

*przełącznik sieciowy AC/DC, diagnostyka uszkodzeń,
awaria tranzystora IGBT*

Piotr SOBAŃSKI*

NAPIĘCIOWY ALGORYTM DIAGNOSTYKI USZKODZEŃ TRANZYSTORÓW W PRZEKSZTAŁNIKU SIECIOWYM AC/DC

W artykule zaprezentowano algorytm diagnostyki awarii tranzystorów IGBT w przełączniku sieciowym AC/DC ze sterowaniem zorientowanym względem napięcia sieci zasilającej. Proponowana metoda jest oparta na analizie średniej wartości błędów estymacji napięć fazowych przełącznika sieciowego AC/DC oraz umożliwia szybką identyfikację tranzystora, który utracił zdolność przewodzenia prądu. Skuteczność algorytmu została potwierdzona zarówno w trakcie pracy prostownikowej jak i falownikowej przełącznika AC/DC. W celu weryfikacji skuteczności działania metody przeprowadzono kompleksowe badania symulacyjne, których wybrane wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

1. DIAGNOSTYKA AWARII W ENERGOELEKTRONICZNYCH UKŁADACH PRZEKSZTAŁNIKOWYCH

Ponad jedną trzecią awarii występujących w napędach elektrycznych stanowią uszkodzenia przełączników energoelektronicznych. Spośród nich około 31% dotyczy nieprawidłowości w funkcjonowaniu tranzystorów, które objawiają się brakiem zdolności przewodzenia prądu bądź zwarcie [1]–[3]. Główną przyczyną awarii tranzystorów są procesy starzeniowe, które przebiegają znacznie szybciej w przypadku częstych przeciążeń układów energoelektronicznych. Płynące w takich warunkach prądy fazowe przełącznika powodują podwyższenie temperatury modułów mocy, przyspieszając tym samym ich zużycie [4]. Zwarcia tranzystorów mogą w krótkim czasie doprowadzić do rozległych uszkodzeń układów energoelektronicznych [2]. W związku z tym, stosuje się wyspecjalizowane sterowniki bramek tranzystorów, które zmniejszają ryzyko rozległych uszkodzeń przełącznika poprzez rozwarcie

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.sobanski@pwr.edu.pl

awaryjnie pracującego łącznika. Utrata zdolności do przewodzenia prądu przez łączniki może być również spowodowana uszkodzeniem sterowników bramek tranzystorów lub fizyczną awarią złącz półprzewodnikowych [5]. Nieprawidłowość pracy, wynikająca z utraty zdolności do przewodzenia prądu przez jeden z tranzystorów w układach energoelektronicznych, prowadzi do błędów regulacji zmiennych stanu.

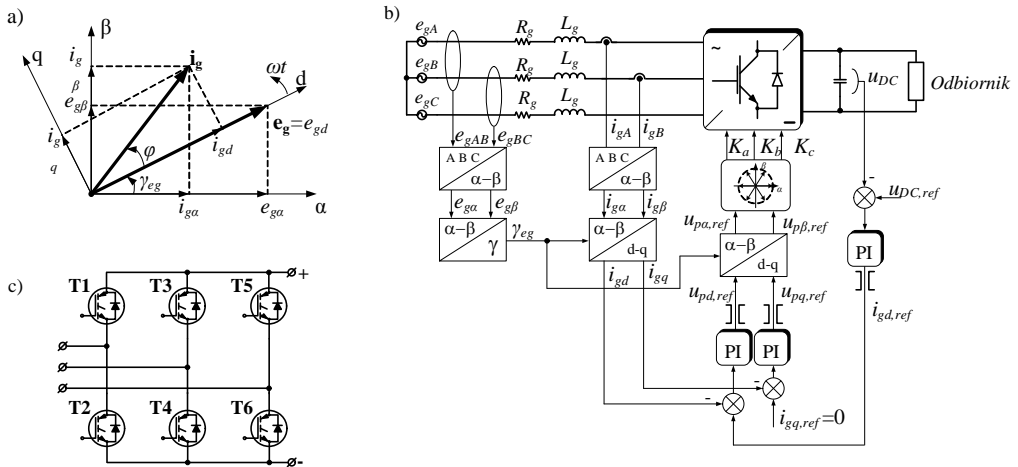
W przypadku awarii falowników napięcia, które zasilają maszyny elektryczne, uszkodzenie tranzystora powoduje nieprawidłowości regulacji momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątowej w napędzie. Ten sam typ awarii w prostownikach AC/DC jest powodem odkształcenia prądów sieciowych oraz utraty możliwości regulacji mocy biernej w pełnym zakresie pracy przekształtnika [6]. W związku z tym są projektowane algorytmy diagnostyki uszkodzeń tranzystorów umożliwiające szybkie zlokalizowanie nieprawidłowo pracującego łącznika. Dzięki temu czas naprawy urządzenia jest krótki, a poniesione koszty, powiązane z przestojami pracy zostają zminimalizowane.

Zdecydowana większość zaprezentowanych dotychczas metod diagnostyki tranzystorów dotyczy awarii falowników napięcia [7, 8]. W przypadku dwupoziomowych, trójfazowych prostowników sterowanych zagadnienie to nie zostało gruntownie przebadane. W pracach [9], [10] zaprezentowano algorytm diagnostyki uszkodzeń diod w prostownikach niesterowanych. Metoda polega na wykorzystaniu wyników transformaty Fouriera zrealizowanej dla napięcia stałego przekształtnika. Algorytm nie pozwala na jednoznaczną lokalizację nieprawidłowo pracującej diody. Ponadto, nie określono czasu potrzebnego na przeprowadzenie procedury diagnostycznej oraz nie wyjaśniono wpływu pojemności kondensatorów filtra prostownika na amplitudę sygnałów diagnostycznych. W pracy [11] przedstawiono wyniki porównawcze kilku technik monitorowania stanu tranzystorów w falowniku pracującym w trybie prostownikowym. Zaprezentowane algorytmy są oparte na analizie obrazów hodografów prądów fazowych przekształtnika energoelektronicznego. Zniekształcenie prądów jest znacznie większe niż obserwuje się w układach prostownikowych, zawierających dławiki sieciowe, co może mieć istotny wpływ na skuteczność metod w przypadku przekształtników sieciowych AC/DC. Do diagnostyki uszkodzeń tranzystorów są również stosowane metody sztucznej inteligencji [12], [13]. Z uwagi na konieczność zgromadzenia dużej ilości danych potrzebnych do wyodrębnienia cech sygnałów diagnostycznych świadczących o awarii, metoda ma ograniczone zastosowanie praktyczne.

W niniejszym artykule, przedstawiono algorytm diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w przekształtniku sieciowym AC/DC ze sterowaniem zorientowanym względem napięcia sieci zasilającej. Zaproponowana w niniejszym artykule nowa metoda diagnostyki uszkodzeń tranzystorów polega na analizie błędów estymacji napięć fazowych przekształtnika i może być zastosowana zarówno podczas pracy prostownikowej jak i falownikowej przekształtnika. Zaletą opisanego rozwiązania jest możliwa łatwa realizacja praktyczna układu diagnostyki uszkodzeń oraz jego pełna skuteczność działania. Zaprojektowany algorytm został zweryfikowany za pomocą modelu symulacyjnego, wykonanego w środowisku Matlab/Simulink.

2. NAPIĘCIOWO ZORIENTOWANA METODA STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM AC/DC

Na rys. 1 przedstawiono wykres wektorowy oraz strukturę sterowania prostownikiem PWM z orientacją wektora prądu sieci \mathbf{i}_g względem wektora napięcia sieci \mathbf{e}_g [14]. Sygnałem wyjściowym regulatora napięcia stałego prostownika u_{DC} jest składowa $i_{gd,ref}$ zadanego prądu sieci. Aby uzyskać zerową wartość kąta φ , a tym samym jednostkowy współczynnik mocy, wartość zadana składowej prądu $i_{gd,ref}$ wynosi zero. Regulatory składowych prądu sieci zasilającej wyznaczają zadane napięcie przekształtnika, które jest modulowane za pomocą algorytmu wektorowego.



Rys. 1. Metoda napięciowo-zorientowana: wykres wektorowy opisujący zasadę działania (a), schemat blokowy układu sterowania (b) oraz schemat obwodowy mostka prostowniczego (c)

Wektor napięcia przekształtnika \mathbf{u}_p może być estymowany na podstawie znajomości wektora napięcia sieci \mathbf{e}_g oraz napięcia dławika sieciowego \mathbf{u}_L zgodnie z zależnością (1):

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{e}_g - \mathbf{u}_L \quad (1)$$

Składowe napięcia przekształtnika mogą być obliczone zgodnie z zależnością (2):

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

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

przy czym: U_{DC} – napięcie na kondensatorze filtrującym, $K_{A,B,C}$ – wartości sygnałów sterujących tranzystorami mostka.

Z uwagi na wysoką częstotliwość łążeń tranzystorów, przetwarzanie sygnałów $K_{A,B,C}$ w celu estymacji napięcia prostownika wymaga zastosowania bardzo krótkiego okresu próbkowania układu sterowania, co w znacznym stopniu ogranicza realizację praktyczną. W związku z tym, zakłada się, że napięcie przekształtnika jest równe napięciu zadanemu.

Napięcie dławika sieciowego obliczono wykorzystując równania (3) [14]:

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

gdzie: $i_{g\alpha,\beta}$ – składowe prądu sieci, q_L – chwilowa wartość mocy biernej pobieranej przez dławik L_g liczona zgodnie z zależnością (4):

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

przy czym: $i_{gA,B,C}$ to mierzone prądy sieci. Z uwagi na pomijalnie małą wartość rezystancji dławików sieciowych R_g , w obliczeniach nie uwzględniono tego parametru.

3. METODA DIAGNOSTYKI AWARII TRANZYSTORÓW

Proponowany algorytm diagnostyki uszkodzeń tranzystorów przekształtnika sieciowego AC/DC polega na analizie średniej różnicy błędów estymacji napięć fazowych prostownika, liczonej w okresie napięcia sieci T_e , zgodnie z zależnością (5):

$$d_f = \sum_{n=1}^k (u_{pfest,n} - u_{pf,n}) / k \quad (5)$$

przy czym: f – oznacza fazę przekształtnika (A, B lub C), k – liczba próbek analizowanych sygnałów, przypadająca na jeden okres napięcia sieci.

Przyjęto uproszczenie, w którym estymowane napięcie przekształtnika u_{pest} jest równe co do wartości napięciu zadanemu, natomiast u_p obliczono zgodnie z zależnością (1). Estymacja napięcia prostownika w czasie awarii jednego z tranzystorów jest obciążona błędem spowodowanym nieuwzględnieniem dysfunkcji łącznika. W związku z tym, na podstawie analizy polaryzacji sygnałów diagnostycznych odnoszących

się do poszczególnych faz, możliwa jest identyfikacja uszkodzonego tranzystora, zgodnie z tabelą 1.

Tabela 1. Reguły pozwalające na identyfikację uszkodzonej fazy prostownika

d_A	d_B	d_C	Uszkodzony tranzystor
$<-T_{TF}$	+	+	T1
$>T_{TF}$	-	-	T2
+	$<-T_{TF}$	+	T3
-	$>T_{TF}$	-	T4
+	+	$<-T_{TF}$	T5
-	-	$>T_{TF}$	T6

Przykładowo, w przypadku uszkodzenia tranzystora T1 sygnał d_A ma ujemną wartość, mniejszą niż założony próg diagnostyczny T_{TF} , natomiast zmienne d_B oraz d_C przyjmują dodatnie wartości. Aby uniknąć tzw. fałszywych alarmów w trakcie prawidłowej pracy układu przekształtnikowego $T_{TF} > 0,1e_{gf}$. Przedstawiony algorytm diagnostyki awarii tranzystorów może być stosowany w przypadku różnych układów sterowania przekształtnikami sieciowymi, tj. bezpośredniego sterowania mocą, układu z orientacją względem wirtualnego strumienia bądź napięcia sieci zasilającej.

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Skuteczność proponowanego algorytmu została zweryfikowana za pomocą modelu symulacyjnego przekształtnika AC/DC wykonanego w środowisku MATLAB/Simulink. Układ energoelektroniczny został zaprojektowany za pomocą biblioteki Sim Power Systems. Symulacji uszkodzeń tranzystorów IGBT dokonano poprzez zadanie zerowej wartości sygnałów sterujących bramek poszczególnych łączników przekształtnika. Podstawowe parametry układu energoelektronicznego oraz struktury sterowania podano w tabeli 2.

Pierwsza część przedstawionych wyników badań obejmuje testy działania systemu diagnostycznego w trakcie uszkodzeń tranzystorów, które są inicjowane podczas pracy prostownikowej przekształtnika AC/DC. Druga część dotyczy awarii, następujących podczas zwrotu energii do sieci (tryb generatorowy). W tym celu, w obwodzie obciążenia zamodelowano źródło napięcia stałego o wartości 800 V. Linia kreskową oznaczono na rysunkach chwilę, w której wymuszano rozwarcie tranzystora oraz dokonano diagnozy.

Tabela 2. Parametry modelu symulacyjnego

Wielkość	Symbol	Wartość
Indukcyjność dławika	L_g	25 mH
Pojemność kondensatora	C	2,5 mF
Rezystancja obciążenia	R	100 Ω
Indukcyjność obciążenia	L	100 mH
Napięcie fazowe sieci zasilającej	E_{gf}	230 V
Siła elektromotoryczna w obwodzie obciążenia	E_{DC}	800 V
Częstotliwość modulacji napięcia	f_m	10 kHz
Krok czasowy symulacji	T_s	1 μ s

Ocenę szybkości działania zaprojektowanego systemu diagnostycznego umożliwia zmienna t_D , zdefiniowana w następujący sposób (6):

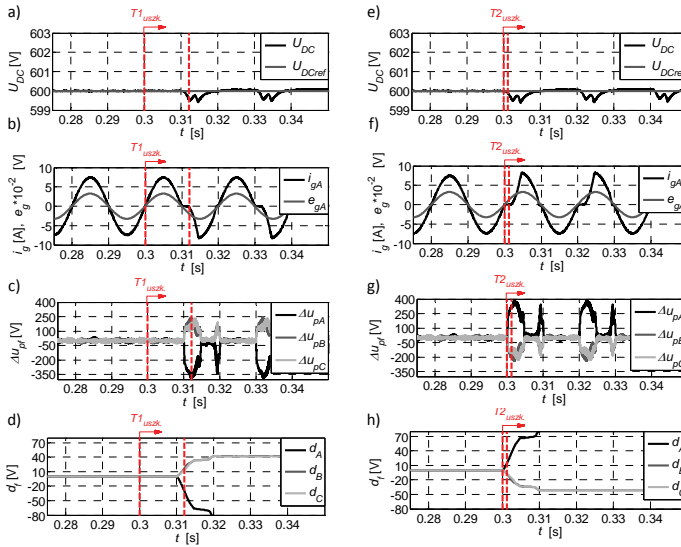
$$t_D = \frac{t_{uszk}}{T_e} \quad (6)$$

przy czym: t_{uszk} oznacza czas pomiędzy chwilą, w której wymuszono awarię tranzystora, a momentem uzyskania informacji o jego uszkodzeniu, natomiast T_e jest równy okresowi podstawowej harmonicznej napięcia sieci zasilającej.

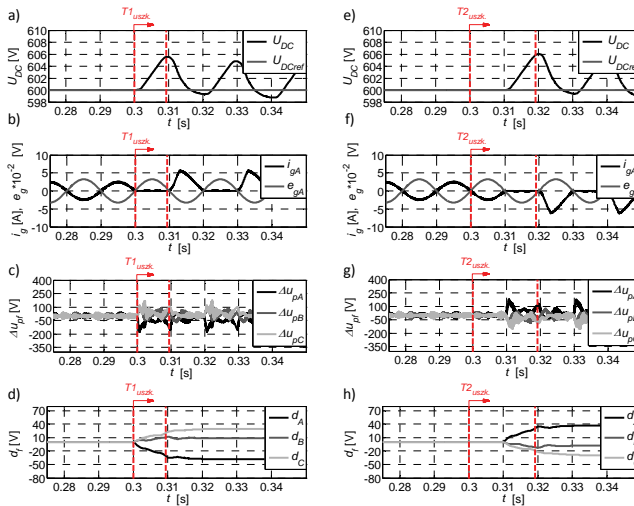
W celu weryfikacji metody diagnostycznej pokazano przebiegi zadanego $U_{DC\ ref}$ oraz zmierzonego U_{DC} napięcia stałego przekształtnika AC/DC, prądu fazy przekształtnika, w której doszło do awarii i_{gA} oraz odpowiedniego napięcia fazowego sieci e_{gA} . Ponadto, zaprezentowano przebiegi błędów estymacji napięć fazowych przekształtnika Δu_{pf} oraz sygnałów diagnostycznych d_f odnoszących się do poszczególnych faz prostownika. Przedstawione wyniki badań dotyczące awarii tranzystorów w fazie A mają reprezentatywny charakter, gdyż efekty działania systemu diagnostycznego w przypadku awarii łączników w pozostałych fazach są analogiczne. Symulacji uszkodzeń tranzystorów dokonano w chwili $t = 0,3$ s.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które dotyczą awarii tranzystora T1 (rys. 2a–d) oraz T2 fazy A przekształtnika (rys. 2e–h). Rozwarcie tranzystorów wymuszono w chwili, gdy przekształtnik pracował w trybie prostownikowym (rys. 2b). Od chwili $t = 0,312$ s (rys. 2d), sygnał d_A przyjmuje ujemne wartości, które przekraczają co do modułu próg diagnostyczny $T_{TF} = 30$ V, natomiast sygnały d_B oraz d_C osiągają wartości dodatnie. W związku z tym, zgodnie z tabelą 1 stwierdza się awarię tranzystora T1.

W przypadku uszkodzenia łącznika T2, chwili $t = 0,301$ s (rys. 2h) zmienna diagnostyczna d_A przyjmuje dodatnie wartości, przekraczające próg diagnostyczny $T_{TF} = 30$ V, natomiast sygnały d_B oraz d_C osiągają wartości ujemne. Zgodnie z tabelą 2 stwierdza się awarię tranzystora T2. Szybkość identyfikacji uszkodzonych łączników wynosi odpowiednio $t_D = 0,61$, w przypadku awarii T1 oraz $t_D = 0,06$ w przypadku awarii łącznika T2.



Rys. 2. Przebiegi zadanego U_{DCref} oraz zmierzonego U_{DC} napięcia stałego przekształtnika (a, e), prądu i_{gA} oraz napięcia e_{gA} fazy, w której doszło do uszkodzenia tranzystora (b, f), błędów estymacji napięć fazowych przekształtnika Δu_{pf} (c, g) oraz sygnałów diagnostycznych d_f (d, h), w przypadku uszkodzenia tranzystora T1 (a–d) oraz T2 (e–h) podczas pracy prostownikowej przekształtnika AC/DC



Rys. 3. Przebiegi zadanego U_{DCref} oraz zmierzonego U_{DC} napięcia stałego przekształtnika (a, e), prądu i_{gA} oraz napięcia e_{gA} fazy, w której doszło do uszkodzenia tranzystora (b, f), błędów estymacji napięć fazowych przekształtnika Δu_{pf} (c, g) oraz sygnałów diagnostycznych d_f (d, h), w przypadku uszkodzenia tranzystora T1 (a–d) oraz T2 (e–h) podczas pracy generatorowej przekształtnika AC/DC

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które dotyczą awarii tranzystora T1 (rys. 2a–d) oraz T2 fazy A przekształtnika (rys. 2e–f) podczas zwrotu energii do sieci (rys. 3b, f). Od chwili $t = 0,309$ s (rys. 3d), sygnał d_A przyjmuje ujemne wartości, co do modułu większe niż założony próg diagnostyczny $T_{TF} = 30$ V, natomiast sygnały d_B oraz d_C osiągają wartości dodatnie. Uwzględniając zależności sformułowane w tabeli 1 stwierdza się awarię tranzystora T1. W przypadku uszkodzenia łącznika T2, chwili $t = 0,319$ s (rys. 3h) zmienna diagnostyczna d_A przyjmuje dodatnie wartości, przekraczające próg diagnostyczny $T_{TF} = 30$ V, natomiast sygnały d_B oraz d_C osiągają wartości ujemne. Zgodnie z Tabelą 1 stwierdza się uszkodzenie łącznika T2. Szybkość identyfikacji uszkodzonych tranzystorów wyniosła odpowiednio $t_D = 0,47$ w przypadku awarii T1 oraz $t_D = 0,96$ w przypadku łącznika T2.

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono algorytm diagnostyki awarii polegających na braku zdolności przewodzenia prądu przez tranzystory w przekształtniku sieciowym AC/DC ze sterowaniem zorientowanym względem napięcia sieci zasilającej. Przedstawiona metoda polega na obliczeniu średniego błędu estymacji napięć fazowych przekształtnika energoelektronicznego w okresie napięcia sieci zasilającej oraz umożliwia bezbłędną lokalizację uszkodzonych łączników, zarówno podczas pracy prostownikowej jak i generatorowej układu. Zależnie od trybu pracy przekształtnika, tj. prostownikowej lub generatorowej, czas wymagany na przeprowadzenie diagnostyki uszkodzonego tranzystora różni się oraz zależy od przyjętego progu diagnostycznego. Przyjęcie większej wartości progu oznaczającego awarię tranzystorów wiąże się z wydłużeniem czasu identyfikacji nieprawidłowo pracującego łącznika, eliminując jednocześnie ryzyko fałszywych alarmów. Z uwagi na stosunkowo niewielki wpływ analizowanych uszkodzeń na jakość regulacji napięcia stałego w przekształtnikach sieciowych AC/DC, czas diagnostyczny nie jest wielkością krytyczną, która jednoznacznie określa przydatność algorytmu, przeciwnie niż jest to w przypadku falowników napięcia, zasilających maszyny prądu przemiennego. Przyjęty próg diagnostyczny umożliwił identyfikację awaryjnie pracujących tranzystorów w czasie krótszym niż jeden okres napięcia sieciowego.

Niewielka złożoność obliczeniowa proponowanego rozwiązania umożliwia prostą realizację praktyczną systemu identyfikującego awarie tranzystorów, opartą na technice mikroprocesorowej.

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. on Pow. Electron., 2010, Vol. 25, No. 11, 2734–2752.
- [2] ALAVI M., WANG D., LUO M., *Short-Circuit Fault Diagnosis for Three-Phase Inverters Based on Voltage-Space Patterns*, IEEE Trans. on Ind. Electron., 2014, Vol. 61, 5558–5569.
- [3] KWANG-WOON L., MYUNGCHUL Y., JANGHO L., KWANG-WOON L., JI-YOON Y., *Condition Monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in Adjustable-Speed Drives*, IEEE Trans. on App. Electron., 2008, Vol. 44, No. 5, 1606–1613.
- [4] SMET V., FOREST F., HUSELSTEIN J.-J., RICHARDEAU F., KHATIR Z., LEFEBVRE S., BERKANI M., *Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling*, IEEE Trans. on Ind. Electron., 2011, Vol. 58, No. 10, 4931–4941.
- [5] RODRIÉGUEZ-BLANCO M.A., CLAUDIO-SAÉNCHEZ A., THEILLIOL D., VELA-VALDEÉS L.G., SIBAJA-TERAÉN L., HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ L., AGUAYO-ALQUICIRA J., *A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System*, IEEE Trans. on Ind. Electron., 2011, Vol. 58, No. 5, 1625–1633.
- [6] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Analiza i diagnostyka uszkodzeń tranzystorów w przekształtniku sieciowym AC/DC*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 69, Seria Studia i Materiały Nr 33, 2013, 70–81.
- [7] SOBAŃSKI P., *IGBTs Open-Circuit Faults Diagnostic Methods for the Voltage Inverter Fed Induction Motor Drives*, XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, 2015, 1–6.
- [8] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Prosty algorytm lokalizacji uszkodzeń tranzystorów falownika napięcia w napędzie z silnikiem indukcyjnym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 70, Seria Studia i Materiały Nr 34, 2014, 76–85.
- [9] KAMEL T., BILETSKIY Y., LIUCHEN C., BO C., *On-line diagnosis for rectifier open circuit faults and input voltage unbalance based on the output DC voltage*, Energy Convers. Congr. and Expos., 2015, 4753–4758.
- [10] RAHIMINEJAD M., DIDUCH C., STEVENSON M., LIUCHEN C., *Open-circuit fault diagnosis in 3-phase uncontrolled rectifiers*, IEEE Int. Symp. on Pow. Electr. for Distrib. Gen. Sys., 2012, 254–259.
- [11] ROTHENHAGEN K., FUCHS F.W., *Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers*, IEEE 35th Ann. Spec. Conf. on Pow. Electr., 2004, Vol. 6, 4348–4354.
- [12] LIU H-D., HAN J.Y., SHEN N.J., LAN H., *Rectifier Power Thyristor Failure in Real-Time Detection Methods*, Conf. on Pow. and Ener. Eng., 2012, 27–29.
- [13] FOITO D., FERNAO PIRES F.G., MARTINS J.F., *A neuro-fuzzy based system for fault detection and diagnosis of 3-phase PFC rectifier*, Conf. and Exp. in Pow. Electr. and Mot. Contr., 2014, 21–24.
- [14] KNAPCZYK M., *Nonlinear control strategies of AC/DC line-side converters using sliding-mode approach*, Ph.D. Thesis, Wrocław 2004.

TRANSISTOR FAULTS DIAGNOSTIC ALGORITHM FOR AC/DC LINE-SIDE CONVERTER

In this paper, transistor faults diagnostic algorithm dedicated to AC/DC line side converter with grid voltage oriented control is presented. The proposed method is based on average values calculation of the power converter phase voltages and it provides fast and correct switch open-circuit faults identification in the case of an rectifier as well as an inverter mode of the power converter. In order to prove the method effectiveness, comprehensive simulation research has been conducted and chosen results are presented in this paper.