

*falowniki napięcia, uszkodzenia tranzystorów IGBT,
układy odporne, redundantne układy mocy*

Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA*, Piotr SOBAŃSKI*

PRZEGLĄD DWUPOZIOMOWYCH FALOWNIKÓW NAPIĘCIA ODPORNYCH NA USZKODZENIA TRANZYSTORÓW IGBT

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia sterowania odpornego na uszkodzenia napędu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym. Omówiono podział metod sterowania odpornego na uszkodzenia napędów elektrycznych ze względu na charakter zastosowanego rozwiązania oraz klasyfikację układów falownikowych odpornych na uszkodzenia łączników IGBT. Przedstawiono najczęściej stosowane układy mocy dwupoziomowych falowników napięcia odpornych na podstawowe uszkodzenia elementów energoelektrycznych.

1. WPROWADZENIE

Realizacja wielu zautomatyzowanych procesów przemysłowych wymaga zastosowania napędów elektrycznych charakteryzujących się wysoką jakością oraz niezawodnością pracy. Współczesny przekształtnikowy układ napędowy (PUN), składający się z silnika indukcyjnego (lub synchronicznego), układów zasilania i energoelektroniki (przekształtnik częstotliwości z modulacją PWM), układów pomiarowych oraz cyfrowego układu sterowania, jest narażony na wystąpienie wielu rodzajów awarii. Dotyczą one uszkodzeń silnika (elektrycznych i mechanicznych), przekształtnika oraz czujników pomiarowych [8], [17]. Układy sterowania nowoczesnymi napędami powinny zapewnić możliwie niezawodne oraz bezpieczne działanie w sytuacjach zaistnienia powyższych awarii. Uszkodzenia czujników pomiarowych w złożonym układzie napędowym mogą przyczynić się do znacznego obniżenia jakości regulacji zmiennych stanu w napędzie. Przywrócenie funkcjonalności układu napędowego najczęściej odbywa się dzięki zmianie algorytmu sterowania. W przypadku awarii elementów energoelektroniki zachodzi konieczność reorganizacji wewnętrznej struktury

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław-mail: piotr.sobanski@pwr.wroc.pl, teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl

układu zasilania i układu sterowania. Systemy, w których jest możliwa zmiana topologii układu sterowania i reorganizacja struktury falownika, w literaturze są nazywane układami bezpiecznymi lub odpornymi na uszkodzenia (ang. *fault tolerant driver; FTC*) [8]. Zadaniem układu odpornego na uszkodzenia, w zależności od rodzaju zaistniałej awarii oraz wymaganego stopnia bezpieczeństwa, jest zapewnienie dalszej stabilnej pracy napędu (przy zachowaniu jego pełnej bądź częściowej funkcjonalności) lub bezpieczne jego zatrzymanie.

Ponad 80% awarii występujących w PUN jest spowodowanych nieprawidłowościami pracy łączników tranzystorowych IGBT, które polegają na zwarcjach bądź braku przewodzenia prądu (ang. *short/open-switch fault*) [1]. Najczęstszą przyczyną tego rodzaju uszkodzenia jest nadmierna eksploatacja napędu, która naraża przekształtnik na przeciążenia. Trwałe zwarcie jednego z łączników przekształtnika najczęściej prowadzi do niezwłocznego uszkodzenia modułu mocy przemiennika i zatrzymania napędu. Brak zdolności przewodzenia prądu tranzystora falownika prowadzi do wystąpienia niebezpiecznych udarów prądu oraz momentu elektromagnetycznego silnika. W przeciwieństwie do zwarć, w przypadku uszkodzeń polegających na braku przewodzenia prądu przez tranzystor jest możliwe odpowiednio szybkie wykrycie awarii, tak aby jej kompensacja została przeprowadzona jeszcze przed rozwojem uszkodzeń na inne elementy napędu [13], [17]. Uszkodzenia przemiennika częstotliwości nie powinny prowadzić do natychmiastowego zatrzymania napędu, jak ma to obecnie najczęściej miejsce. Nieplanowane przestoje technologiczne mogą się przyczynić do znacznych strat finansowych, dlatego też od wielu lat są opracowywane oraz wdrażane różne koncepcje systemów monitorujących stan techniczny napędu. Umożliwiają one szybką oraz automatyczną lokalizację uszkodzeń i podjęcie odpowiednich działań prowadzących do poprawy funkcjonalności napędu. Możliwe jest zastosowanie odpowiedniej redundancji w strukturze modułu energoelektronicznego, niemniej jednak wiąże się to ze znacznym wzrostem kosztów produkcji przemiennika [7], [15]. Innym rozwiązaniem jest rekonfiguracja układu mocy przekształtnika i zmiana algorytmu modulacji, bądź zastosowanie odpowiednich metod sterowania napędem, które pozwalają w pewnym stopniu na zachowanie jego funkcjonalności i umożliwią kontrolowane zatrzymanie procesu produkcyjnego w celu usunięcia awarii napędu [8].

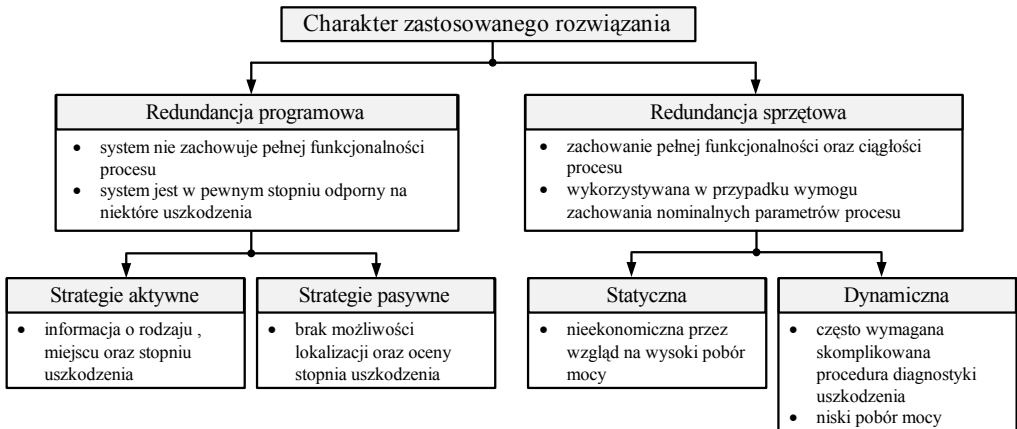
W niniejszej pracy dokonano przeglądu energoelektronicznych układów falownikowych, dedykowanych do pracy w układach napędowych, w których wymagana jest poprawna regulacja prędkości maszyny również po wystąpieniu awarii polegających na zwarcjach bądź braku przewodzenia prądu tranzystorów przemiennika częstotliwości. Przedstawiono topologie, wyjaśniono zasadę działania oraz wyszczególniono główne cechy falowników zapewniających utrzymanie pełnej bądź częściowej funkcjonalności napędów elektrycznych w stanach awaryjnych, dzięki zastosowaniu dodatkowych łączników.

2. ELEKTRYCZNE UKŁADY NAPĘDOWE ODPORNE NA USZKODZENIA

W ujęciu współczesnym, pojęcie metod sterowania odpornego na uszkodzenia jest zagadnieniem kompleksowym, które obejmuje strategie regulacji zapewniające stabilną pracę napędu po wystąpieniu uszkodzenia, przy zachowaniu jego pełnej bądź częściowej funkcjonalności. W zależności od charakteru systemu, celem takiego postępowania może być:

- minimalizacja kosztów, przy zachowaniu ciągłości pracy napędu, ograniczeniu niekorzystnych skutków uszkodzenia oraz automatyczna diagnoza;
- zapewnienie wysokiego stopnia bezpieczeństwa pracy, czyli utrzymanie stabilności systemu nawet w warunkach uszkodzenia;
- autonomizacja oraz pewność pracy, czyli gwarancja wykonania zadania przez system co prowadzi do nadania napędowi elektrycznemu nowego standardu jakości.

Istnieje wiele możliwości klasyfikacji elektrycznych układów napędowych odpornych na uszkodzenia. Jednym z nich jest sposób detekcji uszkodzenia. Biorąc pod uwagę wyżej sformułowane wymagania stawiane napędowi odpornym na uszkodzenia, klasyfikacja ze względu na charakter zastosowanego rozwiązania, pokazana na rysunku 1, zawiera najwięcej istotnych informacji [8], [17], [15], [10]. Uwzględnia ona nie tylko główne cechy zachowanej funkcjonalności układu napędowego po przeprowadzeniu kompensacji skutków uszkodzenia, ale również wskazuje na sposoby, za pomocą których można je osiągnąć.



Rys. 1. Podział metod sterowania odpornego na uszkodzenia napędów elektrycznych ze względu na charakter zastosowanego rozwiązania

Wybór metody sterowania odpornego na uszkodzenia zależy od charakteru uszkodzenia oraz stawianych wymagań co do funkcjonalności napędu po wystąpieniu awarii.

rii. W przypadku metod redundancji programowej rozróżnia się strategie pasywne i aktywne. Niewielkie koszty, wynikające jedynie z implementacji dodatkowego programu w tzw. strategii pasywnej sprawiają, że opisywana metoda jest często wykorzystywana w systemach, w których priorytetem są wymagania ekonomiczne. Bardziej zaawansowane rozwiązania programowe umożliwiają określenie rodzaju, stopnia i miejsca uszkodzenia. Dlatego w większości przypadków, ze względu na korzyści płynące z wiedzy o lokalizacji uszkodzenia, stosuje się strategie aktywne sterowania odpornego. Tym niemniej, po zastosowaniu metod redundancji programowej, napęd zazwyczaj nie zachowuje funkcjonalności poprzedzającej moment awarii.

W przypadku uszkodzeń przekształtników energoelektronicznych, poprawna regulacja prędkości w PUN może być uzyskana dzięki zastosowaniu redundancji sprzętowej, której zakres jest wynikiem przyjętego kompromisu pomiędzy kosztem rozwiązania, a wymaganą funkcjonalnością napędu po zdiagnozowaniu awarii. W zależności od przyjętej koncepcji, dodatkowe urządzenia półprzewodnikowe, tj. najczęściej triaki, są stosowane w celu rekonfiguracji przekształtnika energoelektronicznego do układu, w którym są wykorzystywane jedynie poprawnie działające tranzystory. W tym przypadku, niezbędne jest dokonanie zmian w algorytmie sterowania. Pełna redundancja sprzętowa, obejmująca automatyczne włączenie nadmiarowych tranzystorów za pomocą dwukierunkowych łączników do podstawowego obwodu przekształtnika, stanowi rozwiązanie stosowane w układach, w których jest wymagane zachowanie funkcjonalności napędu przed uszkodzeniem.

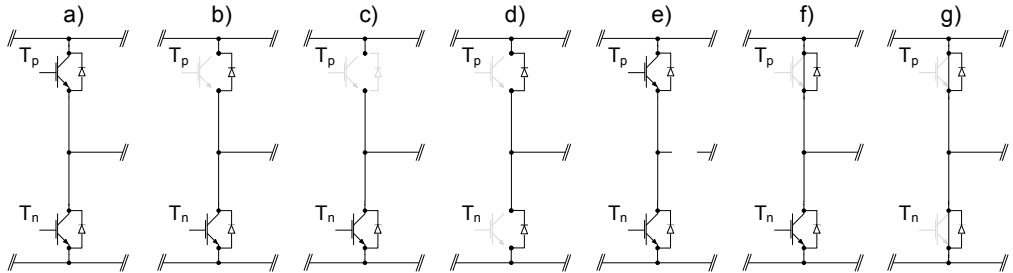
3. RODZAJE USZKODZEŃ ŁĄCZNIKÓW W FALOWNIKACH NAPIĘCIA

Awarie półprzewodnikowych łączników układów falownikowych, stosowanych w napędach indukcyjnych o regulowanej prędkości kątowej, stanowią istotny problem ze względu na nagły oraz postępowy charakter. Uszkodzenie jednego z tranzystorów falownika napięcia, w krótkim czasie może przyczynić się do nieprawidłowości pracy innych łączników, prowadząc tym samym do znacznego obniżenia jakości pracy napędu elektrycznego bądź uniemożliwienia jej dalszego kontynuowania [17]. Symptomy uszkodzeń w przypadku zamkniętych układów sterowania zwykle przyjmują niejednoznaczny charakter, co w dużym stopniu utrudnia proces poprawnej identyfikacji cech sygnałów diagnostycznych świadczących o wystąpieniu analizowanego typu awarii. Z uwagi na to, projektowanie systemów monitorujących stan napędów elektrycznych o zaawansowanej strukturze regulacji często poprzedzone jest badaniami w otwartych układach sterowania, co pozwala na wyselekcjonowanie użytecznych sygnałów diagnostycznych oraz wstępny dobór właściwych metod ekstrakcji symptomów awarii.

Najwięcej uszkodzeń występujących w nowoczesnych układach napędowych spowodowanych jest nieprawidłowościami pracy łączników tranzystorowych IGBT, które

polegają na zwarcjach bądź braku przewodzenia prądu (ang. *short/open-switch fault*) [4], [14]. W przypadku awarii łączników półprzewodnikowych, często dokonywany jest podział na uszkodzenia fizyczne urządzeń (np. IGBT) oraz błędy spowodowane nieprawidłową pracą obwodów sterujących bramkami tranzystorów. Jednak w większości przypadków oba rodzaje zdarzeń klasyfikowane są do jednej grupy uszkodzeń, której udział w ogólnej liczbie awarii jest znacznie większy niż połowa. Na rysunku 2 pokazano najczęściej rozpatrywane w literaturze typy uszkodzeń przekształtników energoelektronicznych [14], [20].

Należy zwrócić szczególną uwagę na różnicę pomiędzy nieprawidłowością pracy tranzystora przejawiającą się brakiem zdolności przewodzenia prądu, a „przerwą” spowodowaną awarią całego modułu tranzystorowego (tranzystor + dioda zwrotna). W przypadku pierwszego rodzaju uszkodzenia, dioda zwrotna zachowuje pełną funkcjonalność, a błąd działania łącznika, może być spowodowany awarią bramki, bądź urządzenia sterującego.



Rys. 2. Schematy poglądowe obwodu jednej fazy falownika podczas jego prawidłowej pracy (a) oraz w warunkach: uszkodzenia uniemożliwiającego przepływ prądu na drodze kolektor-emiter jednego tranzystora (b), przerwy obwodu wynikającej z awarii jednego modułu tranzystorowego (c), uszkodzenia uniemożliwiającego przepływ prądu na drodze kolektor-emiter dwóch tranzystorów (d), przerwy jednej fazy (e), zwarcia jednego tranzystora (f), zwarcia dwóch tranzystorów (g)

Nadmierna eksploatacja napędów, narażająca przekształtnik na przeciążenia, jest częstą przyczyną uszkodzeń urządzeń energoelektronicznych. Awarie te prowadzą do obniżenia jakości wykonywanego procesu oraz mogą mieć postępowy charakter. Z tego powodu szczególnie ważnym zadaniem jest realizacja monitoringu, zapewniającego jak najszybszą lokalizację uszkodzenia, co pozwala na przeprowadzenie czynności służących kompensacji niekorzystnych jego skutków. Elektromagnetyczna stała czasowa napędu jest niewielka w stosunku do stałej mechanicznej, dlatego też najczęściej stosowanymi sygnałami diagnostycznymi są prądy fazowe silnika, w których symptomy uszkodzenia są najwcześniej widoczne. Obecnie, za użyteczną przyjmuje się taką metodę diagnostyki uszkodzeń, przy której czas potrzebny na realizację procesu lokalizacji awarii nie przekracza wartości dwóch okresów przebiegu prądu.

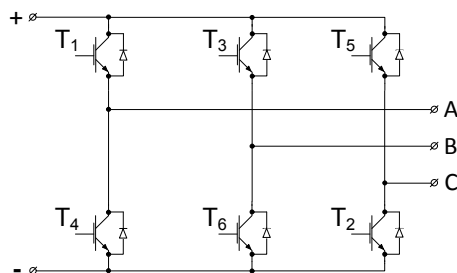
4. UKŁADY FALOWNIKÓW NAPIĘCIA ODPORNE NA USZKODZENIA ŁĄCZNIKÓW TRANZYSTOROWYCH

W przypadku uszkodzeń łączników półprzewodnikowych w przekształtnikach energoelektronicznych, w zasadzie zawsze wykorzystywana jest redundancja. Wynika to najczęściej z konieczności fizycznego odizolowania nieprawidłowo pracującego elementu, co możliwe jest jedynie poprzez zastosowanie dodatkowych obwodów oraz łączników półprzewodnikowych. Układy falownikowe odporne na uszkodzenia łączników półprzewodnikowych, opisane dotychczas w literaturze, można podzielić na kilka grup, które zostały przedstawione na rys. 3 [20].



Rys. 3. Klasyfikacja układów falownikowych odpornych na uszkodzenia łączników

Autorzy publikacji [20] opracowali proste kryterium oceny takich rozwiązań falowników napięcia, biorące pod uwagę moc wyjściową jaka może być uzyskana z uszkodzonego przekształtnika oraz koszty wynikające z zastosowania konkretnej topologii. Sformułowane do tego celu wskaźniki mają charakter znormalizowany i odnoszą się do przedstawionego na rysunku 4 dwupoziomowego falownika napięcia.

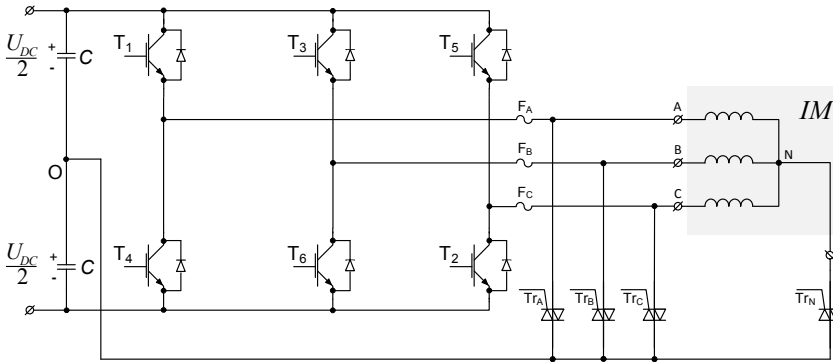


Rys. 4. Schemat obwodowy dwupoziomowego falownika napięcia

Na rysunku 5 pokazano opisany w pracy [7] układ falownikowy, którego koncepcja zakłada jedynie odizolowanie fazy, w której nastąpiło uszkodzenie. Konfiguracja

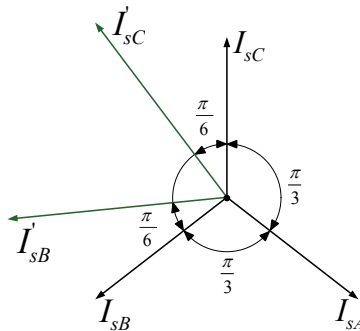
przekształtnika zapewnia odporność na zwarcie (rys. 2f) bądź uszkodzenie typu „przerwa” jednego łącznika (rys. 2b) lub „przerwę” obwodu całej fazy (rys. 2e).

Podczas pracy w pełni sprawnego falownika (ang. *pre-fault configuration*), każdy z triaków (T_{rA} , T_{rB} , T_{rC} , T_{rN}) jest wyłączony (ang. *off-mode*). Zasada działania przekształtnika opiera się na utworzeniu połączenia między punktem neutralnym silnika (N), a neutralnym punktem filtra wejściowego falownika (0).



Rys. 5. Przykładowa konfiguracja falownika zapewniającego odizolowanie uszkodzonej fazy

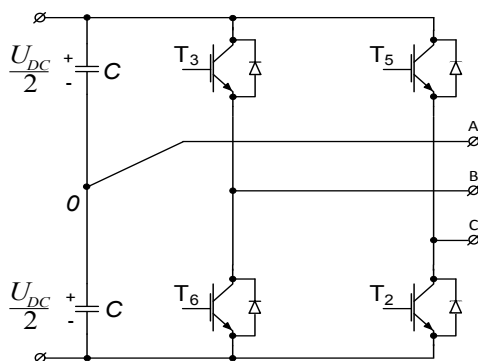
W przypadku wystąpienia uszkodzenia typu „przerwa” następuje załączenie jedynie T_{rN} . Ponadto, ażeby utrzymać stałą wartość strumienia wirnika, wymagane jest $\sqrt{3}$ krotne zwiększenie amplitudy prądów nieuszkodzonych faz oraz przesunięcie ich w fazie o kąt $\pi/6$ [20], jak pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Gwiazda prądów fazowych stojana przed rekonfiguracją obwodu falownika wymuszoną uszkodzeniem typu „przerwa” w fazie A oraz po rekonfiguracji obwodu oraz poprawnymysterowaniu przekształtnika

W przypadku zwarcia jednego z łączników falownika następuje odizolowanie uszkodzonej fazy falownika za pomocą bezpiecznika (F_A , F_B , F_C) oraz niezbędne jest

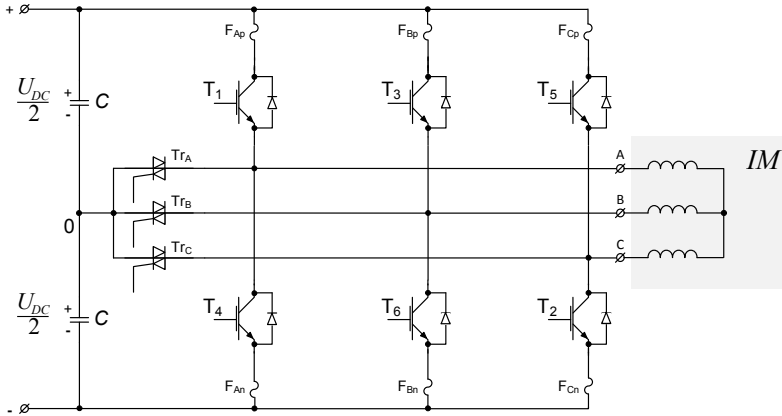
niezwłoczne rozwarczenie nieuszkodzonego tranzystora (ang. *off-mode*) fazy, w której nastąpiła awaria, tak aby uniemożliwić przepływ prądu zwarciovego przez kondensatory filtra wejściowego, chroniąc tym samym przekształtnik przed dalszymi uszkodzeniami. Następnie jest realizowane załączenie odpowiedniego triaka, zależnie od lokalizacji awarii (T_{TA} w przypadku uszkodzenia fazy A). Otrzymana w ten sposób konfiguracja obwodowa przekształtnika (ang. *post-fault configuration*) jest równoważna układowi trójfazowego falownika, którego schemat został przedstawiony na rysunku 7 oraz może być również zastosowana w przypadku awarii polegających na braku przewodzenia prądu przez tranzystory w jednej fazie falownika.



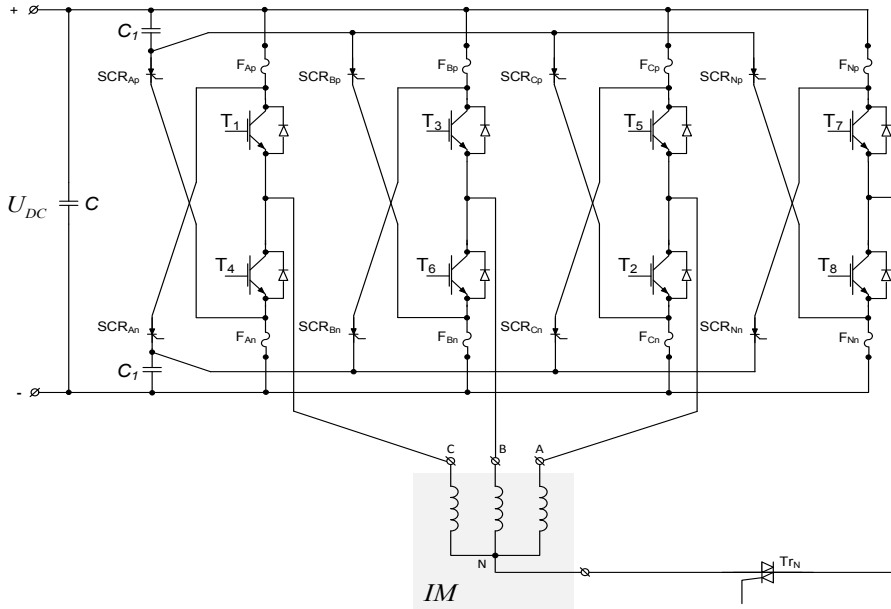
Rys. 7. Ideowy schemat obwodowy falownika odpornego na uszkodzenia po odizolowaniu uszkodzonej gałęzi fazy A przekształtnika (ang. *post-fault configuration*)

Po rekonfiguracji falownika napięcia, która polega na zwarceniu punktu neutralnego (N) silnika z punktem neutralnym falownika (0), możliwa jest praca napędu ze znamionowym momentem obciążenia przy prędkości ograniczonej do około 75% znamionowej wartości, natomiast w przypadku, gdy jest odseparowana uszkodzona faza przekształtnika energoelektronicznego oraz zwarta odpowiednia faza silnika do punktu środkowego filtra wejściowego falownika możliwa jest praca PUN z znamionowym obciążeniem z prędkością mniejszą niż połowa wartości znamionowej. Wynika to z ograniczenia maksymalnej wartości napięcia wyjściowego falownika w układzie po przeprowadzonej rekonfiguracji. Niewątpliwą wadą przedstawionej topologii jest wymagany dostęp do zacisków punktu neutralnego filtra wejściowego przekształtnika oraz punktu neutralnego silnika, co w dużym stopniu ogranicza możliwość opisaną topologią przekształtnika. Alternatywą do wyżej opisaną konfiguracji falownika może być układ o podobnej topologii przedstawionej na rysunku 8, w którym jest wykorzystywany punkt neutralny silnika [5]–[7], [12], [20]. Maksymalna, skuteczna wartość napięcia wyjściowego przekształtnika jest ograniczona do połowy. W związku z tym, również możliwa do uzyskania na stałym poziomie wartość prędkości silnika stanowi około połowę wartości znamionowej.

Konfiguracja falownika zapewniająca odporność na wszystkie wcześniej opisane rodzaje uszkodzeń (rys. 2) została pokazana na rysunku 9. Jest ona przykładem przekształtnika należącego do grupy określanej jako *double-switch redundant topology* [2].

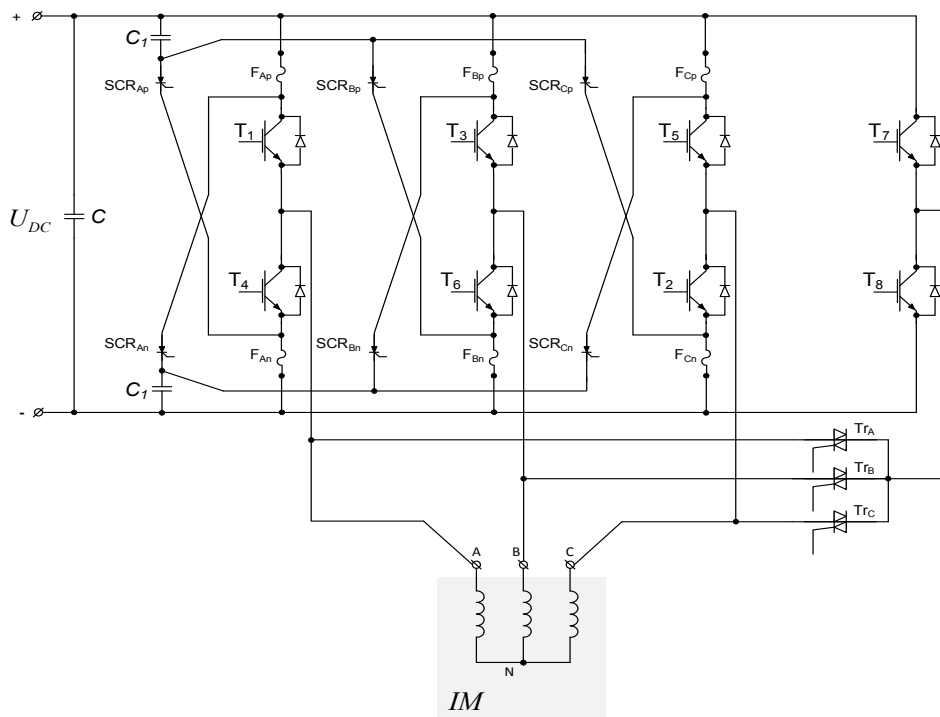


Rys. 8. Przykładowa konfiguracja falownika odpornego na uszkodzenia nie wymagająca dostępu do punktu neutralnego silnika (ang. *switch-redundant topology*)



Rys. 9. Konfiguracja falownika umożliwiającą kompensację uszkodzenia dwóch łączników w różnych fazach przekształtnika (ang. *double-switch redundant topology*)

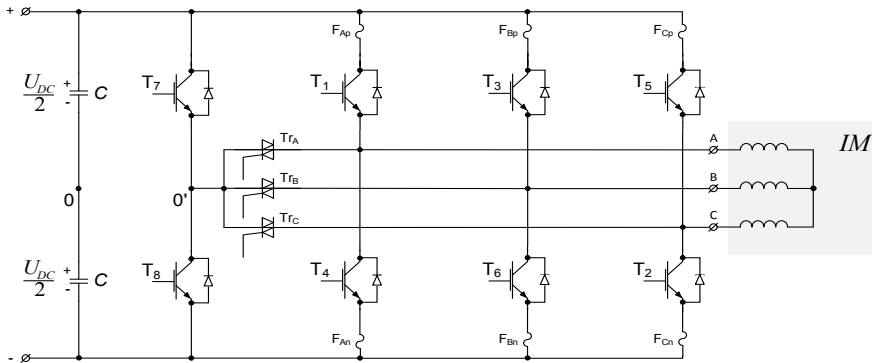
Podczas pracy w pełni sprawnego falownika każdy z tyrystorów ($SCR_{a,b,c}$) oraz triak (Tr_N) jest wyłączony (rozwartry). Po nastąpieniu awarii w jednej z faz (np. A), włączane są tyrystory powiązane z uszkodzoną fazą (SCR_{ap} oraz SCR_{an}), w wyniku czego dochodzi do zwarcia przez kondensatory C_1 . Po zadziałaniu odpowiednich bezpieczników (F_{ap} oraz F_{an}) uszkodzony obwód zostaje odizolowany. Następnie załączane są tyrystory gałęzi zapasowej (SCR_N) oraz triak (Tr_N). Tranzystory T_7 oraz T_8 są wykorzystywane do modulacji napięcia zasilającego maszynę. W przeciwieństwie do wcześniej zaprezentowanej konfiguracji falownika z rys. 5, ta nie wymaga dostępu do punktu neutralnego filtra wejściowego falownika, co pozwala na uniknięcie problemów związanych z nierównowagą napięć w tym obwodzie, które powodują znaczne pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika. Poza tym należy zauważyć, że po wystąpieniu uszkodzenia w gałęzi neutralnej przekształtnika zapewnione jest jej odizolowanie oraz dalsza praca napędu w konfiguracji równoważnej do standardowego układu falownika wcześniej przedstawionego na rys. 4, która jednak nie wykazuje odporności na dalsze uszkodzenia. Mimo wielu zalet opisanego układu, ze względu na dużą liczbę dodatkowych urządzeń półprzewodnikowych możliwość jego implementacji przemysłowej, z uwagi na wysokie koszty, jest raczej silnie ograniczona.



Rys. 10. Konfiguracja falownika umożliwiająca kompensację uszkodzenia dwóch łączników w różnych fazach przekształtnika (ang. *phase-redundant topology*)

Do kolejnej grupy przekształtników odpornych na uszkodzenia należy układ z redundantną fazą (ang. *phase-redundant topology*) [20], którego przykład został pokazany na rysunku 10.

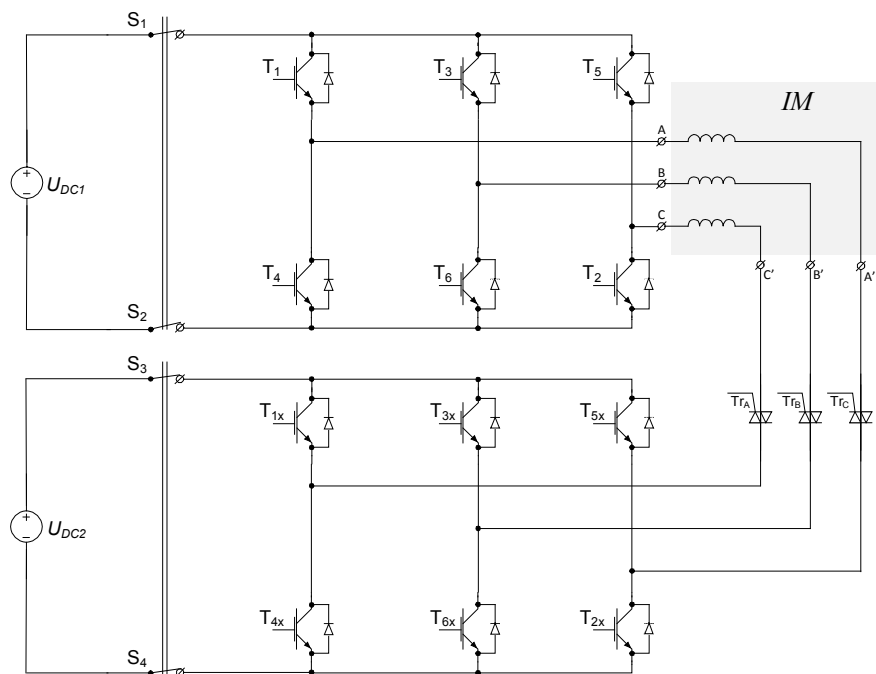
Budowa przekształtnika zapewnia odporność na wszystkie omawiane rodzaje uszkodzeń (rys. 2), przy zachowaniu znamionowej mocy wyjściowej, co niewątpliwie stanowi jej dużą zaletę oraz umożliwia szerszą implementację przemysłową. Zasada działania polega na odizolowaniu uszkodzonej gałęzi falownika w sposób analogiczny do omawianego w poprzednim przykładzie przekształtnika (rys. 9), po czym dzięki załączeniu triaka (T_{rA} , T_{rB} , T_{rC}), zależnego od lokalizacji awarii, następuje włączenie do obwodu nieaktywnej dotychczas redundantnej gałęzi falownika oraz odpowiednie wysterowanie tranzystorów T_7 , T_8 . Do tej samej grupy falowników można również zaliczyć układ pokazany na rysunku 11. W tym przypadku, brak dodatkowych tyrystorów oraz kondensatorów sprawia, że nie ma możliwości wymuszenia zadziałania bezpieczników w poszczególnych fazach falownika.



Rys. 11. Przykładowa konfiguracja falownika z redundantną fazą (ang. *phase-redundant topology*)

Na rysunku 12 pokazano układ falownika napięcia [3], [18]–[20], który umożliwia prawidłową regulację prędkości oraz niski poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego silnika podczas uszkodzeń polegających na zwarciu bądź braku przewodzenia prądu jednego z tranzystorów, przerwę w jednej z faz, zwarcie fazowe lub uszkodzenie jednego ze źródeł napięcia stałego zasilającego falownik [18]. Przekształtnik energoelektroniczny składa się z dwóch trójfazowych mostków tranzystorowych, których wyjścia są podłączone do początków uzwojeń poszczególnych faz silnika. Podniesienie niezawodności układu oraz rozszerzenie jego możliwości generacji napięcia wyjściowego o różnych poziomach wartości jest możliwe poprzez zastosowanie odseparowanych dwóch źródeł napięcia stałego U_{DC1} , U_{DC2} . W przypadku, gdy $U_{DC2} = 0$ V, możliwe do uzyskania wektory napięć wyjściowych falownika są identyczne jak w przypadku klasycznego dwupoziomowego, trójfazowego falownika napięcia, ponieważ jedne z końców trzech uzwojeń silnika są zwarte. Gdy $U_{DC2} = 0,2 U_{DC1}$, ist-

nieje możliwość generacji wektorów napięć, które są skupione w siedem symetrycznie rozlokowanych na płaszczyźnie zespolonej grup. Jeżeli $U_{DC2} = 0,5 U_{DC1}$, omawiany przekształtnik może emulować pracę falownika cztero-poziomowego, natomiast w przypadku gdy wartości napięć stałych dwóch źródeł zasilających falownik są sobie równe, topologia falownika umożliwi generację trzech poziomów napięć. Jedną z istotnych zalet układu jest stała wartość napięć wejściowych falownika, co w znacznym stopniu upraszcza algorytm sterowania. Poza tym, możliwe jest bezpośrednie wymuszenie napięć fazowych silnika, dzięki koncepcji dwustronnego zasilania uzwojenia. Zastosowanie tranzystorów o odpowiednich parametrach napięciowych oraz silnika o uzwojeniu umożliwiającym bezawaryjną pracę przy podwyższonym napięciu zasilającym, pozwala na regulację prędkości napędu w znacznie szerszym zakresie niż w przypadku standardowego układu dwupoziomowego falownika napięcia.



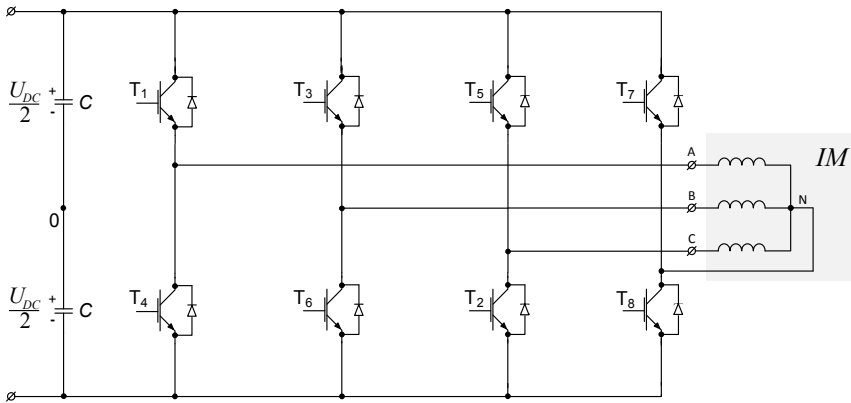
Rys. 12. Falownik kaskadowy zasilany z dwóch odseparowanych źródeł napięcia stałego
(ang. *cascaded inverter topology*)

W razie zwarcia jednego z tranzystorów, np. T_{1x} , górne tranzystory (T_{3x} oraz T_{5x}) są zwierane na stałe do bieguna dodatniego źródła napięcia stałego U_{DC2} . W ten sposób uzyskuje się układ równoważny standardowemu dwupoziomowemu falownikowi napięcia. W przypadku wykorzystania jednego źródła napięcia do zasilania falownika, w trakcie zwarcia tranzystora, w zależności od miejsca uszkodzenia (mostek zasilający

początki, bądź końce uzwojeń silnika), dodatkowo są parami rozwierane dwukierunkowe łączniki (np. styczniki, bądź triaki) S_1 i S_2 lub S_3 oraz S_4 .

W przypadku uszkodzeń polegających na przerwie w jednej z faz falownika bądź braku przewodzenia prądu przez tranzystor falownika zasilanego z dwóch źródeł napięcia stałego, możliwe jest sterowanie przy zasilaniu jedynie dwóch faz silnika. Do tego celu, konieczne jest zastosowanie dodatkowych urządzeń półprzewodnikowych (TrA, TrB, TrC) w celu odseparowania uszkodzonej fazy.

Opisana topologia falownika stanowi ciekawą alternatywę do wcześniej zaprezentowanych układów, niemniej jednak koszt związany z zastosowaną szeroką redundancją sprzętową znacznie ogranicza zakres potencjalnych aplikacji.



Rys. 13. Przykładowa konfiguracja falownika czterogłęziowego (ang. *four-leg inverter topology*)

Na rysunku 13 pokazano układ falownika, o budowie zapewniającej odporność na uszkodzenia jednego, dwóch bądź trzech łączników jednej z grup tranzystorów przekształtnika (anodowej lub katodowej), polegające na nieprzewodzeniu prądu na skutek błędów urządzeń sterujących (ang. *drivers*) bądź awarii bramek tranzystorów. Zachowanie wysokiej jakości pracy napędu po wystąpieniu uszkodzenia jest możliwe dzięki zmianie algorytmu sterowania. Strategia sterowania opiera się na histerezowej regulacji składowych symetrycznych prądu stojana. Po wystąpieniu awarii jednego z tranzystorów falownika, w uszkodzonej fazie może płynąć jedynie jednokierunkowy prąd. Idea regulacji polega na sformułowaniu modelu silnika w taki sposób, aby uniezależnić wartości napięć fazowych silnika od wartości napięcia u_{N0} , pomiędzy punktem neutralnym maszyny oraz filtra wejściowego falownika. W tym celu do równań napięciowych silnika zostały dodane odpowiednie sygnały kompensujące. Przekształcając równania napięciowe uzyskuje się wartości zadane prądów silnika. Dzięki odpowiedniemu sterowaniu tranzystorami T7 oraz T8, metoda znacznie się upraszcza, ponieważ średnia wartość napięcia u_{N0} jest regulowana na poziomie zero, a więc uprzednio zmodyfikowane równania napięciowe silnika, stają się niezależne od napięcia u_{N0} .

Autorzy zaproponowali dwie struktury regulacji oparte na wykorzystaniu regulatorów histerezowych oraz liniowych regulatorów PI [16].

Przedstawiony układ falownika nie zachowuje znamionowej mocy wyjściowej w trakcie pracy po wystąpieniu uszkodzenia. Do jego niewątpliwych zalet należy niski koszt zastosowanej redundancji sprzętowej, niemniej jednak fakt odporności jedynie na uszkodzenia typu *open-switch fault* sprawia, że zakres implementacji praktycznej omawianego układu przekształtnikowego ulega znacznemu ograniczeniu.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano jedynie kilka najprostszych, przykładów falowników odpornych na uszkodzenia łączników półprzewodnikowych, których koncepcja jest oparta na rozbudowie podstawowego układu przedstawionego na rysunku 4. W zależności od analizowanego rodzaju awarii oraz przyjętej koncepcji odizolowania uszkodzonego obwodu, konieczne jest zastosowanie różnej liczby dodatkowych elementów w postaci kondensatorów, triaków, tyrystorów i bezpieczników, które przyczyniają się do obniżenia sprawności przekształtników oraz podniesienia ich kosztów produkcji. Zakres zastosowania niektórych z zaprezentowanych topologii przekształtników jest w dużej mierze ograniczony przez wymagania związane z dostępem do punktu neutralnego silnika bądź falownika.

Wybór odpowiedniej topologii przekształtnika jest uzależniony od wymagań konkretnej aplikacji. W przypadku napędów elektrycznych, w stosunku do których jest oczekiwane zachowanie znamionowych parametrów pracy po wystąpieniu uszkodzenia, najbardziej odpowiednią strukturą przekształtnikową jest układ z redundantną fazą (rys. 10). W pozostałych typach aplikacji, w których dopuszcza się możliwość obniżenia w pewnym stopniu parametrów pracy, decyzja związana z zastosowaniem danego typu falownika jest zawsze oparta na kompromisie pomiędzy kosztem zakupu, a wymaganą funkcjonalnością. Na podstawie przeglądu literatury można jednak stwierdzić, że w przypadku najnowszych technik sterowania odpornego na uszkodzenia przekształtników obserwowany jest przede wszystkim rozwój strategii zakładających minimalizację zakresu zastosowania redundancji sprzętowej na korzyść programowej, co prowadzi nie tylko do obniżenia kosztów budowy, ale również podniesienia niezawodności układu. W szczególności rozwijane są nowe metody, których działanie opiera się na zmianie algorytmu modulacji SVPWM (ang. *Space Vector Modulation*) po nastąpieniu awarii [1], [9]–[11]. Do ich głównych zalet należy przede wszystkim zapewnienie stałej częstotliwości łączy, a przez to wyższej sprawności układu. Poza tym niektóre z nich posiadają zdolność kompensacji wpływu niestabilizowanego źródła napięcia stałego członu pośredniczącego przekształtnika. Przykładem takiej metody jest opisana w artykule [9] technika sterowania trójfazowym falownikiem napięcia o topologii wykorzystującej cztery tranzystory IGBT. Rozwiązanie to różni

się od najczęściej stosowanych w tym przypadku algorytmów SVPWM opartych na informacji o położeniu wektora napięcia stojana na płaszczyźnie zespolonej podzielonej na cztery sektory, np. [1]. Przedstawiona metoda zakłada podział płaszczyzny α - β na sześć sektorów, podobnie jak przy regulacji klasycznych trójfazowych falowników mostkowych (rys. 4), przy czym sposób obliczania czasów załączeń odpowiednich wektorów aktywnych (ang. *active vectors*) zapewnia kompensację wahań (ang. *ripples*) wejściowego napięcia stałego falownika. Pozwala to na zachowanie stałej amplitudy wektora strumienia stojana, uzyskanie prądów fazowych napędu o mniejszym zniekształceniu, co w konsekwencji ma swoje odzwierciedlenie w gładkim przebiegu momentu elektromagnetycznego maszyny, gwarantując tym samym wysoką jakość realizowanego procesu.

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

LITERATURA

- [1] ALAVIJE H.S., AKHBARI M., *Investigation of Induction Motor Drive Behavior in Low-cost Fault Tolerant Control for Electric Vehicles*, IEEE 5th Int. Power Engineering and Optimization Conf., PEOCO, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2011, 176–181.
- [2] BOLOGNANI S., ZORDAN M., ZIGLIOTTO M., *Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, Vol. 47, No. 5, 1134–1141.
- [3] CORZINE K.A., SUDHOFF S.D. WHITCOMB C.A., *Performance characteristics of a cascaded two-level converter*, IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, Vol. 14, No. 3, 433–439.
- [4] CUI B., *Simulation of Inverter with Switch Open Faults Based on Switching Function*, Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics, Jinan, China, 2007, 2774–2778.
- [5] DE ARAUJO RIBEIRO R.L., JACOBINA C.B., DA SILVA E.R.C., LIMA A.M.N., *Fault-Tolerant Voltage-Fed PWM Inverter AC Motor Drive Systems*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2004, Vol. 51, No. 2, 439–446.
- [6] EL BADASI B., BOUZIDI B., MASMOUDI A., *DTC Scheme for a Four-Switch Inverter-Fed Induction Motor Emulating the Six-Switch Inverter Operation*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2013, Vol. 28, No. 7, 3528–3538.
- [7] FU JR., LIPO T.A., *A Strategy to Isolate the Switching Device Fault of a Current Regulated Motor Drive*, Proc. of IEEE Industry Appl. Soc. Ann. Meet., Toronto, Canada, 1993, Vol. 2, 1015–1020.
- [8] ISERMANN R., *Fault-Diagnosis Applications, Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2011.
- [9] JANG D.H., YOON D.Y., *Space-Vector PWM Technique for Two-Phase Inverter-Fed Two-Phase Induction Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, Vol. 39, No. 2, 542–549.
- [10] KIM M.H., LEE S., LEE K.C.H., *Kalman Predictive Redundancy System for Fault Tolerance of Safety-Critical Systems*, IEEE Trans. Industrial Informatics, 2010, Vol. 6, No. 1, 46–53.
- [11] LEE H.H., DZUNG P.Q., PHUONG L.M., KHOA L.D., THANH H.T., *New Space Vector Control Approach for Four Switch Three Phase Inverter under DC – Link Voltage Ripple*, Proc. IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technologies, ICSET, Singapore, 2008, 1059–1064.
- [12] NACUSSE M.A., ROMERO M., HAIMOVICH H., SERON M.M., *DTFC versus MPC for induction motor control reconfiguration after inverter faults*, Conf. on Control and Fault-Tolerant Systems, 2010, 759–764.

- [13] PIRES V.F., AMARAL T.G., SOUSA D., MARQUES G.D., *Fault detection of voltage-source inverter using pattern recognition of the 3D current trajectory*, 8th IEEE Reg. Int. Conf. Comp. Tech., 2010, 617–621.
- [14] ROTHENHAGEN K., FUCHS F.W., *Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Voltage Source Active Rectifiers*, Proc. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf., Aachen, Germany, 2004, Vol. 6, 4348–4354.
- [15] RODRÍGUEZ M.A., CLAUDIO A., THEILLIOL D., VELA L.G., HERNÁNDEZ L., *A Strategy to Replace the Damaged Element for Fault-Tolerant Induction Motor Drive*, Proc. 5th Int. Conf. Electrical Eng., Computing Science and Automatic Control (CCE 2008), Mexico City, Mexico, 2008, 51–55.
- [16] RIBEIRO R.L.A., JACOBINA C.B., LIMA A.M.N., DA SILVA E.R.C., *A Strategy for Improving Reliability of Motor Drive Systems Using a Four-Leg Three-Phase Converter*, Proc. 16th Ann. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition, Anaheim, CA, United States, 2001, Vol. 1, 385–391.
- [17] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Wpływ uszkodzenia tranzystora IGBT falownika napięcia na przebiegi zmiennych stanu silnika indukcyjnego ze sterowaniem wektorowym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, vol. 89, nr 2b, 162–165.
- [18] WANG Y., LIPO T.A., PAN D., *Robust Operation of Double-Output AC Machine Drive*, IEEE 8th Int. Conf. Power Electronics and ECCE Asia, ICPE & ECCE, The Shilla Jeju, Korea, 2011, 140–144.
- [19] WELCHKO B.A., WAI J., JAHNS T.M., JAHNS T.M., LIPO T.A., *Magnet-Flux-Nulling Control of Interior PM Machine Drives for Improved Steady-State Response to Short-Circuit Faults*, IEEE Trans. Industry Applications, 2006, Vol. 42, No. 1, 113–120.
- [20] WELCHKO B.A., LIPO T.A., JAHNS T.M., SCHULZ S.E., *Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, and Limitations*, IEEE Trans. Power Electronics, 2004, Vol. 19, No. 4, 1108–1116.

SURVEY ON TWO-LEVEL VOLTAGE INVERTERS ROBUST TO IGBT FAULTS

This survey paper deals with the problem of fault tolerant control of AC motor drives. Basic problems have been formulated and the classification of fault tolerant control methods has been presented. The main attention was focused to the IGBT faults of the two-level voltage inverter supplying AC motor drives. The most popular inverter topologies suitable for post-fault operation of the drive system have been presented and discussed.