce zwarcia	K15	K14	K13	K12	K11	K10	K9	K8	K7	K6	K5	K4
Działanie (0/1)												

W celu sprawdzenia warunku czułości zabezpieczenia nadprądowego należy sprawdzić następującą zależność:

$$I_r \leq \frac{k_s I_{z \min}}{k_c \eta_i} \quad (6.3)$$

gdzie:

$I_{z \min}$ - najmniejsza wartość prądu zwarcia w przypadku zwarcia metalicznego na końcu zabezpieczanego odcinka obliczona ze wzoru:

$$I_{z \min} = \frac{\sqrt{2} I_{K15}^{(3)}}{\sqrt{3}} \quad (6.4)$$

k_s - współczynnik schematowi (przyjąć 1, połączenie przekładników gwiazda-gwiazda),

η_i - przekładnia przekładników prądowych (przyjąć 1),

k_c - współczynnik czułości (przyjąć 1.5 dla zabezpieczenia podstawowego),

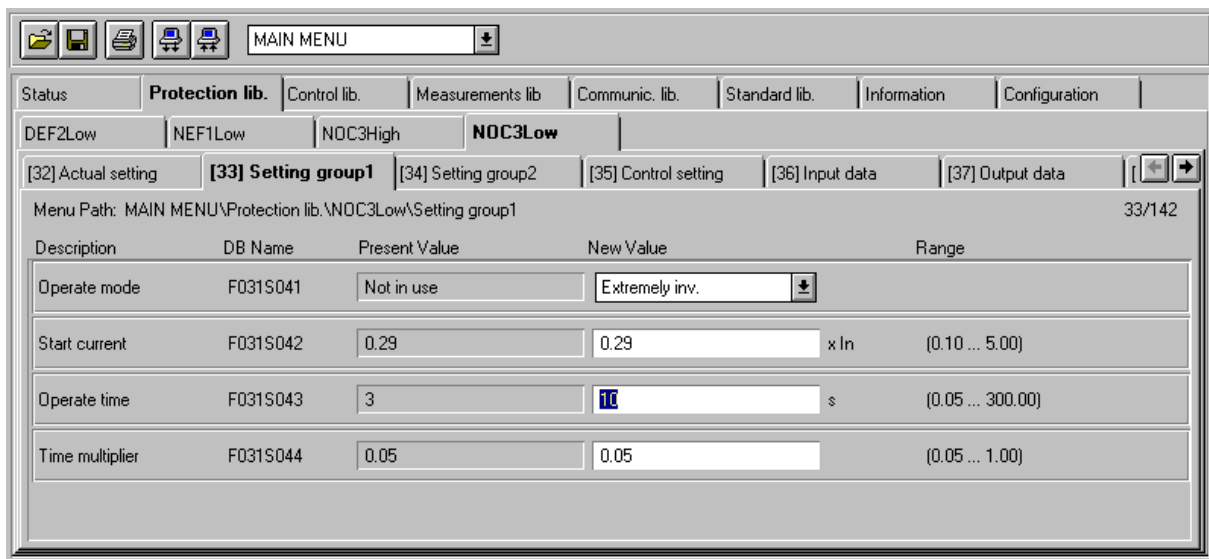
Wnioski:.....

6.1.3. Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne oparte na charakterystyce czasowo prądowej zależnej

Zastosowanie charakterystyki czasowo prądowej zależnej jest jednym ze sposobów zwiększenia selektywności zabezpieczeń nadprądowych. Charakterystyka czasowo prądowa zależna umożliwia selektywne wyłączenie zwarć w długich, wieloodcinkowych liniach promieniowych gdzie zastosowanie charakterystyki niezależnej powoduje, iż zwarcia położone blisko stacji zasilającej, cechujące się dużymi mocami zwarciovymi są wyłączone ze stosunkowo długim czasem.

Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne z charakterystyką czasowo prądową zależną jest stosowane w sieciach elektroenergetycznych do sygnalizacji przeciążeń.

Sposób nastawienia charakterystyki czasowo prądowej zależnej przedstawia rysunek 6.3.



Rys. 6.3 Wprowadzanie nastaw zabezpieczenia nadprądowego zwłoczego

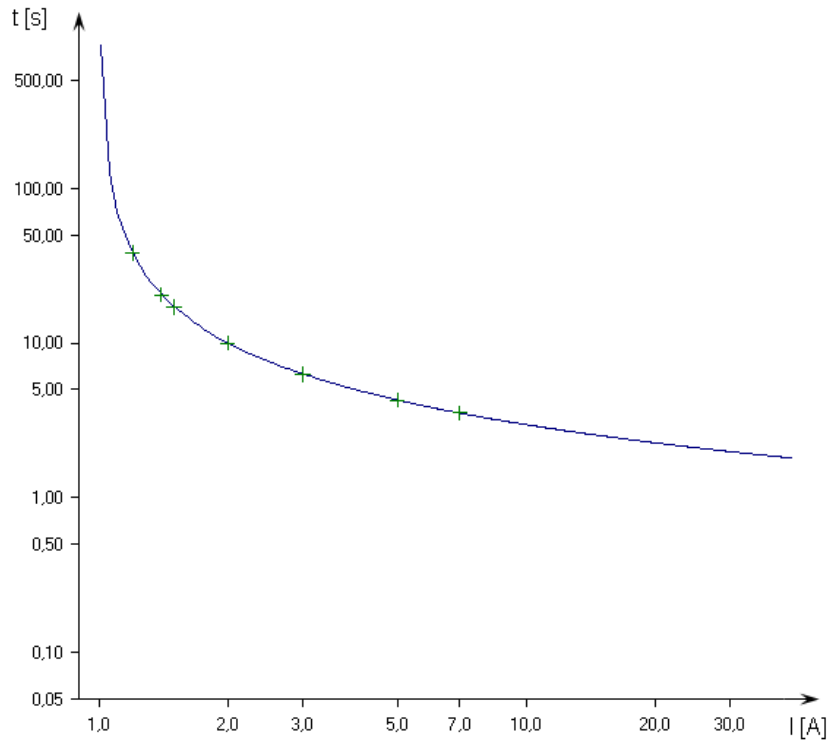
Po wprowadzeniu nastaw należy za pomocą klawiatury terminala przejść do ekranu EVENTS (ang. zdarzenia) i poprzez dwukrotne przytrzymanie klawisza C skasować listę zdarzeń. Następnie należy kolejno symulować zwarcia międzyfazowe, odczytując z amperomierzy prąd zwarcia. Po zapaleniu się czerwonych diod sygnalizacyjnych z menu EVENTS należy odczytać czas zdarzeń E0 (E1), które odpowiadają pobudzeniu zabezpieczenia oraz zdarzeń E2 (E3), które odpowiadają zadziałaniu stopnia i podaniu impulsu na sygnalizację. Różnica tych dwóch czasów odpowiada zwłoce czasowej dla danej wartości prądu zwarcia. Wyniki pomiarów należy umieścić w tabeli 6.

Tabela 6.3

Miejsce zwarcia	Prąd zwarciaowy I_k	Czas pobudzenia E0	Czas zadziałania E2	Zwłoka czasowa
-	A	hh:mm:ss:ms	hh:mm:ss:ms	s
K1				
K2				
K3				
K4				
K5				
K6				
K7				
K8				
K9				
K10				
K11				
K12				
K14				
K15				

Na podstawie tabeli 6.3 należy wykreślić charakterystykę czasowo prądową.

Przebieg przykładowej charakterystyki przedstawiony jest na rys 6.4.



Rys. 6.4 Charakterystyka prądowo czasowa zależna

Wnioski:

6.2. Badanie funkcji zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego DEF2

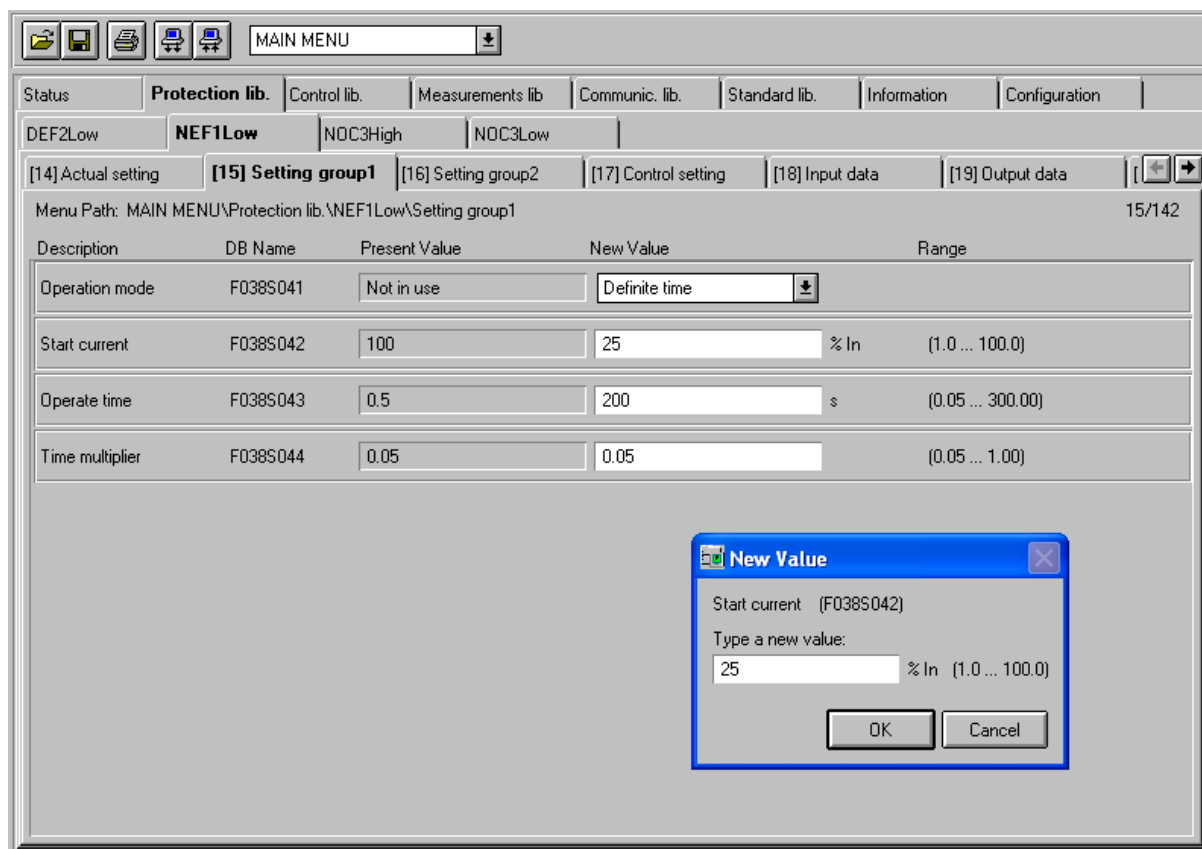
6.2.1. Zabezpieczenie bezkierunkowe oparte na kryterium prądu zerowego

Zabezpieczenia tego typu są stosowane w sieciach SN gdzie nie zastosowano kompensacji prądu ziemnozwarciowego. Z rozplywu prądu zwarcia doziemnego wynika, że przez punkt zabezpieczeniowy przepływa prąd pojemnościowy $3I_{CS}$ związany z pojemnością C_S pozostałej części sieci. Jeżeli natomiast zwarcie nastąpi poza linią zabezpieczaną wówczas przez punkt zabezpieczeniowy płynie prąd $3I_{CL}$ zamykający się przez pojemność C_L tej linii.

Prąd rozruchowy tego zabezpieczenia dobiera się zgodnie ze wzorem:

$$\frac{3I_{CS}}{k_c} \geq I_r \geq k_b 3I_{CL} \quad (6.5)$$

Prąd rozruchowy obliczony ze wzoru 6.5 wprowadzamy do nastaw zabezpieczenia NEF zgodnie z rysunkiem 6.5. Prąd In jest równy 0.2A.



Rys 6.5 Sposób wprowadzania nastaw zabezpieczenia NEF1

Należy przeprowadzić symulację zwarcia jednofazowych doziemnych w obu liniach badanej stacji. Wyniki badań zanotować w tabeli 6.4.

Tabela 6.4

Prąd rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego zerowego bezkierunkowego $I_r = \dots A$						
Miejsce zwarcia	Zwarcie w linii 1			Zwarcie w linii 2		
	K15	K14	K13	K12	K11	K10
Działanie (0/1)						

Wnioski:

6.2.2. Zabezpieczenie oparte na kryterium kątowym

Zabezpieczenie to jest stosowane wtedy gdy zabezpieczenie oparte wyłącznie na kryterium prądu zerowego w sieci izolowanej nie zapewnia selektywnego lokalizowania zwarcia, lub gdy w sieci zastosowano kompensację prądu zerowego.

W celu uruchomienia zabezpieczenia kierunkowego należy dokonać czynności pokazanych na rys 6.6

Description	DB Name	Present Value	New Value	Range
Operation mode	F040S041	Definite time	Definite time	
Oper. criteria	F040S042	Non-dir.lo	BasicAng	
Oper. direction	F040S043	Forward	Forward	
Basic angle d'b	F040S044	-90f	-90f	
Oper. charact.	F040S045	IoSin(i)	IoSin(i)	
Start current	F040S046	15	15	% In (1.0 ... 25.0)
Start voltage	F040S047	10	10	% Un (2.0 ... 100.0)
Operate time	F040S048	300	300	s (0.1 ... 300.0)
Time multiplier	F040S049	0.05	0.05	(0.05 ... 1.00)
Intermittent E/F	F040S050	Not active	Not active	

Należy przeprowadzić symulację zwarcia jednofazowych doziemnych w obu liniach badanej stacji. Wyniki badań zanotować w tabeli 6.5.

Tabela 6.5

Prąd rozruchowy zabezpieczenia nadprądowego zerowego kierunkowego $I_r = \dots A$						
Miejsce zwarcia	Zwarcie w linii 1			Zwarcie w linii 2		
	K15	K14	K13	K12	K11	K10
Działanie (0/1)						

Wnioski:

7. Zakończenie.

Podczas przeprowadzania badań należy uzupełnić tabele 6.1 – 6.5. Na ich podstawie wysnuć wnioski odnoszące się do działania zabezpieczeń.

Uwaga: Wszystkie badane funkcje są przeznaczone do badań w sposób świadomy. Nie wszystkie z nich są odpowiednie dla zabezpieczanej linii. Mogą nastąpić działania zbędne, brakujące itd.. Wszystko to ma na celu wyjaśnienie zasad, odpowiedniego doboru zabezpieczeń do warunków panujących na obiekcie.

Pytania i zadania kontrolne.

1. Wymienić i omówić funkcje przekaźnikowe zawarte w urządzeniu REF 543.
2. Omówić sposób zmiany nastawień urządzenia REF 543 z poziomu przekaźnika i komputera PC.
3. Omówić zasadę działania urządzenia REF 543.
4. Narysować wykresy fazorowe prądów i napięć w punkcie przekaźnikowy:
 - a) linia promieniowa – zwarcie trójfazowe na początku i na końcu linii,
 - b) linia promieniowa – zwarcie dwufazowe na początku i na końcu linii,
 - c) linia promieniowa – zwarcie dwufazowe z udziałem ziemi na początku i na końcu linii,
 - d) a) linia promieniowa – zwarcie jednofazowe na początku i na końcu linii,