

Uruchamianie zabezpieczeń IED od składowych podharmonicznych przy użyciu zaawansowanych narzędzi testowych

R. Midence, A. Oliveira, N. Perera – ERLPhase Power Technologies Ltd

E. Carneiro, K. Donaldson – OMICRON electronics

Streszczenie

W ostatnich latach wzrosła stosowność zabezpieczeń zdolnych do wykrywania stanu rezonansu podsynchronicznego (ang. *Sub-Synchronous Resonance* – SSR). Pojawienie się takich zabezpieczeń przynosi nowe wyzwania – testowanie i uruchamianie tych urządzeń. Przekazywanie do eksploatacji zabezpieczeń od składowych podharmonicznych wymaga realizacji procedury, która różni się od tradycyjnych procedur testowania i uruchamiania urządzeń mikroprocesorowych. W niniejszej pracy przedstawiono doświadczenia autorów nabyte podczas uruchamiania zabezpieczeń od składowych podharmonicznych i opisano procedurę stosowania zaawansowanego systemu testowania takich przełączników (OMICRON CMC 356, moduły oprogramowania Test Universe: Ramping oraz

PQ Signal Generator, a także szablon OCC), jak również zalecany proces, który należy zrealizować przed udaniem się na obiekt oraz podczas samego uruchamiania zabezpieczenia.

W opracowaniu zostaną omówione następujące zagadnienia:

- charakterystyka zabezpieczenia od składowych podharmonicznych;
- procedura techniczna umożliwiająca określenie nastaw;
- określenie scenariuszy testowych gwarantujących odpowiednie przetestowanie wszystkich funkcji przełącznika;
- użycie zaawansowanego systemu testowania przełączników w celu przygotowania planów badań, które

zostaną wykorzystane podczas testów przełącznika;

- procedura uruchamiania zabezpieczenia na obiekcie, realizowana przy użyciu zaawansowanego oprogramowania i urządzeń do testowania zabezpieczeń.

Podczas uruchamiania zabezpieczeń od składowych podharmonicznych autorzy stwierdzili, że poziom zrozumienia zjawisk SSR i SSCI, przesłanek technicznych stojących za wyborem nastaw zabezpieczeń IED od składowych podharmonicznych oraz procedur testowania i uruchamiania tego typu urządzeń, jest bardzo niski. Stąd też wynikała potrzeba edukacji społeczności zajmującej się zagadnieniami EAZ.

W niniejszej pracy opisano użycie zaawansowanego systemu testowania przełączników posiadającego oprogramowanie zdolne do tworzenia skryptów, które będą stosowane do testowania wszystkich funkcji przełącznika i weryfikacji nastaw. Przed utworzeniem skryptów testowych, procedura wymaga dokonania przeglądu scenariuszy symulacji systemu elektroenergetycznego, które były wykorzystywane w celu określenia ustawień przełącznika koniecznych dla utworzenia planów badań potwierdzających, że przełącznik reaguje zgodnie z oczekiwaniami. Procedura wymaga przeprowadzenia testów pod kątem:

- zakresów częstotliwości podharmonicznych – dla sprawdzenia, czy przełącznik nie działa błędnie przy częstotliwościach wykraczających poza żądany zakres częstotliwości;
- wielkości składowych podharmonicznych – dla sprawdzenia, czy przełącznik nie działa błędnie przy podharmonicznych o module mniejszym niż ustawione wartości progowe;

- sprawdzenia wszystkich powiązanych funkcji, takich jak zliczanie liczby operacji w określonym czasie, obliczanie całkowitych zniekształceń podharmonicznych, blokada 2. i 5. harmonicznej itp.;
- funkcji zabezpieczających przy częstotliwości podstawowej.

Słowa kluczowe: rezonans pod synchroniczny (SSR), interakcje pod synchroniczne, linie przesyłowe, kondensatory szeregowo, składowe podharmoniczne, zaawansowane systemy testowania przekaźników

Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat opublikowano kilka prac omawiających różne typy interakcji pod synchronicznych pomiędzy elementami systemu elektroenergetycznego, w szczególności te, w których biorą udział duże generatory parowe, elektrownie wiatrowe, linie przesyłowe wysokiego napięcia prądu stałego HVDC oraz linie przesyłowe z kompensacją szeregową.

Interakcje pod synchroniczne (ang. *Sub-synchronous Interactions* – SSI) to rodzina interakcji fizycznych, podczas których następuje wymiana energii pomiędzy generatorem a systemem transmisyjnym przy częstotliwościach AC poniżej znamionowej częstotliwości systemu. Obejmuje to interakcje SSR, SSTI oraz SSCI. Możliwych jest kilka typów interakcji pod synchronicznych, między innymi rezonans pod synchroniczny (ang. *Sub-Synchronous Resonance* – SSR), pod synchroniczne reakcje skrętne (ang. *Sub-Synchronous Torsional Interactions* – SSTI) oraz pod synchroniczne interakcje sterowań (ang. *Sub-Synchronous Control Interactions* – SSCI). W szczególności interakcje SSR oraz SSTI są dobrze udokumentowane, rozumiane i dość szczegółowo objaśnione przez Andrew L. Isaacsa, Gartha D. Irwina i Amita K. Jindala w [1].

Instytut IEEE opublikował wytyczne dotyczące rezonansu

pod synchronicznego [2], zawierające przegląd najbardziej podstawowych aspektów SSR oraz zależnych od urządzenia drgań pod synchronicznych, przywołując przy tym odnośną bibliografię wspierającą przegląd.

Stowarzyszenie NERC, 26 lipca 2011 roku, opublikowało dokument pt. „*Lesson Learned – Sub-Synchronous Interaction between Series-Compensated Transmission Lines and Generation*”. Wykazano w nim, że niedawne zdarzenia z rodzaju drgań pod synchronicznych pomiędzy turbinami wiatrowymi a kondensatorem szeregowym w sieci przesyłowej doprowadziły do poważnego uszkodzenia turbin wiatrowych. Zwarcie w linii przesyłowej 345 kV, zazwyczaj likwidowane w standardowy sposób, doprowadziło do powstania poawaryjnej konfiguracji systemu, w której dwie farmy wiatrowe były podłączone promieniowo do linii przesyłowej 345 kV z kompensacją szeregową. Ta konfiguracja doprowadziła do powstania pod synchronicznej niestabilności sterowań (SSCI) pomiędzy turbinami wiatrowymi a linią przesyłową z kompensacją szeregową, w wyniku czego wystąpiły silne przepięcia, zniekształcenia prądu, zadziałanie dodatkowych wspomagających urządzeń przesyłowych i uszkodzenie obwodów sterujących elektrowni wiatrowej. W dokumencie zawarto konkluzję, że podczas badania sposobu integracji dużych elektrowni wiatrowych, należy rozważyć odpowiednie ulepszenia projektu sieci przesyłowej. Do środków, które można rozważać, należą – między innymi – instalacja dodatkowych systemów zabezpieczeń wykrywających SSR oraz podjęcie działań korygujących, jak również instalacja dodatkowych systemów zabezpieczeń pozwalających na uniknięcie SSR w oparciu o topologię systemu.

Za sprawą zaleceń sformułowanych przez NERC, dostawcy przekaźników zabezpieczających zaczęli opracowywać przekaźniki zabezpieczające przed składowymi podharmonicznymi zdolne do

wykrywania interakcji podsynchronicznych, w celu podjęcia działań korygujących, a nawet zapobiegawczych.

K. Narendra i in., w [3], przedstawiają szczegółowy opis zabezpieczenia mikroprocesorowego zaprojektowanego specjalnie do wykrywania i zabezpieczania przed interakcjami podsynchronicznymi. [4][5][6] zawierają szczegółowe informacje na temat zastosowania zabezpieczenia od składowych podharmonicznych, procedury technicznej umożliwiającej obliczenie nastaw, a także propozycję procedury weryfikującej działanie przekaźnika.

W niniejszej pracy skoncentrowano się na procedurze obiektowych testów akceptacyjnych zabezpieczenia od składowych podharmonicznych, zarówno dla funkcji wykrywania podharmonicznych, jak i dla funkcji zabezpieczających przy częstotliwości podstawowej.

Opis nastaw zabezpieczenia od składowych podharmonicznych

[6] Zabezpieczenie od składowych podharmonicznych chroni przed drganiami podharmonicznymi, mierząc moduły napięcia i prądu składowych podharmonicznych przy częstotliwościach w zakresie 5–45 Hz dla systemów 50 Hz lub 5–55 Hz dla systemów 60 Hz. Przekaźnik składa się z czterech 3-fazowych zespołów wejść prądowych i dwóch zespołów wejść napięciowych. Każde wejście można ustawić w taki sposób, aby wykrywało poszczególne częstotliwości z zakresu 5–45 Hz dla

systemów 50 Hz lub 5–55 Hz dla systemów 60 Hz, z dwoma poziomami wykrywalności. Urządzenie posiada również zdolność sumowania wielkości z dowolnych dwóch wejść prądowych – jest to przydatna funkcja, która umożliwia monitorowanie prądów w liniach, które są powiązane z dwoma wyłącznikami, poprzez zastosowanie detektorów poziomu dla tych zsumowanych wartości.

Dla każdego detektora prądu lub napięcia można określić następujące ustawienia wykrywania podharmonicznych:

- zakres częstotliwości wybierany pomiędzy wartościami granicznymi 5 Hz i 45 Hz dla systemów 50 Hz lub 5 Hz i 55 Hz dla systemów 60 Hz,
- wartość pobudzenia przy danym poziomie składowych podharmonicznych,
 - współczynnik znamionowy,
 - współczynnik podstawowy,
- zwłoka czasowa,
- całkowite zniekształcenia podharmoniczne,
- ustawienie liczby operacji na minutę,
- blokada od drugiej składowej harmonicznej – tylko dla detektorów prądu,
- blokada od piątej składowej harmonicznej – tylko dla detektorów prądu.

Format ustawień pokazano na rysunkach 1 i 2 poniżej.

Current 1

Detector 1

Name: Current 1 Det 1

Pickup Delay: 10.000 s

Minimum Frequency: 5 Hz

Maximum Frequency: 25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting: 100 % of 5A = 5.00A

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting: 100 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting: 100 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting: 20 operations/minute

Second Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold: 20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Fifth Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold: 20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Detector 2

Name: Current 1 Det 2

Pickup Delay: 10.000 s

Minimum Frequency: 5 Hz

Maximum Frequency: 25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting: 100 % of 5A = 5.00A

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting: 100 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting: 100 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting: 20 operations/minute

Second Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold: 20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Fifth Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold: 20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Rysunek 1 – ustawienia detektora prądu

Main Voltage

Detector 1

Name: Main Voltage Det 1

Pickup Delay: 10.000 s

Minimum Frequency: 5 Hz

Maximum Frequency: 25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting: 5 % of 69V = 3.45V

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting: 5 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting: 5 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting: 20 operation/minute

Detector 2

Name: Main Voltage Det 2

Pickup Delay: 10.000 s

Minimum Frequency: 5 Hz

Maximum Frequency: 25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting: 5 % of 69V = 3.45V

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting: 5 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting: 5 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting: 20 operations/minute

Rysunek 2 – ustawienia detektora napięcia

W kolejnych rozdziałach przedstawiono opis funkcji zabezpieczających pokazanych na rysunkach 1 i 2.

Zakres częstotliwości

Zakres częstotliwości to zakres częstotliwości podharmonicznych, który będzie monitorowany przez przełącznik. Granice zakresu częstotliwości są określone przez częstotliwość minimalną (Minimum Frequency) i maksymalną (Maximum Frequency), jak pokazano na rysunkach 1 i 2.

Żadne składowe podharmoniczne o częstotliwości wykraczającej poza zakres nie będą uwzględniane przy zastosowaniu nastaw, za wyjątkiem całkowitych zniekształceń podharmonicznych TSHD.

[3] Podstawową zasadą wykorzystywaną przy wykrywaniu podharmonicznych jest porównanie modułów każdej składowej podharmonicznej w zdefiniowanym przez użytkownika zakresie częstotliwości, pomiędzy minimalną a maksymalną

częstotliwością, a następnie porównanie ich ze zdefiniowanym przez użytkownika poziomem progowym dla modułów.

Podczas testowania przełącznika jest konieczne wykazanie, że rozróżnia on częstotliwości podharmoniczne w wyznaczonym zakresie częstotliwości i poza nim.

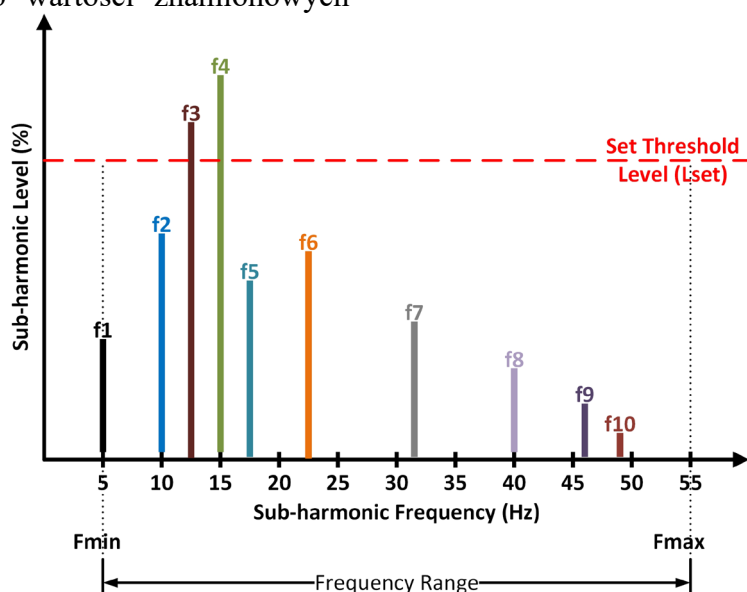
Wartość pobudzenia przy danym poziomie składowych podharmonicznych

Wartość pobudzenia przy danym poziomie składowych podharmonicznych może być powiązana z ustawieniami Nominal ratio (Współczynnik znamionowy) i Fundamental ratio (Współczynnik podstawowy).

[3] Funkcja podharmonicznych znamionowych porównuje ustawienia poziomu pobudzenia ze współczynnikiem modułu składowej podharmonicznej w odniesieniu do wartości znamionowych

wejść prądowych lub napięciowych przełącznika. Podobnie detektor podharmonicznej podstawowej porównuje ustawienia poziomu pobudzenia ze współczynnikiem modułu składowej podharmonicznej w stosunku do wartości podstawowej. Przełącznik zasygnalizuje pobudzenie, gdy współczynnik znamionowy lub podstawowy dla którejkolwiek ze składowych podharmonicznych w określonym zakresie częstotliwości przekroczy ustawiony poziom pobudzenia. [3] Na rysunku 3 przedstawiono interpretację graficzną.

Podczas testów należy wykazać, że przełącznik potrafi precyzyjnie obliczyć wielkości współczynnika znamionowego i współczynnika podstawowego oraz że pobudzenie następuje przy wartości wybranej w odpowiednim ustawieniu, w granicach określonej dokładności.



Rysunek 3 – poziomy składowych podharmonicznych dla współczynnika znamionowego i współczynnika podstawowego, dla systemu 60 Hz

Całkowite zniekształcenia podharmoniczne (Total sub-harmonic distortion)

[3] Detektor całkowitych zniekształceń podharmonicznych (TSHD) oblicza poziom zniekształceń zgodnie ze wzorem:

$$TSHD(\%) = \frac{\sqrt{f_{5Hz}^2 + f_{6Hz}^2 + f_{7Hz}^2 + \dots + f_{55Hz}^2}}{f_{60Hz}^3} \quad (1)$$

[3] Należy zauważyć, że zgodnie z powyższym równaniem w ocenie TSHD będą uwzględnione wszystkie moduły

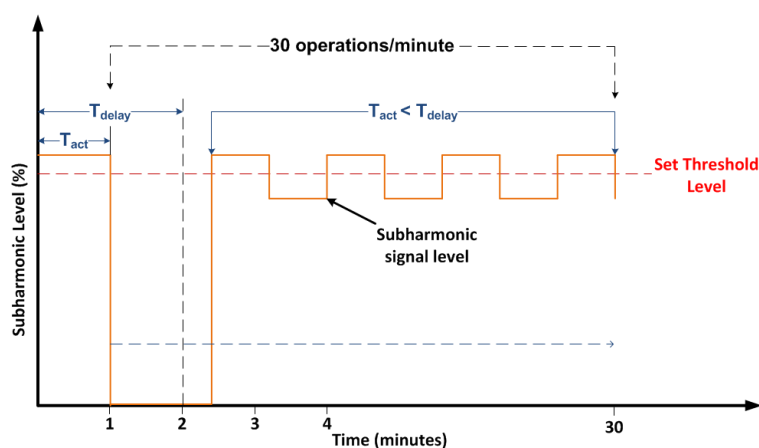
składowych podharmonicznych w zakresie 5–45 Hz dla systemów 50 Hz lub 5–55 Hz dla systemów 60 Hz, w odniesieniu do podstawowego napięcia, prądu lub wirtualnie wyprowadzonego kanału, przy 60 Hz. Tę samą definicję można zastosować do systemu 50 Hz.

Przetestowanie tej funkcji zweryfikuje, czy przekąźnik prawidłowo oblicza wartość TSHD i czy zostaje pobudzony przy ustawionej wartości, w granicach określonej dokładności.

Liczba operacji na minutę (Operations / Minute)

[3] Zadaniem tej funkcji jest zliczanie

drgań podharmonicznych o wielkości przekraczającej ustawioną wartość progową i czasie trwania krótszym niż skonfigurowane opóźnienie czasowe, które mogłyby być pominięte przez konwencjonalne detektory opisane powyżej. Okresowe występowanie takiego zdarzenia, nawet jeżeli jego czas trwania jest krótszy niż czas ustawiony, może mieć negatywny wpływ na sieć elektroenergetyczną i jej elementy, w szczególności w przypadku dużych generatorów termicznych lub generatorów turbin wiatrowych. Do wykrywania takich zdarzeń zaprojektowano specjalny detektor liczby operacji na minutę, który działa w sposób przedstawiony na rysunku 4.



Rysunek 4 – zasada zliczania operacji na minutę

[3] Na powyższym przykładzie przedstawiono zdarzenie o 30 operacjach na minutę (wykres nie jest w skali). Czas T_{act} odpowiada rzeczywistemu czasowi trwania sygnału podharmonicznego, który jest oceniany. Takie zdarzenie nie jest rejestrowane przez konwencjonalne detektory wspomniane w poprzednim rozdziale, ponieważ nie został przekroczony ich czas opóźnienia pobudzenia T_{delay} , a zatem zdarzenie jest dla nich niezauważalne. Będzie wewnętrznie zliczane i monitorowane 30 operacji (działanie powyżej ustawionego limitu). Jeżeli ustawiona liczba operacji na minutę przekroczy wyliczony stan graniczny licznika, ten specjalny detektor wygeneruje sygnał wyzwalaający lub alarm, zgodnie

z ustawioną konfiguracją. W ten sposób można wykryć zakłócenia okresowe o czasie trwania krótszym niż ustawiona wartość graniczna.

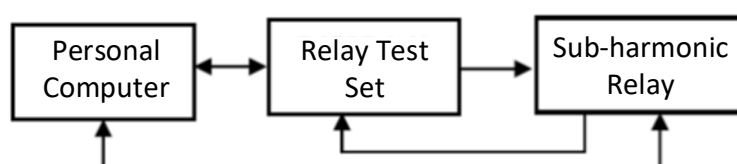
Zastosowanie tej funkcji podczas testowania umożliwia potwierdzenie, że przekąźnik precyzyjnie mierzy czas trwania każdego zdarzenia, poprawnie rozpoznaje liczbę incydentów o czasie trwania krótszym niż T_{delay} , i precyzyjnie zlicza liczbę takich krótkotrwałych incydentów.

Blokada od drugiej harmonicznej (Second Harmonic Blocking) i blokada od piątej harmonicznej (Fifth Harmonic Blocking)

Przekąźnik jest narażony na działanie stanów przejściowych, takich jak prądy

załączania transformatora lub pola, czy też przewzbudzenie uzwojenia pierwotnego transformatora. W związku z tym wprowadzono funkcję blokady harmonicznych – przekaźnik mierzy 2. i 5. składową harmoniczną fali prądu i blokuje działanie wyjść wyzwalających, eliminując w ten sposób przypadki nieprawidłowego zadziałania (prąd załączania może być bogaty w 2. składową harmoniczną, a zjawisko przewzbudzenia może objawiać się przebiegami z dużą zawartością 5. harmonicznej).

Wykorzystanie tych funkcji podczas



Rysunek 5 – konfiguracja sprzętowa na potrzeby testu

System do testowania przekaźników powinien być zdolny do generowania sygnałów o różnych składowych podharmonicznych nałożonych na częstotliwość podstawową, dla przetestowania działania przekaźnika i weryfikacji jego ustawień.

Testowanie wartości granicznych i wartości pobudzenia

W przypadku ustawień detektorów podharmonicznych, napięciowych i prądowych, zakres częstotliwości podharmonicznych można ustawić, wybierając częstotliwość minimalną i maksymalną w ustawieniach „Minimum Frequency” i „Maximum Frequency”. Ustawienia częstotliwości minimalnej i maksymalnej są następnie używane w parametrach „Nominal Ratio”, „Fundamental Ratio” i wszystkich związanych z nimi stopniach. Wartości progowe można ustawić indywidualnie dla każdego stopnia, na dwa różne sposoby: (a) „Nominal Ratio”: wartości progowe elementów są określane przez współczynnik modułu składowej podharmonicznej i znamionowej wartości modułu;

testowania umożliwia potwierdzenie, że przekaźnik prawidłowo wyodrębnia 2. i 5. składową harmoniczną z fali prądu, która może zawierać również składowe podharmoniczne, i że prawidłowo blokuje wyjścia wyzwalające, gdy zawartość 2. i 5. składowej harmonicznej przekracza ustawioną wartość progową.

Testowanie funkcji przekaźnika

Ustawienia testu

Na rysunku 5 przedstawiono konfigurację sprzętową na potrzeby testu.

(b) „Fundamental Ratio”: wartości progowe stopni działania są określane przez współczynnik modułu składowej podharmonicznej i podstawowej wartości modułu dla napięcia i prądu.

Aby nastąpiło pobudzenie od stopni „Nominal Ratio” i „Fundamental Ratio”, muszą być spełnione dwa warunki: moduł składowych podharmonicznych musi dawać, odpowiednio, współczynniki większe niż ustawione wartości progowe dla poszczególnych stopni, a częstotliwość składowych podharmonicznych musi się mieścić w granicach ustawionego zakresu częstotliwości.

Testy wartości granicznych zakresu częstotliwości i wartości progowych pobudzenia są przeprowadzane przy użyciu narzędzia programowego, które potrafi zmieniać krokowo moduły napięcia i prądu, przy konkretnych częstotliwościach podharmonicznych. W przypadku testu opisanego poniżej, zakres częstotliwości ustawiono na 5 Hz i 45 Hz, a wartość progową pobudzenia prądowego na 100 mA.

Figure 6 pokazuje zrzut ekranu modułu

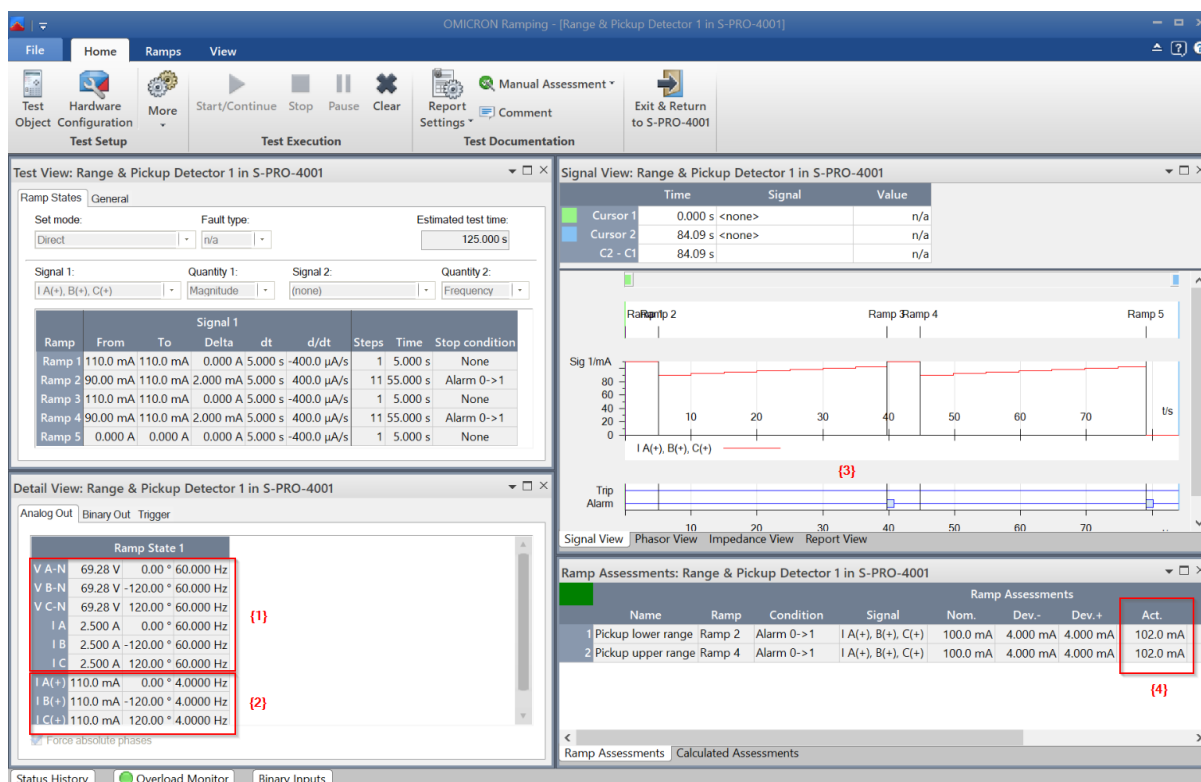
testowego skonfigurowanego do tego badania. Cała sekwencja testowa została zrealizowana przez przyłożenie napięcia znamionowego i prądu obciążenia 2,5 A do każdej fazy, przy częstotliwości znamionowej (patrz {1}, Figure 6). Utworzono pięć ramp w celu symulowania następujących testowanych warunków:

- Odcinek Ramp 1: ten stan został wprowadzony, aby sprawdzić, czy przekaźnik nie będzie działać błędnie przy częstotliwościach podharmonicznych niższych od minimum zakresu częstotliwości. Prąd stały, przy częstotliwości podharmonicznej równej 4 Hz i module większym od wartości pobudzenia, jest nakładany na sygnał (patrz {2}). W widoku sygnałów w dziedzinie czasu (patrz {3}) można sprawdzić, czy przekaźnik nie wysłał rozkazu wyłącz.
- Odcinek Ramp 2: weryfikacja, czy przekaźnik zostaje wyzwolony, gdy zmierzona zawartość składowych podharmonicznych, dla podharmonicznych pozostających w zakresie, osiągnęła odpowiednią wartość. Moduł prądu przy 5 Hz jest zwiększany do chwili zadziałania

przekaźnika. Każda wartość podczas zmian krokowych jest utrzymywana przez 5 sekund, co przekracza wielkość opóźnienia zadziałania elementu. W oknie oceny (patrz {4}) widać, że przekaźnik zostaje wyzwolony przy zmierzonej wartości pobudzenia 102 mA.

- Odcinek Ramp 3: tak samo, jak Ramp 1, ale tym razem z podharmoniczną o częstotliwości 46 Hz. Nie zarejestrowano zadziałania, ponieważ nie zostało spełnione kryterium zakresu częstotliwości.
- Odcinek Ramp 4: tak samo, jak Ramp 2, ale tym razem dla podharmonicznej o częstotliwości 45 Hz. W oknie oceny (patrz {4}) widać, że przekaźnik zostaje wyzwolony, gdy moduł prądu osiąga wartość 102 mA.
- Odcinek Ramp 5: przyłożenie sygnałów wyłącznie przy częstotliwości znamionowej. Przekaźnik się resetuje.

Tę samą procedurę można powtórzyć, aby przetestować wartości graniczne częstotliwości i wartości pobudzenia dla elementów detektora napięcia, jeżeli są one aktywne.



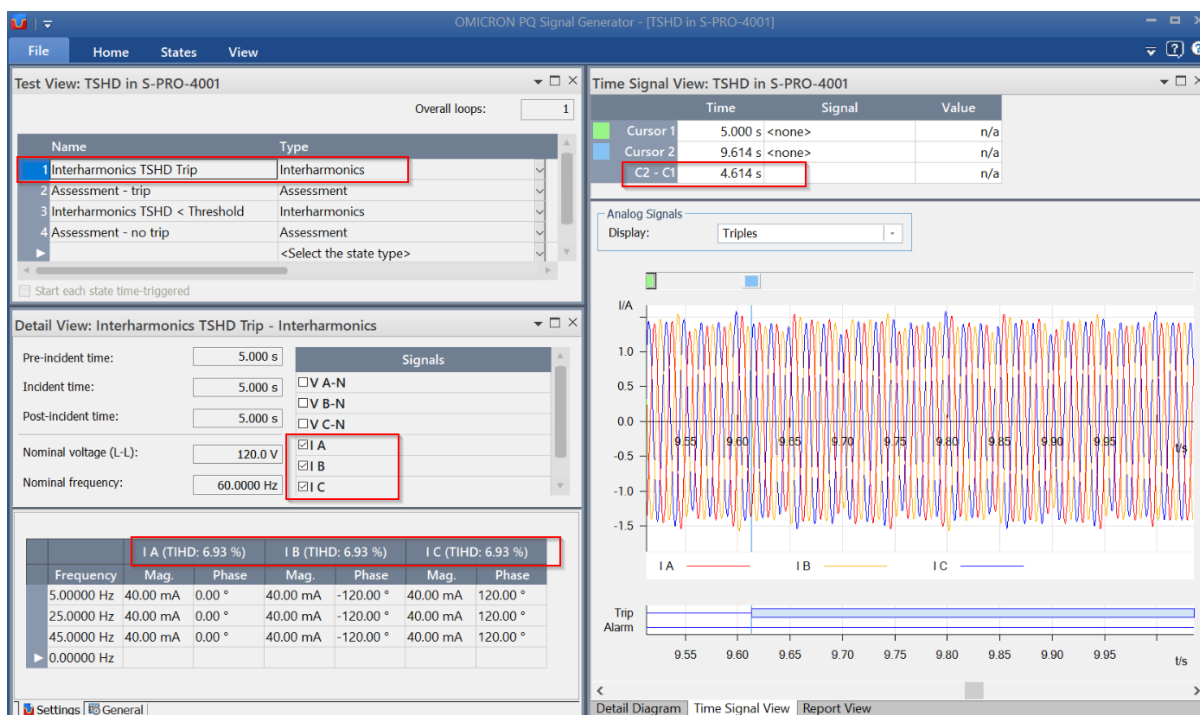
Rysunek 6 – konfiguracja testu dla wartości granicznych częstotliwości i wartości pobudzenia

Testowanie całkowitych zniekształceń podharmonicznych (TSHD)

W przypadku ustawienia „Total Sub-Harmonic Distortion (TSHD)” wartości progowe poszczególnych stopni są określane przez współczynnik dla sumy wszystkich modułów w zakresie 5 Hz–45 Hz dla systemów 50 Hz lub 5 Hz–55 Hz dla systemów 60 Hz oraz modułu podstawowego. Aby nastąpiło pobudzenie od stopnia „TSHD”, suma wszystkich modułów składowych podharmonicznych musi być większa od wartości progowych TSHD (podczas przykładowego testu ustawionych na 5%).

Podczas przeprowadzania tego testu przyłożono napięcie znamionowe i prąd 1 A, przy częstotliwości znamionowej. Do sygnałów prądowych dodano przebiegi o częstotliwościach podharmonicznych 5 Hz, 25 Hz i 45 Hz. Były symulowane dwa sygnały z następującą zawartością składowych podharmonicznych:

- TSHD 6,93%, aby wykazać zadziałanie dla wartości wyższych niż ustawiona wartość progowa (Figure 7).
- TSHD 4,92%, aby wykazać, że przełącznik nie działa błędnie przy wartościach poniżej ustawionego progu.



Rysunek 7 – kształt fali prądu użytej do badania pobudzenia wskutek przekroczenia progu całkowitych zniekształceń podharmonicznych (TSHD)

Testowanie liczby operacji w określonym czasie (operations/duration)

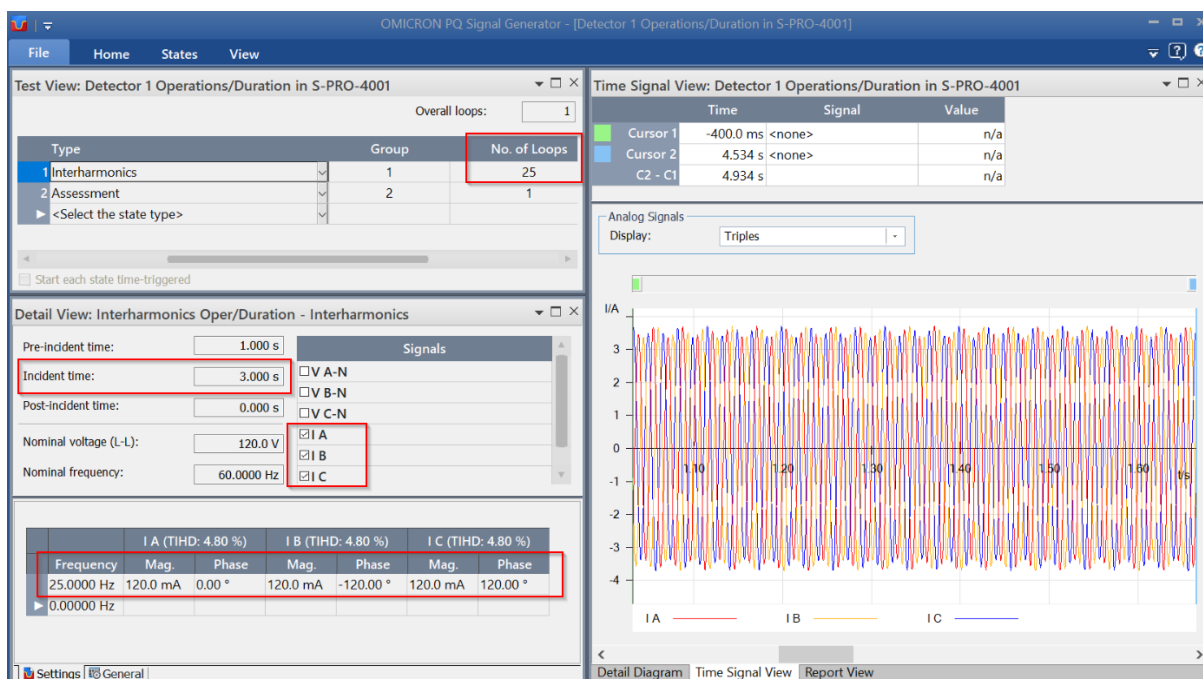
W przypadku nastaw stopnia „Operations/Duration”, napięciowych i prądowych, można ustawić liczbę wystąpień w określonym czasie (ustawianym w minutach). Wystąpienie to zdarzenie, w którym następuje pobudzenie od stopnia „Nominal Ratio”, „Fundamental Ratio” lub „TSHD”, ale które nie trwa dłużej niż wartość ustawiona w parametrze „Pickup Delay” (Opóźnienie pobudzenia), więc nie powoduje zadziałania detektora S-PRO. Stopień „Operations/Duration” jest dostępny tylko wtedy, gdy jest już aktywny jeden z powiązanych z nim stopni podharmonicznych.

Aby nastąpiło pobudzenie od stopnia „Operations/Duration”, liczba wystąpień w ciągu minuty musi być większa niż ustawiona dla nich wartość progowa.

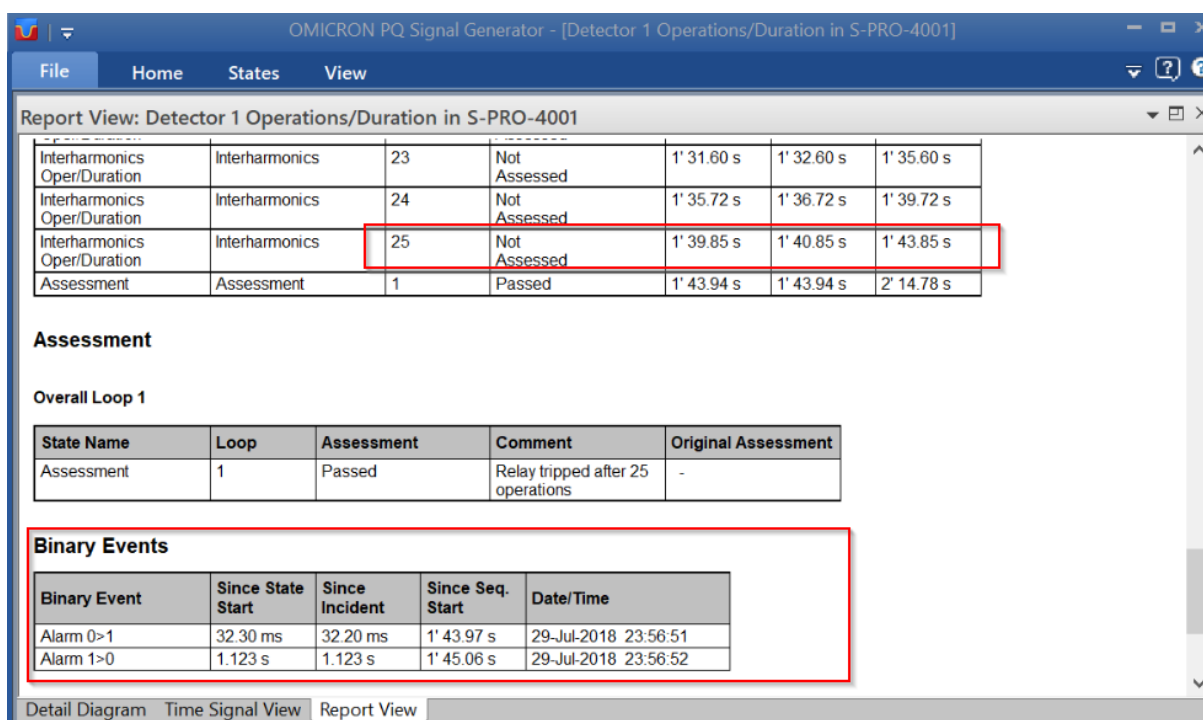
Figure 8 pokazuje konfigurację dla

tęgo testu. Sygnał został dobrany w taki sposób, aby moduł składowej podharmonicznej o częstotliwości 25 Hz był większy niż wartość pobudzenia, ale by zdarzenie trwało tylko 3 s, a więc mniej niż ustawione opóźnienie pobudzenia wynoszące 4 s.

Narzędzie testowe umożliwia powtarzanie tego samego sygnału, poprzez zdefiniowanie parametru „No. of loops” (Liczba pętli), jak pokazuje Figure 8. Stopień został ustawiony na 25 operacji w ciągu 2 minut, a zatem sygnał został skonfigurowany na 25 powtórzeń. Czas trwania każdego powtórzenia wynosi 4 s (1 s przed incydem plus 3 s czasu incydem), więc łączny czas trwania testu wynosi około 1 minuty i 40 sekund. Po zakończeniu 25. powtórzenia zaobserwowano zadziałanie przekaźnika. Figure 9 pokazuje raport z testu zawierający dowód, że zadziałanie stopnia zostało wykryte przez tester po zakończeniu 25. operacji, w interwale 2-minutowym.



Rysunek 8 – kształt fali użytej do badania liczby operacji na minutę

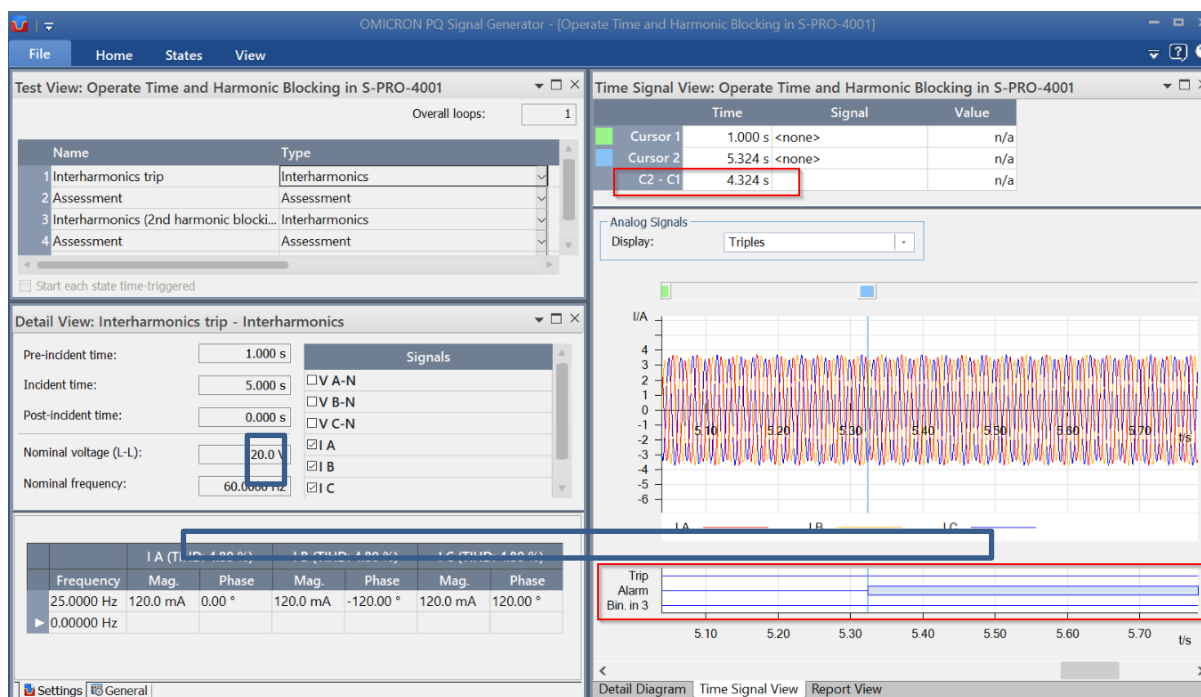


Rysunek 9 – raport z badania liczby operacji na minutę, z zarejestrowanym zdarzeniem binarnym

Testowanie czasu zadziałania

Dla weryfikacji czasu opóźnienia pobudzenia przekaźnika stworzono sygnał złożony ze składowej podstawowej i składowej podharmonicznej o częstotliwości 25 Hz. Składowe prądu podstawowa i podharmoniczna są stałe, a ich

moduły są wystarczająco duże, aby spowodować pobudzenie detektorów podharmonicznych S-PRO. Czas opóźnienia zadziałania przekaźnika można zaobserwować w widoku oscylograficznym sygnałów czasowych, śledząc zdarzenie binarne, jak przedstawia Figure 10.



Rysunek 10 – test czasu opóźnienia pobudzenia

Testowanie blokady 2. składowej harmoniczej

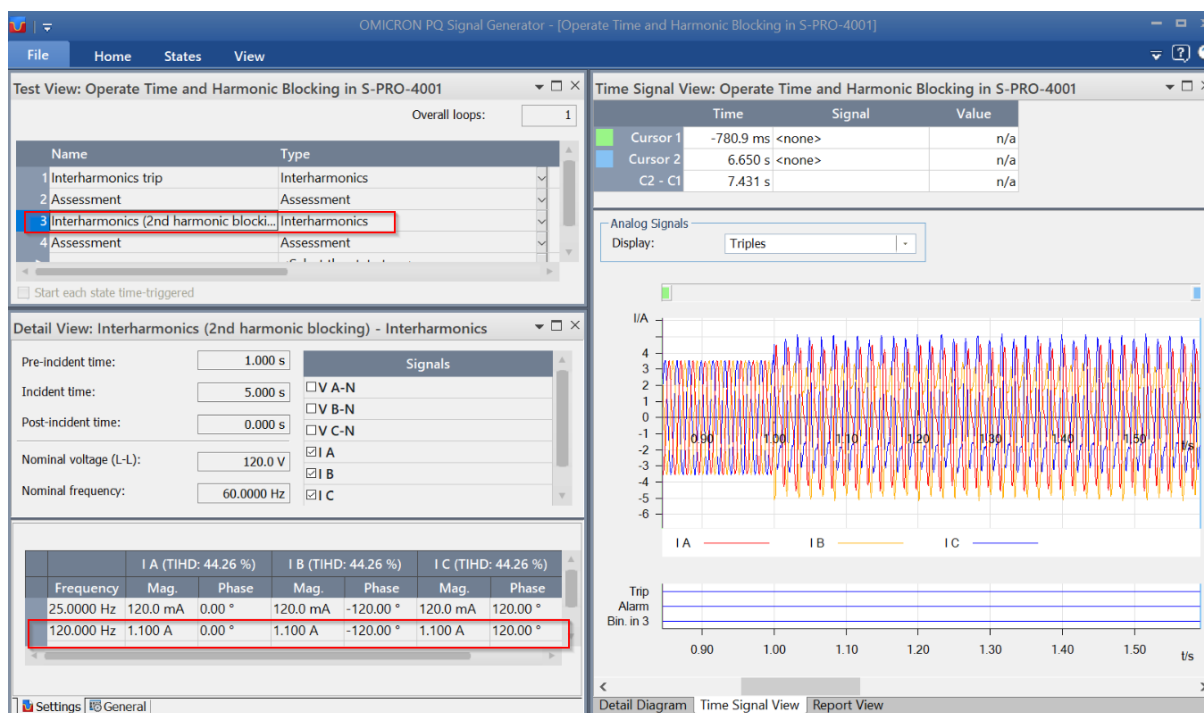
W przypadku nastaw elementów „Second Harmonic Blocking” i „Fifth Harmonic Blocking”, wyłącznie prądowych, określa się indywidualnie wartości progowe, przez zdefiniowanie stosunku modułu drugiej lub piątej składowej harmoniczej do modułu znamionowego prądu 5 A lub 1 A.

Aby elementy parametrów „Second Harmonic Blocking” i „Fifth Harmonic Blocking” spowodowały blokadę detektorów podharmonicznych, stosunek modułu 2. i/lub 5. składowej harmoniczej do prądu znamionowego musi być większy od

ustawionych dla nich wartości progowych.

Test jest wykonywany w taki sam sposób, jak pokazuje Figure 10 dla czasu zadziałania, ale tym razem do sygnału jest również dodawana druga składowa harmoniczna, jak przedstawia Figure 11. Moduł 2. składowej harmoniczej jest ustawiony na wartość większą niż wartość progowa elementu „Second Harmonic Blocking”, co powoduje zablokowanie działania stopni podharmonicznych.

Elementy parametru „Fifth Harmonic Blocking” można przetestować w ten sam sposób, jak w przypadku elementów „Second Harmonic Blocking”.



Rysunek 11 – kształt fali użytej do badania blokowania 2. składowej harmonicznej

Podsumowanie

Celem niniejszej pracy jest opisanie procedury testowej przy uruchamianiu zabezpieczeń od składowych podharmonicznych, za pomocą zaawansowanego systemu do testowania przekładników, zdolnego do generowania fal o kształtach koniecznych do symulacji odpowiednich scenariuszy testowych.

Przedstawiono pełny opis procedury testowania, a także przykłady pokazujące typowe kształty fal zastosowane do badania każdej z funkcji.

Należy zaznaczyć, że zabezpieczenia od składowych podharmonicznych nie mogą być testowane na drodze prostego generowania prądu i napięcia, ponieważ każdy z testów wymaga konkretnego połączenia sygnału podstawowego i składowych podharmonicznych.

W pracy przedstawiono procedurę testowania detektorów prądu i napięcia dla następujących nastaw wykrywania podharmonicznych:

- Frequency Range (Zakres częstotliwości), do wyboru pomiędzy 5 Hz a 55 Hz,
- wartość pobudzenia przy danym poziomie składowych podharmonicznych,
 - Nominal Ratio (Współczynnik znamionowy),
 - Fundamental Ratio (Współczynnik podstawowy),
- Time delay (Opóźnienie czasowe),
- Total Sub-harmonic Distortion (Całkowite zniekształcenia podharmoniczne),
- Operations / Minute Setting (Ustawienie liczby operacji na minutę),
- Second Harmonic Blocking (Blokowanie drugiej składowej harmonicznej),
- Fifth Harmonic Blocking (Blokowanie piątej składowej harmonicznej).

1. BIBLIOGRAFIA

- [1] „Sub-Synchronous Control Interactions between Type 3 Wind Turbines and Series Compensated AC Transmission Systems”, Andrew L. Isaacs, *członek IEEE*, Garth D. Irwin, *członek IEEE* i Amit K. Jindal, *członek IEEE*
- [2] „Reader’s Guide to Sub-Synchronous Resonance” oraz Raport komitetu IEEE sporządzony przez Grupę Roboczą ds. Rezonansu Podsyncronicznego wchodzącą w skład Podkomitetu ds. Dynamicznego Działania Systemów, Transactions on Power Systems, Vol. 7, nr 1, luty 1992
- [3] „A Microprocessor-Based Sub-Harmonic Protection Technique for Wind Farms”, Krish Narendra, Dave Fedirchuk, Adi Mulawarman, Pratap Mysore, Konferencja IEEE EPEC 2011
- [4] „New Microprocessor Based Relay to Monitor and Protect Power Systems against Sub-Harmonics”, K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, N. Zhang, A. Mulawarman, P. Mysore, V. Sood., Konferencja IEEE EPEC 2011
- [5] „Performance Evaluation of a Sub-Harmonic Protection Relay Using Practical Waveforms” N. Perera, K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, V. Sood, Konferencja IEEE EPEC 2012
- [6] „Sub-harmonic protection application for interconnections of series compensated lines and wind farms”, René Midence, Joe Perez, P.E., Adi Mulawarman, Western Protection Relay Conference 2012, Pullman, Waszyngton.

OMICRON to firma międzynarodowa służąca branży elektroenergetycznej innowacyjnymi rozwiązaniami w zakresie testowania i diagnostyki. Zastosowanie produktów firmy OMICRON pozwala użytkownikowi z dużą dozą pewności ocenić stan urządzeń podstawowych i dodatkowych zainstalowanych w systemie. Gamę produktów uzupełniają usługi w obszarze konsultacji, uruchomień, testowania, diagnostyki i szkoleń.

Klienci w ponad 160 krajach polegają na zdolności firmy do dostarczania najnowocześniejszej technologii o doskonałej jakości. Nasze centra serwisowe na wszystkich kontynentach zapewniają dostęp do obszernej bazy wiedzy oraz doskonałej obsługi klienta. Wszystko to, w połączeniu z rozległą siecią partnerów handlowych, sprawia, że nasza firma jest liderem w branży elektroenergetycznej.

Szczegółowe informacje, dodatkowe publikacje oraz dane kontaktowe naszych oddziałów na całym świecie można znaleźć na naszej stronie internetowej.