

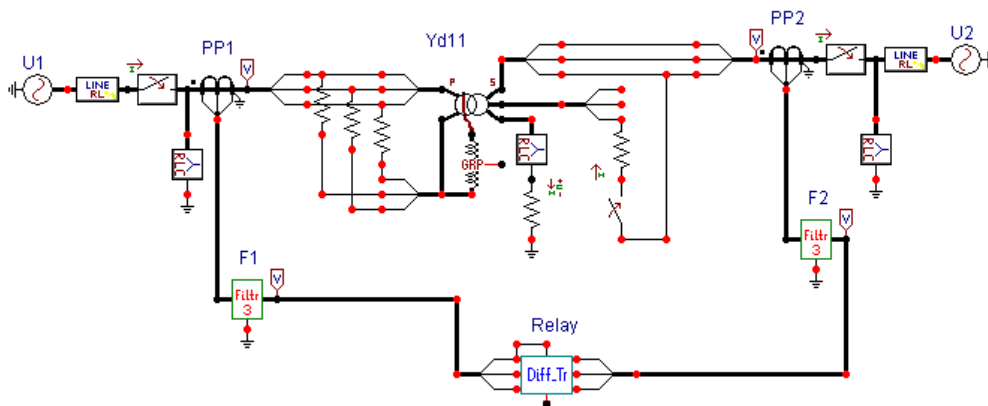
PRZYKŁAD C4

Opracować model przekaźnika różnicowego do zabezpieczania transformatora dwuuzwojeniowego. Przeprowadzić analizę działania przekaźnika.

Model fragmentu sieci elektrycznej wraz z zabezpieczeniem różnicowym transformatora jest pokazany na rys. 1. Rozpatrywana sieć z transformatorem jest taka, jak w Przykładzie C2. Obwody pomiarowe po obu stronach transformatora składają się z przekładników prądowych oraz analogowych filtrów odcinających. Dla uproszczenia schematu, wszystkie te bloki są przedstawione w postaci elementów trójfazowych. Dyskowe zbiory związane z modelem znajdują się w kartotece: *przykład_C4*.

Modele przekładników prądowych wykonano w postaci niestandardowych modułów, które reprezentują trzy przekładniki umieszczone poszczególnych fazach. Moduł przekładnika tworzą następujące zbiory dyskowe (CT – ang. *Current Transformer*):

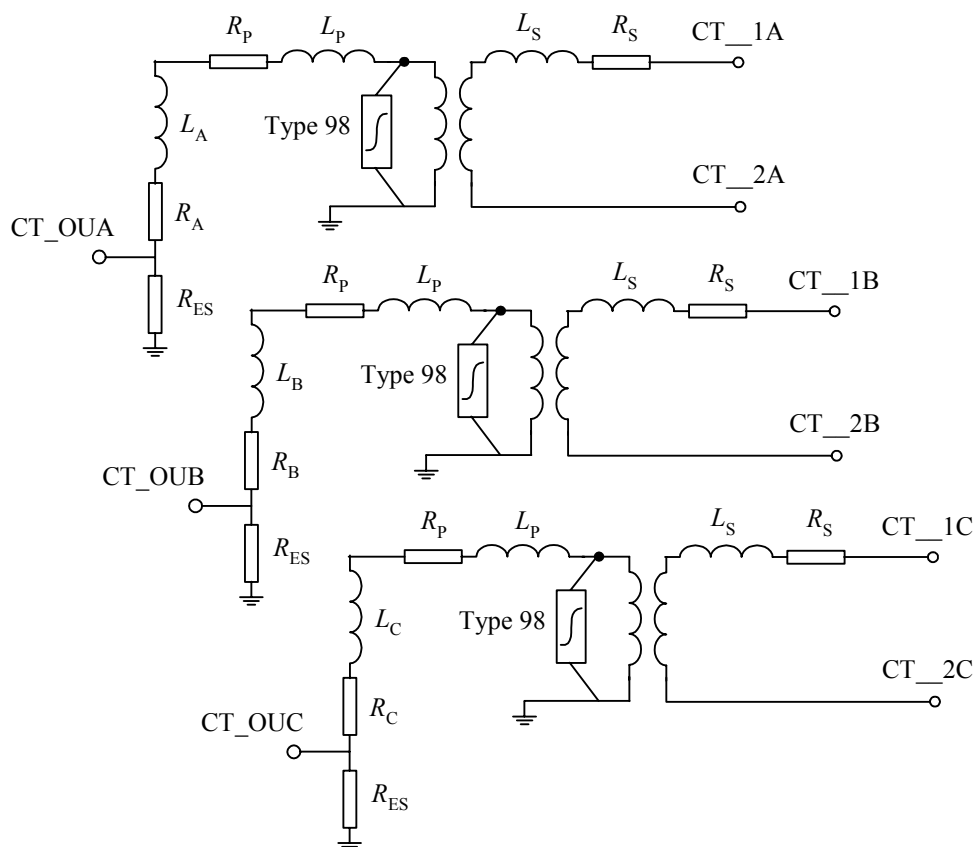
- CT_3.dat* - zbiór źródłowy,
- CT_3.lib* - zbiór skompilowany,
- CT_3.sup* - zbiór z modelem graficznym.



Rys. 1. Schemat modelu ATPDraw z zabezpieczeniem różnicowym transformatora

Schemat elektryczny modułu przekładników jest pokazany na rys. 2. Do pomiaru prądów wtórnych utworzono dzielniki rezystancyjne: spadek napięcia na oporniku R_{ES} jest

proporcjonalny do tego prądu. Taki układ stanowi jednocześnie przetwornik prąd/napięcie i ułatwia przyłączenie filtra odcinającego. W rzeczywistych warunkach rolę tę spełnia dodatkowy transformator, który wprowadza także niezbędną separację galwaniczną pomiędzy obwodem wejściowym i układem wewnętrznym przekładnika. Strona związana z wysokim napięciem przekładników jest w modelu reprezentowana przez stronę wtórną transformatorów (*s – ang. secondary*), natomiast obwód pomiarowy jest skojarzony ze stroną pierwotną modelu transformatora (*p – ang. primary*). Obciążenie przekładnika stanowią elementy: L_A , R_A oraz R_{ES} w pierwszej fazie i podobnie w pozostałych fazach. Wartość opornika R_{ES} (jednakowy we wszystkich fazach) można przyjąć bardzo małą, na przykład, $0,1\ \Omega$. Wówczas wartość i charakter obciążenia będzie praktycznie zależała od pozostałych dwóch elementów. Wyjścia napięciowe z tego modelu są związane z zaciskami: CT_OUA, CT_OUB, CT_OUC. Są one podłączone do jednej nóżki elementu graficznego modelu.



Rys. 2. Schemat przekładników prądowych tworzących moduł CT_3

Charakterystyka magnesowania rdzenia jest reprezentowana podobnie, jak w klasycznym modelu transformatora, za pomocą elementu nieliniowego: Typ 98 (bez histerezy). Użytkownik nie ma dostępu bezpośrednio z edytora ATPDraw do zmiany tej charakterystyki. W razie potrzeby, należy odpowiednio edytować zbiór CT_3.dat i następnie poddać go kompilacji. Poza tym, użytkownik ma możliwość zmiany pozostałych parametrów każdego z przekładników fazowych.

Prąd znamionowy wtórny przekładników prądowych ma wartość 1 A (wartość skuteczna), natomiast prądy pierwotne: PP1: 10000 A, PP2: 600 A.

Model filtru odcinającego również wykonano w postaci trójfazowej: w każdej fazie umieszczono filtr RC drugiego rzędu zgodnie z opisem przedstawionym w poprzednim punkcie. Dla częstotliwości próbkowania 1000 Hz przyjęto częstotliwość odcięcia filtru: 375 Hz.

Model przekaznika jest reprezentowany przez blok *Diff_Tr* (rys. 3). Jest to element 8-zaciskowy, do którego nóżek doprowadzono po trzy napięcia z każdego filtru odcinającego oraz wartość składowej urojonej napięcia fazy A dla początkowego stanu ustalonego sieci. Wielkość ta ma oznaczenie *imssv*, jako wielkość wejściowa do bloku MODELS. Jej zastosowanie w modelu ma znaczenie drugorzędne: aby pominąć stan przejściowy użytych w algorytmie filtrów cyfrowych można ich ‘pamięci’ wstępnie zappełnić, korzystając z obliczanego przez program ATP stanu ustalonego, odpowiadającego momentowi startu programu ($t=0$). Normalnie dostępne są składowe rzeczywiste prądów i napięć. Do pełnej znajomości położenia wektora napięcia należy wczytać także wartość składowej urojonej.

Do odwzorowania przekaznika różnicowego należy określić prądy: różnicowy i wzdłużny w każdej fazie transformatora. Odpowiednie związki zależą od sposobu połączenia uzwojeń transformatora, przekładni zwojowych: transformatora oraz przekładników prądowych oraz efektów skalowania w torze pomiarowym. Prąd różnicowy powinien być odniesiony do uzwojenia kolumny strony pierwotnej lub wtórnej transformatora. Jeśli wybierzemy uzwojenie strony Y, to odpowiednie związki przyjmą następującą formę.

Prądy różnicowe w poszczególnych fazach:

$$\begin{aligned} i_{dA}(k) &= k_Y(i_{YA}(k) - i_{Y0}(k)) - k_D(i_{DA}(k) - i_{DC}(k))/\sqrt{3} \\ i_{dB}(k) &= k_Y(i_{YB}(k) - i_{Y0}(k)) - k_D(i_{DB}(k) - i_{DA}(k))/\sqrt{3} \\ i_{dA}(k) &= k_Y(i_{YA}(k) - i_{Y0}(k)) - k_D(i_{DA}(k) - i_{DC}(k))/\sqrt{3} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: $i_{Y0}(k) = \frac{1}{3}(i_{YA}(k) + i_{YB}(k) + i_{YC}(k))$, indeks *D* oznacza prąd fazowy od strony trójkąta,

indeks *Y* – od strony gwiazdy.

Prądy stabilizujące (hamujące):

$$i_{sA}(k) = k_Y(i_{YA}(k) - i_{Y0}(k)) + k_D(i_{DA}(k) - i_{DC}(k))/\sqrt{3}$$

$$i_{sB}(k) = k_Y(i_{YB}(k) - i_{Y0}(k)) + k_D(i_{DB}(k) - i_{DA}(k))/\sqrt{3} \quad (2)$$

$$i_{sA}(k) = k_Y(i_{YA}(k) - i_{Y0}(k)) + k_D(i_{DA}(k) - i_{DC}(k))/\sqrt{3}$$

W powyższych równaniach, k_Y jest współczynnikiem, przez który należy pomnożyć prąd i_Y (w modelu jest to napięcie) na wejściu przekładnika, aby otrzymać prąd w obwodzie pierwotnym (na wejściu przekładnika prądowego) po stronie gwiazdy. Podobnie, współczynnik k_D odnosi się do prądu po stronie uzwojenia połączonego w trójkąt. Dzięki temu, prądy obliczone zgodnie z (1), (2) są odniesione do strony gwiazdy transformatora.

Można zauważyć, że w powyższych wyrażeniach od prądu fazowego strony Y odejmowana jest składowa zerowa. Wynika to stąd, że w prądach fazowych strony Δ taka składowa nie występuje. Prądy: różnicowy i stabilizujący mogą być także obliczane względem strony Δ .

W bloku pomiarowym obliczane są następujące wielkości:

- amplituda pierwszej, drugiej i piątej harmonicznej prądu różnicowego,
- amplituda składowej podstawowej prądu stabilizującego.

Składowe ortogonalne m -tej harmonicznej obliczane są według następujących zależności rekursywnych:

$$\begin{aligned} X_{cm}(k) &= X_{cm}(k-1) + \frac{2}{N} h_{cm}(k)(y(k) - y(k-N)) \\ X_{sm}(k) &= X_{sm}(k-1) + \frac{2}{N} h_{sm}(k)(y(k) - y(k-N)) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: N - liczba próbek w okresie (wszystkie składowe są obliczane w oknie o długości N próbek); $h_{cm}(k)$, $h_{sm}(k)$ - funkcje impulsowe filtrów kosinusowego i sinusowego, odpowiednio.

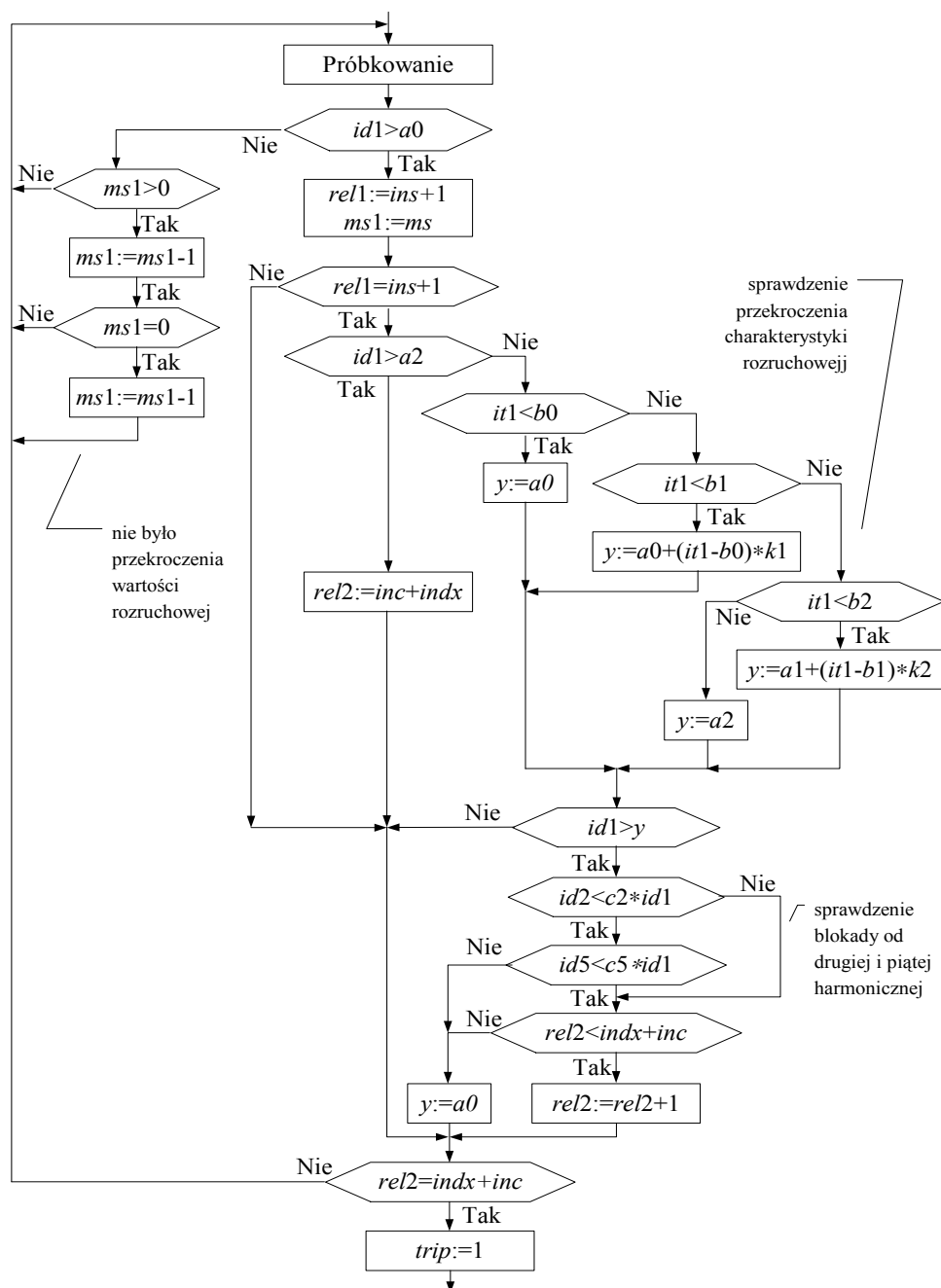
Funkcje impulsowe filtrów są określane według zależności ($a=2\pi/N$):

$$\begin{aligned} h_{cm}(k) &= \cos(a(k-0,5)) \\ h_{sm}(k) &= -\sin(a(k-0,5)) && \text{- dla składowej podstawowej,} \\ h_{cm}(k) &= \cos(2a(k-0,5)) \\ h_{sm}(k) &= -\sin(2a(k-0,5)) && \text{- dla drugiej harmonicznej,} \\ h_{cm}(k) &= -\cos(5a(k-0,5)) \\ h_{sm}(k) &= \sin(5a(k-0,5)) && \text{- dla piątej harmonicznej.} \end{aligned}$$

Amplitudy tych składowych obliczane są według zależności:

$$X(k) = \sqrt{X_{cm}^2(k) + X_{sm}^2(k)} \quad (4)$$

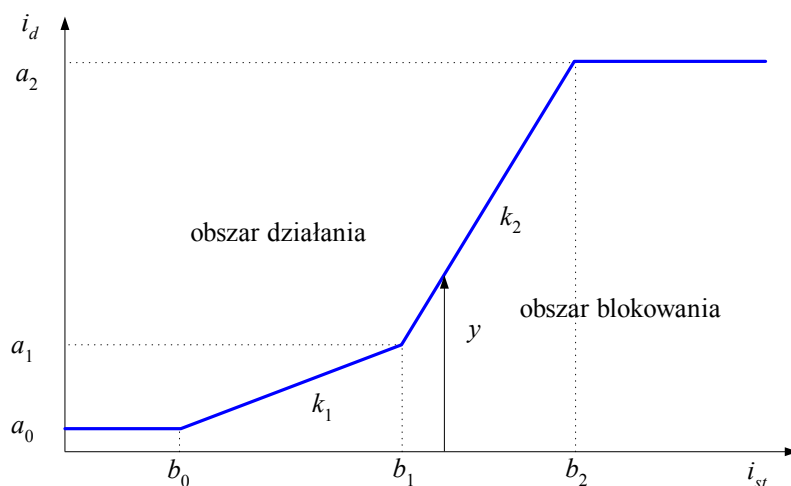
Szczegółowy algorytm członu decyzyjnego zabezpieczenia różnicowego w postaci blokowej dla jednej fazy transformatora jest pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Schemat algorytmu zabezpieczenia (dla jednej fazy transformatora)

Oznaczenia zmiennych są identyczne, jak w programie *T_Diff.mod*, który tworzy moduł ATPDraw. Zapis algorytmu jest nadmiarowy (niektóre zmienne i warunki można usunąć bez wpływu na wynik działania procedury), jednak dokładnie odwzorowuje on procedurę w języku MODELS, zapisaną w zbiorze *T_Diff.mod*.

W bloku pomiarowym, w każdym kroku próbkowania, obliczane są próbki prądu różnicowego i stabilizacyjnego, a także ich amplitudy dla pierwszej, drugiej i piątej harmonicznej (te dwie ostatnie tylko w odniesieniu do prądu różnicowego). Jeśli nastąpi przekroczenie progu rozruchowego ($id1 > a0$), to następuje sprawdzenie przebiegu trajektorii prądu różnicowego na charakterystyce rozruchowej przełącznika (rys. 4). Odpowiednie nastawy i punkty na charakterystyce odniesione są do amplitud: prądu różnicowego i stabilizującego. Odpowiednie nastawy są dostępne w zbiorze *T_Diff.mod*.



Rys. 4. Charakterystyka rozruchowa: oznaczenia przyjęte w programie

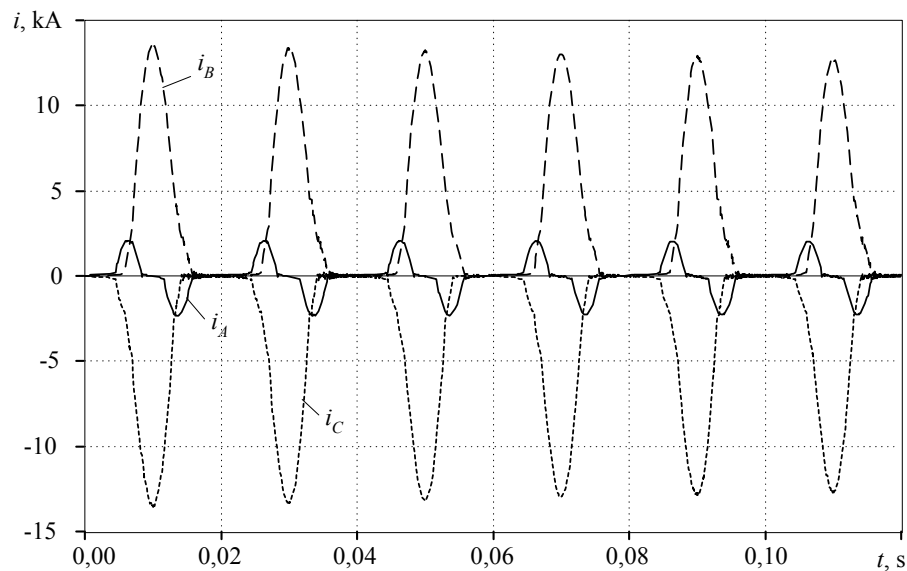
Jeśli warunki działania zabezpieczenia są spełnione, to w dalszej części procedury następuje sprawdzenie warunków blokady od drugiej i piątej harmonicznej prądu różnicowego. Odpowiednie nastawy są tu wyrażone przez współczynniki C_2 oraz C_5 . Sygnał wyłączający wyłączniki po obu stronach transformatora pojawia się w przypadku, gdy wskaźnik *trip* przyjmuje wartość 1 przynajmniej w jednej fazie.

Badanie zabezpieczenia

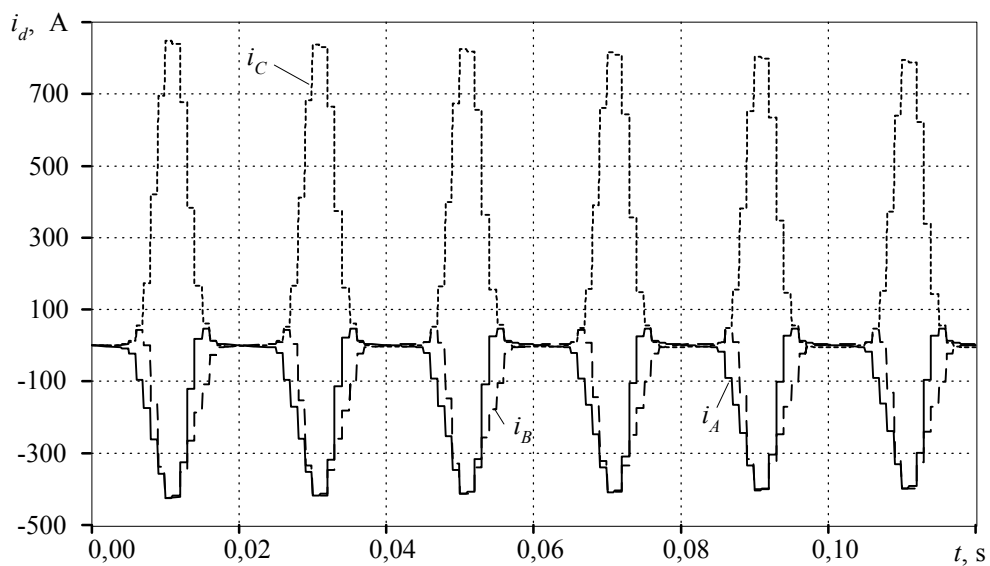
Pełny model sieci wraz z zabezpieczeniem jest pokazany na rys. 1. Poniżej podano wyniki kilku testów przeprowadzonych z wykorzystaniem tego modelu.

a) Załączanie nieobciążonego transformatora.

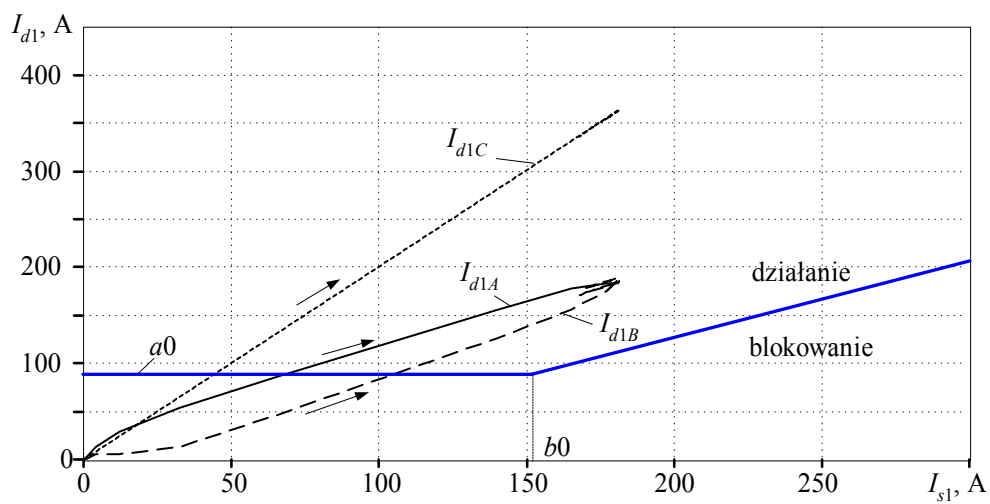
Test został przeprowadzony zgodnie z Przykładem C2. Przebiegi prądów fazowych są pokazane na rys. 5. Przebieg prądu różnicowego w poszczególnych fazach jest pokazany na rys. 6. Schodkowy charakter krzywych wynika z procesu próbkowania. Należy zauważyć, że prądy te są odniesione do uzwojeń strony Y transformatora. Widać, że prąd różnicowy przybiera wartości przekraczające prąd znamionowy tej strony transformatora. Kryterium różnicowe z pewnością spowodowałoby wyłączenie transformatora. Potwierdzają to trajektorie prądów różnicowych we wszystkich trzech fazach względem charakterystyki rozruchowej przekątnika (rys. 7). Charakterystyka ta jest w tym zakresie zmian prądu stabilizującego ograniczona przez wartość rozruchową a_0 , która jest nastawiona na 20% prądu znamionowego transformatora. Jednak amplituda drugiej harmonicznej prądu różnicowego w tym przypadku jest również duża (na rys. 8 są pokazane przebiegi amplitud w fazie C) i decyzja przekątnika jest blokowana. Udział piątej harmonicznej jest niewielki – jej wzrost mógłby być spowodowany wzrostem napięcia lub obniżeniem się częstotliwości.



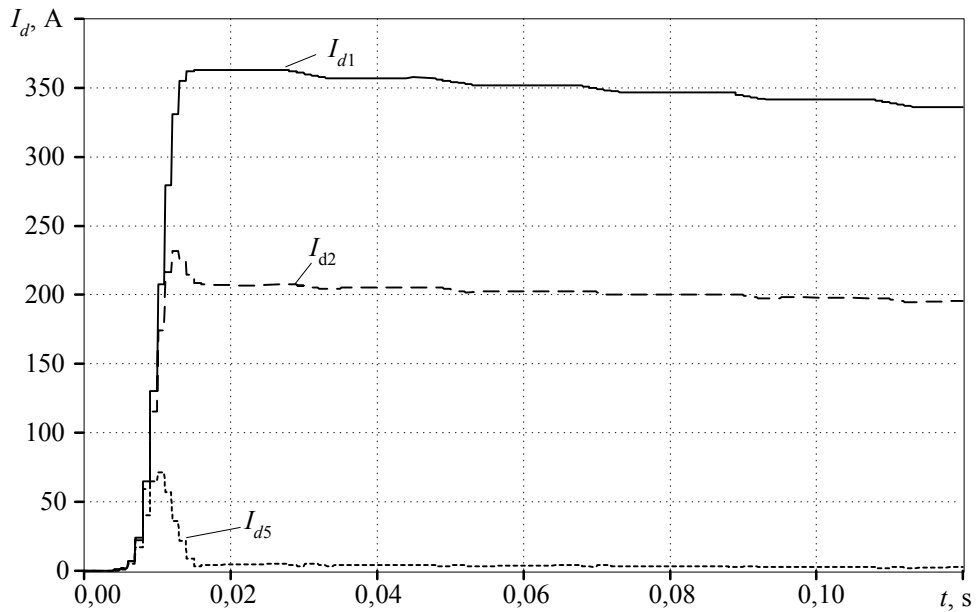
Rys. 5. Prądy po stronie Δ , po załączeniu nieobciążonego transformatora



Rys. 6. Przebieg prądów różnicowych podczas załączania nieobciążonego transformatora



Rys. 7. Trajektorie prądów różnicowych na charakterystyce rozruchowej przekaźnika



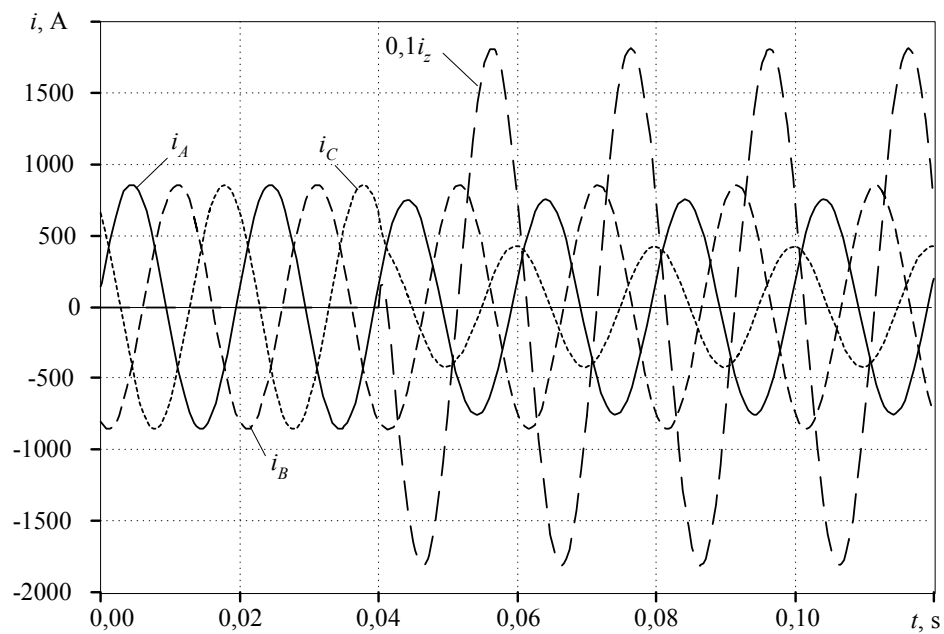
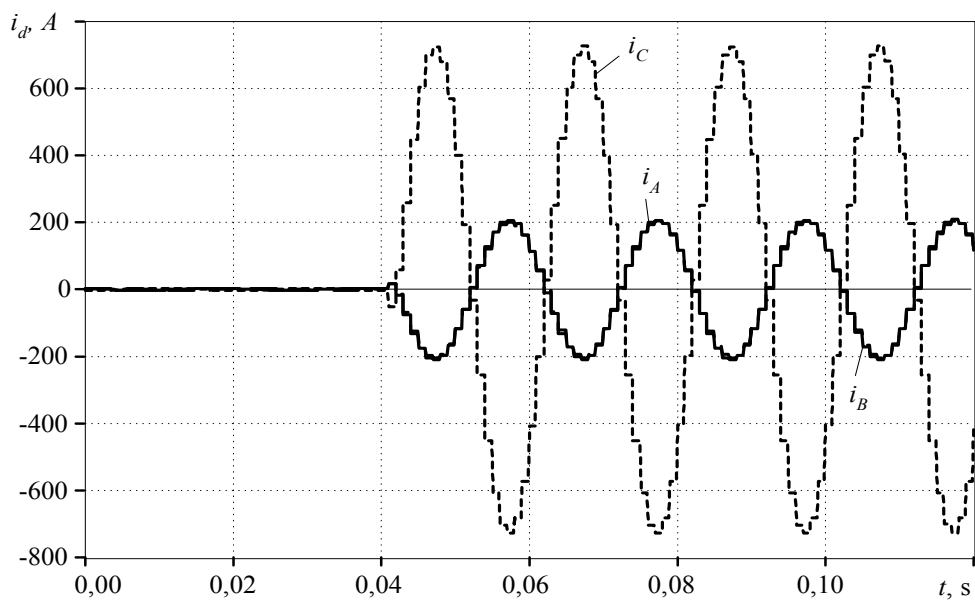
Rys. 8. Amplitudy pierwszej, drugiej i piątej harmonicznych prądu różnicowego fazy C

b) Zwarcie 5% uzwojenia Y.

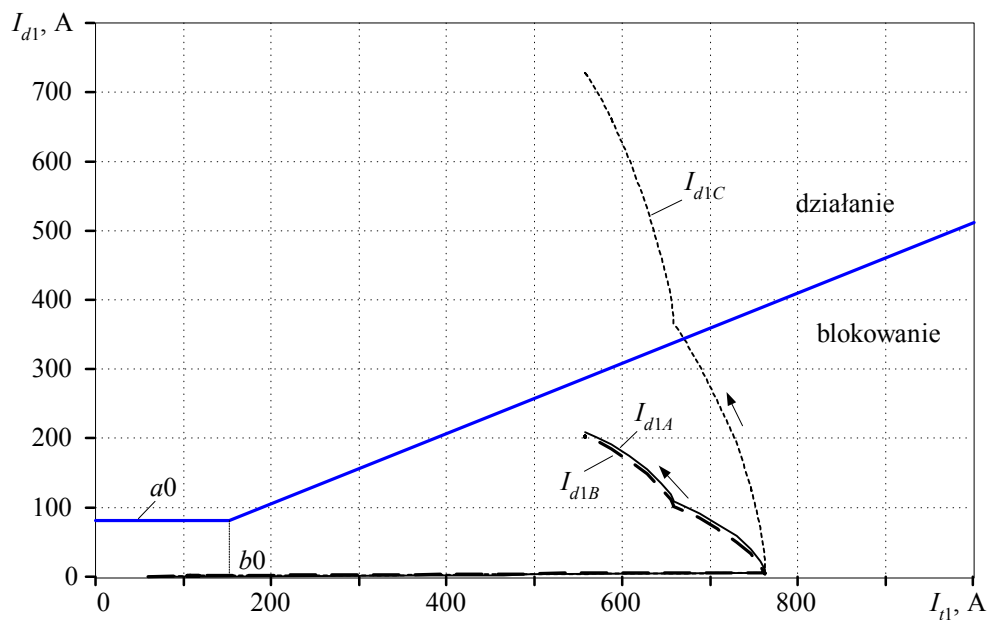
Rozpatrywane jest zwarcie 5% zwojów uzwojenia fazy C strony Y transformatora. Również ten przypadek jest analizowany w Przykładzie C2. Przebieg prądów jest pokazany na rys. 9. Przebieg prądu różnicowego przedstawia rys. 10. Widać, że jest on stosunkowo niewielki – prąd fazy A jest mniej więcej równy prądowi znamionowemu, który ma amplitudę równą 785 A. Wystarczy to jednak do pobudzenia przekąźnika ($0,1I_N$).

Trajektorie pierwszej harmonicznej prądu różnicowego na charakterystyce rozruchowej przekąźnika są pokazane na rys. 11. Widać, że tylko prąd fazy C przekracza tę charakterystykę. Prądy w pozostałych fazach są zbyt małe. Tym niemniej, zabezpieczenie prawidłowo działa, wyłączając uszkodzony transformator.

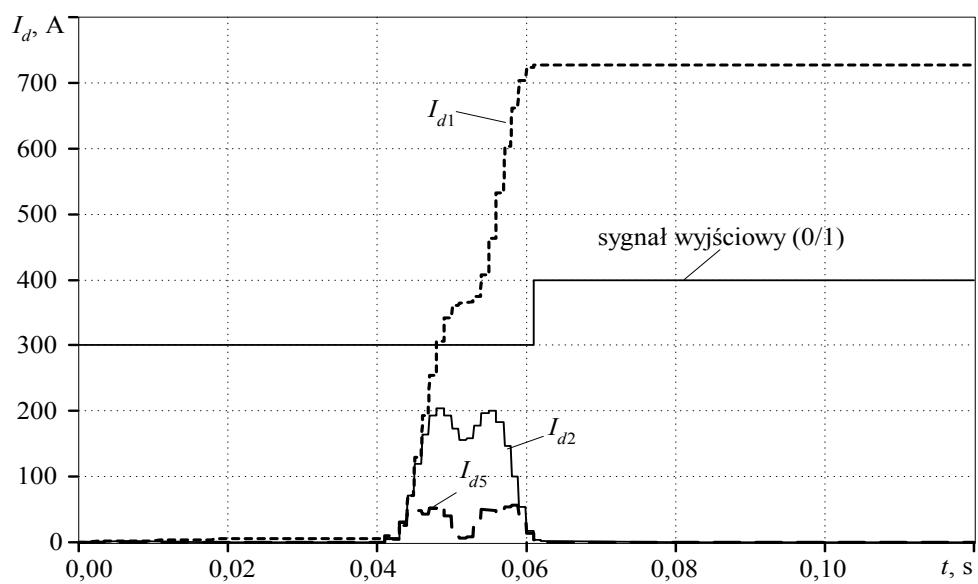
Interesująca jest także analiza charakterystyk czasowych działania zabezpieczenia. Składowe harmoniczne: druga i piąta, są bardzo małe, więc w stanie ustalonym nie powodują one blokowania działania zabezpieczenia. Jednak stan przejściowy filtra drugiej harmonicznej powoduje, że w tym czasie przekąźnik jest blokowany, wprowadzając zwłokę o długości niemal jednego okresu składowej podstawowej (rys. 12 – sygnał wyłączający pokazano na tle przebiegów amplitud odpowiednich harmonicznych prądu różnicowego).

Rys. 9. Prądy fazowe na stronie H oraz prąd w miejscu zwarcia (i_z)

Rys. 10. Przebieg prądów różnicowych podczas zwarcia 5% uzwojenia transformatora



Rys. 11. Trajektorie prądów różnicowych na charakterystyce rozruchowej przekaźnika



Rys. 12. Trajektorie prądów różnicowych na charakterystyce rozruchowej przekaźnika