

*przełącznik sieciowy AC/DC, metody bezczujnikowe,
 tranzystor IGBT, diagnostyka uszkodzeń*

Piotr SOBAŃSKI*, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA*

ANALIZA I DIAGNOSTYKA USZKODZEŃ TRANZYSTORÓW W PRZEKSZTAŁTNIKU SIECIOWYM AC/DC

W artykule przedstawiono analizę symptomów uszkodzeń polegających na braku przewodzenia prądu przez jeden z tranzystorów IGBT w układzie sterowania przełącznikiem AC/DC z orientacją wektora prądu względem wektora napięcia sieci. Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości implementacji w układach przełącznikowych AC/DC o dwukierunkowym przepływie energii znanych metod diagnostyki awarii tranzystorów dwupoziomowego falownika napięcia. Przedstawione wyniki badań mają charakter porównawczy, tj. zostały uzyskane za pomocą symulacyjnych modeli przełącznika AC/DC w układzie regulacji z pomiarem napięć sieci zasilającej oraz w strukturze sterowania bezczujnikowego.

1. WSTĘP

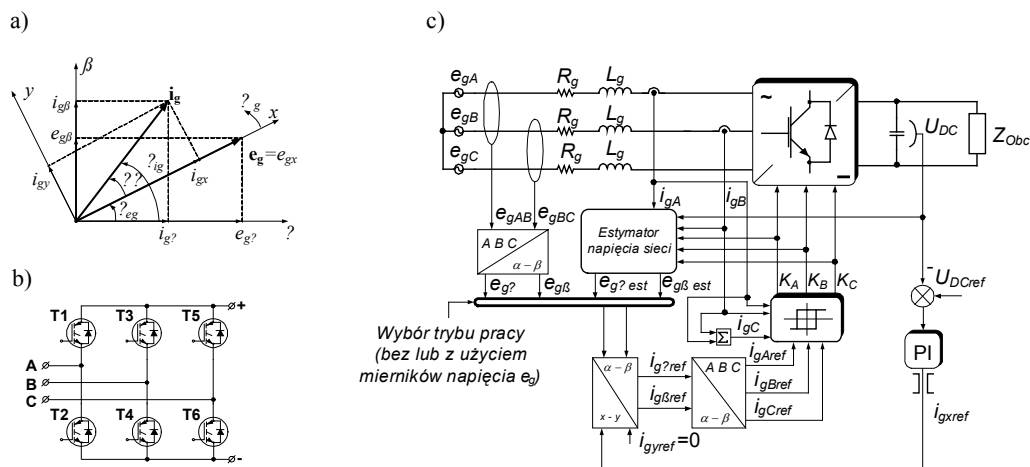
Stosowane w nowoczesnych układach napędowych przełączniki sieciowe AC/DC ze sterowaniem wektorowym umożliwiają nie tylko dwukierunkowy przepływ energii, ale również zapewniają sinusoidalny kształt prądów pobieranych z sieci oraz jednostkowy współczynnik mocy w każdym stanie bezawaryjnej pracy napędu [3]–[6]. Obniżenie kosztów produkcji wspomnianych przełączników, nazywanych również prostownikami PWM zostało uzyskane dzięki zastosowaniu algorytmów estymacji zmiennych stanu przetwarzanych w układzie sterowania, pozwalających na redukcję liczby używanych w procesie regulacji układów pomiarowych. Ponadto, dzięki systemom monitorowania uszkodzeń możliwa jest minimalizacja kosztów spowodowanych awariami, których konsekwencją są nieoczekiwane przestoje procesów technologicznych. Jednym z rodzajów uszkodzeń układów przełącznikowych są nieprawidłowości pracy tranzystorów IGBT, które polegają na braku przewodzenia prądu [8]–[10]. W ostatnich latach zaprezentowano wiele metod

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław ul. Smoluchowskiego 19, piotr.sobanski@pwr.wroc.pl, teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl.

diagnostyki tego rodzaju awarii. Poprawność działania wspomnianych technik została zweryfikowana przede wszystkim w układach falowników napięcia, zasilających silniki prądu przemiennego, np. [1], [2], [9]. Prace, w których przedstawiono metody diagnostyki uszkodzeń łączników tranzystorowych w prostownikach PWM dotyczą głównie struktur z pomiarem napięć sieci, np. [7]. W niniejszym artykule zaprezentowano przebiegi wybranych zmiennych diagnostycznych w układzie sterowania przekształtnikiem AC/DC, zarówno z pomiarem napięć sieci zasilającej jak i w układzie bezczujnikowym. Sformułowano reguły diagnostyczne, które mogą zostać wykorzystane do opracowania systemu detekcji uszkodzeń tranzystorów przekształtnika.

2. METODA STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM AC/DC W UKŁADZIE Z ORIENTACJĄ WEKTORA PRĄDU SIĘCI WZGLĘDEM WEKTORA NAPIĘCIA SIĘCI

Na rysunku 1 przedstawiono analizowaną strukturę sterowania prostownikiem PWM z orientacją wektora prądu sieci \mathbf{i}_g względem wektora napięcia sieci \mathbf{e}_g oraz wykres wektorowy [3]–[6].



Rys. 1. Układ sterowania przekształtnikiem AC/DC z orientacją wektora prądu sieci względem wektora napięcia sieci: wykres wektorowy opisujący zasadę działania (a), schemat obwodowy mostka prostowniczego (b) oraz schemat blokowy układu sterowania (c)

Wektor napięcia sieci może być wyznaczony na podstawie znajomości wektora napięcia przekształtnika \mathbf{u}_p oraz napięcia dławika sieciowego \mathbf{u}_L zgodnie z zależnościami [4], [5]:

$$\mathbf{e}_{gest} = \mathbf{u}_{pest} + \mathbf{u}_{Lest} \cdot \quad (1)$$

Składowe napięcia przekształtnika zostały obliczone za pomocą równań (2) [4], [5]:

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

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

przy czym:

U_{DC} – napięcie na kondensatorze filtrującym,

$K_{A,B,C}$ – wartości sygnałów wyjściowych regulatorów histerezowych prądu poszczególnych faz prostownika.

Napięcie dławika sieciowego obliczono wykorzystując równania (3) [4], [6]:

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

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

gdzie:

$i_{g\alpha,\beta}$ – składowe prądu sieci,

q_L – chwilowa wartość mocy biernej pobieranej przez dławik L_g liczona zgodnie z zależnością (4) [4, 6]:

$$q_L = \frac{3L_g}{\sqrt{3}} \left(\frac{di_{gA}}{dt} i_{gC} - \frac{di_{gC}}{dt} i_{gA} \right) \quad (4)$$

przy czym $i_{gA,B,C}$ – prądy fazowe sieci.

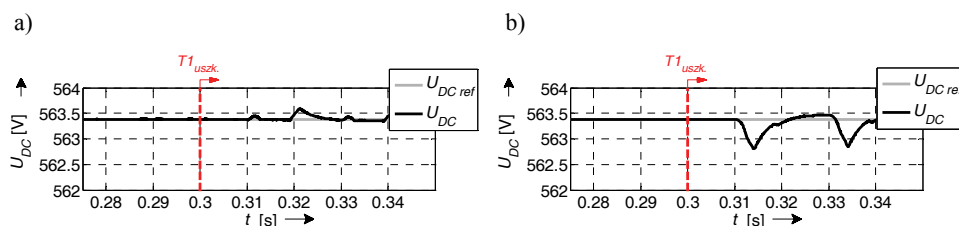
3. DIAGNOSTYKA USZKODZEŃ TRANZYSTORÓW PRZEKSZTAŁTNIKA AC/DC

Dzięki zastosowaniu kondensatora filtrującego (rys. 1c) o dostatecznie dużej pojemności oraz wykorzystaniu dławików sieciowych L_g zarówno w strukturze sterowania z pomiarem napięć sieci jak i układzie bezczujnikowym pulsacje wyjściowego napięcia prostownika U_{DC} spowodowane uszkodzeniem jednego z jego tranzystorów są nieznaczne (rys. 2). Niemniej jednak praca z zachowaniem jednostkowego współczynnika mocy przekształtnika oraz zachowanie sinusoidalnego kształtu prądów sieci $i_{gA,B,C}$ w trakcie awarii polegającej na braku przewodzenia prądu przez jeden z tranzy-

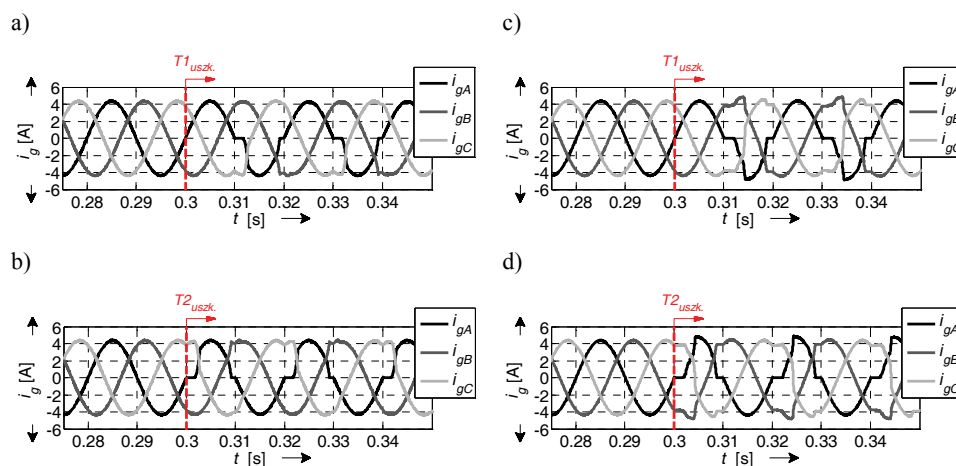
storów prostownika jest niemożliwa (rys. 3). W związku z czym, wydaje się być zasadnym zastosowanie odpowiednich układów monitorujących stan techniczny przekształtnika, pozwalających na możliwie szybkie zlokalizowanie awarii oraz naprawę.

Metody diagnostyki uszkodzeń przekształtników energoelektronicznych można podzielić na techniki, w których są wykorzystywane przetworzone sygnały prądowe bądź napięciowe. W dalszej części pracy przeanalizowano możliwość użycia do diagnostyki prostownika PWM standardowych algorytmów stosowanych przede wszystkim w przypadku monitorowania falowników napięcia w napędach elektrycznych.

Symulacji uszkodzeń poszczególnych tranzystorów przekształtnika AC/DC dokonano w chwili $t = 0,3$ s w trakcie ustalonej, prostownikowej pracy przekształtnika (energia pobierana z sieci) obciążonego odbiornikiem Z_{Obc} o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. Przedstawione wyniki badań mają charakter porównawczy oraz dotyczą testów zrealizowanych przy wykorzystaniu modelu przekształtnika w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci oraz w układzie bezczujnikowym.



Rys. 2. Przebiegi napięcia wyjściowego prostownika w trakcie uszkodzenia tranzystora T1 w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a) oraz w układzie bezczujnikowym (b)



Rys. 3. Przebiegi prądów fazowych sieci w trakcie uszkodzenia tranzystorów T1 lub T2 prostownika w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a, b) oraz w układzie bezczujnikowym (c, d)

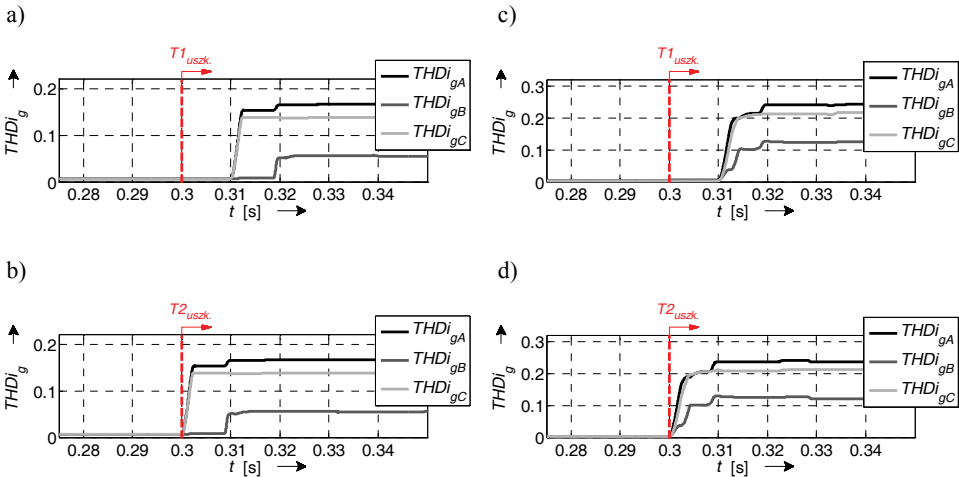
Na rysunku 4 pokazano przykładowe przebiegi współczynnika zawartości harmonicznych THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) w prądach fazowych podczas uszkodzenia jednego z tranzystorów fazy A prostownika. Wartości współczynników THD_{i_g} odnoszące się do poszczególnych faz prostownika zostały obliczone zgodnie z zależnością (5):

$$THD_{i_{gm}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_{gm k}^2}}{I_{gm 1}} \quad (5)$$

gdzie:

$I_{gm k}$ – skuteczna wartość k -tej harmonicznej prądu fazy m sieci,

$I_{gm 1}$ – skuteczna wartość składowej podstawowej $f_1 = 50$ Hz prądu fazy m sieci, przy czym $m = A, B$ lub C .



Rys. 4. Przebiegi współczynnika zawartości harmonicznych (THD) w prądach fazowych prostownika podczas uszkodzenia tranzystora T1 lub T2 w układzie sterowania z pomiarem napięcia zasilającej (a, b) oraz w układzie bezczujnikowym (c, d)

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono znaczny wzrost wartości współczynnika THD prądów sieci zasilającej podczas pracy prostownika w warunkach uszkodzenia jego poszczególnych tranzystorów. Jak można zauważyć, na przykładzie uszkodzeń tranzystorów fazy A, w przypadku obwodu fazowego, w którym doszło do awarii, wartość THD_{i_g} jest największa oraz znacznie przewyższa wartość THD_{i_g} związaną z każdym z pozostałych obwodów prostownika. W tabeli 1 sformułowano reguły pozwalające na identyfikację fazy prostownika, w której doszło do awarii. Wartość progu diagnostycznego k_{THD} może być ustalona na podstawie badań symulacyjnych.

Ponadto zauważono, że w przypadku awaryjnej pracy prostownika w strukturze sterowania beczujnikowego, wartości $THDi_g$ odnoszące się do poszczególnych faz są większe niż w strukturze, w której wykorzystywany jest pomiar napięcia sieci (rys. 4).

Tabela 1. Reguły pozwalające na identyfikację uszkodzonej fazy prostownika

$THDi_{gA}$	$THDi_{gB}$	$THDi_{gC}$	Uszkodzony tranzystor
$>k_{THD}$	$\in(0,25k_{THD}, 0,6k_{THD})$	$>k_{THD}$	T1 lub T2
$>k_{THD}$	$>k_{THD}$	$\in(0,25k_{THD}, 0,6k_{THD})$	T3 lub T4
$\in(0,25k_{THD}, 0,6k_{THD})$	$>k_{THD}$	$>k_{THD}$	T5 lub T6

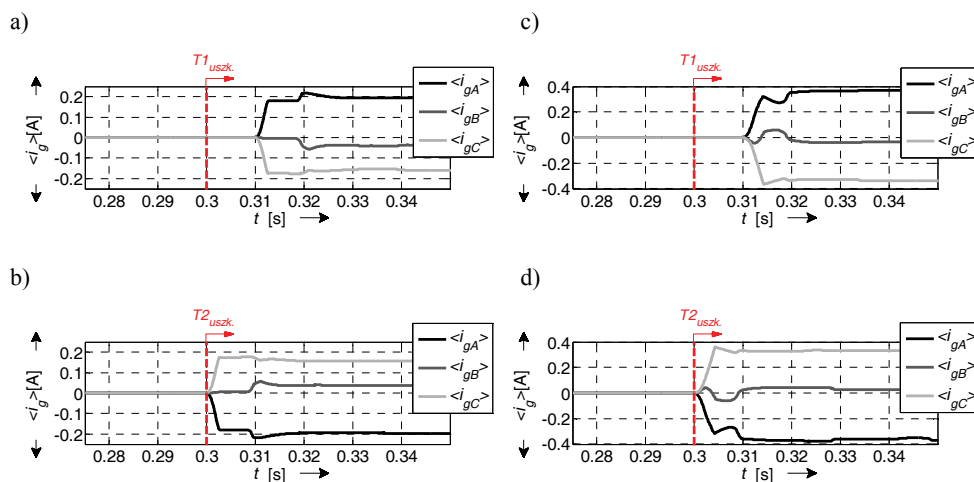
Na rysunku 5 pokazano przykładowe przebiegi średniej wartości prądów fazowych sieci $\langle i_g \rangle$ w trakcie awarii jednego z tranzystorów fazy A prostownika, natomiast na rysunku 6 przedstawiono wybrane przebiegi średniej wartości błędu regulacji prądów fazowych sieci $\langle \Delta i_g \rangle$ w trakcie awarii jednego z tranzystorów fazy B prostownika. Błąd regulacji został zdefiniowany następująco (6):

$$\Delta i_{gm} = i_{gmref} - i_{gm} \quad (6)$$

gdzie:

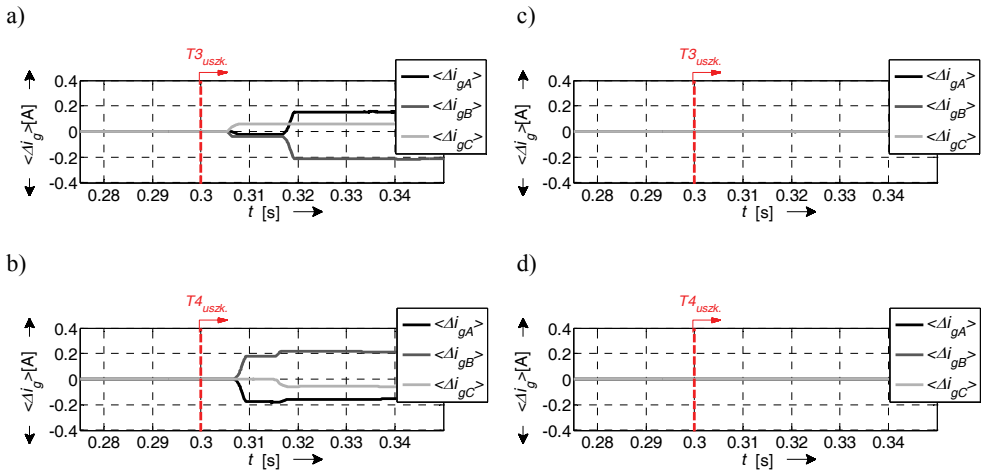
i_{gmref} – zadany prąd fazy f sieci zasilającej,

i_{gm} – mierzony prąd fazy m sieci zasilającej, przy czym $m = A, B$ lub C .



Rys. 5. Przebiegi średniej wartości prądów sieci zasilającej podczas uszkodzenia tranzystora T1 lub T2, w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a, b) oraz w układzie beczujnikowym (c, d)

Można zauważyć, że w układzie prostownika ze sterowaniem bezczujnikowym analiza $\langle \Delta i_g \rangle$ nie niesie informacji diagnostycznej (rys. 6). W pozostałych przypadkach, na skutek uszkodzenia jednego z tranzystorów prostownika zarówno $\langle i_g \rangle$, jak i $\langle \Delta i_g \rangle$ przyjmuje wartości różne od zera (rys. 5, 6). W tabeli 2 przedstawiono zbiór reguł diagnostycznych pozwalających na zlokalizowanie uszkodzonego tranzystora. Symbolami k_{ig} oraz $k_{\Delta ig}$ oznaczono progi diagnostyczne odpowiadające poszczególnym metodom diagnostycznym, tj. technice opartej na analizie $\langle i_g \rangle$ lub $\langle \Delta i_g \rangle$. Przykładowo, jeżeli wartość $\langle i_{gA} \rangle$ jest większa niż k_{ig} oraz równocześnie wartość $\langle i_{gC} \rangle$ jest mniejsza niż $-k_{ig}$ wtedy można stwierdzić uszkodzenie tranzystora T1.



Rys. 6. Przebiegi średniej wartości błędu regulacji prądów sieci zasilającej podczas uszkodzenia tranzystora T3 lub T4, w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a, b) oraz w układzie bezczujnikowym (c, d)

Reguły diagnostyczne sporządzone na podstawie analizy $\langle \Delta i_g \rangle$ zostały sformułowane analogicznie. Wartości k_{ig} oraz $k_{\Delta ig}$ mogą zostać wyznaczone na podstawie badań symulacyjnych.

Tabela 2. Reguły pozwalające na identyfikację uszkodzonej fazy prostownika

$\langle i_{gA} \rangle$	$\langle i_{gB} \rangle$	$\langle i_{gC} \rangle$	$\langle \Delta i_{gA} \rangle$	$\langle \Delta i_{gB} \rangle$	$\langle \Delta i_{gC} \rangle$	Uszkodzony tranzystor
$>k_{ig}$		$<-k_{ig}$	$<-k_{\Delta ig}$		$>k_{\Delta ig}$	T1
$<-k_{ig}$		$>k_{ig}$	$>k_{\Delta ig}$		$<-k_{\Delta ig}$	T2
$<-k_{ig}$	$>k_{ig}$		$>k_{\Delta ig}$	$<-k_{\Delta ig}$		T3
$>k_{ig}$	$<-k_{ig}$		$<-k_{\Delta ig}$	$>k_{\Delta ig}$		T4
	$<-k_{ig}$	$>k_{ig}$		$>k_{\Delta ig}$	$<-k_{\Delta ig}$	T5
	$>k_{ig}$	$<-k_{ig}$		$<-k_{\Delta ig}$	$>k_{\Delta ig}$	T6

W artykule [2] zaprezentowano sposób diagnostyki uszkodzeń falownika napięcia oparty na wykorzystaniu przetworzonych sygnałów napięciowych. W niniejszej pracy została sprawdzona skuteczność wspomnianych algorytmów w przypadku awarii przekształtnika AC/DC. Na rysunku 7 pokazano przykładowe przebiegi średniej wartości estymowanych napięć sieci $\langle e_{g\ est} \rangle$ w trakcie uszkodzenia jednego z tranzystorów fazy B prostownika, natomiast na rysunku 8 przedstawiono wybrane przebiegi średniej wartości błędu estymacji napięć fazowych sieci $\langle \Delta e_g \rangle$ w trakcie awarii jednego z tranzystorów fazy C prostownika, w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej. Błąd estymacji został zdefiniowany następująco (7):

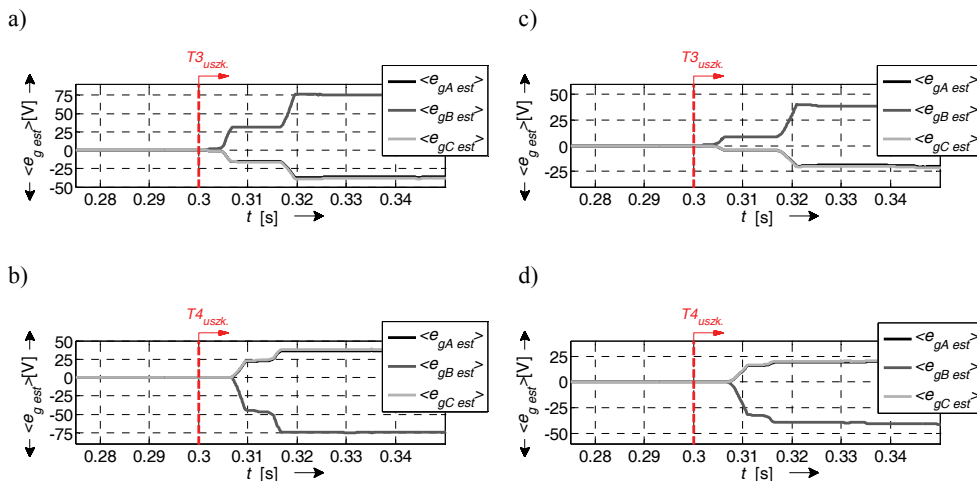
$$\Delta e_{gm} = e_{gm} - e_{gm\ est} \quad (7)$$

gdzie:

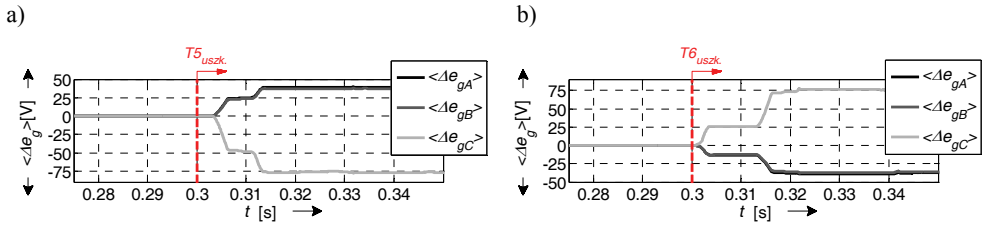
e_{gm} – mierzone napięcie fazy f sieci zasilającej,

$e_{gm\ est}$ – estymowane napięcie fazy m sieci zasilającej, przy czym $m = A, B$ lub C .

W tabeli 3 przedstawiono reguły diagnostyczne pozwalające na zlokalizowanie uszkodzonego tranzystora zarówno w przypadku wykorzystania sygnałów $\langle e_{g\ est} \rangle$, jak i $\langle \Delta e_g \rangle$. Symbolami k_{eg1} , k_{eg2} oraz $k_{\Delta eg1}$, $k_{\Delta eg2}$ oznaczono progi diagnostyczne, których wartości mogą zostać wyznaczone na podstawie badań symulacyjnych. W celu minimalizacji czasu potrzebnego na zidentyfikowanie nieprawidłowo funkcjonującego łącznika należy przyjąć takie wartości progów diagnostycznych, żeby została spełniona nierówność $k_{eg1} > k_{eg2}$. Podobnie w przypadku algorytmu opartego na analizie sygnału $\langle \Delta e_g \rangle$ powinna zostać zachowana relacja: $k_{\Delta eg1} > k_{\Delta eg2}$.



Rys. 7. Przebiegi średniej wartości estymowanych napięć sieci zasilającej podczas uszkodzenia tranzystora T3 lub T4, w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a, b) oraz w układzie bezczujnikowym (c, d)



Rys. 8. Przebiegi średniej wartości błędu estymacji napięć sieci zasilającej podczas uszkodzenia tranzystora T5 (a) lub T6 (b) w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci

Tabela 3. Reguły pozwalające na identyfikację uszkodzonego tranzystora

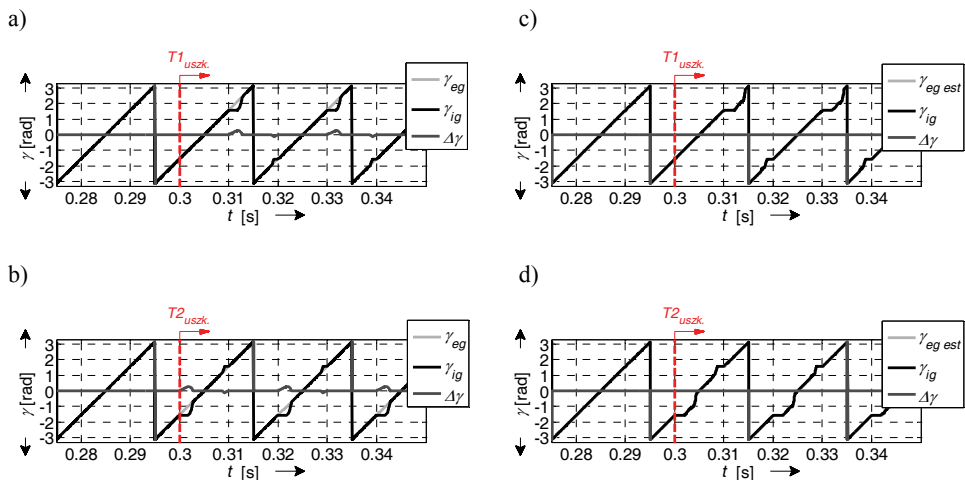
$\langle e_{gA} \text{ est} \rangle$	$\langle e_{gB} \text{ est} \rangle$	$\langle e_{gC} \text{ est} \rangle$	$\langle \Delta e_{gA} \rangle$	$\langle \Delta e_{gB} \rangle$	$\langle \Delta e_{gC} \rangle$	Uszkodzony tranzystor
$>k_{eg1}$	$<-k_{eg2}$	$<-k_{eg2}$	$<-k_{\Delta eg1}$	$>k_{\Delta eg2}$	$>k_{\Delta eg2}$	T1
$<-k_{eg1}$	$>k_{eg2}$	$>k_{eg2}$	$>k_{\Delta eg1}$	$<-k_{\Delta eg2}$	$<-k_{\Delta eg2}$	T2
$<-k_{eg2}$	$>k_{eg1}$	$<-k_{eg2}$	$>k_{\Delta eg2}$	$<-k_{\Delta eg1}$	$>k_{\Delta eg2}$	T3
$>k_{eg2}$	$<-k_{eg1}$	$>k_{eg2}$	$<-k_{\Delta eg2}$	$>k_{\Delta eg1}$	$<-k_{\Delta eg2}$	T4
$<-k_{eg2}$	$<-k_{eg2}$	$>k_{eg1}$	$>k_{\Delta eg2}$	$>k_{\Delta eg2}$	$<-k_{\Delta eg1}$	T5
$>k_{eg2}$	$>k_{eg2}$	$<-k_{eg1}$	$<-k_{\Delta eg2}$	$<-k_{\Delta eg2}$	$>k_{\Delta eg1}$	T6

Diagnostyka uszkodzeń tranzystorów przekształtników energoelektronicznych może zostać oparta na informacji o przebiegu wartości kąta położenia wektora prądu w układzie współrzędnych α - β [1], [7], [9]. W czasie bezawaryjnej pracy przekształtnika sterowania AC/DC ze sterowaniem wektorowym kąt $\Delta\gamma$ zawarty między wektorem prądu, a wektorem napięcia sieci jest równy w przybliżeniu zero (rys. 1a). W przypadku uszkodzenia jednego z tranzystorów prostownika, dwukrotnie w trakcie okresu prądu wektor \mathbf{i}_g wstrzymuje swój ruch obrotowy w charakterystycznej części płaszczyzny α - β . Badając dynamikę zmian kąta γ_{ig} , można – przy znajomości polaryzacji prądów sieci – bezbłędnie zidentyfikować uszkodzony tranzystor [1], [7], [9].

Na rysunku 9 pokazano przebiegi γ_{eg} lub $\gamma_{eg \text{ est}}$, γ_{ig} oraz $\Delta\gamma$ w trakcie uszkodzenia tranzystorów T1 lub T2. W niniejszej pracy zaproponowano algorytm, który może być wykorzystany w strukturze sterowania prostownikiem PWM z pomiarem napięć sieci. W odróżnieniu od wspomnianych technik diagnostycznych, uszkodzony tranzystor został zlokalizowany na podstawie znajomości wartości kąta $\Delta\gamma$ (rys. 1a).

W tabeli 4 przedstawiono reguły umożliwiające zlokalizowanie tranzystora, który uległ awarii. Jak wspomniano w stanie awaryjnej pracy przekształtnika AC/DC wektor prądu sieci dwukrotnie wstrzymuje swój ruch na płaszczyźnie α - β , natomiast wektor napięcia sieci zawsze wiruje z prędkością kątową $\omega_{eg} = 2\pi f_{eg}$, gdzie f_{eg} – częstotliwość sieci zasilającej. Jeżeli $f_{eg} = \text{const}$, to na podstawie wartości $\Delta\gamma$ oraz informacji o położeniu wektora prądu na płaszczyźnie α - β w momencie kiedy \mathbf{i}_g wstrzymał swój ruch ($\gamma =$

$\gamma_{uszk.}$), można zlokalizować uszkodzony tranzystor. W tabeli 4 symbolem $k_{\Delta\gamma}$ oznaczono próg diagnostyczny, który może być ustalony na podstawie badań symulacyjnych.



Rys. 9. Przebiegi γ_{eg} lub $\gamma_{eg est}$, γ_{ig} oraz $\Delta\gamma$ w trakcie uszkodzenia tranzystorów T1 lub T2, w układzie sterowania z pomiarem napięć sieci zasilającej (a, b) oraz w układzie bezczujnikowym (c, d)

Tabela 4. Reguły pozwalające na identyfikację uszkodzonego tranzystora

$\Delta\gamma$	$\gamma_{uszk.}[\text{rad}]$	1,57	-1,57	0,52	-2,61	2,62	-0,52
$\Delta\gamma > k_{\Delta\gamma}$		T1	T2	T4	T3	T6	T5
$\Delta\gamma < -k_{\Delta\gamma}$		T2	T1	T3	T4	T5	T6

4. PODSUMOWANIE

W artykule przeanalizowano wpływ awarii polegającej na braku przewodzenia jednego z tranzystorów przekształtnika AC/DC w układzie regulacji z pomiarem napięć sieci zasilającej oraz w strukturze sterowania bezczujnikowego na przebiegi wybranych zmiennych stanu. Poza tym, zbadano skuteczność współczesnych metod diagnostyki uszkodzeń przekształtników energoelektronicznych, głównie falowników napięcia w przypadku awarii prostownika PWM.

W analizowanych warunkach pracy przekształtnika AC/DC, zarówno w układzie sterowania z pomiarem napięć międzyfazowych sieci, jak i układzie bezczujnikowym, pulsacje napięcia wyjściowego prostownika, które są spowodowane uszkodzeniem jednego z tranzystorów są pomijalnie małe. Ze względu na brak możliwości zachowania jednostkowego współczynnika mocy oraz znaczne zniekształcenie prądów sieci spowodowane awarią prostownika jest wskazane zastosowanie układu diagnostyczne-

go umożliwiającego szybkie zlokalizowanie uszkodzonego tranzystora, w celu przywrócenia pełnej funkcjonalności przekształtnika. Wybór odpowiedniej techniki monitorowania stanu prostownika jest uzależniony od zastosowanego algorytmu sterowania. Metoda diagnostyki uszkodzeń tranzystorów prostownika oparta na analizie przebiegu średniej wartości błędów regulacji prądów fazowych sieci zasilającej oraz technika, w której wykorzystano transformację Clarka, są nieskuteczne w układzie bezczujnikowym. Natomiast wykazują dobrą efektywność w przypadku pracy układu z pomiarem napięcia sieci. W układzie bezczujnikowym mogą być z powodzeniem wykorzystane metody diagnostyczne oparte na analizie średniej wartości (składowej stałej): prądów fazowych sieci zasilającej, błędów regulacji prądów fazowych przekształtnika lub estymowanych napięć sieci zasilającej.

Zastosowanie algorytmu estymacji wektora napięcia sieci zasilającej pozwala zrezygnować ze stosowania układów pomiaru tego napięcia, przez co zarówno koszt wykonania przekształtnika jak i jego rozmiar ulega zmniejszeniu. Ponadto, niezawodność pracy prostownika jest większa, ponieważ ryzyko wystąpienia awarii układu pomiaru napięć sieci nie występuje.

Zgodnie z wykorzystaną w pracy metodą estymacji, wektor napięcia sieci jest wyznaczany, m.in. na podstawie znajomości sygnałów sterujących tranzystorami przekształtnika. W związku z tym, podczas awarii jednego z tranzystorów, napięcie sieci jest błędnie obliczane, co skutkuje większym odkształceniem prądów fazowych przekształtnika niż w przypadku układu z pomiarem napięć sieci. Fakt ten zwiększa pewność oraz szybkość działania części zaprezentowanych metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów prostownika (Rys. 4, 5).

W kolejnej pracy, autorzy planują weryfikację działania zaprezentowanych metod diagnostyki awarii przekształtnika sieciowego AC/DC w trakcie jego pracy z oddawaniem energii odbiornika do sieci.

Praca zrealizowana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2013/09/B/ST7/04199.

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL-Grid.

LITERATURA

- [1] ESTIMA J.O., FREIRE N.M.A., CARDOSO A.J.M., *Recent Advances in Fault Diagnosis by Park' Vector Approach*, IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis, Paris 2013, 279–288.
- [2] FREIRE N.M.A., ESTIMA J.O., CARDOSO A.J.M., *A voltage-based approach for open-circuit fault diagnosis in voltage-fed SVM motor drives without extra hardware*, XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille 2012, 2378–2383.
- [3] KNAPCZYK M., PIENKOWSKI K., *Analiza nieliniowych metod sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC*, Zagadnienia Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24, 2004, 381–392.

- [4] KNAPCZYK M., *Nonlinear control strategies of AC/DC line-side converters using sliding-mode approach*, Ph.D. Thesis, Wrocław 2004.
- [5] LEE D.C., LIM D.S., *AC Voltage and Current Sensorless Control of Three-Phase PWM Rectifiers*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 6, 2002, 883–890.
- [6] MALINOWSKI M., KAŻMIERKOWSKI M.P., TRZYNADŁOWSKI A.M., *A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in AC Adjustable Speed Drives*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 6, 2003, 1390–1396.
- [7] ROTHENHAGEN K., FUCHS F.W., *Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers*, IEEE 35th Annual Conference of Power Electronics Specialists, Vol. 6, Aachen 2004, 4348–4354.
- [8] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Wpływ uszkodzenia tranzystora IGBT falownika napięcia na przebiegi zmiennych stanu silnika indukcyjnego ze sterowaniem wektorowym*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, nr 2b, 2013, 162–165.
- [9] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Metoda diagnostyki uszkodzenia typu przerwa łącznika IGBT falownika napięcia w układzie wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, nr 6, 2013, 159–163.
- [10] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Analiza symptomów uszkodzeń łączników tranzystorowych falownika napięcia w napędzie indukcyjnym*, Poznań University of Technology, Academic Journals Electrical Engineering, nr 75, 2013, 71–78.

ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF IGBT FAULTS IN AC/DC LINE SIDE CONVERTER

In this paper a single IGBT open-circuit fault symptoms analysis in the voltage-oriented-control AC/DC converter was carried out. The aim of the present contribution was to confirm an effectiveness of the well-known diagnosis methods for open-switch faults in two level voltage inverter in case of the reversible AC/DC line side converter. Presented results have a comparative character and they were achieved by utilizing simulation model of the AC/DC converter control structure based on voltage sensor or sensorless control concept.