

Zastosowanie metod diagnostyki awarii tranzystorów w przekształtnikach sieciowych AC/DC

Streszczenie. W artykule porównano dwa algorytmy diagnostyki awarii tranzystorów w przekształtniku sieciowym AC/DC z dwukierunkowym przepływem mocy. Zaprezentowane rozwiązania pozwalają na szybką identyfikację łączników energoelektronicznych, które utraciły zdolność do przewodzenia prądu oraz mogą być zastosowane bez użycia dodatkowych układów sprzętowych, w różnych układach regulacji. W odróżnieniu od większości znanych z literatury podobnych rozwiązań, skuteczność proponowanych metod została zweryfikowana zarówno podczas pracy prostownikowej jak i falownikowej przekształtnika. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych potwierdzających pełną skuteczność proponowanych rozwiązań.

Abstract. In this article two transistor fault diagnostic algorithms in the AC/DC line-side converter with a bidirectional power flow are compared. The presented methods allow to a fast transistor open-circuit fault detection and they can be used with no additional hardware in various control structures. As opposed to known from a literature survey similar methods, an effectiveness of the proposed algorithms has been verified under a rectifying as well as generation mode of the converter. In the article, the chosen simulation and experimental results that prove the full effectiveness of the proposed methods have been presented. (*Transistor Fault Diagnostic Methods in the AC/DC Line-Side Converter*).

Słowa kluczowe: prostownik aktywny, diagnostyka awarii, uszkodzenie tranzystora.

Keywords: active rectifier, fault diagnostic, transistor fault.

Wstęp

Awarie układów energoelektronicznych w systemach napędowych powodują znaczne obniżenie funkcjonalności napędów, prowadząc tym samym do strat finansowych spowodowanych zatrzymaniem wykonywanych procesów przemysłowych. Na rys.1 przedstawiono statystykę uszkodzeń występujących w napędach elektrycznych, również tych, które zasilane są z prostowników aktywnych [1]. Przerwy bądź zwarcia łączników półprzewodnikowych stanowią 12% spośród wszystkich uszkodzeń i są wynikiem intensywnej eksploatacji napędu oraz efektem starzenia się tranzystorów [2]. Zarówno w przypadku układów falownikowych, służących do zasilania silników prądu przemiennego, jak i prostowników aktywnych, prowadzone są prace mające na celu zaprojektowanie skutecznych algorytmów diagnostyki awarii modułów mocy.

Algorytmy diagnostyki awarii falowników napięcia można podzielić na, tzw. pośrednie metody diagnostyki, które polegają na analizie:

- średnich wartości błędów regulacji prądów fazowych silnika [3],
- średnich wartości błędów estymacji prądów fazowych silnika [4],
- średnich wartości błędów estymacji napięć fazowych silnika [5],

Podobnie w przypadku algorytmów bezpośrednich, które polegają na przetwarzaniu estymowanych bądź mierzonych sygnałów, we większości przypadków wykorzystuje się sygnały prądowe. Spośród nich wyróżnia się:

- metody wykorzystujące hodografy zmiennych diagnostycznych [6],
- proste operacje arytmetyczne oraz złożone obliczeniowo techniki sztucznej inteligencji [7].

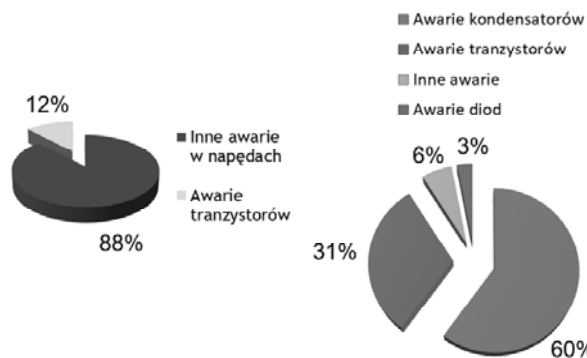
Niezależnie od wykorzystywanego sygnału diagnostycznego, do najszybszych należą systemy diagnostyczne, w których użyto dodatkowe przetworniki pomiarowe. Niemniej jednak metody te są bardziej kosztowne od algorytmów typowo programowych, których idea polega na stosowaniu jedynie zmiennych stanu dostępnych pomiarowo z uwagi na przyjętą metodę sterowania wektorowego napędem. W ich przypadku czas potrzebny na diagnozę jest zwykle nie dłuższy niż jeden okres podstawowej harmonicznej prądu silnika.

W przypadku przekształtników sieciowych AC/DC, wraz ze wzrostem ich obciążenia prąd płynący przez diody zwrotne rośnie. W związku tym symptomy awarii przekształtników AC/DC różnią się od tych, które są charakterystyczne dla falowników napięcia, tj. pomimo awarii tranzystora, prąd w uszkodzonej fazie prostownika płynie w dwóch kierunkach, nie w jednym jak w przypadku awarii w falowniku napięcia zasilającym silnik indukcyjny. Im większa jest reaktancja dławika sieciowego oraz wymuszane wyższe napięcie na wyjściu prostownika, tym tzw. okresy bezprądowe trwają krócej. Niemniej jednak, metody diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w prostownikach aktywnych w dużej mierze mają charakter analogiczny do przedstawionych w rozdziale poświęconym monitorowaniu awaryjnych stanów pracy w falownikach napięcia, tzn.:

- metody wykorzystujące średni błąd pomiędzy odpowiednimi sygnałami, np. [8, 9],
- metody oparte na analizie hodografów wybranych zmiennych diagnostycznych, np. [9, 10, 11]

Wszystkie wspomniane algorytmy dotyczą topologii dwupoziomowych oraz do diagnostyki wykorzystują sygnały prądowe. W ogólności, większość znanych z literatury metod diagnozowania awarii tranzystorów w przekształtnikach sieciowych jest realizowana w układach wielopoziomowych, które z uwagi na dużą liczbę łączników półprzewodnikowych umożliwiają przywrócenie częściowej funkcjonalności przekształtnika po odpowiedniej zmianie algorytmu modulacji napięcia, która jest możliwa do przeprowadzenia na podstawie informacji o nieprawidłowo funkcjonującym łączniku, np. [12].

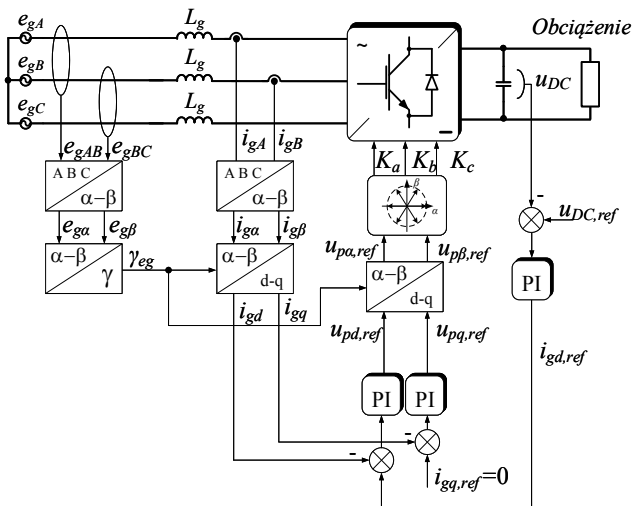
W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych dwóch metod diagnostyki awarii polegających na braku zdolności przewodzenia prądu tranzystorów w przekształtniku sieciowym AC/DC ze sterowaniem zorientowanym z napięciem sieci zasilającej. Przeprowadzone testy obejmują awarie prostownika pracującego w trybie prostownikowym oraz generatorowym. Badania symulacyjne zrealizowano za pomocą modelu opracowanego przy wykorzystaniu oprogramowania MATLAB/Simulink, natomiast wyniki eksperymentalne zostały uzyskane dzięki zaprojektowanemu stanowisku badawczemu.



Rys.1. Awarie w energoelektronicznych układach przekształtnikowych

Układ regulacji napięcia stałego w przekształtniku sieciowym AC/DC

Na rys.2 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania prostownikiem sieciowym z orientacją wektora prądu i_g względem napięcia e_g sieci zasilającej [13]. Idea regulacji polega na minimalizacji kąta φ zawartego pomiędzy wektorem prądu oraz napięcia sieci tak, aby współczynnik mocy $\cos\varphi$ był bliski jedności. W tym celu definiuje się układ współrzędnych d - q , który wiruje z pulsacją napięcia sieciowego ω_g . Położenie osi d względem osi α jest zdefiniowane przez kąt γ_{eg} , który oblicza się na podstawie znajomości napięć międzyfazowych sieci zasilającej przekształtnik. Kompensacja mocy biernej jest realizowana poprzez minimalizację składowej prądu sieci i_{gq} . Prąd i_{gd} jest proporcjonalny do mocy czynnej pobieranej przez odbiornik, a jego wartość zadaną wyznacza się na podstawie uchybu regulacji napięcia stałego u_{DC} przekształtnika.



Rys.2. Schemat blokowy układu sterowania prostownikiem sieciowym z orientacją prądu względem napięcia sieci zasilającej

Układ regulacji napięcia stałego w przekształtniku sieciowym AC/DC

Zaprojektowany pierwszy algorytm diagnostyki uszkodzeń tranzystorów przekształtnika sieciowego AC/DC, nazywany w dalszej części M1, jest oparty na analizie średniej wartości błędów estymacji napięć fazowych prostownika, liczonej w okresie napięcia sieci T_e , zgodnie z zależnością (1) [14]:

$$(1) \quad \delta_f = \sum_{n=1}^k (u_{pf,est,n} - u_{pf,n}) / k$$

przy czym: f – oznacza fazę przekształtnika (A, B lub C), k – to liczba analizowanych próbek sygnałów, składających się na jeden okres napięcia sieci zasilającej. W algorytmie przyjęto uproszczenie, w którym estymowane napięcie przekształtnika $u_{p,est}$ jest równe co do wartości napięciu zadanemu. Napięcie przekształtnika u_p jest liczone zgodnie z zależnością (2):

$$(2) \quad u_p = e_g - u_L$$

Składowe napięcia przekształtnika mogą być wyznaczone wg zależności (3):

$$(3) \quad u_{p\alpha,est} = \frac{2}{3} U_{DC} \left(K_A - \frac{1}{2} (K_B + K_C) \right)$$

$$u_{p\beta,est} = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{DC} (K_B - K_C)$$

przy czym: U_{DC} to napięcie na kondensatorach filtrujących, $K_{A,B,C}$ – wartości zmiennych sterujących półprzewodnikowymi łącznikami mostka. Ze względu na wysoką częstotliwość łączeń tranzystorów, wykorzystanie sygnałów $K_{A,B,C}$ w celu estymacji napięcia prostownika wymaga użycia bardzo krótkiego okresu próbkowania układu sterowania, ograniczając tym samym w znacznym stopniu realizację praktyczną. Z tego powodu, zakłada się, że napięcie przekształtnika jest równe napięciu zadanemu.

Napięcie dławika sieciowego obliczono wykorzystując równania (4):

$$(4) \quad u_{L\alpha,est} = -\frac{2}{3} \frac{1}{i_{g\alpha}^2 + i_{g\beta}^2} i_{g\beta} q_L$$

$$u_{L\beta,est} = \frac{2}{3} \frac{1}{i_{g\alpha}^2 + i_{g\beta}^2} i_{g\alpha} q_L$$

gdzie: $i_{g\alpha,\beta}$ – składowe prądu sieci, q_L – chwilowa wartość mocy biernej pobieranej przez dławik L_g liczona zgodnie z zależnością (5):

$$(5) \quad q_L = \frac{3L_g}{\sqrt{3}} \left(\frac{di_{gA}}{dt} i_{gC} - \frac{di_{gC}}{dt} i_{gA} \right)$$

przy czym: $i_{gA,B,C}$ to mierzone prądy sieci.

Estymacja napięcia prostownika w czasie awarii jednego z tranzystorów jest obarczona błędem wynikającym z nieuwzględnienia faktu utraty funkcjonalności łącznika. W związku z tym, biorąc pod uwagę polaryzację sygnałów diagnostycznych korespondujących z poszczególnymi fazami prostownika, możliwa jest detekcja uszkodzonego tranzystora, zgodnie z Tabelą 1.

Przykładowo, jeżeli dojdzie do uszkodzenia tranzystora T1, sygnał δ_A odnoszący się do fazy A prostownika osiąga ujemną wartość, która jest mniejsza niż przyjęty próg diagnostyczny. Jednocześnie zmienne diagnostyczne δ_B oraz δ_C charakteryzują się dodatnimi wartościami. W celu uniknięcia fałszywych alarmów w trakcie bezawaryjnej pracy przekształtnika sieciowego AC/DC przyjęto warunek $T_{TF} > 0,03e_{gf}$. Wartość progu diagnostycznego powinna zostać wyznaczona na podstawie badań symulacyjnych.

Tabela 1. Reguły diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku aktywnym – metoda M1

δ_A	δ_B	δ_C	Uszkodzony tranzystor
$<-T_{TF}$	+	+	T1
$>T_{TF}$	-	-	T2
+	$<-T_{TF}$	+	T3
-	$>T_{TF}$	-	T4
+	+	$<-T_{TF}$	T5
-	-	$>T_{TF}$	T6

Drugą metodę diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku sieciowym, nazywaną w dalszej części M2, stanowi algorytm oparty na predykcji wektora prądu i_g sieci zasilającej [15].

Do predykcji prądu sieci przekształcono równanie (6) za pomocą metody Eulera:

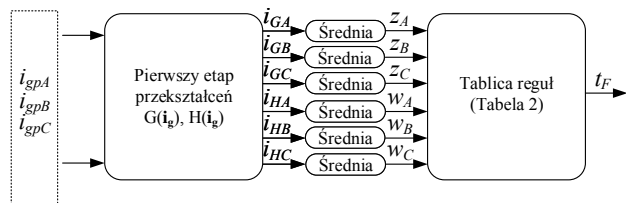
$$(6) \quad L_g \frac{di_g}{dt} = e_g - u_p - R_g i_g$$

gdzie: i_g , e_g , u_p – wektor mierzonego prądu sieci, napięcia sieci oraz estymowanego napięcia przekształtnika, L_g , R_g – indukcyjność oraz rezystancja dławika sieciowego.

Po przekształceniu (6) otrzymano zależność (7):

$$(7) \quad i_{gp}(k+1) = \left(1 - \frac{R_g T_s}{L_g}\right) i_{gp}(k) + \frac{T_s}{L_g} [e_g(k) - u_p(k)]$$

Prądy i_{gp} zostały zastosowane jako sygnały diagnostyczne. W tym celu dokonuje się przekształceń prądów sieci zasilającej, zgodnie ze schematem rys.3.



Rys.3. Schemat blokowy układu diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku sieciowym AC/DC

Funkcje G oraz H zostały zastosowane do wstępnego przetwarzania prądów sieci oraz stanowią metodę normalizacji sygnałów wejściowych systemu diagnostycznego, których amplituda jest zależna od poziomu obciążenia przekształtnika, zgodnie z (8) i (9).

$$(8) \quad G(i_{gp}) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } i_{gp} > \varepsilon \\ -1 & \text{jeżeli } i_{gp} < -\varepsilon \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$$(9) \quad H(i_{gp}) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } -\varepsilon \leq i_{gp} \leq \varepsilon \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Funkcja G służy do określenia polaryzacji prądów fazowych przekształtnika, natomiast dzięki funkcji H jest rejestrowane zdarzenie kiedy wartość prądu w danej fazie systemu wynosi zero. W wyniku wspomnianych przekształceń uzyskuje się odpowiednio sygnały fazowe i_{GA} , i_{GB} , i_{GC} oraz i_{HA} , i_{HB} , i_{HC} , dla których są liczone wartości średnie, odpowiednio z_A , z_B , z_C oraz w_A , w_B , w_C . Na podstawie tablicy reguł (Tabela 2) generowany jest sygnał t_F , którego wartość wskazuje na numer uszkodzonego tranzystora.

W fazie przekształtnika, w której doszło do uszkodzenia jednego z tranzystorów jest obserwowany przepływ jednokierunkowego prądu. W jednym swoim okresie prąd ten płynie przez czas krótszy niż pół okresu napięcia sieciowego i zależy od pobieranej mocy oraz indukcyjności dławika sieciowego. W konsekwencji, zależnie od kierunku przepływu prądu w uszkodzonej fazie przekształtnika, jest obserwowany zdecydowany wzrost jednego z sygnałów w_A ,

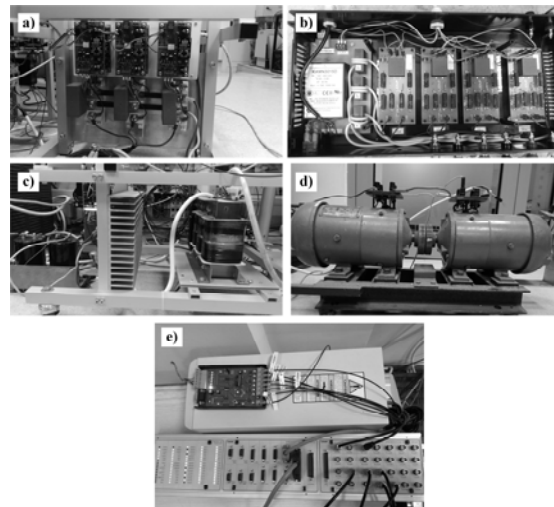
w_B , w_C do wartości nie przekraczającej 0,5. Podobnie dzieje się w przypadku jednej ze zmiennych z_A , z_B , z_C , która znacznie wzrasta w stosunku do pozostałych. Jeżeli dojdzie do awarii dwóch tranzystorów w jednej fazie prostownika, wtedy jeden z sygnałów z_A , z_B , z_C rośnie do wartości przekraczającej 0,5 natomiast mniejszej niż 1,0. Dzieje się tak, ponieważ prąd w danej fazie praktycznie nie płynie. Tabelę 2 należy interpretować następująco: w wierszach zawarte są reguły, których spełnienie wskazuje na awarię konkretnego łącznika. Przykładowo, stwierdza się uszkodzenie tranzystora T1 jeśli sygnały w_A oraz z_A wzrosną do wartości większej niż q_1 oraz zmienna z_A jest co najmniej dwukrotnie większa niż dowolny z sygnałów: z_B lub z_C . Ponadto, awarię dwóch łączników w jednej fazie prostownika, np. T1 oraz T2, można wykryć jeśli wartość z_A będzie co najmniej dwukrotnie większa niż dowolny z sygnałów: z_B lub z_C i jednocześnie większa niż q_2 . Wartości q_1 , q_2 powinny zostać dobrane na podstawie badań symulacyjnych

Tabela 2. Reguły diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku aktywnym – metoda M2

w_A	w_B	w_C	z_A	z_B	z_C	uszkodzony tranzystor
$> q_1$			$> q_1 \cap > 2z_B$ $\cap > 2z_C$			T1
$<-$			$> q_1 \cap > 2z_B$ $\cap > 2z_C$			T2
	$>$			$> q_1 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_C$		T3
	$<-$			$> q_1 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_C$		T4
		$>$			$> q_1 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_B$	T5
		$<-$			$> q_1 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_B$	T6
			$> q_2 \cap > 2z_B$ $\cap > 2z_C$			T1, T2
				$> q_2 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_C$		T3, T4
					$> q_2 \cap > 2z_A$ $\cap > 2z_B$	T5, T6

Układ laboratoryjny

Przekształtnik sieciowy, przedstawiony na rys.3, składa się z trójfazowego mostka tranzystorowego, którego budowa jest oparta na tranzystorach IGBT SKM145GB128D firmy Semikron, podłączonego poprzez dławik do sieci zasilającej.



Rys.3. Układ laboratoryjny przekształtnika sieciowego AC/DC

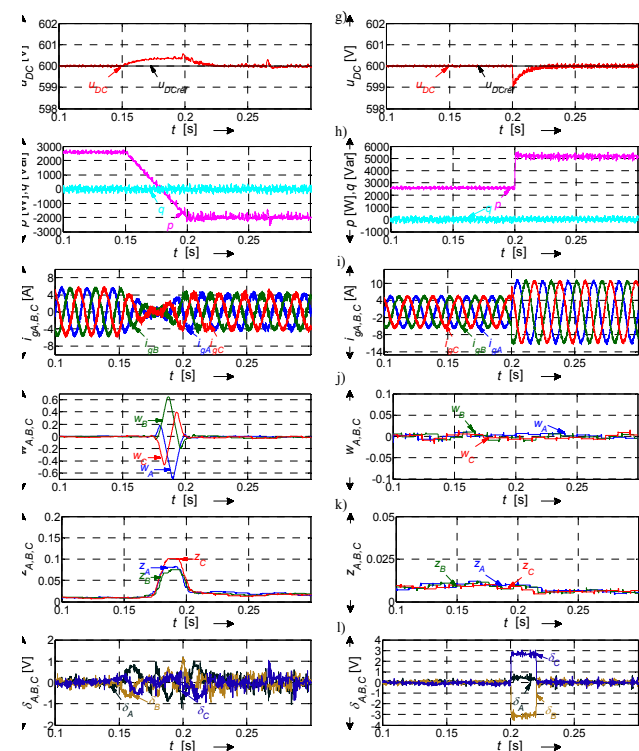
Łączniki modułu mocy są sterowane za pomocą systemu do szybkiego prototypowania DS1103, poprzez interfejs światłowodowy. Na wyjściu mostka zastosowano szeregowo połączone kondensatory elektrolityczne. Obciążenie prostownika PWM stanowią dwie połączone sztywnym wałem maszyny prądu stałego o tej samej mocy znamionowej oraz regulowanym napięciu twornika. Prądy fazowe przekształtnika zostały zmierzone za pomocą przetworników LA 55-P, natomiast do pomiaru napięć stałych wykorzystano przetworniki LV 25-P. Szczegółowe parametry systemu zamieszczono w Tabeli 3.

Tabela 3. Parametry znamionowe przekształtnika sieciowego AC/DC

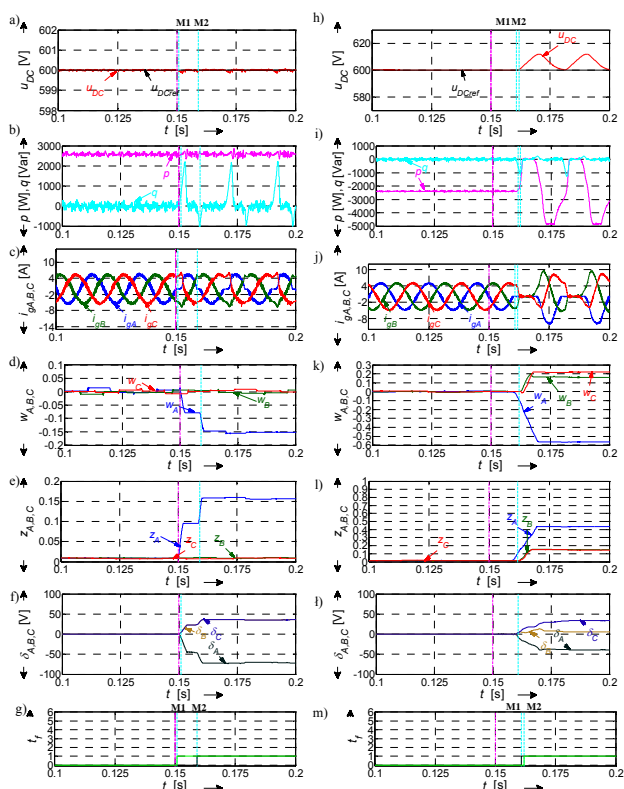
Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość
Indukcyjność dławika sieciowego	L_g	6,84 mH
Pojemność kondensatorów elektrolitycznych	C_F	2,4 mF
Częstotliwość modulacji napięcia	f_m	10 kHz
Częstotliwość sieci zasilającej	f_g	50 Hz
Moc znamionowa maszyny prądu stałego	P_M	0,5 kW
Napięcie znamionowe maszyny prądu stałego	U_M	220V

Wyniki badań symulacyjnych

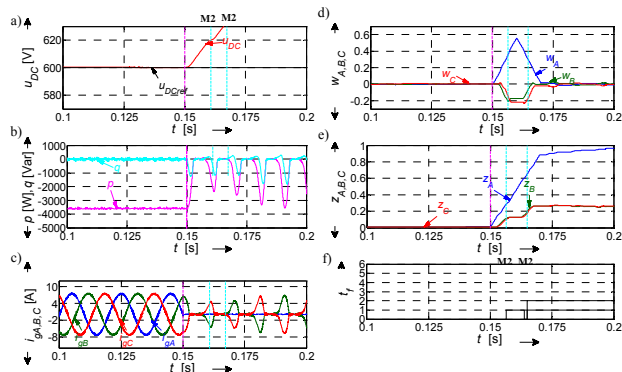
Na rysunkach 4-6 zaprezentowano symulacyjne przebiegi napięcia stałego, prądów sieci zasilającej, mocy czynnej i bierniej oraz wybranych sygnałów diagnostycznych w trakcie uszkodzeń jednego z tranzystorów prostownika o dwukierunkowym przepływie energii. Zaprojektowane algorytmy diagnostyczne zostały zweryfikowane na przykładzie awarii łącznika w fazie A prostownika, przy czym wyniki badań mają reprezentatywny charakter, tzn. wnioski z nich płynące dotyczą uszkodzeń pozostałych tranzystorów.



Rys.4. Przebiegi napięcia stałego u_{DC} (a, g), mocy czynnej p oraz bierniej q (b, h), prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (c, i) oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, $\delta_{A,B,C}$ (d-f, j-l) w trakcie bezawaryjnej pracy przekształtnika sieciowego podczas zmiany kierunku przepływu mocy czynnej w systemie (a-f) oraz zmian obciążenia prostownika (g-l)



Rys.5. Przebiegi napięcia stałego u_{DC} (a, g), mocy czynnej p oraz bierniej q (b, h), prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (c, i) oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, $\delta_{A,B,C}$, t_f (d-g, j-m) w trakcie awarii tranzystora T1 podczas pracy prostownikowej (a-g) generatorowej (h-m); metoda M1 i M2



Rys.6. Przebiegi napięcia stałego u_{DC} (a), mocy czynnej p oraz bierniej q (b), prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (c) oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, t_f (d-f) w trakcie awarii tranzystora T1 i T2 podczas pracy generatorowej przekształtnika; metoda M2

Najpierw przeanalizowano przebiegi zmiennych diagnostycznych w różnych stanach pracy nieuszkodzonego układu prostownikowego tak, aby zdefiniować wartości progowe sygnałów diagnostycznych, których przekroczenie jednoznacznie wskazuje na awarie przekształtnika. Następnie pokazano przykład pojedynczej awarii tranzystora przekształtnika sieciowego zarówno w trakcie pracy prostownikowej jak i w czasie zwrotu energii do sieci zasilającej. Trzecim zobrazowanym przypadkiem jest awaria dwóch łączników w jednej fazie prostownika.

Na rys.4 zaprezentowano przebiegi wybranych zmiennych stanu przekształtnika sieciowego w czasie testów, które mają na celu ocenę maksymalnych wartości sygnałów diagnostycznych w trakcie poprawnej pracy przekształtnika.

W pierwszym przypadku (rys.4a-f) zmieniono kierunek przepływu mocy czynnej w systemie, czego skutkiem było chwilowe, znaczne zmniejszenie wartości prądów fazowych, niemal do zera. W związku z tym, wartości zmiennych $z_{A,B,C}$ oraz $w_{A,B,C}$ wzrosły podobnie jak to się dzieje w trakcie awarii tranzystorów w przekształtniku, tj. $w_A < -q_1$ i $w_B > q_1$ i $w_C > q_1$ oraz jednocześnie $z_A > q_1$ i $z_B > q_1$ i $z_C > q_1$. W odróżnieniu od stanu awaryjnego, w przywołanym przypadku, wartości zarejestrowanych sygnałów $z_{A,B,C}$ są porównywalne, przeciwnie do sytuacji awaryjnej, kiedy to jedna ze zmiennych $z_{A,B,C}$ charakteryzuje się znacznie większą wartością, tzn. nie spełniony jest żaden z dodatkowych warunków, np. dotyczący przypadku awarii tranzystora T1: $z_A > 2z_B$ i $z_A > 2z_C$ (jak podano w Tabeli 2 odnoszącej się do metody M2). Ponadto, badania wykazały, że wartości zmiennych diagnostycznych $\delta_{A,B,C}$ nie rosną w istotny sposób i utrzymują się w bezawaryjnym stanie pracy przekształtnika na poziomie bliskim 0 (rys.4f). Widać, że możliwe jest wyznaczenie progu diagnostycznego T_{TF} , który nie zostanie przekroczony w warunkach bezawaryjnej pracy prostownika. Zmiana wartości pobieranej mocy czynnej (przypadek gdy kierunek mocy czynnej nie zmienia się) nie ma istotnego wpływu na poziomy wielkości diagnostycznych $z_{A,B,C}$ oraz $w_{A,B,C}$ (rys.4j, k), natomiast w istotny sposób przyczynia się do wzrostu sygnałów $\delta_{A,B,C}$ (rys.4l). Z tego powodu wartość progu diagnostycznego, którego przekroczenie świadczy o awarii powinna być odpowiednio większa niż uzyskane wartości sygnałów $\delta_{A,B,C}$ w trakcie zaprezentowanego testu. Przyjęte progi diagnostyczne dla zaprojektowanych metod diagnostycznych wynoszą odpowiednio $q_1=0,1$, $q_2=0,65$, $T_{TF}=7$ V.

Na rys.5 zaprezentowano wyniki badań odnoszące się do uszkodzeń tranzystora T1 zarówno podczas pracy prostownikowej (rys.5a-g) jak i generatorowej (rys.5h-m) przekształtnika sieciowego. W obu przypadkach awarię zasymulowano w tej samej chwili $t=0,15$ s, niemniej jednak wartości sygnałów diagnostycznych odnoszących się do metody prądowej różnią się w zależności od rodzaju pracy przekształtnika. Z projektowego punktu widzenia, w przypadku metody M2, istotne są przede wszystkim różnice pomiędzy wartościami zmiennych diagnostycznych $z_{B,C}$, które odnoszą się do nieuszkodzonych faz przekształtnika. W przypadku pracy prostownikowej, bezpośrednio po przekroczeniu przez sygnał z_A progu diagnostycznego $q_1 = -0,1$, tzn. $z_A < -q_1$ (rys.5e), można stwierdzić awarię łącznika T1, ponieważ wartości $z_{B,C}$ są znacznie mniejsze niż z_A , tj. spełniony jest warunek $z_A > 2z_B$ i $z_A > 2z_C$. W przypadku awarii tranzystora występującej podczas pracy generatorowej prostownika sygnał w_A przekroczył próg diagnostyczny, tj. $w_A < -q_1$, natomiast $z_A > q_1$, co wskazuje na awarię T1. W obu przypadkach, wartości progowe zmiennej diagnostycznej δ_A dla metody M1 osiągnięte są znacznie szybciej niż w przypadku metody opartej na analizie prądów sieci zasilającej (metoda M2).

Na rys.6 pokazano przykład działania systemu diagnostyki awarii tranzystorów prostownika podczas uszkodzenia łączników T1 oraz T2 w fazie A prostownika, AC/DC przy wykorzystaniu metody M2. Ponieważ prąd w uszkodzonej fazie przekształtnika praktycznie nie płynie, to sygnał z_A przyjmuje wartość większą niż założony próg diagnostyczny, co świadczy o awarii dwóch tranzystorów (w przypadku uszkodzenia jednego z łączników zmienna z_A przyjmuje wartość mniejszą niż 0,5, ponieważ prąd w awaryjnie pracującej fazie płynie dłużej niż przez pół okresu napięcia sieciowego). Najpierw została zidentyfikowana awaria tranzystora T1, a następnie T2 w czasie odpowiednio 0,011 s raz 0,016 s.

Wyniki badań eksperymentalnych

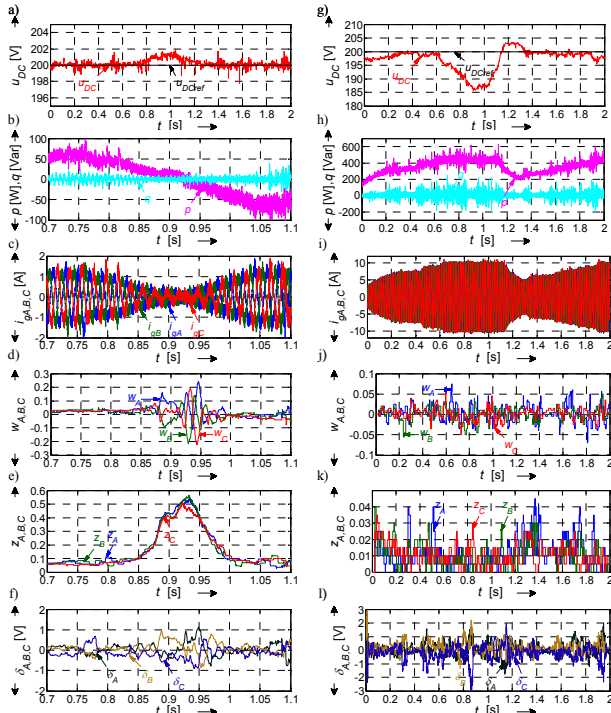
Obie metody diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku aktywnym, tj. algorytm M1 oraz M2 zostały zaimplementowane na stanowisku eksperymentalnym. Metodologia badań była identyczna jak w przypadku części symulacyjnej. W przypadku metody opartej na prądach zasilającej (M2) przedział wartości progowych q_1 , które prowadzą do poprawnej diagnozy jest szeroki. Żeby to zobrazować, w części eksperymentalnej przyjęto wyższą wartość progu diagnostycznego $q_1=0,35$, niemniej jednak wartość wyznaczona w ramach badań symulacyjnych prowadziłaby również do prawidłowych wyników.

W pierwszej kolejności zbadano poziomy zmiennych diagnostycznych w trakcie bezawaryjnej pracy przekształtnika sieciowego. Można zauważyć, że zdefiniowane na podstawie badań symulacyjnych reguły diagnostyki uszkodzeń tranzystorów nie są spełnione w trakcie prawidłowego funkcjonowania przekształtnika sieciowego co gwarantuje brak fałszywych alarmów (rys.7). Na rys.8 pokazano wyniki badań eksperymentalnych skuteczności obu zaproponowanych metod diagnostycznych, które dotyczą uszkodzeń tranzystora T1 podczas pracy prostownikowej przekształtnika (rys.8a-g) oraz w trakcie zwrotu energii do sieci zasilającej (rys.8h-m). W pierwszym przypadku awaria tranzystora nastąpiła gdy przewodził on prąd osiągający szczytową wartość (rys.8c). W chwili $t=0,1339$ s sygnał w_A przekroczył wartość progową oznaczającą awarię przekształtnika, tzn. został spełniony warunek $w_A < -0,35$ (rys.8k). W tym samym czasie wartość z_A była mniejsza niż 0,65 co wyklucza awarię dwóch tranzystorów w tej samej fazie prostownika (rys.8e). Ponadto, na rysunku 8f wartość δ_A jest mniejsza niż -7 V na skutek awarii tranzystora, przy czym δ_B oraz δ_C przyjmują dodatni znak. Badania wykazały skuteczność dwóch analizowanych metod diagnostyki awarii tranzystorów prostownika. W przypadku metody opartej na analizie prądów sieci zasilającej czas lokalizacji awarii wyniósł 0,0123 s, czyli o 0,00151 s krócej niż w przypadku algorytmu napięciowego (rys.8g).

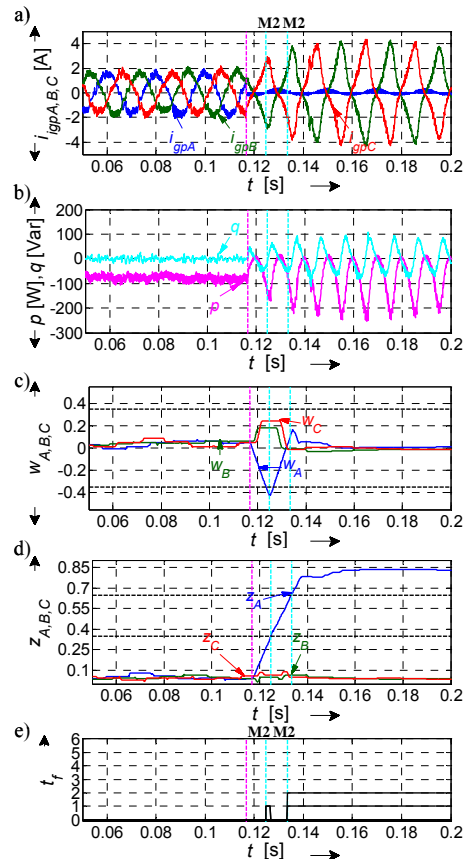
Skuteczność algorytmów została potwierdzona również w przypadku pracy generatorowej przekształtnika, przy czym dla przykładu zaprezentowano przebiegi wybranych zmiennych stanu systemu w trakcie uszkodzenia tranzystora, które nastąpiło w chwili przewodzenia komplementarnego łącznika tej samej fazy prostownika. Przeciwnie do wcześniej przeanalizowanego przypadku, próg diagnostyczny odnoszący się do poziomu sygnałów $\delta_{A,B,C}$ dla metody M1 został osiągnięty wcześniej niż zostały spełnione reguły systemu diagnostycznego opartego na analizie prądów sieci zasilającej. W odróżnieniu od wcześniej zaprezentowanego przypadku, uszkodzenie tranzystora T1 wystąpiło podczas generatorowej pracy prostownika (rys.8h-m). Krótco po jego wystąpieniu, współczynnik w_A przekroczył wartość progową w chwili $t=0,1339$ s. Wartość sygnału z_A wyniosła 0,5 co wskazuje na awarię pojedynczego łącznika. Należy zauważyć, że do awarii łącznika T1 doszło podczas przewodzenia prądu przez tranzystor T4, przeciwnie do wcześniej przedstawionego przykładu. Zgodnie z regułami systemu diagnostycznego M2 poprawnie rozpoznano uszkodzenie tranzystora T1 (rys.8m). Czas lokalizacji awarii wyniósł 0,0191 s.

Ostatni z przypadków wybranych z wielu testów układu dotyczy uszkodzenia dwóch tranzystorów w jednej fazie przekształtnika, tj. T1 oraz T4 (9a-e), przy czym do awarii doszło w chwili $t=0,1167$ s, podczas przewodzenia prądu przez tranzystor T4 (rys.9a), podczas zwrotu energii do sieci (rys.9b). Sygnał diagnostyczny z_A wzrósł do wartości 0,84 (rys.9d), co wskazuje na awarię dwóch łączników. Ponadto, można zauważyć, że zmienna w_A osiąga próg diagnostyczny szybciej niż z_A , a zatem w pierwszej kolejności jest diagnozowane uszkodzenie tranzystora T1 a następnie T2 (rys.9e). Czasy

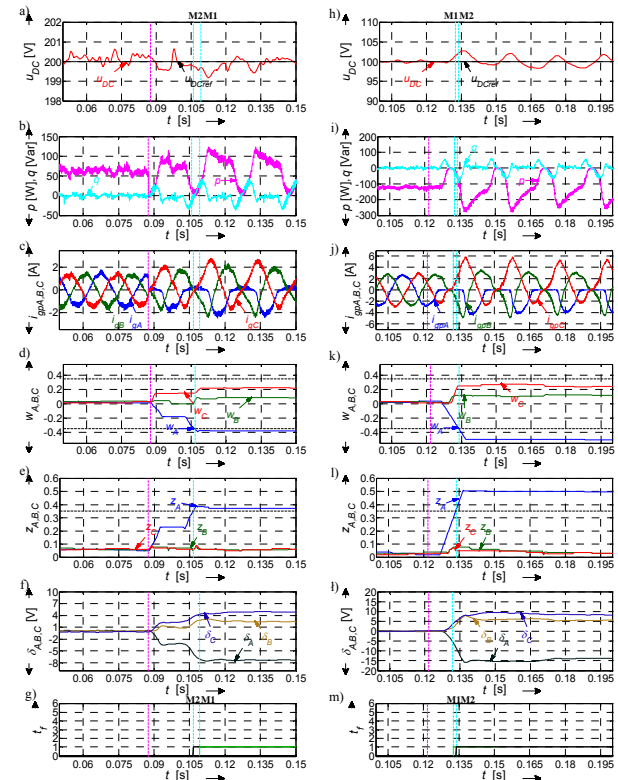
potrzebne do zdiagnozowania awarii tranzystorów wynoszą odpowiednio 0,008 s oraz 0,0167 s.



Rys. 7. Przebiegi napięcia stałego u_{DC} (a, g), mocy czynnej p oraz bierniej q (b, h), prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (c, i) oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, $\delta_{A,B,C}$ (d-f, j-l) w trakcie bezawaryjnej pracy przekształtnika sieciowego podczas zmiany kierunku przepływu mocy czynnej w systemie (a-f) oraz zmian obciążenia prostownika (g-l)



Rys. 9. Przebiegi prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (a), mocy czynnej p oraz bierniej q (b), oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, t_f (c-e) w trakcie awarii tranzystora T1 oraz T2 podczas pracy generatorowej przekształtnika (b); metoda M2



Rys. 8. Przebiegi napięcia stałego u_{DC} (a, g), mocy czynnej p oraz bierniej q (b, h), prądów sieci zasilającej $i_{gA,B,C}$ (c, i) oraz zmiennych diagnostycznych $w_{A,B,C}$, $z_{A,B,C}$, $\delta_{A,B,C}$, t_f (d-g, j-m) w trakcie awarii tranzystora T1 podczas pracy prostownikowej (a-g) generatorowej (h-m); metoda M1 i M2

Podsumowanie

Zaprojektowane metody diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku aktywnym mogą być stosowane w różnych układach regulacji przekształtnikami AC/DC. Z uwagi na rodzaj wykorzystywanych do diagnostyki sygnałów, pierwsza z zaprezentowanych metod jest dedykowana do układów ze sterowaniem zorientowanym względem napięcia sieci zasilającej. Techniki oparte na predykcji prądów sieci zasilającej mają bardziej uniwersalny charakter i mogą być stosowane niezależnie od metody sterowania prostownikiem sieciowym. Zaletą przedstawionych algorytmów w stosunku do opublikowanych rozwiązań jest skuteczność w przypadku pracy prostownikowej oraz w trakcie zwrotu energii do sieci. Ponadto, zastosowane metody charakteryzują się prostą implementacją praktyczną, która nie wymaga użycia dodatkowych systemów pomiarowych, obniżając tym samym koszty projektowe.

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu UMO-2014/15/N/ST/7/04676.

Autor: dr inż. Piotr Sobański, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 57-370 Wrocław, E-mail: piotr.sobanski@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Yang S., Xiang D., Bryant A., Mawby P., Ran L., Tavner P., Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, 25 (2010), n.11, 2734-2752
- [2] Rodriguez M. A., Claudio A., Theilliol D., Vela L. G., A New Fault Detection Technique for IGBT Based on Gate Voltage

- Monitoring, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, (2007), Orlando, 1001-1005
- [3] Estima J. O., Cardoso A. J. M., Single Power Switch Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Fed PWM Motor Drives by the Reference Current Errors, *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, (2011), Bologna, 364-371
- [4] Śleszyński W., Nieznański J., Cichowski A., Real-Time Fault Detection and Localization Vector-Controlled Induction Motor Drives, *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, (2005), Drezno, 1-8
- [5] Freire N. M. A., Estima J. O., Cardoso A. J. M., A Voltage-Based Approach Without Extra Hardware for Open-Circuit Fault Diagnosis in Closed-Loop PWM AC Regenerative Drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61 (2014), n.9, 4960-4970
- [6] Mendes A. M. S., Cardoso A. J. M., Fault-Tolerant Operating Strategies Applied to Three-Phase Induction-Motor Drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 53, (2006), n. 6, 1807-1817
- [7] Alavi M., Luo M., Wang D., Bai H., IGBT Fault Detection for Three Phase Motor Drives Using Neural Networks, *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, (2012), Krakow, 1-8
- [8] Duan P., Xie K. G., Zhang L., Rong X., *Open-Switch Fault Diagnosis and System Reconfiguration of Doubly Fed Wind Power Converter Used in a Microgrid*, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, 26, (2011), n.3, 816-821
- [9] Espinoza-Trejo D. R., Campos-Delgado D. U., Bossio G., Barcenas E., Hernandez-Diez J. E., Lugo-Cordero L. F., Fault Diagnosis Scheme for Open-Circuit Faults in Field-Oriented Control Induction Motor Drives, *IET Pow. Electron.*, 6 (2013), n.5, 869-877
- [10] Im W. S., Kim J. M., Lee D. C., Lee K. B., Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Three-Phase AC-DC PWM Converter Systems, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 49 (2013), n.4, 1539-1547
- [11] Rothenhagen K., Fuchs F. W., Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Voltage Source Active Rectifiers, *IEEE 35th Annual Conference Power Electronics Specialists (PESC)*, 6 (2004), Aachen, 4348-4354
- [12] Lee J. S., Lee K. B., Open-Circuit Fault-Tolerant Control for Outer Switches of Three-Level Rectifiers in Wind Turbine Systems, *IEEE Trans. Pow. Electron.*, 31 (2016), n.5, 3806-3815
- [13] Malinowski M., Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Warszawska, (2001), Warszawa
- [14] Sobanski P., Orłowska-Kowalska T., Open Switch Fault Diagnosis Method for an AC/DC Line-Side Converter, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, (2017), Toronto, 1580-1584
- [15] Sobanski P., Orłowska-Kowalska T., IGBT Open-Circuit Fault Diagnosis Based on the Current Prediction in the Line-Side AC/DC Converter, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, (2017), Toronto, 113-118