

Niskoindukcyjne układy połączeń części silnoproudowych przekształtników energoelektronicznych

Krzysztof Blecharz, Krzysztof Kowalewski

Połączenia niskoindukcyjne

W konstrukcjach nowoczesnych przekształtników energoelektronicznych wykorzystuje się moduły z tranzystorami IGBT pracującymi z dużą częstotliwością łączeń. Podczas przełączania tranzystorów na ich zaciskach możliwe jest występowanie przepięć łączeniowych, których główną przyczyną jest indukcyjność pasożytnicza L_p połączeń wewnętrznych przekształtnika. Szybkie zmiany dużej wartości prądu płynącego przez indukcyjności pasożytnicze połączenia wewnętrznego w bardzo krótkim czasie (di/dt), które wynoszą obecnie dla nowych konstrukcji tranzystorów od 1 do 2,5 kA/ μ s [1], powodują indukowanie się przepięcia na zaciskach tranzystora, które tranzystor musi wytrzymać w stanie blokowania. Wartość napięcia, jaka odkłada się na zaciskach tranzystorów przekształtnika, jest równa sumie napięcia panującego w obwodzie pośredniczącym prądu stałego oraz wartości przepięcia wynikającego z istnienia dodatkowych indukcyjności pasożytniczych w obwodzie przekształtnika [2]. Wartość maksymalną napięcia można określić wzorem (1)

$$U_{CE} = U_{dc} + L_p \frac{di}{dt}$$

gdzie:

U_{CE} – napięcie kolektor – emiter modułu tranzystorowego IGBT;

U_{DC} – napięcie w obwodzie pośredniczącym prądu stałego (DC);

L_p – indukcyjność pasożytnicza połączenia modułu IGBT – obwód DC;

di/dt – szybkość zmian prądu płynącego przez moduł IGBT.

Przepięcia powstające w trakcie działania przekształtnika negatywnie wpływają na pracę całego przekształtnika, m.in. są źródłem zakłóceń elektromagnetycznych, mają wpływ na jakość przebiegów uzyskiwanych na wyjściu przekształtnika lub w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do uszkodzenia łączników IGBT.

Na rysunku 1 pokazano topologię połączeń dwupoziomowego falownika zasilającego silnik indukcyjny z zaznaczonymi indukcyjnościami pasożytniczymi L_p .

Problem występowania przepięć jest szczególnie istotny z uwagi na stale powiększający się zakres mocy wyjściowych urządzeń energoelektronicznych oraz szybkości łączeń tranzystorów. Wielkość indukcyjności pasożytniczych połączeń wewnętrznych przekształtnika zależy od ich długości, sposobu

Streszczenie: W artykule poruszono problem występowania przepięć komutacyjnych w układach falowników napięcia. Jednym ze sposobów ograniczania wartości przepięć jest minimalizacja indukcyjności pasożytniczych połączeń wewnętrznych przekształtnika. W artykule opisano metodę projektowania niskoindukcyjnych połączeń wewnętrznych w układach falowników napięcia oraz zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych wybranej konstrukcji połączenia niskoindukcyjnego.

Abstract: The article discusses the problem of commutation overvoltage in voltage power converters. One way to limit the value of overvoltage is minimization of the inside connections parasitic inductances in converter topology. The article shows how design low inductance connections in the low voltage inverters and laboratory test results for type selected busbar connection.

przewodzenia połączeń oraz ich przekrojów i może osiągać wielkość do 600 nH [3]. Straty mocy występujące podczas działania tranzystorów wymagają odpowiedniego rozmieszczenia ich na radiatorach. Na ogół zwiększenie mocy przekształtnika wiąże się ze zwiększeniem wymiarów geometrycznych urządzenia, a także odległości pomiędzy tranzystorami a obwodem pośredniczącym DC, co skutkuje wzrostem wartości niepożądanych indukcyjności pasożytniczych przekształtnika.

reklama

Indukcyjności pasożytniczych połączeń wewnętrznych nie można wyeliminować całkowicie, jednakże można obniżyć ich wartość poprzez zastosowanie niskoindukcyjnych połączeń typu *busbar*.

Połączenia niskoindukcyjne typu *busbar* (ang. *low inductance busbar connection*) wykonuje się w postaci dwóch lub więcej warstw przewodzących prąd elektryczny oddzielonych od siebie warstwą dielektryka. Na rysunku 2 pokazano widok modelu połączenia płaskiego wielowarstwowego.

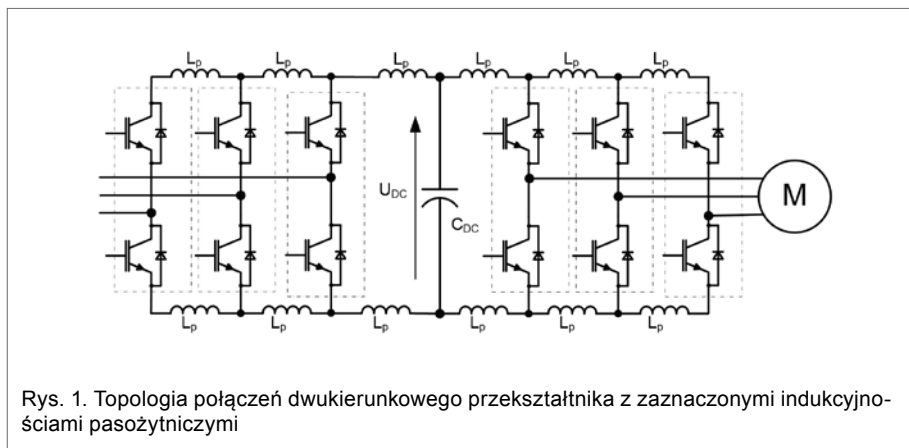
Korzystnym aspektem zastosowania niskoindukcyjnych laminowanych połączeń typu *busbar* jest obniżenie kosztów związanych z wykonaniem połączeń wewnętrznych przekształtnika poprzez usprawnienie procesu montażowego urządzenia oraz eliminację lub zmniejszenie dodatkowych kondensatorów do tłumienia przepięć komutacyjnych (ang. *snubber capacitors*). Konstrukcja prawidłowo zaprojektowanego niskoindukcyjnego połączenia płaskiego wraz z naniesionymi oznaczonymi poszczególnymi zaciskami zmniejsza do minimum możliwość wykonania błędnych połączeń przez osobę dokonującą montażu przekształtnika. Nie ma konieczności przygotowywania odpowiednich przewodów do połączeń wewnętrznych wraz z zaprasowanymi końcówkami. Ma to duże znaczenie szczególnie w przypadku masowej produkcji urządzenia.

Na rysunku numer 3 pokazano przykładowy przekrój poprzeczny dwuwarstwowego połączenia niskoindukcyjnego z dwoma równolegle połączonymi kondensatorami obwodu pośredniczącego.

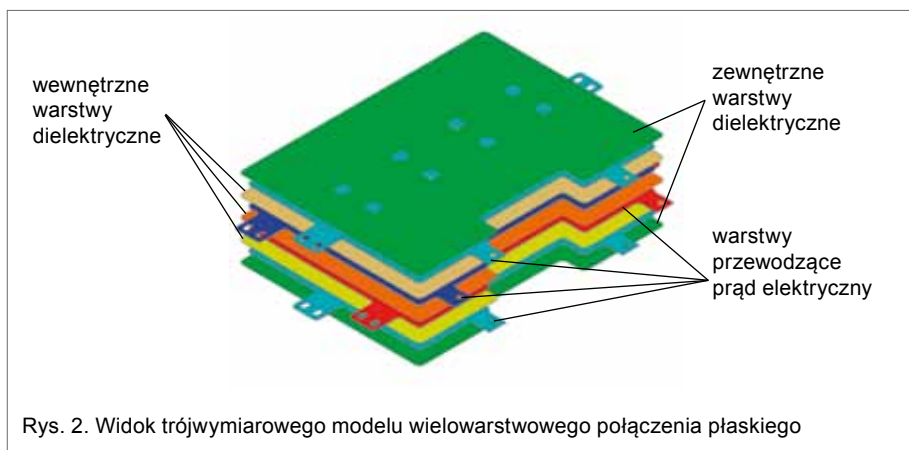
W ramach szeregu projektów realizowanych na przestrzeni 5 lat w Katedrze Automatyki Napędu Elektrycznego, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, opracowano metodę projektowania i konstrukcji połączeń niskoindukcyjnych zarówno w wersji dwuwarstwowej, jak i wielowarstwowej.

Projektowanie i konstrukcja połączeń wewnętrznych

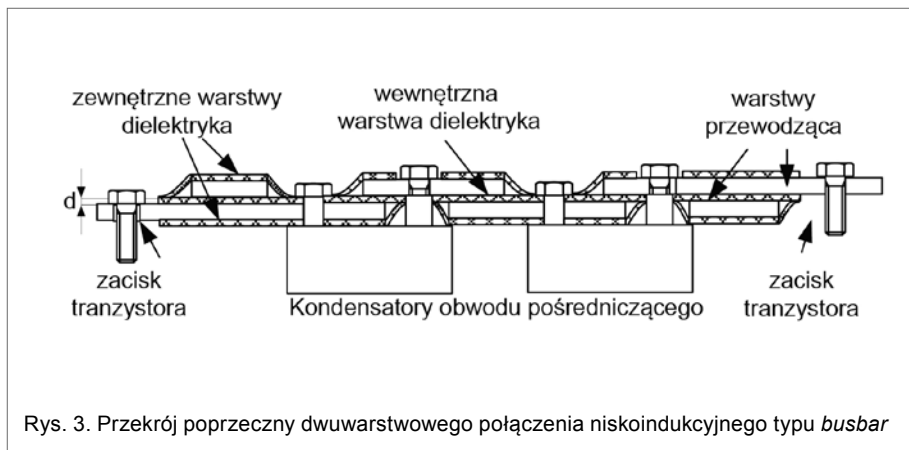
Proces projektowania połączenia niskoindukcyjnego można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie projektowania na podstawie przyjętych wartości napięcia U_{dc} i prądu I_{dc} w obwodzie pośredniczącym przekształtnika ustala się parametry warstwy dielektryka oraz powierzchnie styku warstwy przewodzącej z elementami obwodu DC i tranzysto-



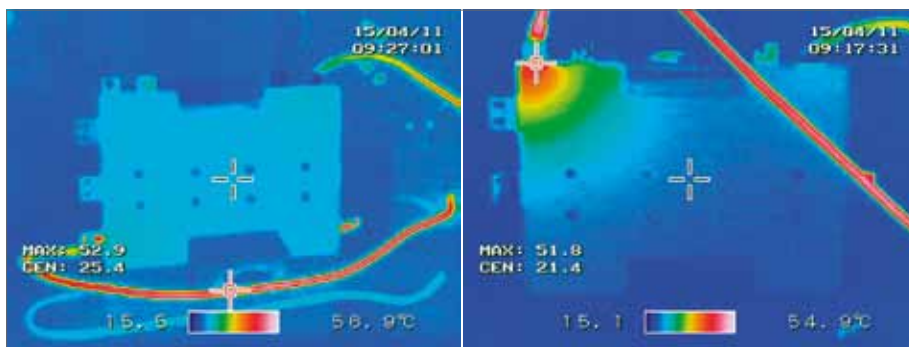
Rys. 1. Topologia połączeń dwukierunkowego przekształtnika z zaznaczonymi indukcyjnościami pasożytniczymi



Rys. 2. Widok trójwymiarowego modelu wielowarstwowego połączenia płaskiego



Rys. 3. Przekrój poprzeczny dwuwarstwowego połączenia niskoindukcyjnego typu *busbar*



Rys. 4. Rozkład temperatury na powierzchni *busbara*:
a) rozkład prawidłowy;
b) rozkład w przypadku uszkodzenia warstwy dielektryka

Tabela 1. Wybrane parametry techniczne folii Mylar

Dane techniczne:	Jednostka	Wartość
Przenikalność dielektryczna względna	–	3,3
Napięcie przebicia dla próbki o grubości 125 µm	[kV]	13
Rezystancja skośna	[Ωm]	10 ¹⁸
Rezystancja powierzchniowa	[Ω]	10 ¹⁶

rami IGBT. Przy doborze grubości warstwy przewodzącej uwzględnia się poza gęstością prądu również powierzchnię odprowadzania ciepła oraz skomplikowany kształt elementu. W drugim etapie wykonuje się projekt konstrukcji przestrzennej przekształtnika, wykorzystując program komputerowy typu CAD, uwzględniając przede wszystkim rozmieszczenie modułów tranzystorowych oraz kondensatorów obwodu pośredniczącego. W trakcie projektowania należy zwrócić uwagę na minimalizację drogi przepływu prądu.

Montaż konstrukcji połączenia polega na połączeniu poszczególnych warstw przewodzących i nieprzewodzących pod odpowiednim, równomiernie rozłożonym naciskiem w odpowiedniej temperaturze. Ważnym etapem w procesie wytwarzania połączenia niskoindukcyjnego jest precyzyjne wycięcie kształtu oraz obróbka krawędzi. Wykorzystuje się do tego technologię CNC. Pozostawienie ostrych zakończeń na krawędziach może doprowadzić do uszkodzenia materiału izolacyjnego bezpośrednio w trakcie procesu łączenia elementów lub zmniejsza wytrzymałość elektryczną dielektryka poprzez naruszenie jego struktury. Prowadzi to w dłuższym przedziale czasowym do powstania zwarcia wieloprądowego pomiędzy elektrodami połączenia.

W opracowanych konstrukcjach połączeń niskoindukcyjnych jako materiał izolacyjny wykorzystano folię poliesterową na bazie polietylenotereftalanu, produkowaną przez firmę DuPont Teijin Films i dostępną pod nazwą handlową Mylar® A. Folia jest dostępna w szerokiej gamie grubości. Podstawowe parametry techniczne folii zostały pokazane w tabelicy numer 1. Dobór grubości zależy od przyjętej maksymalnej wartości napięcia obwodu pośredniczącego projektowanego przekształtnika.

Pojemność całkowita elementu połączenia niskoindukcyjnego uzależniona jest od wymiarów geometrycznych oraz grubości i rodzaju zastosowanego ma-

teriału dielektrycznego. Pojemność elementu można obliczyć ze wzoru:

$$C_{busbar} = \frac{\epsilon S}{d}$$

gdzie:

S – pole powierzchni elektrod;

ϵ – przenikalność dielektryczna materiału izolacyjnego;

d – grubość materiału izolacyjnego.

Wartość pojemności obliczona według zależności (2) dla konstrukcji *busbara* pokazanej na rysunku numer 2 wynosi 22,05 nF.

Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne opracowanych połączeń niskoindukcyjnych umożliwiły sprawdzenie jakości poszczególnych konstrukcji oraz usprawnienie procesu łączenia. Połączenia niskoindukcyjne zostały przetestowane pod względem wytrzymałości dielektrycznej warstwy izolacyjnej na przebicia. Badanie polegało na przyłożeniu napięcia stałego probierczego o wartości 5 kV na okres $t = 360$ s, zarówno w temperaturze pokojowej, jak również w maksymalnej dopuszczalnej temperaturze pracy urządzenia. Za pomocą laboratoryjnego mostka pomiarowego zmierzono pojemność poszczególnych warstw *busbara*, która wynosiła odpowiednio 20,1 nF i 20,3 nF.

Wykonano także test obciążenia prądowego, który polegał na wymuszeniu przepływu prądu o określonej dla konkretnej konstrukcji połączenia wartości i zarejestrowaniu przy pomocy kamery termowizyjnej rozkładu temperatury na powierzchni połączenia. Na rysunku 4

pokazano rozkład temperatury w stanie termicznie ustalonym na powierzchni dwóch identycznych elementów. Wartość prądu stałego wymuszonego w obwodzie pomiarowym wynosiła 270 A i została zmierzona amperomierzem cęgowym typu EXTECH EX840.

Prawidłowo wykonana konstrukcja *busbara* charakteryzuje się równomiernym rozkładem temperatury na całej powierzchni elementu (rys. 4 a). W przypadku uszkodzenia wewnętrznej warstwy dielektrycznej badanie to umożliwia dokładną lokalizację uszkodzenia (rys. 4 b). Badania rozkładu temperatury wykonano kamerą termowizyjną NEC InfRec Thermo Gear G30.

Literatura

- [1] STRIBGEN M.: *Reducing inductance in power distribution systems*. Power Electronic Technology 10/2012.
- [2] BEUKES H.J., ENSLIN J.H., SPEE R.: *Busbar Design Considerations for High Power IGBT Converters*. Proc. of Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC 97'.
- [3] BEUKES H.J., ENSLIN J.H., SPEE R.: *Reduced Layer Planar Busbar for Voltage Source Inverters*. IEEE Transactions on power electronics, vol. 17, no. 4, July 2002.

dr inż. Krzysztof Blecharz – adiunkt w Katedrze Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, k.blecharz@ely.pg.gda.pl;
dr inż. Krzysztof Kowalewski – kierownik projektów, MMB Drives Sp. z o.o., kowalik@mmbdrives.com.pl

reklama