



Politechnika Warszawska

Instytut Elektroenergetyki

**Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej
Laboratorium Automatyki Elektroenergetycznej Cyfrowej**

Instrukcja laboratoryjna

Badanie funkcji i cech przekaźników nadprądowych

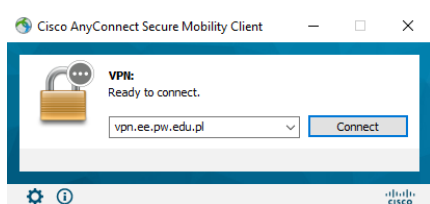
1 Zdalne stanowiska laboratoryjne wykorzystujące program PSCAD

Uniwersalna zdalna platforma do prowadzenia zajęć laboratoryjnych wykorzystująca wirtualizację systemów operacyjnych oraz interfejs www ma na celu umożliwienie prowadzenia wielu różnorodnych zajęć laboratoryjnych realizowanych w ramach Zakładu Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej ZAiAE w trybach synchronicznym, asynchronicznym oraz hybrydowym. Zbudowana platforma laboratoryjna składa się z dwóch elementów: serwera dostępowego z uruchomionymi kilkunastoma maszynami wirtualnymi z zainstalowanym programem PSCAD oraz utworzonych modeli i instrukcji odwzorowujących prowadzone dotychczas w formie stacjonarnej laboratoria. Podstawowym założeniem zbudowanej platformy jest zapewnienie wysokiej jakości merytorycznej realizowanych zajęć oraz ich uatrakcyjnienie z punktu widzenia studentów, jak również opracowanie mechanizmów pozwalających na prosty i intuicyjny dostęp do wirtualnych stanowisk laboratoryjnych.

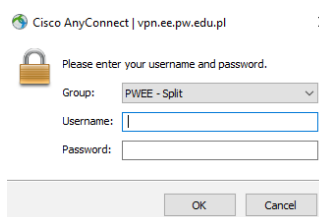
Sposób działania zdalnej platformy laboratoryjnej opiera się na mechanizmie wirtualizacji systemów operacyjnych. W ramach zdalnej platformy wykorzystano serwer z aktywowanymi 15 maszynami wirtualnymi, które zostały skonfigurowane w taki sposób, aby spełnić wymagania dla typowych grup laboratoryjnych uczęszczających na zajęcia w Instytucie Elektroenergetyki PW (IEN PW). Serwer został zainstalowany w Gmachu Mechaniki, gdzie wykorzystano istniejące systemy bezpieczeństwa IT (sprzętowy firewall, urządzenie tunelowe VPN oraz szyfrowany protokół https) i podłączone do sieci komputerowej zapewniającej dostęp z sieci lokalnej Gmachu Mechaniki oraz sieci internet, za pośrednictwem tunelu VPN.

W ramach budowy platformy opracowano aplikację dostępową pozwalającą na jednoczesny dostęp do systemu 15 studentów. Studenci uzyskują dostęp do przypisanych maszyn wirtualnych i ich zasobów poprzez opracowany na potrzeby systemu interfejs www bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania a wszelkie aplikacje narzędziowe konieczne do przeprowadzania ćwiczenia są zainstalowane na udostępnianych maszynach wirtualnych. Takie podejście zapewnia możliwość prowadzenia zajęć z dowolnego miejsca niezależnie czy będzie to laboratorium w budynkach uczelni czy domy uczestników zajęć, jak również pozwala na dostęp do systemów asynchronicznie, poza wyznaczonymi godzinami zajęć.

W celu uzyskania dostępu do platformy testowej konieczne jest posiadanie przez zainteresowaną osobę aktywnego konta na Wydziale Elektrycznym. Po zainstalowaniu aplikacji *Cisco Any Connect Secure Mobility Client* oraz wpisaniu adresu serwera dostępowego pokazanego na Rys. 1.1 przechodzimy do okna z prośbą o wpisanie loginu i hasła (Rys. 1.2). Po uzyskaniu potwierdzenia dostępu do sieci Wydziału elektrycznego możliwe jest połączenia z serwerem platformy laboratoryjnej.



Rys. 1.1. Aplikacja do połączenia VPN



Rys. 1.2. Połączenie VPN – prośba o login i hasło do konta na WE

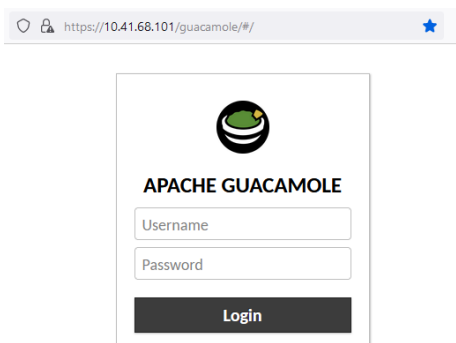
Serwer zdalnej platformy laboratoryjnej ma przydzielony adres:

<https://10.41.68.101/guacamole>

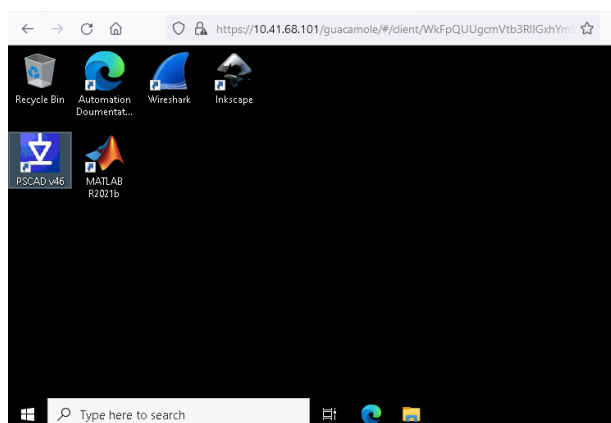
Po wpisaniu adresu do przeglądarki uzyskamy widok z prośbą o podanie loginu i adresu do konkretnej maszyny wirtualnej pokazany na Rys. 1.3.

Login i hasło można uzyskać indywidualnie u prowadzącego.

Po uzyskaniu dostępu do maszyny wirtualnej użytkownik widzi w przeglądarce pulpit systemu operacyjnego z zainstalowanymi dodatkowymi aplikacjami np. PSCAD (Rys. 1.4). Już w tym momencie można w pełni korzystać z funkcjonalności wszystkich aplikacji zainstalowanych w wybranym systemie. Do pracy z programem PSCAD konieczne jest połączenie z serwerem licencji, które realizowane jest automatycznie po zalogowaniu do maszyny wirtualnej.



Rys. 1.3. Prośba o podanie hasła i loginu do wybranej maszyny wirtualnej

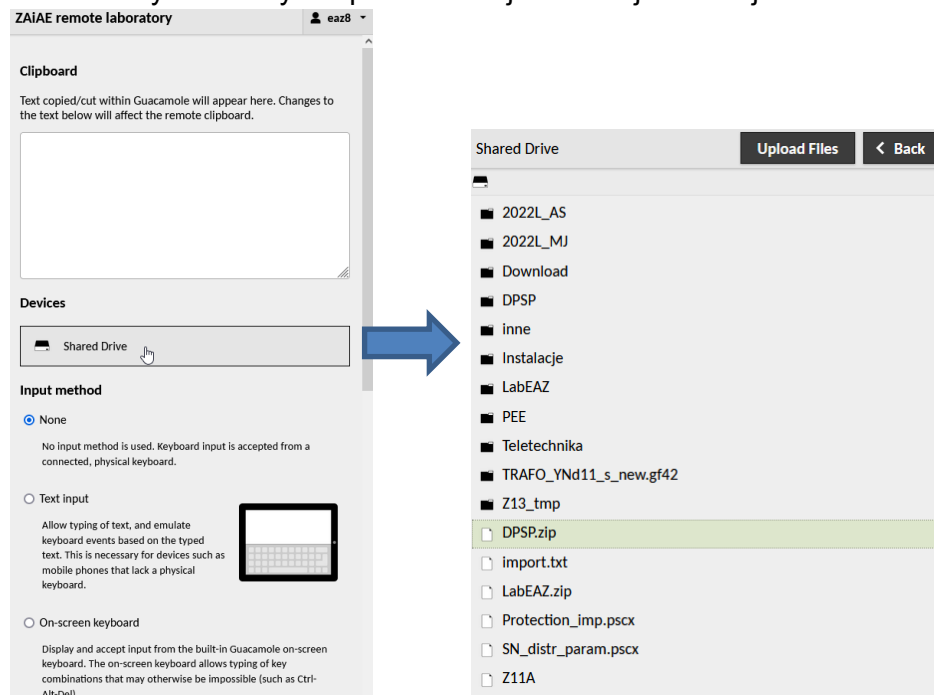


Rys. 1.4. Widok pulpitu wybranej maszyny wirtualnej

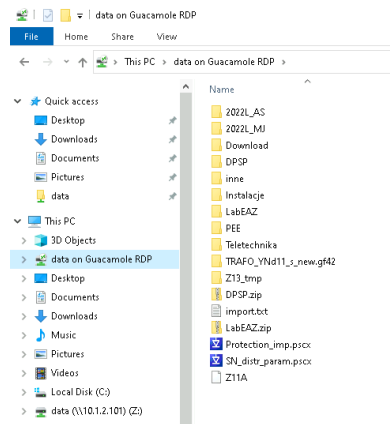
W przypadku konieczności pobrania lub przesłania na serwer plików np. z symulacjami konieczne jest wykorzystanie dodatkowego menu do którego uzyskujemy dostęp po naciśnięciu trzech przycisków *Shift+Ctrl+Alt*. Pojawia się wtedy okno pokazane na Rys. 1.5, gdzie należy wybrać opcję Shared Drive. Po kliknięciu na przycisk uzyskujemy dostęp do zasobów dyskowych serwera. Dwukrotne szybkie kliknięcia na plik daje możliwość pobrania go na własny komputer. Natomiast kliknięcie przycisku *Upload files* pozwala na wysłanie plików na serwer.

Po zakończeniu przesyłania plików należy zamknąć dodatkowe menu przez ponowne naciśnięcie trzech przycisków *Shift+Ctrl+Alt*. Dostęp do przesłanych plików jest możliwy systemie Windows z katalogu `\data on Guacamole RDP` podświetlonego na Rys. 1.6.

Ze względu na przydzielane uprawnienia, przesłane na maszynę wirtualną pliki z symulacjami należy skopiować na dysk lokalny i dopiero z takiej lokalizacji można je uruchamiać.



Rys. 1.5. Widok dodatkowego menu maszyny wirtualnej



Rys. 1.6. Katalog z plikami przegranymi na maszynę wirtualną

2 Wprowadzenie teoretyczne

2.1 Przekąźniki nadprądowe

Zabezpieczenie nadprądowe jest jednym z najpowszechniejszych zabezpieczeń stosowanych w elektroenergetyce. W uproszczeniu jego działanie polega na pomiarze wartości płynącego prądu i reagowaniu na jego przekroczenie ponad określoną wartość.

Możliwość stosowania tego rodzaju zabezpieczenia określa warunek (2.1):

$$I_{kmin}'' > I_{rp} > I_{robmax} \quad (2.1)$$

gdzie: I_{kmin}'' – najmniejsza wartość prądu zwarciovego w punkcie zainstalowania zabezpieczenia, I_{rp} – prąd rozruchowy zabezpieczenia, I_{robmax} – maksymalny prąd roboczy zabezpieczanego elementu. W zależności jaki obiekt jest zabezpieczany i jaki rodzaj zabezpieczenia nadprądowego jest stosowany, warunek ten uściśla się.

Ogólnie zabezpieczenie nadprądowe w zależności od sposobu działania można podzielić na dwa rodzaje: zwłoczne oraz bezzwłoczne.

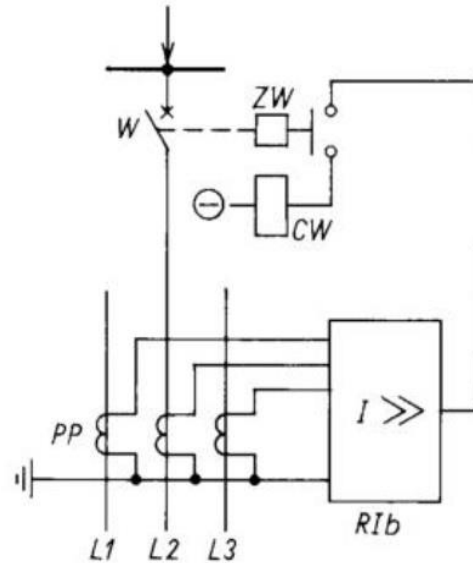
2.1.1 Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne

Od elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej wymaga się, między innymi aby wyłączenie elementów dotkniętych ciężkimi zakłóceniami, takimi jak zwarcia wielkopądowe następowało w możliwie najkrótszym czasie. Celem tego jest wyeliminowanie skutków tych zakłóceń, takich jak oddziaływanie cieplne prądu zwarciovego na elementy obwodu w którym to zwarcie występuje. Jedną z metod przeciwdziałania jest zastosowanie zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego, które po wykryciu zakłócenia wysyła impuls na wyłączenie uszkodzonego obiektu natychmiast po przekroczeniu określonej wartości prądu rozruchowego tego zabezpieczenia.

Niestety stosowanie zabezpieczenia bezzwłocznego jest mocno ograniczone. Wpływ na to ma inne z wymagań stawianych elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej, a mianowicie selektywność działania zabezpieczeń. Ze względu na to wymaganie zwiększa się prąd rozruchowy jednego z zabezpieczeń, aby wspomniana selektywność została zapewniona, co np. w przypadku linii elektroenergetycznych skutkuje zmniejszeniem obszaru działania zabezpieczenia. W rezultacie chroniona jest tylko część rozpatrywanego obiektu, zamiast jego całości.

Z przyczyn wcześniej wymienionych zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne nie jest powszechnie stosowane. W praktyce używa się je tylko do ochrony linii rozdzielczych oraz odbiorów w sieciach rozdzielczych, takich jak silniki indukcyjne WN. W przypadku silników jedyną rzeczą o której należy pamiętać to wzrost prądu podczas rozruchu silnika, przez co należy tak nastawić wartość rozruchową zabezpieczenia, aby nie dochodziło do jego niepotrzebnego zadziałania.

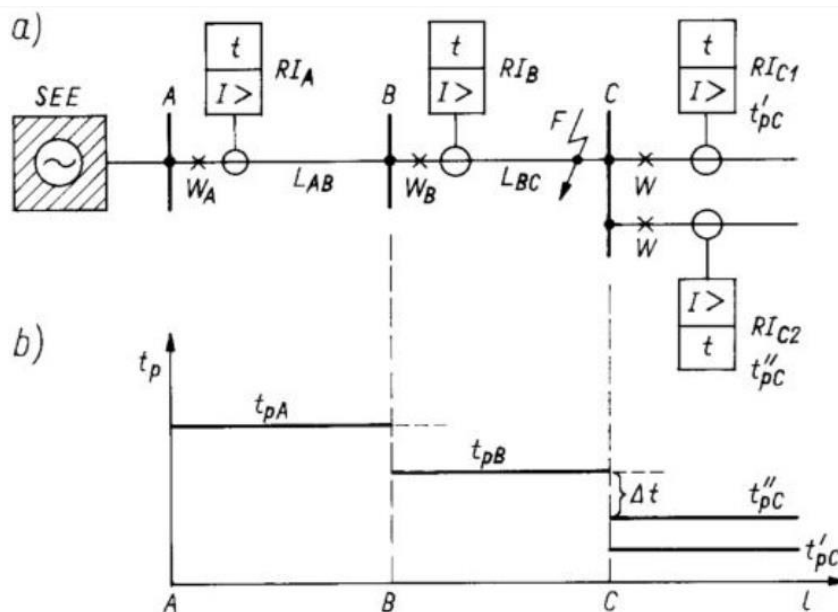
Uproszczony schemat blokowy zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego przedstawiono na rys. 2.1. Przekładniki prądowe PP, zazwyczaj połączone w gwiazdę lub niepełną gwiazdę, wysyłają sygnał pomiarowy do przekąźnika R_b . Gdy nastąpi przekroczenie nastawionej wartości rozruchowej zabezpieczenia wysyła ono sygnał do wyłącznika W na jego otwarcie. Cewka CW napędu wyłącznika pobudza zamek ZW, który to otwiera wyłącznik i zwarcie zostaje wyeliminowane.



Rys. 2.1. Schemat zabezpieczenia nadprądowego bezwłocznego [1]

2.1.2 Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne

Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne, jak wynika z jego nazwy, ma pewne opóźnienie w swoim działaniu. Może wydawać się to sprzeczne z logiką, gdyż od zabezpieczeń wymaga się jak najszybszego działania, ale taki zabieg jest jak najbardziej uzasadniony. Zwłoki czasowe wprowadza się w celu zachowania selektywności oraz zwiększenia strefy działania zabezpieczenia na cały chroniony obiekt. Jako przykład można wziąć sieć promieniową przedstawioną na rys. 2.2a.

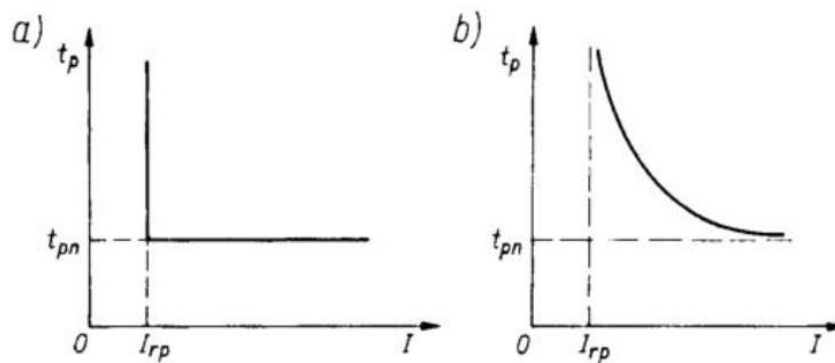


Rys. 2.2. Sieć promieniowa chroniona zabezpieczeniami nadprądowymi zwłocznymi (a), opóźnienia poszczególnych przekaźników (b) [1]

Wartość prądu rozruchowego poszczególnych zabezpieczeń R_{IA} , R_{IB} , R_{IC1} i R_{IC2} dobiera się zgodnie z zależnością (2.1). Bez wprowadzania zwłok czasowych t_{pA} , t_{pB} i t_{pC} w

przełącznikach mogłoby dojść do ich nieselektywnego zadziałania. Przykładowo przy zwarceniu w punkcie F pobudziłby się przełącznik R/B , co jest pożądane, ale także przełącznik R/A , co spowodowałoby niepotrzebne wyłączenie zdrowej linii L_{AB} , gdyż płynie w niej taki sam prąd zwarciaowy jak w zwartej linii L_{BC} . Dlatego też aby uniknąć takiej sytuacji stosuje się stopniowanie czasów, czyli wprowadzanie różnicy czasu Δt (wynoszącej dla starszych zabezpieczeń zazwyczaj 0,5 s, dla nowszych 0,3 s) dla kolejnych zabezpieczeń linii, co przedstawia rys. 2.2b.

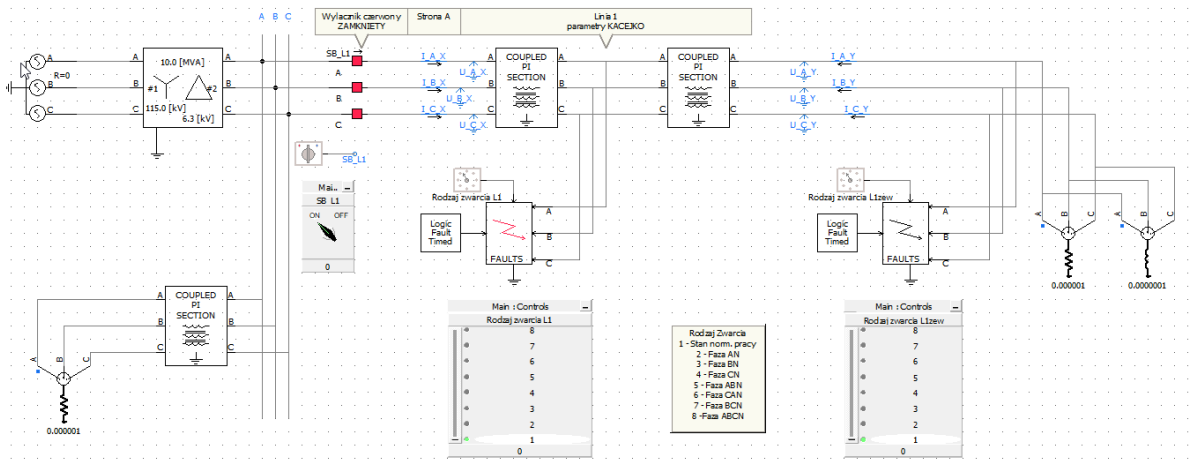
W analizowanym przykładzie założono, że zabezpieczenia te są o charakterystyce niezależnej, tzn. szybkość ich działania nie zależy od wartości płynącego prądu. Istnieją jeszcze przekładniki o charakterystyce zależnej, dla których czas działania jest funkcją prądu. Przykładowe charakterystyki przedstawiono na rys. 2.3a – charakterystyka niezależna oraz rys. 2.3b – charakterystyka zależna.



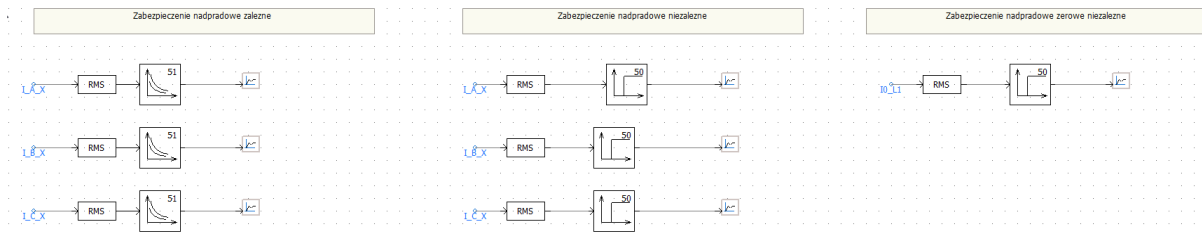
Rys. 2.3. Charakterystyka niezależna przełącznika nadprądowego (a), charakterystyka zależna (b) [1]

3 Opis modelu

Niniejsza instrukcja laboratoryjna ma na celu wprowadzenie studenta w środowisko PSCAD i umożliwienie wykonania ćwiczenia związanego przedstawieniem podstawowych cech przekaźników nadprądowych. W tym celu wykorzystany zostanie model pokazany na Rys. 3.1. Przedstawia on jedną linię SN o długości 30 km i napięciu znamionowym 15 kV. Dzięki użyciu dwóch zwarcionników na początku i na końcu linii możliwe jest sprawdzenie działania przekaźników nadprądowych (Rys. 3.2) dla różnych prądów zwarcia.



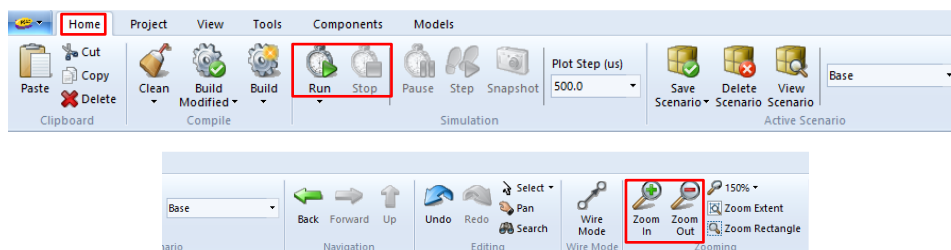
Rys. 3.1. Model linii SN 15 kV pozwalający na sprawdzenie działania przekaźników nadprądowych



Rys. 3.2. Zamodelowane przekaźniki nadprądowe

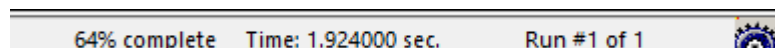
4 Podstawowe informacje potrzebne do wykonania symulacji

W celu przybliżenia lub oddalenia fragmentów modelu należy posługiwać się ikonami „Zoom in”, „Zoom out”, znajdującymi się w menu Home dostępnym na górnym pasku zadań pokazanym na Rys. 4.1. Aby rozpocząć symulację, trzeba kliknąć ikonę „Run”. Do jej przerwania służy ikona „Stop”.



Rys. 4.1. Podstawowe ikony i ich umiejscowienie w głównym pasku zadań

Na samym dole okna, po prawej stronie można kontrolować postęp wykonywania symulacji oraz czas jej trwania – Rys. 4.2.



Rys. 4.2. Czas i postęp symulacji

W przypadku wystąpienia błędów podczas kompilacji modelu będą one widoczne w oknie pokazanym na Rys. 4.3. Prawidłowo przeprowadzona kompilacja nie powinna wykazywać żadnych błędów oznaczanych wykrzyknikiem w czerwonym kółku. Kompilacja modelu wykonywana jest po każdym rozpoczęciu symulacji.



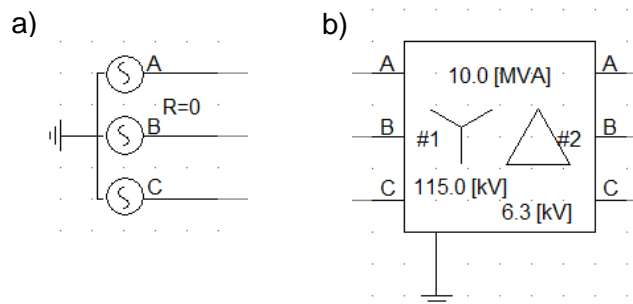
Rys. 4.3. Okno przebiegu kompilacji modelu

5 Opis najważniejszych elementów modelu

Model składa się z elementów takich jak: źródło, transformator, transformator uziemiający, szyna, idealne mierniki, czworniki typu PI, zwarcionniki, obciążenie. Dodatkowo, w celu spisania wyników oraz zobrazowania zjawisk zawarto wskaźniki oraz wykresy. Poniżej opisano najważniejsze fragmenty modelu.

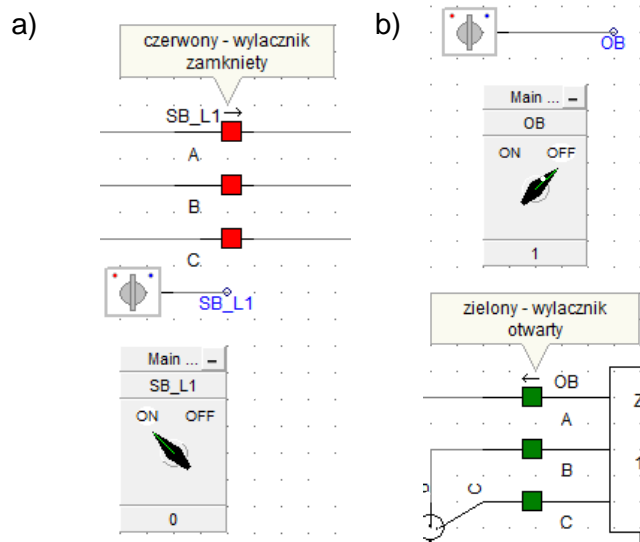
Zasilane modelu wykonano poprzez zastosowanie idealnego źródła trójfazowego, o częstotliwości 50 Hz i napięciu, przedstawionym na Rys. 5.1a.

Transformator o mocy 10 MV widoczny na Rys. 5.1b jest na napięcie WN/SN, w układzie połączeń gwiazda-trójkąt. Posiada przekładnię równą 115/6,3.



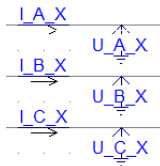
Rys. 5.1. a) idealne źródło, b) transformator WN/SN

Do każdego wyłącznika przypisany jest switch, którym można zmieniać stan jego zestyków, klikając na wskaźnik w bloczku. Kiedy kwadraty symbolizujące wyłącznik są czerwone, a wskaźnik pokazuje „ON”, zestyki są zamknięte. Kiedy są zielone, a wskaźnik wskazuje „OFF” wyłącznik jest otwarty. Sytuacja zobrazowana jest na Rys. 5.2.



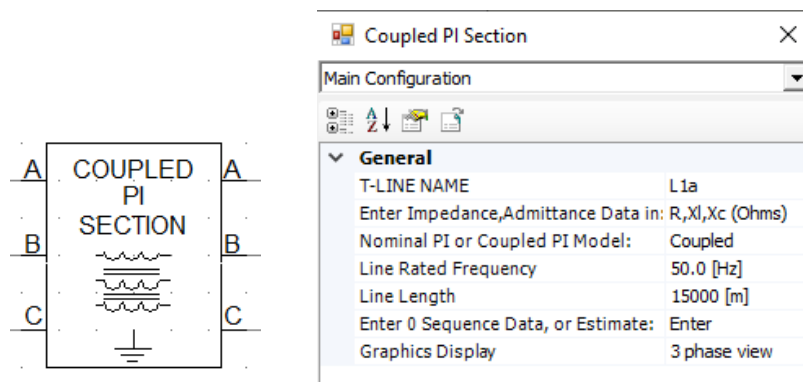
Rys. 5.2. Symbol wyłącznika oraz przypisany mu switch a) zamknięty, b) otwarty

W każdej linii zamodelowano idealne mierniki – amperomierze i woltomierze, widoczne na Rys. 5.3. Pozwalają one na pomiar prądu i napięcia w każdej z faz. Amperomierze zostały włączone szeregowo, a woltomierze równoległe, zgodnie z zasadami elektrotechniki.



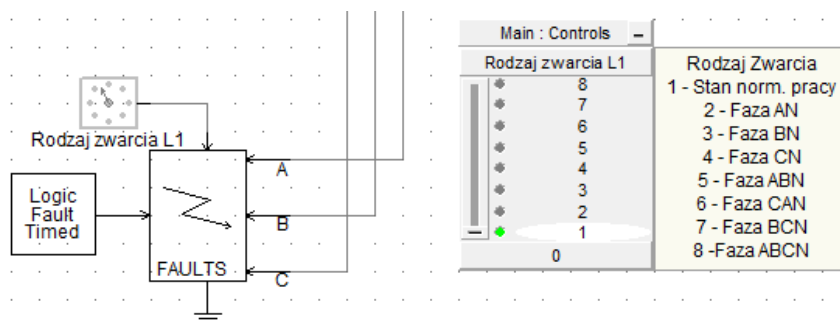
Rys. 5.3. Idealne mierniki

Do zamodelowania linii użyto czwórników typu PI (Rys. 5.4). W każdej z linii występują dwa bloczki. Dzięki takiemu rozwiązaniu, operując długością linii wpisywaną w każdym z bloczków, można zasymulować zwarcia na którymkolwiek kilometrze linii. W ćwiczeniu, oba ustawione są na 15 km, co oznacza, że pierwszy zwarcionnik symuluje zwarcie w środku linii, a drugi (nazwany zew.) – na końcu.



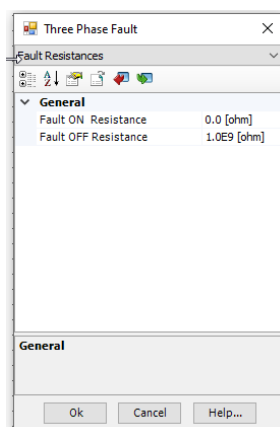
Rys. 5.4. Bloczek czwórnika typu PI oraz jego konfiguracja

Bloczki „FAULTS” (Rys. 5.5) są umiejscowione w każdej linii na 15 oraz 30 kilometrze. Służą do odwzorowania występujących zwarcć. Przy każdym z nich dostępne jest menu, w którym można wybrać rodzaj zwarcia przesuwając suwak na pozycję 1-8. Obok znajduje się legenda.



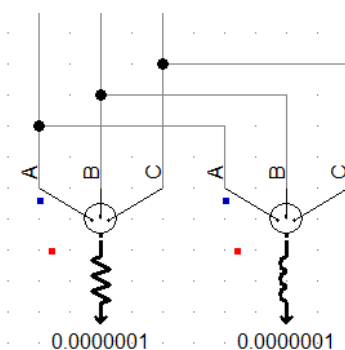
Rys. 5.5. Symbol zwarcionnika oraz menu wyboru rodzaju zwarcia

Dodatkowej regulacji prądu zwarcia można dokonać poprzez zmianę rezystancji przejścia. Zwiększając rezystancję w zakładce Fault ON Resistance (Rys. 5.6) możemy zmniejszyć wartość prądu zwarciovego i wpływać w ten sposób na czas działania zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego.



Rys. 5.6. Okno zmiany rezystancji przejścia w Zwarciowniku

Obciążenie linii zrealizowane jest jako dwa elementy, widoczne na Rys. 5.7. Pierwszy z nich symbolizuje obciążenie rezystancją, a drugi obciążenie o charakterze indukcyjnym.

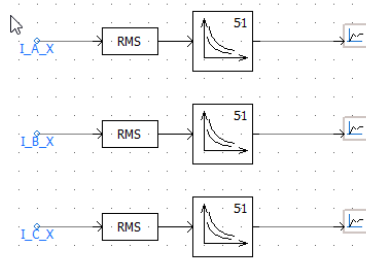


Rys. 5.7. Obciążenie linii

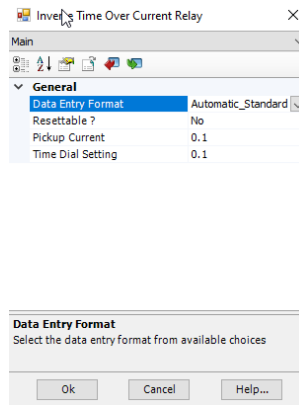
W opisywanym modelu wykorzystano dwa typy przekaźników nadprądowych:

- Nadprądowe zwłoczne o charakterystyce zależnej,
- Nadprądowe zwłoczne o charakterystyce niezależnej,

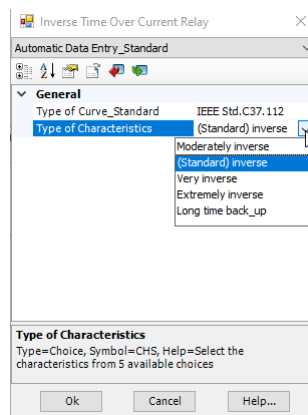
W przypadku przekaźnika nadprądowego o charakterystyce zależnej jego odwzorowanie w modelu pokazano na Rys. 5.8. Nastawienia przekaźnika wykonuje się po dwukrotnym kliknięciu na symbol funkcji. Uruchamia się wtedy okno nastawień pokazane na Rys. 5.9 pozwalające na zmianę wartości prądu rozruchowego. Wybór kształtu charakterystyki zależnej możliwy jest w kolejnej zakładce pokazanej na Rys. 5.10. Mamy do wyboru pięć charakterystyk, które możemy wykorzystać podczas realizacji ćwiczenia.



Rys. 5.8. Przekaźnik nadprądowy o charakterystyce zależnej (dla każdej fazy niezależny przekaźnik)

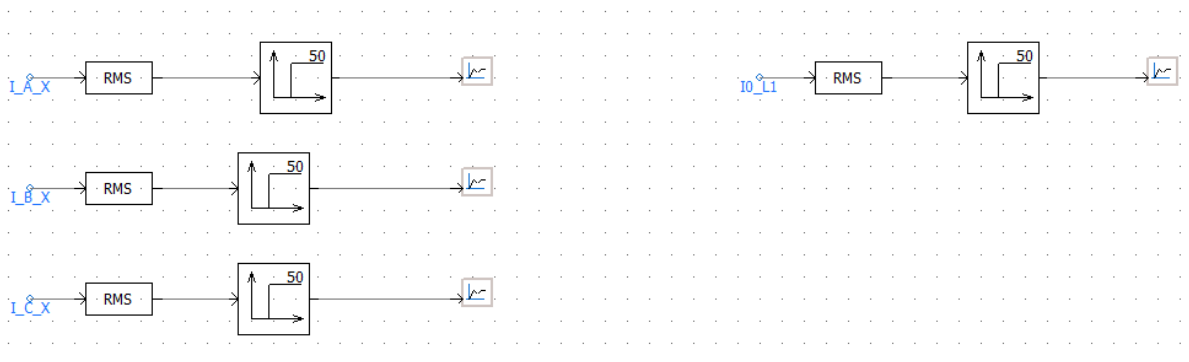


Rys. 5.9. Nastawienia wartości rozruchowej prądu

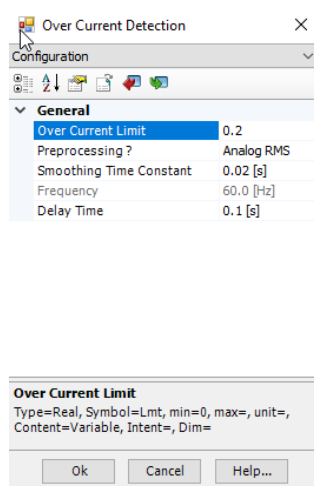


Rys. 5.10. Wybór typu charakterystyki zależnej

W przypadku przełącznika nadprądowego o charakterystyce niezależnej jego odwzorowanie w modelu pokazano na Rys. 5.11. Nastawienia przełącznika wykonuje się po dwukrotnym kliknięciu na symbol funkcji. Uruchamia się wtedy okno nastawień pokazane na Rys. 5.12 pozwalające na zmianę wartości prądu rozruchowego oraz zwłokę czasowa działania.

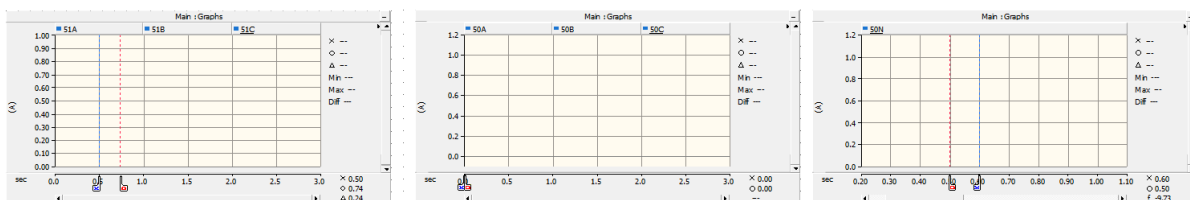


Rys. 5.11. Przełącznik nadprądowy o charakterystyce niezależnej (dla każdej fazy niezależny przełącznik oraz dodatkowo przełącznik nadprądowy reagujący na składową zerową prądu)



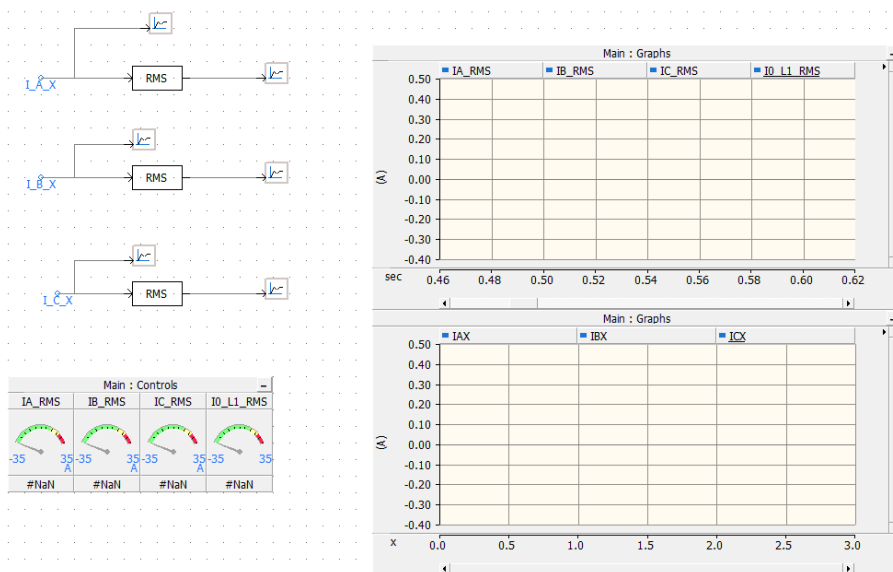
Rys. 5.12. Nastawienia wartości rozruchowej prądu przełącznika nadprądowego o charakterystyce niezależnej

Analiza działania poszczególnych przełączników wraz z pomiarem ich czasów działania możliwa jest dzięki wykorzystaniu okien z wizualizacją stanów wyjściowych przełączników pomiarowych pokazanych na Rys. 5.13.



Rys. 5.13. Okna pomiarowe pokazujące działanie przełączników nadprądowych

Pomiary prądów dla poszczególnych stanów wymuszeń można odczytać za pomocą mierników i okien z przebiegami okresowymi pokazanymi na Rys. 5.14.



Rys. 5.14. Elementy pozwalające na odczyt wartości prądów płynących podczas wykonywania symulacji

6 Wykonanie ćwiczenia

Ćwiczenie składa się z następujących części:

1. Wykonać symulacje dla stanu normalnej pracy linii, dla dwóch stanów obciążenia linii: 1 MW oraz 5 MW. Zanotować wartości płynących prądów.
2. Wykonać zwarcie jednofazowe na końcu i początku badanej linii zwarcie. Zanotować uzyskane wartości prądów.
3. Wykonać zwarcie trójfazowe na końcu i początku badanej linii zwarcie. Zanotować uzyskane wartości prądów.
4. Na podstawie wcześniejszych pomiarów dobrać wartości rozruchowe przekaźników nadprądowych.
5. Dla zwarcia trójfazowego wpływając na wartość prądu zwarcia (zmiana rezystancji przejścia) zdjąć wybraną charakterystykę zależną.
6. Dla zwarcia trójfazowego wpływając na wartość prądu zwarcia (zmiana rezystancji przejścia) zdjąć charakterystykę niezależną.
7. Dla zwarcia jednofazowego zaobserwować działanie przekaźnika nadprądowego zerowego.

7 Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy wykonać poniższe punkty:

1. Na podstawie uzyskanych wyników narysować charakterystykę zależną przekąźnika nadprądowego oraz porównać jej kształt z charakterystyką teoretyczną.
2. Na podstawie uzyskanych wyników narysować charakterystykę niezależną przekąźnika nadprądowego oraz porównać jej kształt z charakterystyką teoretyczną.
3. Określić wpływ rezystancji przejścia na prąd zwarcia w przypadku zwarcia trójfazowego.
4. Określić wpływ miejsca zwarcia na prąd zwarcia w przypadku zwarcia trójfazowego.

8 Literatura

1. WILIBARD W., WISZNIEWSKI A. *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*. Warszawa, WNT, 2002. ISBN 978-83-7926-080-5.