

Załącznik 1. – Zewnętrzna instrukcja laboratoryjna do ćwiczenia



Politechnika Warszawska

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

Instrukcja laboratoryjna

**Badanie rozplywów prądu w układzie różnicowym dedykowanym
do ochrony transformatorów elektroenergetycznych**

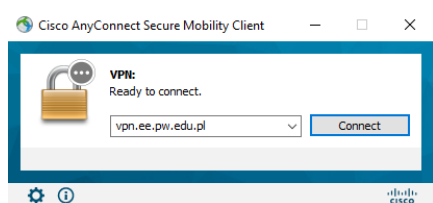
1 Zdalne stanowiska laboratoryjne wykorzystujące program PSCAD

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.

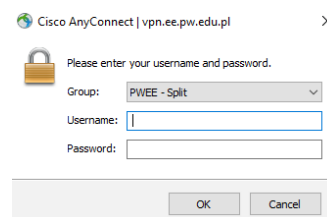
Sposób działania zdalnej platformy laboratoryjnej opiera się na mechanizmie wirtualizacji systemów operacyjnych. W ramach zdalnej platformy wykorzystano serwer z aktywowanymi 15 maszynami wirtualnymi, które zostały skonfigurowane w taki sposób, aby spełnić wymagania dla typowych grup laboratoryjnych 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 połączone 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. Z. 1 przechodzimy do okna z prośbą o wpisanie loginu i hasła (Rys. Z. 2). Po uzyskaniu potwierdzenia dostępu do sieci Wydziału elektrycznego możliwe jest połączenia z serwerem platformy laboratoryjnej.



Rys. Z. 1. Aplikacja do połączenia VPN



Rys. Z. 2. Połączenie VPN – prośba o login i hasło do konta na WE

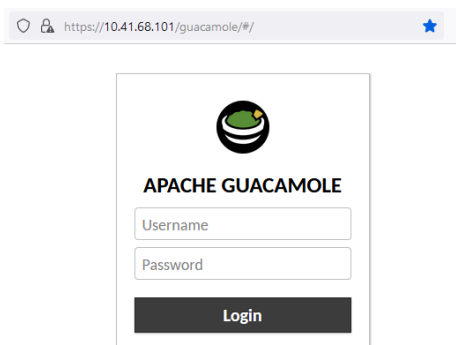
Serwer zdalnej platformy laboratoryjnej ma przydzielony adres:

<https://10.41.68.101/guacamole>

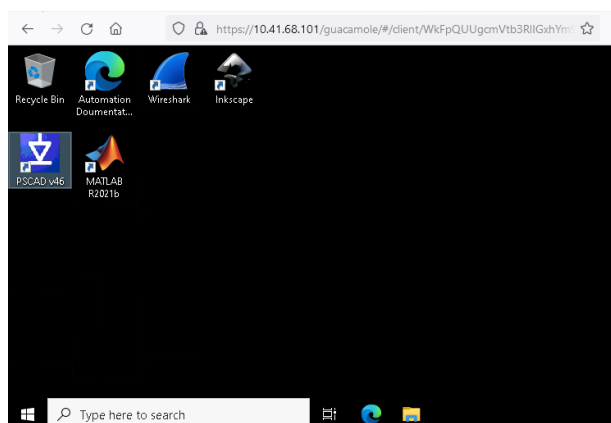
Po wpisaniu adresu do przeglądarki uzyskamy widok z prośbą o podanie loginu i adresu do konkretnej maszyny wirtualnej pokazany na Rys. Z. 3.

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. Z. 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. Z. 3. Prośba o podanie hasła i loginu do wybranej maszyny wirtualnej

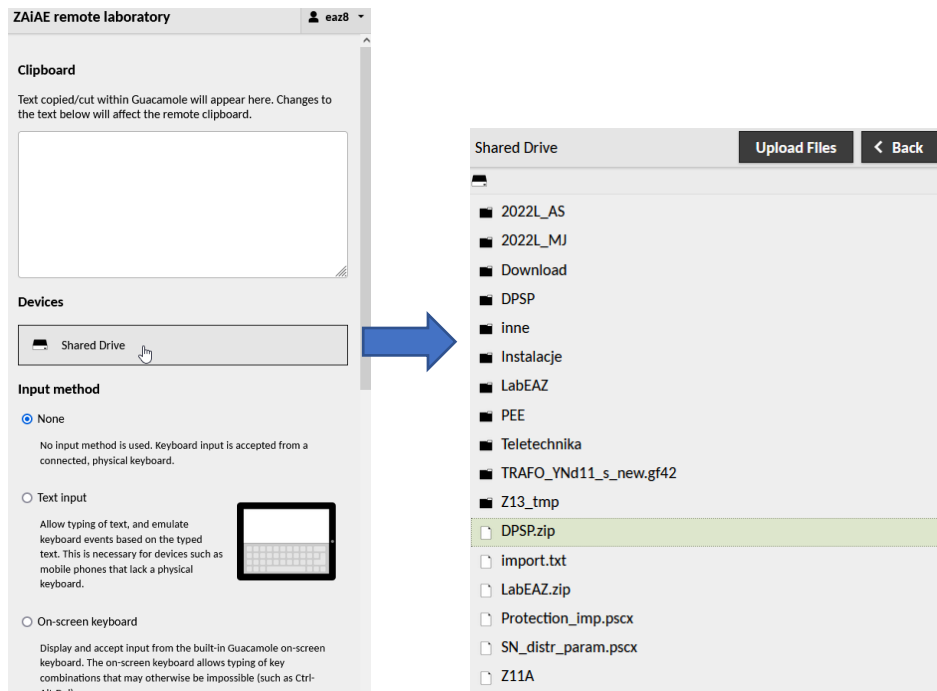


Rys. Z. 4. Widok pulpitu wybranej maszyny wirtualnej

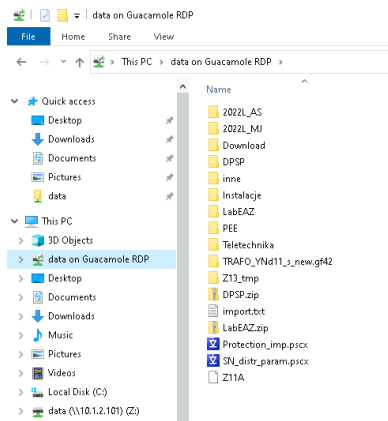
W przypadku konieczności pobrania lub przesłania na serwer plików np. z symulacjami konieczne jest wykorzystanie dodatkowego menu do którego uzyskujemy dostęp po naciśnięciu trzech przycisków *Shift+Ctrl+Alt*. Pojawia się wtedy okno pokazane na Rys. Z. 5, gdzie należy wybrać opcję *Shared Drive*. Po 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 *ldata on Guacamole RDP* podświetlonego na Rys. Z. 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. Z. 5. Widok dodatkowego menu maszyny wirtualnej



Rys. Z. 6. Katalog z plikami przegrzonymi na maszynę wirtualną

2 Wstęp

2.1 Cel ćwiczenia

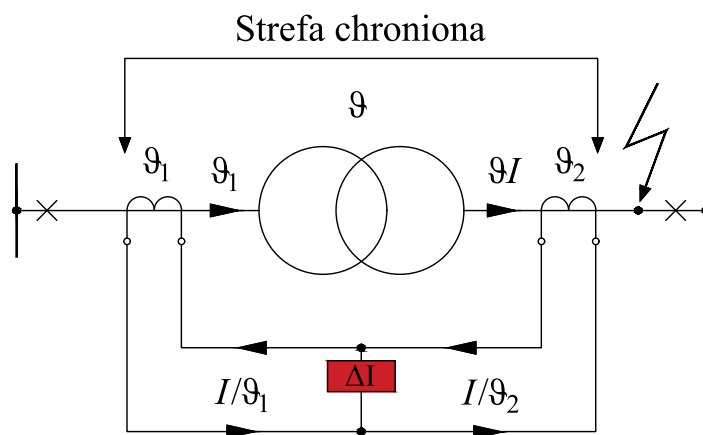
Celem ćwiczenia jest:

- zapoznanie się z zasadą działania zabezpieczenia różnicowego transformatorów,
- zapoznanie się z zasadami wyznaczania grup połączeń transformatorów,
- zapoznanie się z funkcjonalnością modelu fragmentu sieci z transformatorem przygotowanym w programie PSCAD,
- wykonanie pomiarów prądów płynących przez transformator podczas występowania różnych typów zwarcć oraz wykonanie graficznych rozplątów,

2.2 Wstęp teoretyczny

2.2.1 Zasada działania zabezpieczenia różnicowego

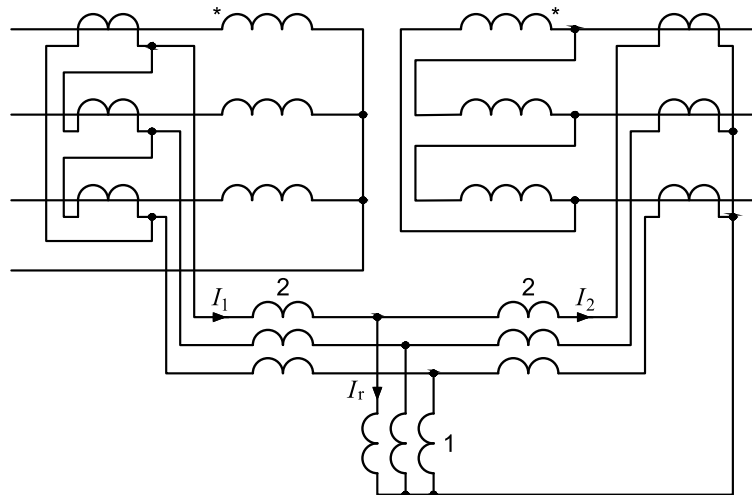
Podstawowym zabezpieczeniem transformatorów średnich i dużych mocy jest zabezpieczenie różnicowe. Krajowe przepisy wymagają jego użycia dla każdego transformatora o mocy znamionowej większej niż 5 MVA. Jest to zabezpieczenie, dzięki któremu układ automatyki zabezpieczeniowej jest w stanie wykryć zwarcie doziemne, międzyfazowe, a nawet zwojowe przy nastawieniu odpowiedniej czułości. Strefa chroniona przez zabezpieczenie różnicowe przestawiona została na rys. z.2.1.



Rys. Z.2.1. Zabezpieczenie różnicowe transformatora z zaznaczoną strefą chronioną

Układ zabezpieczenia różnicowego chroni transformator oraz linie znajdujące się w strefie chronionej przez przekładniki prądowe współpracujące z zabezpieczeniem. Do poprawnego działania zabezpieczenia wymagane jest, aby prądy w gałęziach różnicowych po stronie górnej, jak i dolnej transformatora były równe co do fazy, amplitudy oraz częstotliwości. Konieczne jest wtedy dobranie przekładników o odpowiedniej przekładni oraz wzięcie pod uwagę typu połączeń zaczepek transformatora. Schemat funkcjonalny zabezpieczenia różnicowego przedstawiono na rys. z.2.2.

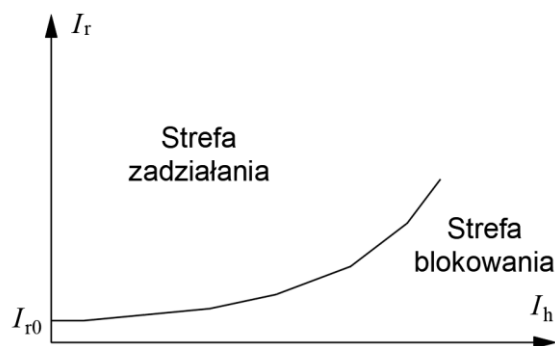
W nowoczesnych zabezpieczeniach cyfrowych, można oczekiwać czasu zadziałania w okolicach 20-30 ms.



Rys. Z.2.2. Schemat funkcjonalny zabezpieczenia różnicowego stabilizowanego transformatora: 1 – uzwojenie robocze, 2 – uzwojenie hamujące

2.2.2 Charakterystyka stabilizacji

Bardzo istotne jest, aby zabezpieczenie różnicowe wykrywało każde zwarcie wewnątrz strefy chronionej, ale jednocześnie pozostawało niewrażliwe na zwarcia pojawiające się na zewnątrz tego obszaru. W tym celu wymagana jest wysoka precyzja doboru nastaw czułości zabezpieczenia. Aby tego dokonać implementuje się stabilizację zabezpieczenia różnicowego.



Rys. Z.2.3. Charakterystyka stabilizacji zabezpieczenia różnicowego

Typową charakterystykę stabilizacji przedstawia rys. z.2.3. Określa ona zależność prądu różnicowego I_d od prądu hamowania I_{st} . Sposób wyliczenia wartości prądu różnicowego oraz prądu hamowania przedstawiają wzory (Z.2.1) oraz (Z.2.2).

$$I_r = I_1 - I_2 \quad (Z.2.1)$$

$$I_h = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (Z.2.2)$$

Podczas zwarc zewnątrz, poza strefą chronioną, w gałęzi poprzecznej zabezpieczenia różnicowego pojawia się prąd uchybowy, który może spowodować niepożądane zadziałanie zabezpieczenia. Wartość tego prądu uchybowego zależy od:

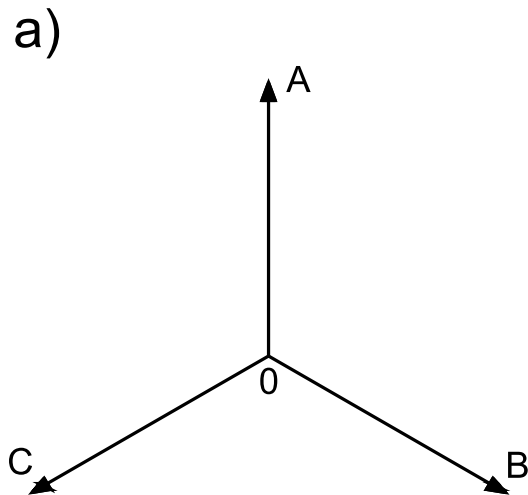
- odchyłeń rzeczywistych parametrów przekładników prądowych od deklarowanych przez producenta,
- zmian przekładni transformatora spowodowanych regulacją napięcia,
- różnicy charakterystyk magnesowania dobranych przekładników prądowych,
- potencjalnego nasycenia magnetycznego przekładników prądowych spowodowanego zwarciem poza strefą chronioną przez zabezpieczenie różnicowe.

Stabilizacja zabezpieczenia różnicowego pozawala na kompensację odchyłeń dobranych przekładni przekładników prądowych oraz zmian w przekładni transformatora podczas regulacji napięcia.

W nowoczesnych zabezpieczeniach cyfrowych, charakterystyka różnicowa może być złożona z dwóch lub trzech odcinków.

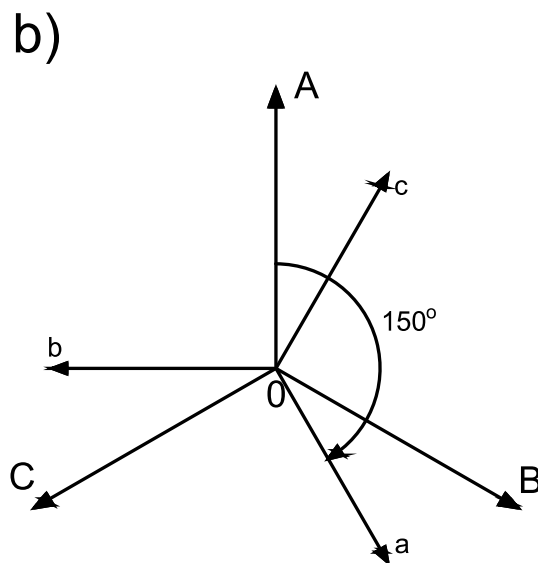
3 Wyznaczanie grupy połączeń YNd5

Wyznaczenie grupy połączeń transformatora należy rozpocząć od narysowania fazy napięć pierwotnych w układzie symetrycznym, jak pokazano na rys. z.3.1.



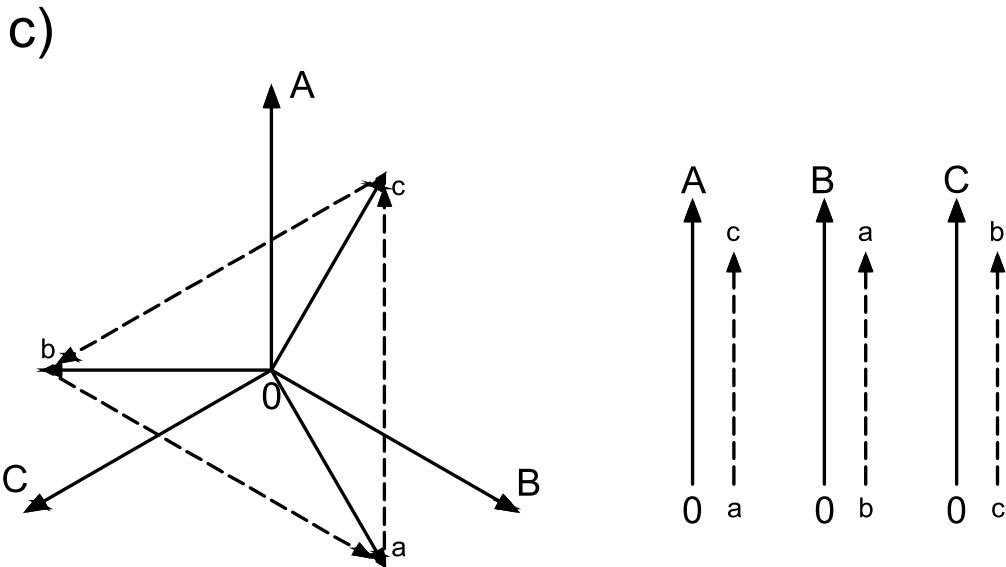
Rys. Z.3.1. Fazy napięcia pierwotnego w układzie symetrycznym

Następnie należy narysować fazy napięć wtórnych przesuniętych o odpowiednią wartość godzinową. Każda godzina przesunięcia fazowego równa jest 30° . W tym przypadku, podczas analizy grupy połączeń YNd5, kąt przesunięcia wyniesie $5 * 30^\circ = 150^\circ$. Rys. Z.3.2 przedstawia sposób narysowania fazy napięć wtórnych.



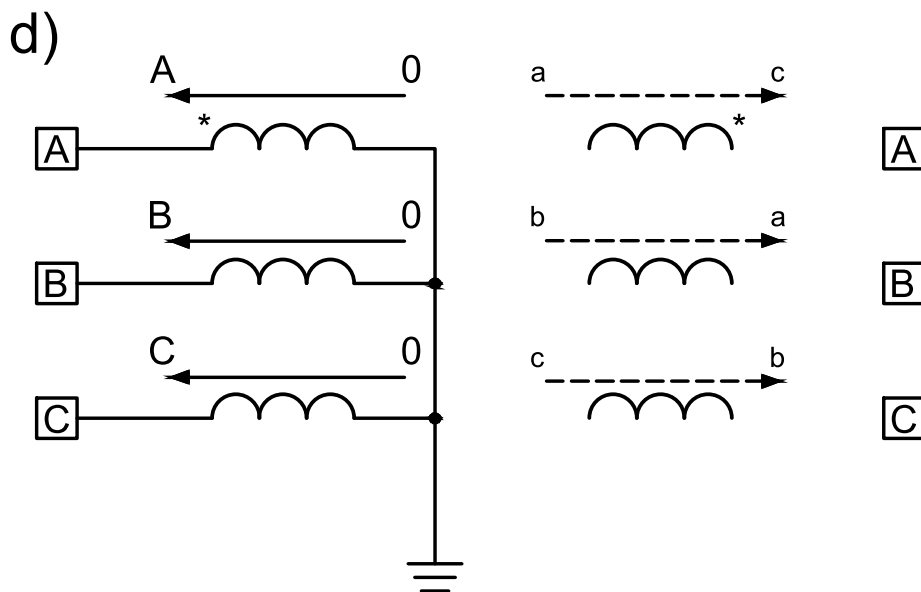
Rys. Z.3.2. Przesunięcie fazowe napięć wtórnych

Szukamy dalej fazorów napięć „międzyfazowych” o grotach zwróconych w tę samą stronę, co odpowiadające im, równoległe fazory napięć fazowych. W celu zwiększenia czytelności, grupuje się obok równoległe fazory, jak pokazano na rys. z.3.3.



Rys. Z.3.3. Dobór par napięć pierwotnych i „międzyfazowych”

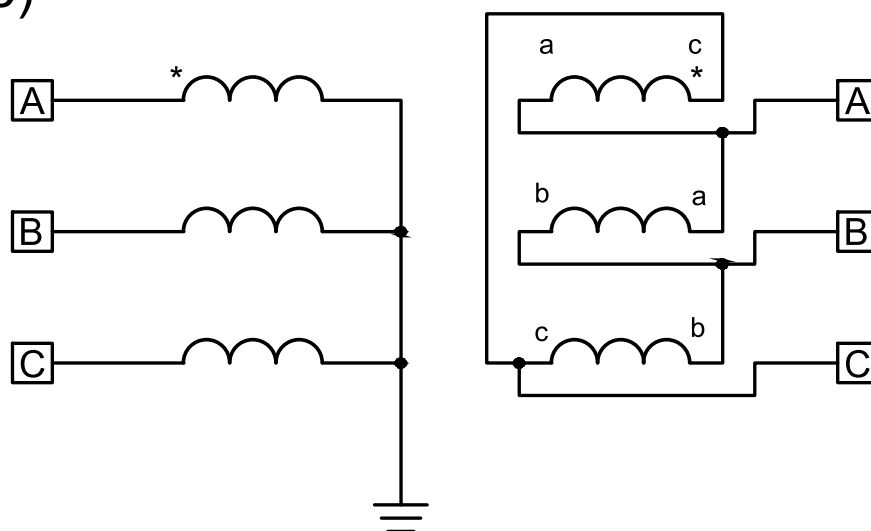
Następnie należy narysować uzwojenia strony pierwotnej i wtórnej oraz opisać ich odczepy korespondującymi fazorami napięć. Rys. Z.3.4 przedstawia, jak powinno być to wykonane.



Rys. Z.3.4. Oznaczenie uzwojeń transformatora fazorami napięć

Na koniec należy połączyć według oznaczeń korespondujące ze sobą odczepy. Fazy strony wtórnej odprowadza się z odpowiednio oznaczonych połączeń, jak na rys. z.3.5.

e)



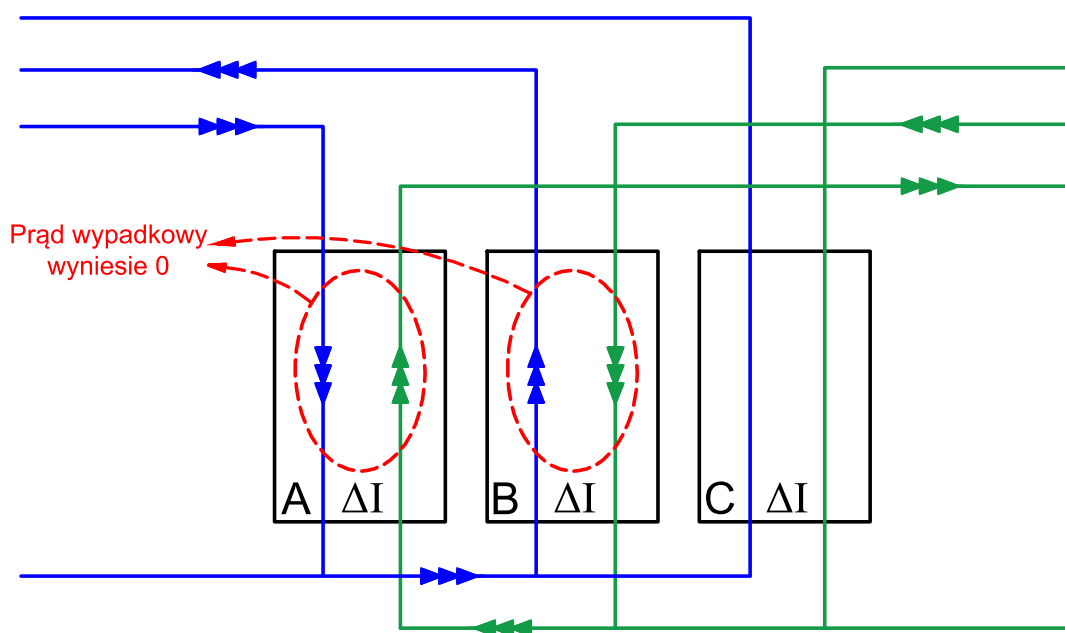
Rys. Z.3.5. Finalne podłączenie uzwojeń transformatora YNd5

4 Badanie rozplywu prądów w układzie transformatora YNd11

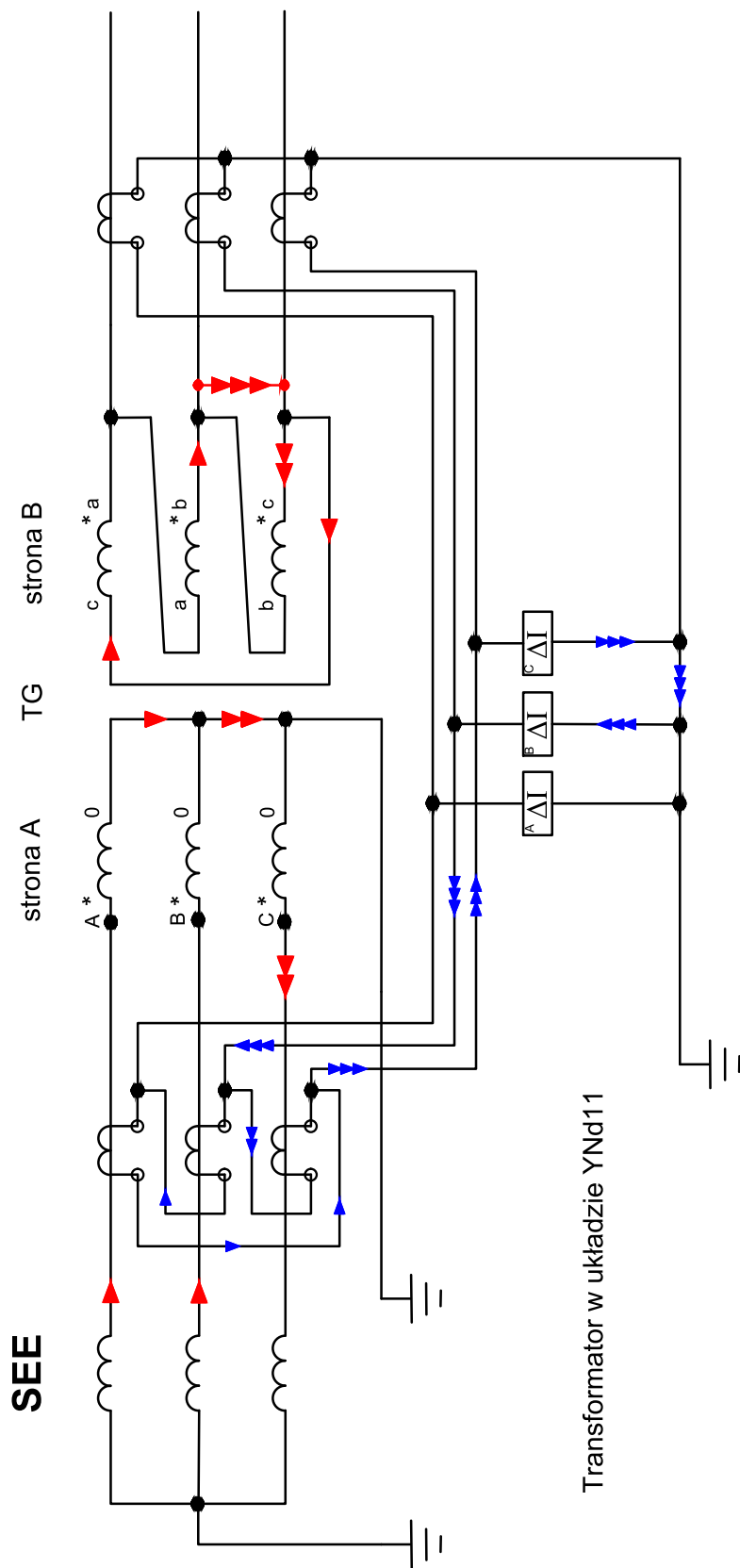
Rys. Z.4.2 przedstawia rozplyw prądów podczas zwarcia międzyfazowego faz B i C po stronie wtórnej transformatora. W tym przypadku, prądy płynące w fazach A i B strony górnej przechodzą przez przekładniki prądowe oraz uzwojenia transformatora, po czym sumują się i wracają do sieci elektroenergetycznej fazą C. Następnie prądy transformowane są na stronę dolną i biorą udział w zwarcu międzyfazowym. Prąd z fazy A oraz fazy C trójkąta sumuje się i wypływa z uzwojeń fazą B, aby następnie popłynąć drogą zwarcia. Prąd zwarcioowy wraca fazą C z powrotem do uzwojeń połączonych w trójkąt i rozplywa się ponownie na fazę A i C. Prąd w gałęzi różnicowej płynie do przekładników fazą B, a wraca fazą C. Ze strony wtórnej transformatora gałęzią różnicową nie płynie żaden prąd, gdyż w obecnym stanie prąd nie ma możliwości dopłynięcia do przekładników prądowych strony wtórnej.

Wartości prądów w poszczególnych miejscach badanego układu otrzymywane są poprzez pomiar amperomierzy zaimplementowanych w modelu w programie PSCAD.

Na potrzeby intuicyjnej demonstracji rozplywów prądów w fazach oraz układzie różnicowym gałęzi różnicową przedstawiono jako zbiegające się linie z przekładników prądowych po obu stronach transformatora. W rzeczywistości podłączenie takiego układu w przekładnikach różnicowych wygląda jak na rys. z.4.1. Zabezpieczenie różnicowe mierzy prąd wypadkowy z przekładników po obu stronach transformatora i w przypadku braku zwarcia, zwarcia doziemnego po stronie trójkąta lub zwarcia zewnętrznego, prąd wypadkowy wyniesie zero.



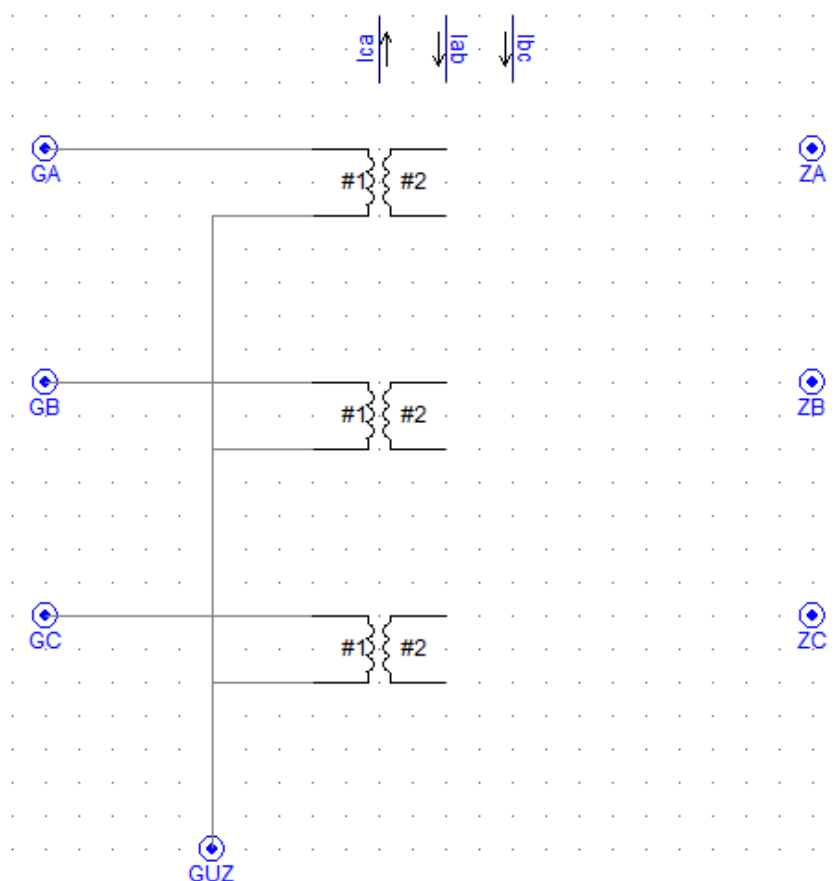
Rys. Z.4.1. Rzeczywiste połączenie prądów do przekładnika różnicowego



Rys. Z.4.2. Przykładowy rozplyw prądów w układzie transformatora YNd11 dla zwarcia międzyfazowego po stronie wtórnej

5 Model symulacyjny w programie PSCAD

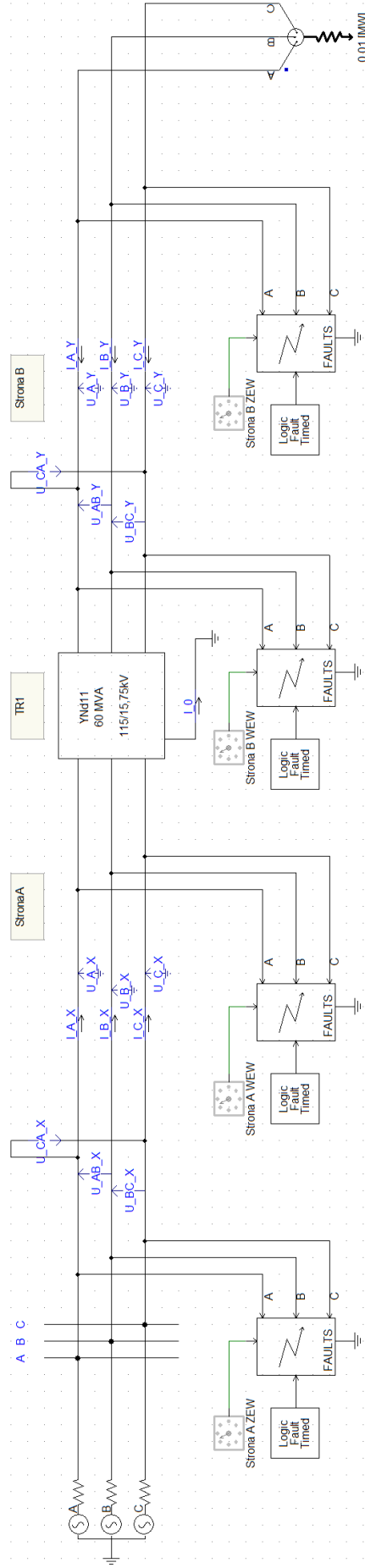
Do wykonywania wszelkich działań oraz symulacji wykorzystywany będzie plik programu PSCAD o nazwie *YNd11_stud.psx*. Model transformatora trójfazowego 115/15,75 kV składa się z uproszczonego układu trzech jednofazowych transformatorów, które należy połączyć w układ YNd11 (rys. z.5.1). Dodatkowo, należy w odpowiednich fazach umieścić dane amperomierze tak, aby mierzyły prądy płynące w trójkącie po stronie wtórnej transformatora. Cały model przedstawiono na rys. z.5.2.



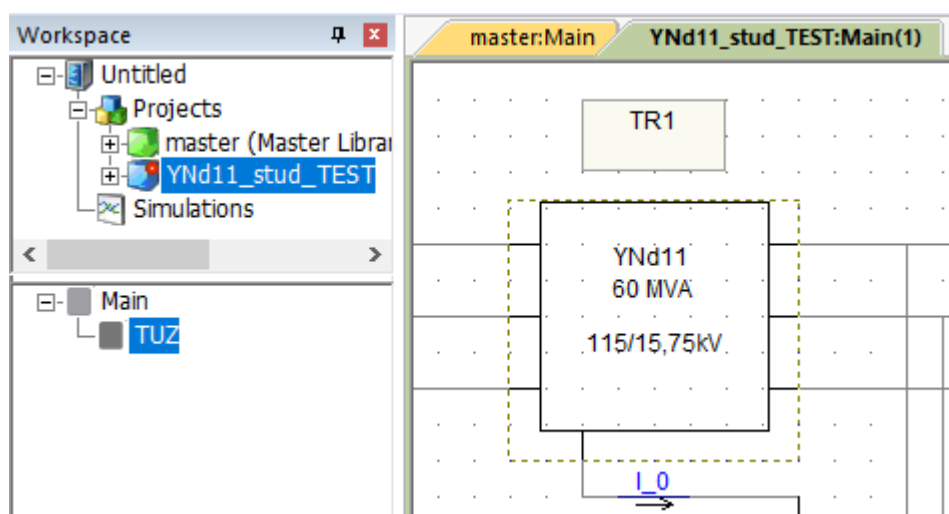
Rys. Z.5.1. Uzwojenia transformatora w modelu PSCAD

Aby przejść z widoku głównej części modelu do układu transformatora, należy w programie PSCAD nacisnąć dwukrotnie komponent transformatora TR1, lub na panelu bocznym „Workspace” dwukrotnie wcisnąć pole „TUZ” (rys. z.5.3). W celu powrotu z pola edycji transformatora do modelu głównego należy wcisnąć dwukrotnie pole „Main”.

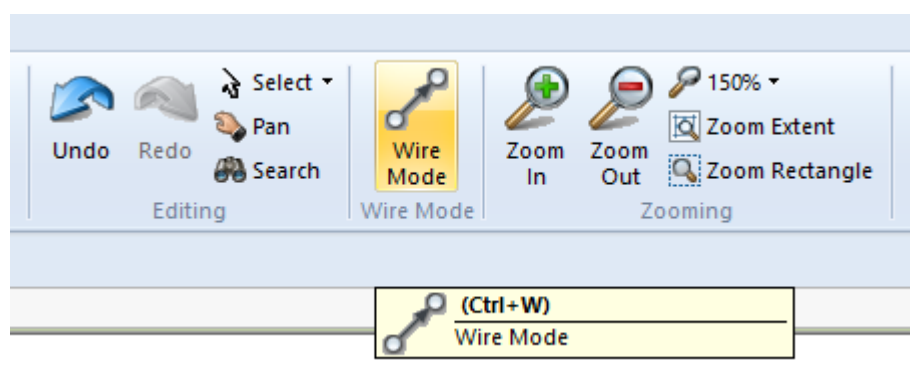
Rysowanie połączeń pomiędzy komponentami dokonywane jest przy użyciu trybu „Wire mode”, dostępnego na pasku górnym programu PSCAD, lub po wciśnięciu kombinacji klawiszy Ctrl+W (rys. z.5.4). Rysowanie przewodu rozpoczyna się przez pojedyncze naciśnięcie lewego przycisku myszy, tak samo tworzy się też załamania, a kończy poprzez naciśnięcie prawego przycisku myszy.



Rys. Z.5.2. Model uproszczonego transformatora WN/SN o układzie YNd11 w środowisku PSCAD

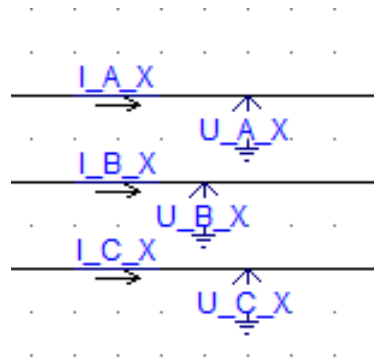


Rys. Z.5.3. Widok komponentu transformatora oraz panelu bocznego „Workspace”

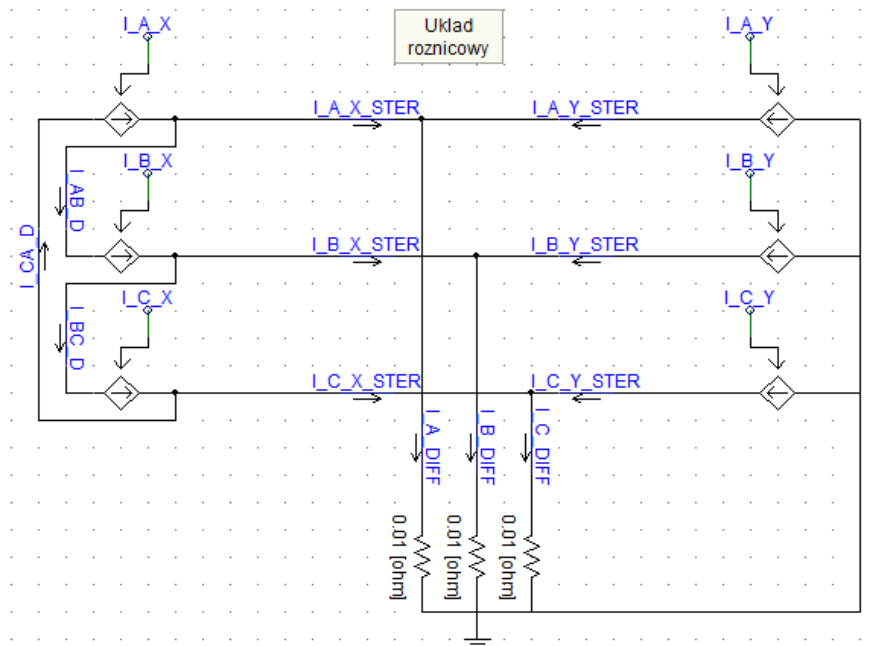


Rys. Z.5.4. Widok trybu rysowania połączeń pomiędzy komponentami

Widoczne na rys. z.5.5 amperomierze służą do pomiaru prądów po obu stronach transformatora, ale również spełniają praktyczną funkcję przekładników prądowych, z których prąd trafia do zewnętrznego układu różnicowego. Zadaniem tego układu jest kompensacja amplitudy i fazy prądów wynikającym z układu połączeń gwiazda-trójkąt. Układ ten pokazano na rys. z.5.6. Dostępny jest szereg mierników i wykresów fazorowych w celu pomiaru i weryfikacji otrzymanych prądów i napięć. W modelu znajdują się również oscylografy pozwalające na podejrzenie przebiegów napięć przez czas trwania całej symulacji.

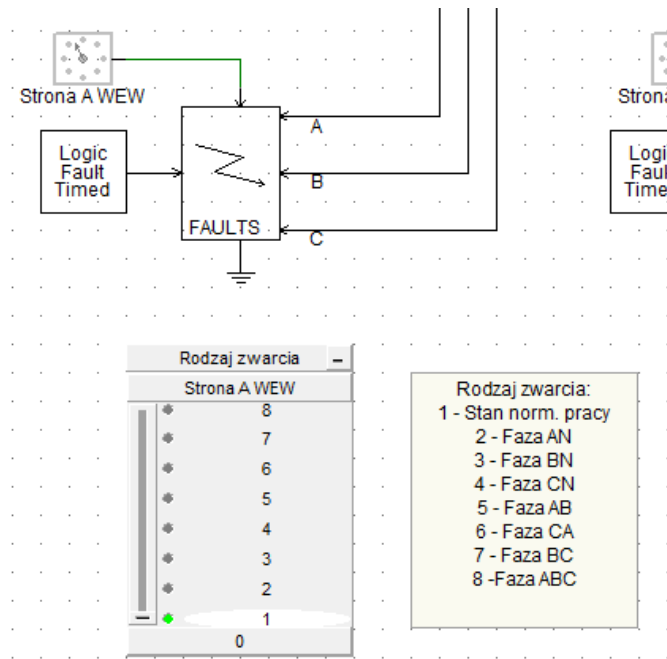


Rys. Z.5.5. Amperomierze i woltomierze po stronie górnej transformatora

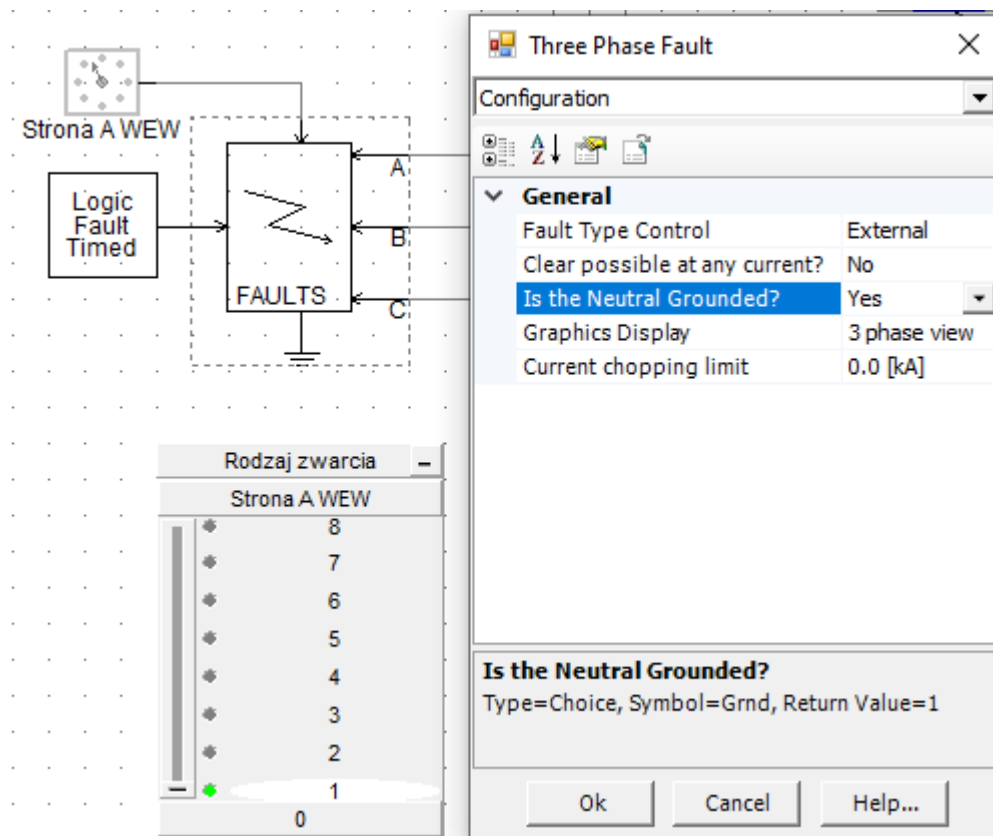


Rys. Z.5.6. Układ różnicowy do kompensacji amplitudy i fazy

Za wykonywanie zwarć w systemie odpowiedzialne są bloki zwarciove. Jeden z nich pokazano na rys. z.5.7. Każdy zwarcioownik sparowany jest z osobnym suwakiem umożliwiającym wybór rodzaju zwarcia według zamieszczonej legendy. Umożliwiają one wykonywanie wszystkich rodzajów zwarcia w środku oraz poza strefą chronioną. W ustawieniach każdego elementu zwarciowego, dostępny jest wybór uziemienia punktu neutralnego (rys. z.5.8). W celu przeprowadzenia zwarć bez udziału ziemi, należy zaznaczyć brak uziemienia punktu neutralnego.

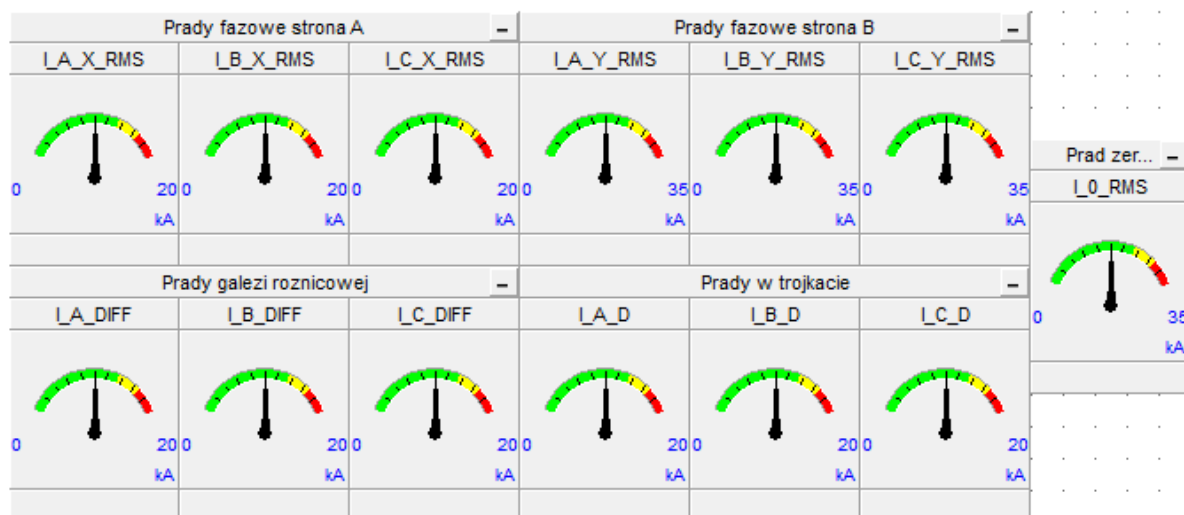


Rys. Z.5.7. Widok zwarcionika wraz z kontrolerem w programie PSCAD



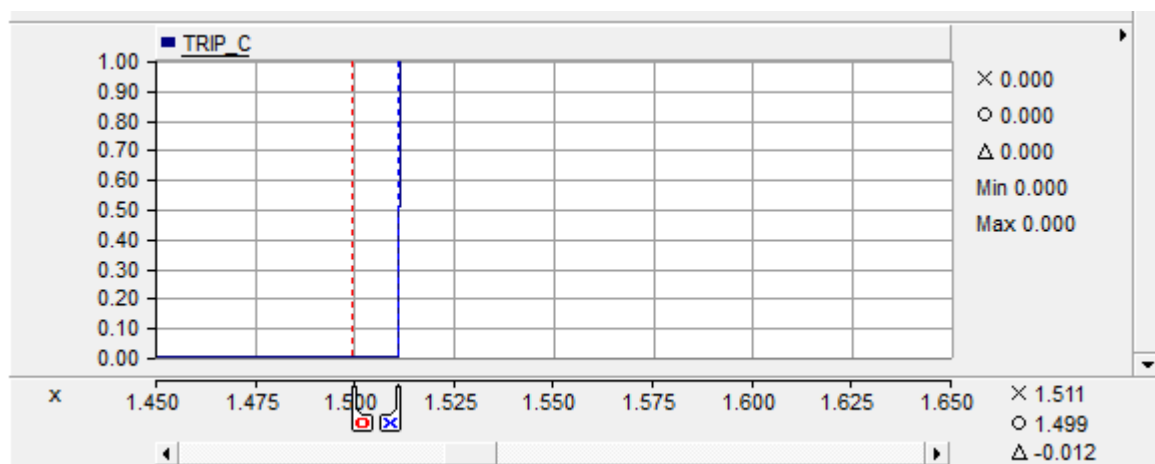
Rys. Z.5.8. Ustawienia elementu zwarcionika

Zmierzone wartości skuteczne prądów płynących przez transformator oraz układ różnicowy można odczytać z mierników widocznych na rys. z.5.9.



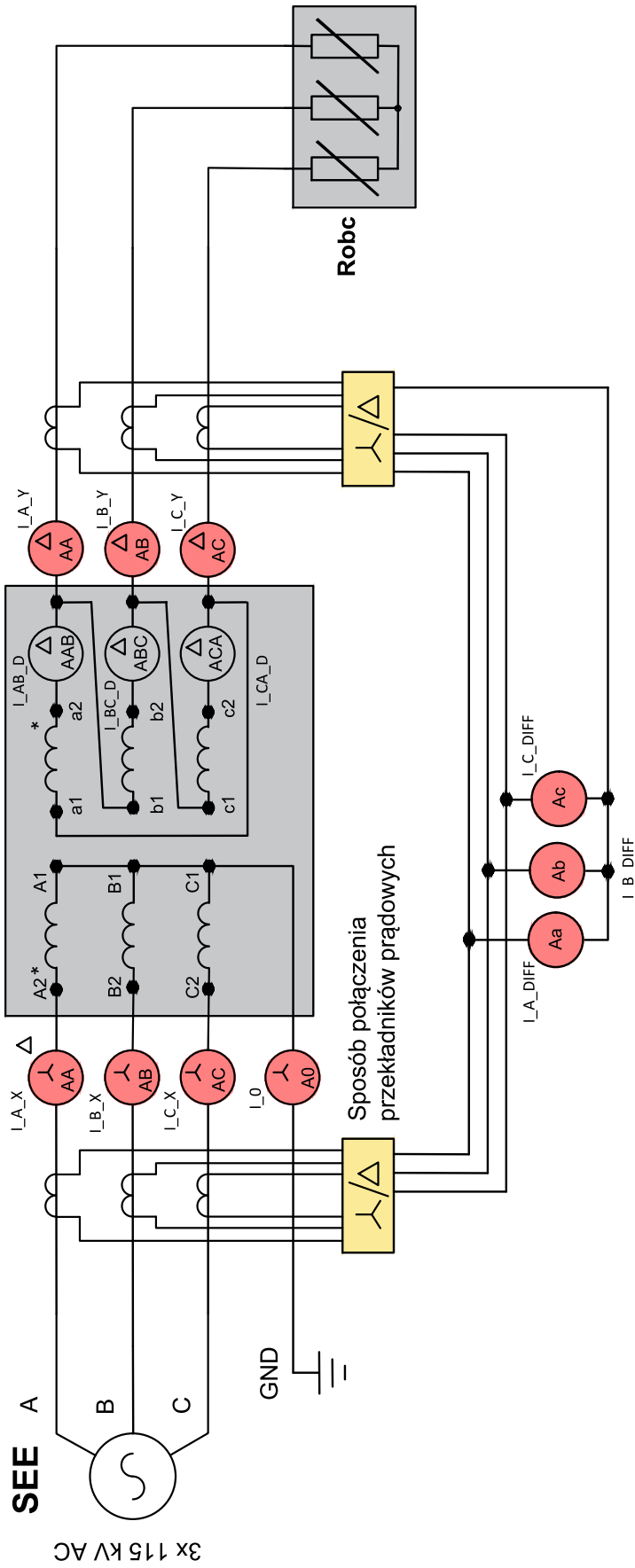
Rys. Z.5.9. Mierniki prądów w układzie transformatora

Czas zadziałania zabezpieczenia różnicowego można odczytać z oscylografów zawierających przebiegi sygnału TRIP_A, TRIP_B oraz TRIP_C. W tym celu powinno się użyć markerów dostępnych po naciśnięciu na oscylograf, następnie wciśnięciu klawisza *M*. Klawisz *R* na klawiaturze powoduje automatyczne wyskalowanie wykresów. Przykładowy pomiar pokazano na rys. z.5.10. Wartości zmierzone markerami wyświetlają się w prawym dolnym rogu okna oscylografu. Różnicę pomiarów oznaczono jako Δ .



Rys. Z.5.10. Pomiar czasu zadziałania przekaźnika różnicowego

Rys. Z.5.11 przedstawia schemat ideowy podłączenia modelu transformatora wraz z zaznaczonymi pomiarami.



Rys. Z.5.11. Schemat podłączenia modelu w programie PSCAD

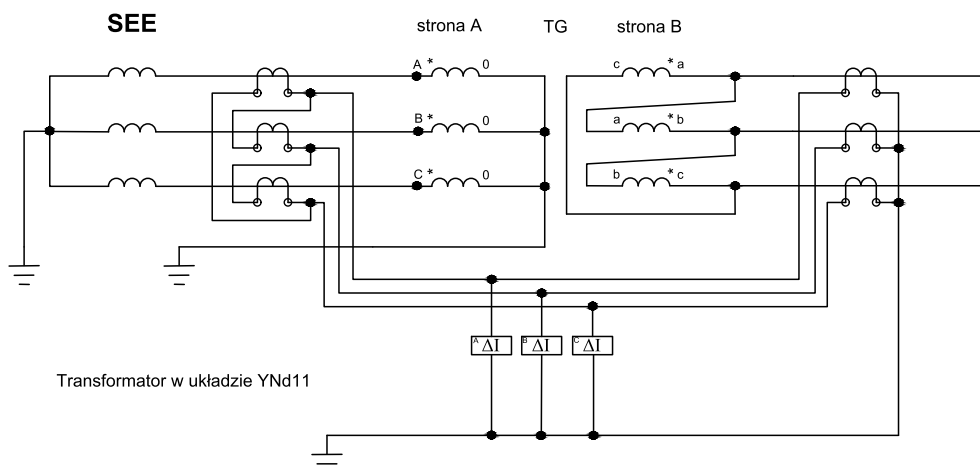
6 Zadanie do wykonania

Do sprawozdania należy:

- połączyć uzwojenie wtórne transformatora w taki sposób, aby otrzymać układ połączeń YNd11 oraz w odpowiednich miejscach umieścić amperomierze tak, aby mierzyły prądy płynące w trójkącie;
- wykonać dwa zwarcia wewnętrzne i zewnętrzne: jednofazowe i międzyfazowe wybranych faz po stronie pierwotnej transformatora (bez udziału ziemi);
- wykonać zwarcie wewnętrzne i zewnętrzne międzyfazowe wybranych faz po stronie wtórnej transformatora (bez udziału ziemi);
- wyniki zwarć wpisać do tabl. z.6.1 i na rys. z.6.1 wykonać rozpływy prądów w całym układzie według przykładu;
- zanotować czasy zadziałania zabezpieczenia różnicowego i porównać z teoretycznymi;

Tabl. Z.6.1. Tabela prądów zmierzonych podczas ćwiczenia

Miejsce zwarcia			Wskazania amperomierzy												
Strona transf.	Strefa zabezp. różnic.	Zwarte fazy	Strona A transformatora				Strona B transformatora					Gałąź różnicowa			
			A _A	A _B	A _C	A ₀	A _{AB}	A _{BC}	A _{CA}	A _A	A _B	A _C	A _a	A _b	A _c
A	wewn.														
	zewn.														
B	wewn.														
	zewn.														



Rys. Z.6.1. Schemat transformatora WN/SN w układzie YNd11 z zabezpieczeniem różnicowym