

Przekształtnikowy napęd na napięciu 3,3 kV zintegrowany z silnikiem dużej mocy

Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, Dariusz Paluszczak, Jacek Sontowski, Jarosław Michalak, Marcin Zygmantowski, Krzysztof Kwaśniewski, Jacek Przybyłka

1. Wstęp

Regulacja prędkości obrotowej lub momentu elektromagnetycznego jest wymagana w większości procesów technologicznych. Wymagania dotyczące regulacji prędkości coraz częściej dotyczą napędów o wyższych napięciach i większych mocach. Rozwój napędów średniego napięcia wiąże się z rozwojem przekształtników wielopoziomowych. Przekształtniki te umożliwiają stosowanie, do zasilania odbiorników o określonych napięciach, znamionowych energoelektronicznych elementów o napięciach blokowania niższych niż napięcie znamionowe pracy odbiornika (w obecnie produkowanych tranzystorach IGBT napięcie blokowania wynosi maksymalnie 6,5 kV). Dla wielu przemysłowych zastosowań istotne są gabaryty i waga napędu i w takich przypadkach ważne jest, aby w przekształtniku wielopoziomowym nie był stosowany transformator wielouzwojeniowy. Z tego względu dla napięcia 3,3 kV odpowiednią topologią jest 3-poziomowy przekształtnik z diodami poziomującymi (NPC). Rozwiązanie to wydaje się optymalne w szczególności dla napędów zintegrowanych ze względu na relatywnie niską liczbę elementów.

W napędach niskiego napięcia stosuje się rozwiązania zintegrowane, charakteryzujące się mniejszymi gabarytami niż rozwiązania typowe. Wśród rozwiązań średniego napięcia dostępne są prawie wyłącznie rozwiązania niezintegrowane, wymagające instalacji szaf z aparaturą zabezpieczeniową, układów chłodzenia oraz dodatkowych filtrów.


W artykule przedstawiono prototypowy napęd, będący rozwiązaniem zintegrowanym, w którym w jednej obudowie wykonano silnik indukcyjny klatkowy, przekształtniki AC/DC i DC/AC oraz dławik sieciowy. Zastosowany przekształtnik pozwala na dwukierunkowe przekazywanie energii między siecią a silnikiem i zapewnia poprawę współczynnika mocy w miejscu zasilania. Napęd wykonany jest w obudowie przeciwybuchowej, co pozwala na jego stosowanie w środowisku niebezpiecznym.

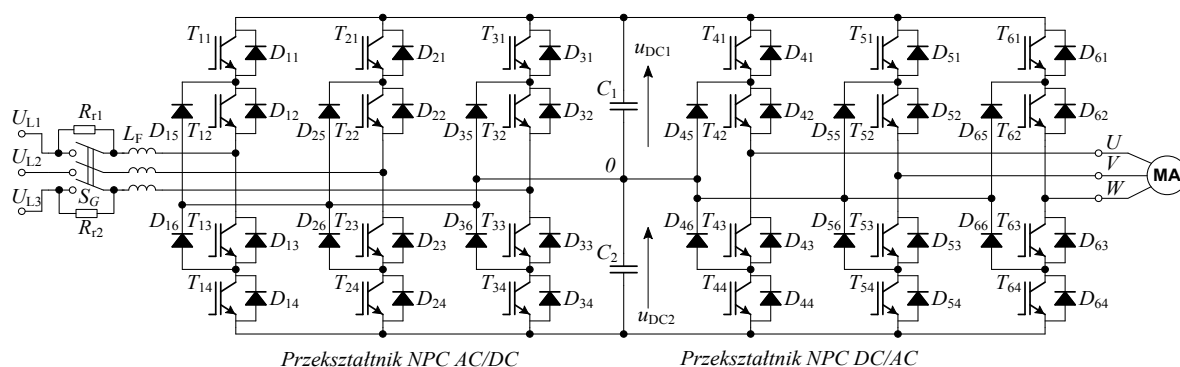
Zastąpienie istniejącego silnika indukcyjnego, pracującego ze stałą prędkością obrotową, przez proponowany napęd zintegrowany nie wymaga żadnych modyfikacji obwodów zasilania i układu chłodzenia. Należy zaznaczyć, że objętość napędu zwiększyła się tylko o około 75% w stosunku do objętości samego silnika, natomiast masa zwiększyła się jedynie o 40%.

2. Właściwości i idea budowy napędu

Prezentowany przekształtnikowy napęd zintegrowany przeznaczony jest do zasilania napięciem 3,3 kV i ma moc 850 kW. Bazą do tego rozwiązania były wcześniejsze doświadczenia

Streszczenie: Artykuł prezentuje zagadnienia dotyczące napędu przekształtnikowego średniego napięcia 3,3 kV, zintegrowanego z silnikiem indukcyjnym klatkowym dużej mocy. W napędzie zastosowano przekształtniki sieciowy (AC/DC) i silnikowy (DC/AC) oraz zintegrowano je w jednej obudowie z silnikiem klatkowym i niezbędnym do prawidłowej pracy przekształtnika AC/DC dławikiem sieciowym. Uzyskano dzięki temu układ napędowy o zwartej konstrukcji, umożliwiający regulację prędkości obrotowej, który może zastąpić klasyczny silnik klatkowy. Dodatkowo dla każdej prędkości możliwa jest praca napędowa, jak i hamowanie ze zwrotem energii do sieci, prądy sieci są quasi-sinusoidalne, a współczynnik mocy bliski jedności. Napęd zaopatrzone w obudowę przeciwybuchową, co umożliwia jego stosowanie w środowisku zagrożonym wybuchem. W artykule przedstawiono właściwości napędu i przekształtników, wybrane zagadnienia konstrukcyjne i techniczne oraz wybrane wyniki badań prototypowego napędu zintegrowanego o mocy 850 kW. Badania te dotyczą analizy pracy napędu w różnych stanach statycznych i dynamicznych oraz analizy termicznej napędu.

 **Abstract:** The paper presents aspects of realization of medium voltage 3,3 kV power electronic drive integrated with high power induction motor. The drive consists of two converters, the grid-side converter (AC/DC) and motor side converter (DC/AC) that have been integrated in one explosion-proof enclosure with squirrel cage induction motor and the line inductors which are needed for proper operation of AC/DC converter. The integration leads to the construction of the compact drive which allows controlling the motor in full range of speed and can be used instead of the classical induction motor. For any speed it is possible to operate as a motor or as a generator with energy recuperation to the grid. Additionally, the drive system ensures achieving quasi-sinusoidal line currents and power factor close to one. Explosion-proof construction of the drive makes it possible to operate in potentially explosive environments. The paper presents properties of the drive and converters, technical aspects of construction of the drive and selected results of tests of prototype of the integrated drive with the rated power of 850 kW. These results cover operation of the drive in steady state and during transients. The analysis of thermal aspects of operation of the drive is also presented in the paper.



Rys. 1. Schemat obwodów mocy prototypowego napędu zintegrowanego na napięcie 3,3 kV

związane z opracowanym w DFME DAMEL SA, przy współpracy z firmą ENEL-PC, typoszeregiem silników zintegrowanych z przekształtnikiem częstotliwości [1] o zakresie mocy od 60 kW do 500 kW i napięciu znamionowym 1000 V i 1140 V. Napędy te znajdują zastosowanie m.in. w maszynach górniczych, a w szczególności przenośnikach taśmowych i zgrzeblowych i pozwalają na wyeliminowanie zjawisk, takich jak na przykład wpływ obciążeń dynamicznych na trwałość przekładni i taśmy transporterowej. Prezentowane rozwiązanie, w stosunku do produkowanych, oprócz wyższego napięcia znamionowego (3,3 kV) wyposażone jest w układ zwrotu energii do sieci zasilającej.

Przy doborze elementów przyjęto możliwość pracy z napięciem do 110% wartości znamionowej, z czego wynika, że w obwodzie DC napięcie może wynosić nawet 5,2 kV. To z kolei, ze względu na maksymalne napięcia blokowania tranzystorów IGBT (6,5 kV) oraz potrzebę zachowania współczynnika bezpieczeństwa, prowadziło do wyboru topologii trójpoziomowej przekształtników. Ostatecznie wybrano dla obu przekształtników topologię trójpoziomową z diodami poziomującymi NPC – *Neutral-Point Clamped* [2, 3] (w przekształtniku trójfazowym stosuje się 12 tranzystorów i 6 diod poziomujących). Dzięki przekształtnikowi trójpoziomowemu prądy fazowe sieci i silnika charakteryzują się mniejszymi odkształceniami (w stosunku do rozwiązania dwupoziomowego), co ogranicza negatywne zjawiska w silniku i sieci. Dodatkowo istnieje możliwość zmniejszenia częstotliwości przełączania tranzystorów, przez co można zwiększyć sprawność przekształtnika, ponieważ przy zastosowaniu tranzystorów IGBT na napięciu 6,5 kV znaczący udział w całkowitych stratach mocy mają straty przełączania. Taki przekształtnik wymaga jednak stosowania odpowiedniego algorytmu modulacji sygnałów sterujących tranzystorami, w którym oprócz kształtowania napięć wyjściowych uwzględnić należy problematykę wyrównywania napięć obwodu DC [4]. Aby umożliwić długotrwałą pracę silnika przy napędzaniu i hamowaniu oraz ze względu na potrzebę ograniczenia wpływu na sieć, wybrano do budowy topologię AC/DC/AC, w której występują dwa przekształtniki NPC.

Na rys. 1 pokazano obwody mocy prototypowego napędu zintegrowanego z silnikiem asynchronicznym. W jego skład wchodzi: silnik klatkowy, dwa trójfazowe przekształtniki NPC (AC/DC i DC/AC), dławiki sieciowe L_F , stycznik główny S_G

oraz rezystory wstępnego ładowania R_r . Napęd zintegrowany podłącza się bezpośrednio do źródła zasilania, jak normalny silnik klatkowy. Podczas uruchamiania napędu najpierw, po podaniu napięcia 3,3 kV, następuje ładowanie kondensatorów obwodu DC przez rezystory wstępnego ładowania R_r , następnie załączany jest stycznik główny S_G , a później uruchamiane są oba przekształtniki NPC.

Przekształtnik sieciowy AC/DC wraz z dławikami L_F umożliwia kształtowanie prądów sieci, co ma na celu zapewnienie niskiej zawartości harmonicznych w prądach sieci i współczynnika mocy bliskiego jedności. Zbudowany jest on z tranzystorów T_{11} – T_{34} zintegrowanych z diodami D_{11} – D_{34} oraz diod poziomujących D_{15} – D_{36} . Przekształtnik sieciowy AC/DC cechuje się mniejszymi gabarytami niż stosowany w napędach średnich napięć prostownik diodowy 12-pulsowy z transformatorem oraz dodatkowo umożliwia zwrot energii do sieci w stanie hamowania napędu, co likwiduje problem podłączenia rezystorowego układu rozpraszania energii, który w przypadku napędu dużej mocy, pracującego w stanie hamowania przez dłuższy czas, miałby znaczne gabaryty.

Zadaniem przekształtnika DC/AC (tranzystory T_{41} – T_{64} , diody D_{41} – D_{64} oraz diody poziomujące D_{45} – D_{66}) jest zasilanie silnika klatkowego. Przekształtnik zapewnia regulację prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego silnika (w układzie sterowania zastosowano sterowanie skalarne oraz sterowanie połowo zorientowane). Ze względu na właściwości dynamiczne tranzystorów IGBT na napięciu 6,5 kV, ograniczone gabaryty oraz możliwości układu chłodzenia przyjęto częstotliwość przełączeń tranzystorów równą 1050 Hz. W obwodzie DC występują dwie baterie kondensatorów C_1 i C_2 , więc konieczne jest uwzględnienie w sterowaniu stabilizacji potencjału punktu środkowego obwodu DC (zapewnienie równej wartości napięć obu kondensatorów). Brak tego algorytmu może skutkować zmianami potencjału punktu środkowego w szerokim zakresie i prowadzić do uszkodzeń. Problem ten obserwowalny jest przy niskich prędkościach obrotowych, ponieważ przyłączenie danej fazy (przez relatywnie długi czas) do punktu środkowego powoduje, że prąd tej fazy doładowuje jeden i rozładowuje drugi kondensator. Przy większych prędkościach napędu wyjścia danych gałęzi przekształtnika rzadziej są przyłączane do punktu środkowego obwodu DC, co zmniejsza zmiany jego potencjału. Zastosowany algorytm stabilizacji

bazuje na dodawaniu składowej wspólnej napięcia do napięć wyjściowych we wszystkich fazach [4]. Dodawana składowa wspólna zależy od kąta wektora przestrzennego napięcia zadane, wartości chwilowych prądów przekształtnika i znaku różnicy napięć kondensatorów. Działanie algorytmu stabilizacji punktu środkowego w obwodzie DC, który zastosowano w niniejszym rozwiązaniu, przedstawiono w pracy [5].

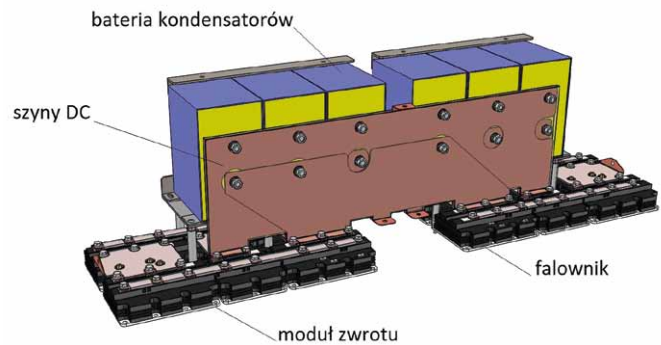
3. Wybrane zagadnienia technologiczne prototypowego napędu zintegrowanego

Jak przedstawiono w poprzednim rozdziale, w obwodach mocy części energoelektronicznej zintegrowanego napędu wyróżnić można: dławik sieciowy z układem rozruchowym, przekształtnik sieciowy AC/DC, obwód pośredniczący napięcia stałego DC z baterią kondensatorów oraz przekształtnik DC/AC (silnikowy). Całość została zintegrowana w konstrukcji mechanicznej silnika, której ostateczną postać pokazano na rys. 2. Silnik został wykonany jako bryła złożona z: cylindrycznej części mieszczącej obwód elektromagnetyczny zamknięty z obu stron tarczami łożyskowymi, nabudowanej na górze silnika skrzyni z aparaturą energoelektroniczną i układem wstępnego ładowania oraz obudowy mocowanej od strony przeciwnapędowej, w której umieszczono dławik sieciowy. Dzięki takiemu rozwiązaniu dodatkowe źródło ciepła, jakim jest dławik, nie wpływa bezpośrednio na temperaturę pracy przekształtników. Całość uzupełniona została skrzynką zaciskową i dodatkową skrzynką z aparaturą sterowniczą.



Rys. 2. Widok z boku napędu zintegrowanego

Przy projektowaniu prototypowego napędu przyjęto, że obwody energoelektroniki zostaną podzielone na trzy części, z których każda obejmuje jedną fazę przekształtnika AC/DC, jedną trzecią baterii kondensatorów tworzących obwód pośredniczący DC oraz jedną fazę przekształtnika DC/AC. Pozwoliło to na zachowanie modułowości. Przekształtniki są umieszczone na radiatorach, a elementy połączone ze sobą za pomocą zestawu blach o odpowiedniej konstrukcji, stanowiących tzw. busbar. Takie wykonanie szyn DC pozwoliło na zminimalizowanie indukcyjności połączeń między kondensatorami i zaworami, a tym samym ograniczenie przepięć komutacyjnych, co ma szczególne znaczenie ze względu na klasę napięciową tranzystorów IGBT. Upraszcza to także montaż i ewentualne prace serwisowe w przypadku przeglądów czy napraw. Model trójwymiarowy pojedynczej fazy obu przekształtników z elementami



Rys. 3. Model pojedynczej fazy przekształtnika

łączeniowymi (szyny DC) i baterią kondensatorów przedstawiono na rys. 3. Projekt mechaniczny przekształtników NPC został wykonany w środowisku SolidWorks, co pozwoliło na ich łatwiejszą integrację z silnikiem oraz szybkie przygotowanie dokumentacji do wykonania elementów.

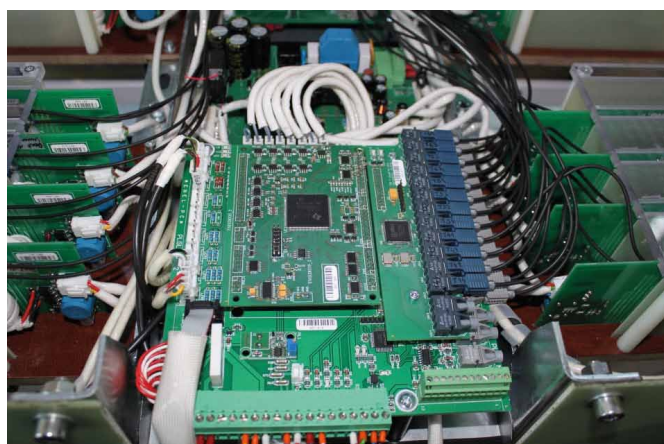
Wszystkie elementy napędu, będące źródłem znaczących strat mocy, są chłodzone cieczą. Radiatory wodne przekształtników zostały zaprojektowane jako dwie identyczne płyty miedziane zaopatrzone w sieć kanałów wodnych. W celu uproszczenia systemu chłodzenia przepływ cieczy jest szeregowy, zorganizowany tak, aby najpierw chłodzić oba przekształtniki (równolegle), następnie dławik i na końcu silnik. W ten sposób elementy, których temperatura może być wyższa (dławik i silnik), są chłodzone wodą wstępnie podgrzaną (temperatury wszystkich elementów nie przekraczają wartości dopuszczalnych). Rozmieszczenie elementów systemu chłodzenia wodnego z obiegiem wymuszonym uwzględnione zostało w konstrukcji napędu zintegrowanego silnikiem. Uwzględniono również rozmieszczenie przyrządów energoelektronicznych pod względem prowadzenia przewodów obwodów mocy oraz obwodów sterowniczych, wykonanych jako obwody iskrobezpieczne. Prototypowy układ napędowy ma wymiary większe jedynie o około 75%, a masę większą o 40% w porównaniu do typowego silnika 3,3 kV o mocy 850 kW.

Oba przekształtniki wykonane zostały na bazie elementów firmy Hitachi – tranzystorów IGBT MBN750H65E2 oraz diod MDM500H65E2. Dodatkowe elementy układu sterowania stanowią przetworniki LEM do pomiaru prądu sieci i silnika oraz wysokonapięciowe przetworniki DV-4200 firmy LEM do pomiaru napięcia. Ze względu na wymagania układu sterowania mierzone są dwa międzyfazowe napięcia sieci oraz dwa napięcia obwodu pośredniczącego przekształtnika. Zdjęcie przekształtników przedstawia rys. 4.

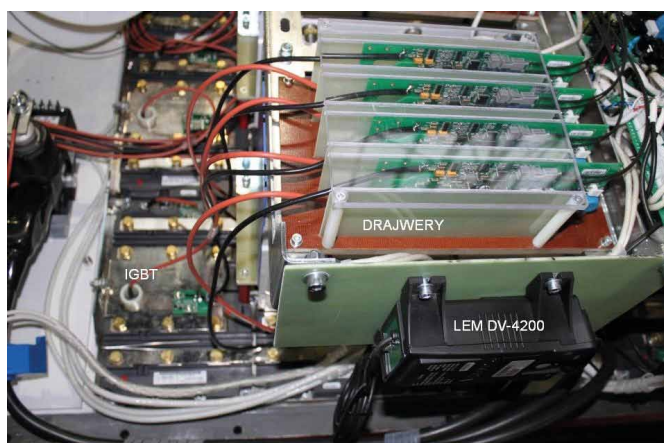
Układ sterowania (rys. 5) każdego z przekształtników bazuje na mikrokontrolerze sygnałowym DSC TMS 320F28335 [6]. Kluczowym elementem mikrokontrolera, wykorzystywanym do sterowania tranzystorów, są bloki ePWM. Sygnały przez nie generowane, po właściwym przetworzeniu, są przyłączone do układów nadajników światłowodowych widocznych po prawej stronie na rys. 5.



Rys. 4. Zespół przekształtnikowy zintegrowanego napędu na napięcie 3,3 kV



Rys. 5. Sterownik przekształtnika



Rys. 6. Fragment przekształtnika AC/DC z zespołem drajwerów tranzystorów IGBT

Sygnaly z nadajników światłowodowych doprowadzone są do zaprojektowanych wysokonapięciowych układów drajwerów. Przyjęto rozwiązanie, w którym drajwery są oddalone do tranzystorów IGBT, a sygnaly bramkowe i zwrotne zabezpieczeń są dołączone do modułów za pomocą ekranowanych przewodów z izolacją wysokonapięciową. Pozwala to zmniejszyć narażenie

drajwera na zakłócenia wynikające ze zjawisk komutacyjnych w tranzystorach i obwodach mocy. Zespół czterech drajwerów jednej gałęzi przekształtnika pokazano na rys. 6.

Program sterujący został przygotowany w środowisku Code Composer Studio i obejmuje wszystkie niezbędne elementy pozwalające na sterowanie napędem, komunikację z użytkownikiem, nastawę parametrów, kalibrację wejść analogowych, zabezpieczenia i diagnostykę przekształtnika oraz silnika. Blok sterujący przekształtnika silnikowego pozwala na pracę ze sterowaniem skalarnym i sterowaniem połowo zorientowanym (czujnikowym lub bezczujnikowym). Zastosowano modulator regularny z rozszerzonym zakresem osiąganego wartości 1-harmonicznego napięcia wyjściowego oraz uwzględniono funkcję stabilizacji potencjału punktu środkowego obwodu pośredniczącego.

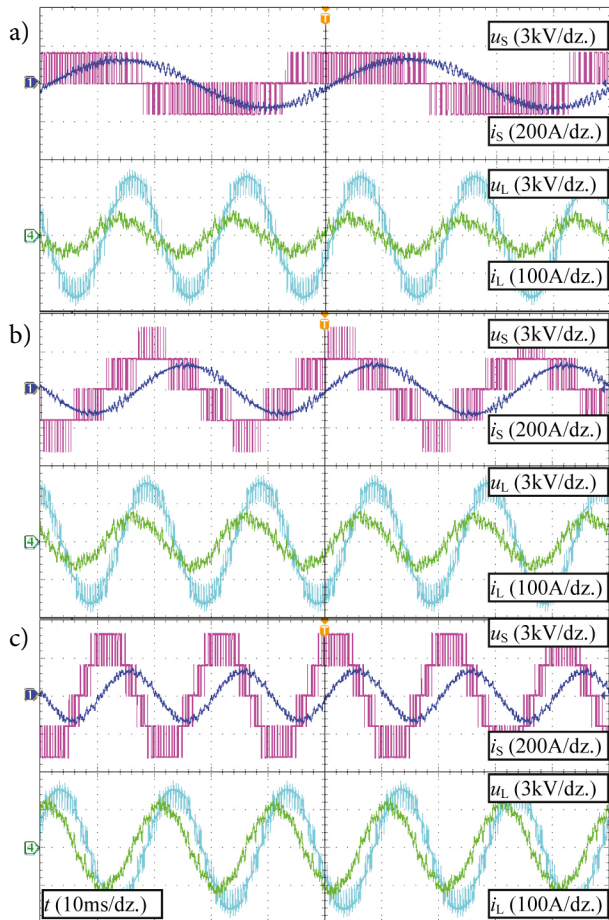
4. Badania laboratoryjne napędu

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych napędu zintegrowanego o mocy 850 kW prezentują jego właściwości.

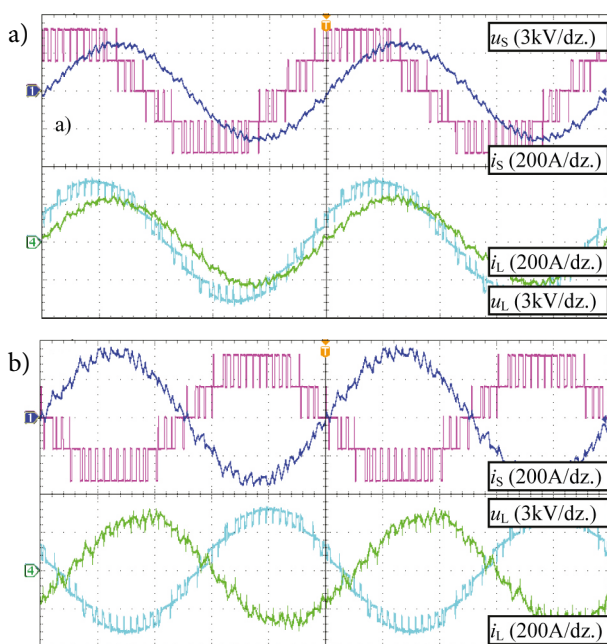
Na rys. 7 pokazano przebiegi napięcia i prądu silnika u_s , i_s oraz napięcia i prądu sieci u_L , i_L dla różnych częstotliwości napięcia wyjściowego i momentu obciążenia 2500 Nm. Przesunięcie między napięciem a prądem wynika z tego, że na rys. 7 widoczne jest napięcie międzyfazowe i prąd fazowy sieci. Dla niskich częstotliwości (rys. 7 a) napięcie międzyfazowe silnika ma trzy poziomy. Gdy częstotliwość rośnie, zwiększa się liczba poziomów napięcia międzyfazowego do pięciu (rys. 7 b i 7 c). Dzięki temu, mimo relatywnie niskiej częstotliwości przełączeń tranzystorów, prądy silnika nie są znacząco odkształcone. W napięciu sieci widoczne są zmiany spowodowane przełączeniem tranzystorów. Wartości tych zmian zależą od stosunku indukcyjności zastępczej sieci do indukcyjności dławika sieciowego L_F . W czasie testów na stanowisku laboratoryjnym napęd zasilany był z sieci o relatywnie dużej impedancji. Należy zaznaczyć, że zastosowany w prototypowym napędzie algorytm sterowania pozwalał na poprawną pracę przy obserwowalnych odkształceniach napięcia sieci.

Na rys. 8 pokazano przebiegi napięć i prądów dla pracy napędowej i hamowania odzyskowego przy mocy bliskiej znamionowej, gdy obciążeniem był silnik synchroniczny z magnesami trwałymi i klatką rozruchową (LSPMSM) o mocy 1,4 MW i napięciu 6 kV. Ze względu na stałą prędkość obrotową silnika (1500 obr./min) zmiany stanu pracy uzyskiwano poprzez zmiany częstotliwości wirowania pola w napędzie zintegrowanym. Wyniki potwierdzają poprawną pracę napędu dla obu stanów pracy, bliski jedności współczynnik mocy oraz quasi-sinusoidalne kształty prądów sieci.

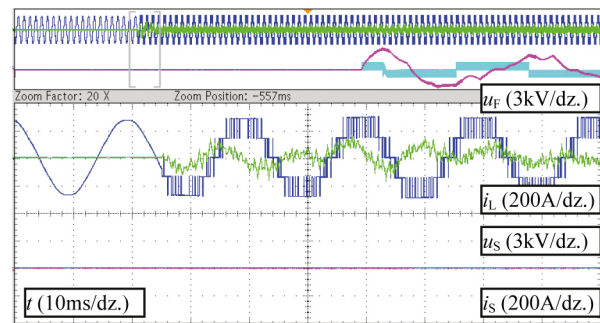
Na rys. 9 i 10 przedstawiono pracę napędu w stanach dynamicznych. Rys. 9 pokazuje rozruch napędu z powiększeniem przebiegów w chwili załączenia przekształtnika sieciowego AC/DC. Pokazano tu napięcie mierzone bezpośrednio na zaciskach przekształtnika oraz prąd sieci. Przy rozruchu najpierw załączany jest przekształtnik sieciowy (kontrolowane jest napięcie obwodu DC). Prąd sieci, po wstępnym naładowaniu obwodu pośredniczącego, ma niewielką wartość. Następnie uruchamiany jest przekształtnik silnikowy DC/AC. Silnik zasilany jest napięciem o niskiej częstotliwości i wartości skutecznej. Ze



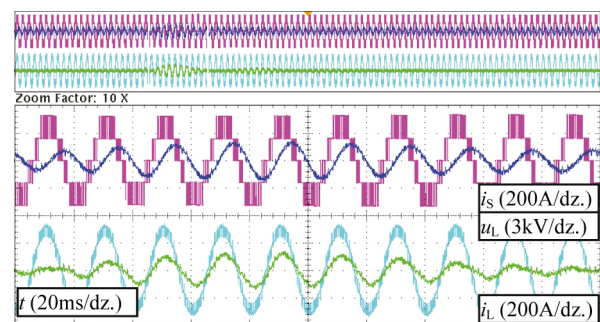
Rys. 7. Przebiegi napięcia u_s i prądu i_s silnika oraz napięcia u_L i prądu i_L sieci, częstotliwość zasilania silnika: a) 20 Hz; b) 30 Hz; c) 50 Hz



Rys. 8. Przebiegi napięcia u_s i prądu i_s silnika oraz napięcia u_L i prądu i_L sieci dla pracy: a) napędowej; b) hamowania odzyskowego



Rys. 9. Rozruch napędu zintegrowanego



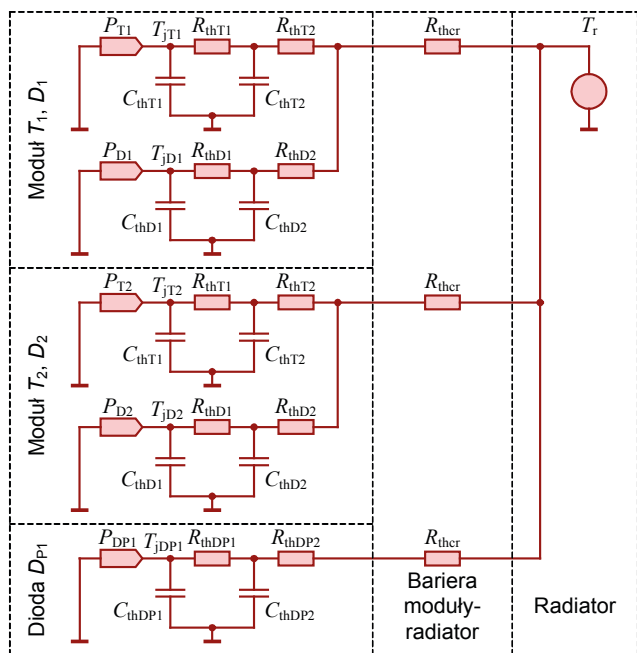
Rys. 10. Przebiegi napięcia u_s i prądu i_s silnika oraz napięcia u_L i prądu i_L sieci w czasie synchronizacji obciążenia – silnika LSPMSM – z siecią 6 kV

względem na relatywnie długie czasy martwe i krótkie czasy przewodzenia tranzystorów w początkowej fazie rozruchu prądu silnika są odkształcone, co redukuje się przy wzroście częstotliwości lub obciążenia.

Na rys. 10 przedstawiono proces synchronizacji pracującego jako obciążenie silnika LSPMSM. W tym przypadku badany napęd pracuje z prędkością bliską synchronicznej i po osiągnięciu warunków synchronizacji następuje włączenie silnika LSPMSM. Powoduje to powstanie stanu przejściowego i niewielki wzrost prądu silnika i sieci przez kilka okresów. Jak można zauważyć na rys. 10, ten stan przejściowy nie prowadzi do niepoprawnej pracy napędu zintegrowanego.

5. Analiza zjawisk termicznych w napędzie zintegrowanym

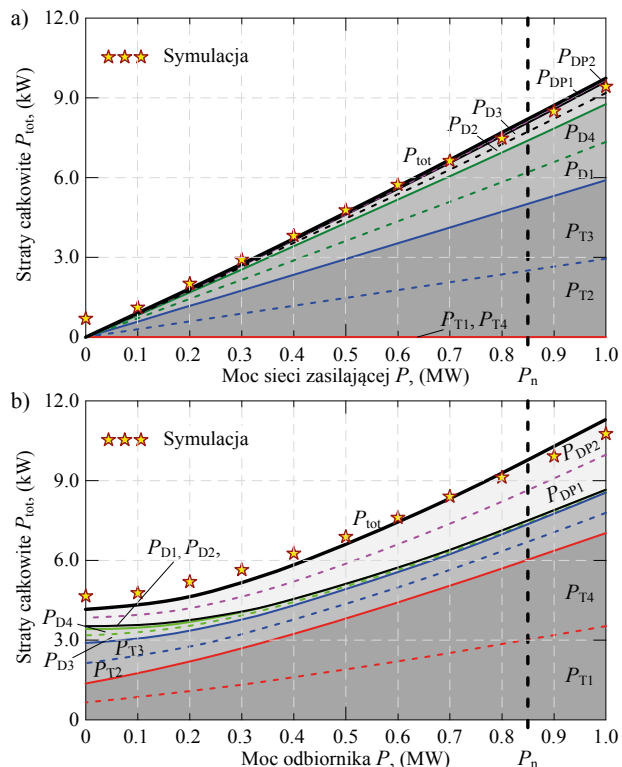
Dla zapewnienia bezpiecznej pracy napędu elektrycznego oraz dostatecznie długiego czasu jego eksploatacji ważne jest dobre rozpoznanie zagadnień cieplnych związanych z elementami składowymi opracowanego systemu. Do tych zagadnień zalicza się generowanie strat mocy w obu trójpoziomych przekształtnikach NPC, w trójfazowym dławiku sieciowym oraz w maszynie indukcyjnej. Najistotniejsze z punktu widzenia niezawodnej pracy napędu są straty mocy w tranzystorach i diodach obu przekształtników i dokładne rozpoznanie rozkładu temperatur wewnątrz tych elementów w różnych warunkach



Rys. 11. Schemat modelu cieplnego górnej gałęzi przekształtnika NPC, ilustrujący straty mocy w dwóch tranzystorach T_1 , T_2 i diodach D_1 , D_2 oraz diodzie poziomującej D_{P1} z ich rezystancjami i pojemnościami cieplnymi

pracy napędu. W celu określenia tych temperatur opracowano modele analityczne strat mocy dla obu przekształtników NPC z rozdzieleniem ich na poszczególne tranzystory IGBT i diody [7], a następnie zbudowano model cieplny uwzględniający parametry głównych elementów przekształtników. Fragment modelu cieplnego górnej gałęzi jednej fazy przekształtnika NPC przedstawiono na rys. 11. Model ten opracowano w programie GeckoCIRCUITS. Wykorzystanie tego programu symulacyjnego, łączącego model elektryczny przekształtników z ich modelami cieplnymi, pozwoliło na zaobserwowanie generowanych strat mocy i temperatur złącz półprzewodnikowych wszystkich przyrządów. Szczegółowe parametry cieplne, takie jak rezystancje i pojemności cieplne R_{th} , C_{th} tranzystorów i diod oraz radiatora wodnego połączonych jak w modelu z rys. 11, podano w pracy [7]. W modelu symulacyjnym założono, że temperatura radiatora jest stała i wynosi 50°C . Generowane straty mocy w tranzystorach i diodach przekształtników NPC, określone za pomocą modeli analitycznych, przedstawiono w funkcji mocy wyjściowej dla obu przekształtników NPC na rys. 12. Sumaryczne straty porównano z sumarycznymi stratami uzyskanymi z modelu symulacyjnego wykonanego w programie GeckoCIRCUITS.

Wyniki osiągnięte za pomocą obu metod są zbieżne, co potwierdza poprawność wykonania modeli. Ważną zaletą modelu analitycznego jest to, że pozwala on na znacznie szybsze



Rys. 12. Całkowite straty mocy wraz z udziałem mocy poszczególnych przyrządów trójfazowego trójpoziomowego przekształtnika NPC w funkcji mocy wyjściowej P : a) przekształtnika sieciowego; b) przekształtnika silnikowego

uzyskanie wyników strat mocy dla różnych warunków pracy napędu elektrycznego w porównaniu z modelem symulacyjnym GeckoCIRCUITS.

W przypadku obu przekształtników straty mocy rosną wraz ze wzrostem mocy czynnej odbiornika, przy czym straty mocy przekształtnika silnikowego są większe od strat mocy przekształtnika sieciowego. Jest to spowodowane tym, że przekształtnik silnikowy przekazuje do silnika moc bierną indukcyjną, której nie generuje przekształtnik sieciowy, a która zwiększa wartość skuteczną prądów fazowych. Dla małych mocy odbiornika straty mocy modelu analitycznego są niższe niż straty modelu symulacyjnego GeckoCIRCUITS. Wiąże się to z faktem, że w modelu analitycznym nie uwzględniono wpływu składowej prądów związanej z przełączeniami tranzystorów.

Kolejnym istotnym zagadnieniem dotyczącym modelowania cieplnego opracowanego przekształtnikowego napędu 3,3 kV było przygotowanie pełnego modelu cieplnego przekształtników, filtrów sieciowych wraz z silnikiem asynchronicznym. W pracy [8] przedstawiono wyniki analizy strat mocy występujących w opracowanym napędzie wraz z rozkładem temperatur w różnych punktach pomiarowych systemu. Radiator wodny, na którym zamontowano oba przekształtniki NPC, chłodzony jest wodą o maksymalnym przepływie równym 30 l/min. Zakładając, że maksymalne straty mocy obu przekształtników (przy znamionowej mocy $P = 850$ kW) wynoszą 17,5 kW,

przyrost temperatury wody chłodzącej przekształtniki wynosi 8,4 K. Straty w całym napędzie zintegrowanym wynoszą w tych warunkach 37,2 kW, co przekłada się na wzrost temperatury wody o 17,8 K.

Przy założeniu, że temperatura radiatora wodnego w otoczeniu tranzystorów IGBT i diod wynosi 50°C, w modelu GeckoCIRCUITS określono temperatury złącz poszczególnych przyrządów półprzewodnikowych. Największy przyrost temperatury dla pracy silnikowej napędu zaobserwowano w tranzystorach wewnętrznych T2T3 przekształtnika sieciowego oraz tranzystorach zewnętrznych T1T4 przekształtnika silnikowego i wynosił on w obu przypadkach maksymalnie 15 K. Taki przyrost temperatury jest bezpieczny dla pracy całego napędu przekształtnikowego [7].

Na podstawie wykonanych pomiarów w pracy [8] wyznaczono maksymalne całkowite straty mocy całego napędu przekształtnikowego na poziomie 37,2 kW, co przy mocy znamionowej silnika wynoszącej 850 kW przekłada się na wysoką sprawność całego napędu wynoszącą 95,8%.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono prototypowy napęd zintegrowany o mocy 850 kW na napięcie 3,3 kV. Napęd zintegrowany zawiera w jednej obudowie w wykonaniu przeciwybuchowym: silnik klatkowy, dwa przekształtniki AC/DC i DC/AC o topologii NPC oraz trójfazowy dławik sieciowy. Ze względu na napięcie pracy 3,3 kV zastosowano przekształtniki trójpoziomowe. Opracowany układ napędowy zastępuje klasyczny silnik klatkowy i umożliwia: płynną regulację prędkości obrotowej w pełnym zakresie, pracę w czterech ćwiartkach układu współrzędnych moment – prędkość, quasi-sinusoidalne prądy sieci i współczynnik mocy bliski jedności. Omówione zagadnienia konstrukcyjne, a w szczególności przedstawione wyniki badań laboratoryjnych, potwierdzają bardzo dobre właściwości napędu zintegrowanego. Należy zaznaczyć, że w odróżnieniu od napędów niezintegrowanych proponowane rozwiązanie może zastępować bezpośrednio istniejące silniki (wymaga identycznych podłączeń elektrycznych i układu chłodzenia jak klasyczny silnik). Opracowany napęd zintegrowany ma wymiary geometryczne większe o około 75% w stosunku do samego silnika, a masę większą jedynie o 40%, cechuje się względnie wysoką sprawnością wynoszącą w warunkach pracy znamionowej 95,8%.

Literatura

- [1] PRZYBYŁKA J.: *Nowoczesne układy napędowe produkcji DFME „DAMEL” SA przeznaczone do pracy w strefach zagrożonych wybuchem z możliwością regulacji prędkości obrotowej i monitorowania pracy napędu*. „Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne” 76/2007.
- [2] NABAE A., TAKAHASHI I., AKAGI H.: *A new neutral-point-clamped PWM inverter*. IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 17, pp. 518–523, Sep.-Oct. 1981.
- [3] RODRIGUEZ J., BERNET S., STEIMER P.K., LIZAMA I.: *A survey on neutral-point-clamped inverters*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, pp. 2219–2230, Jul. 2010.
- [4] POU J., ZARAGOZA J., CELLABOS S., SAEEDIFARD M., BOROYEVICH D.: *A carrier-based PWM strategy with zero-sequence voltage injection for a three-level neutral-point-clamped converter*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 642–651, Feb. 2012.
- [5] BISKUP T., KOŁODZIEJ H., PALUSZCZAK D., SONTOWSKI J., MICHALAK J., ZYGMANOWSKI M.: *Przekształtnik 3-poziomowy NPC 3,3 kV do integracji z silnikiem klatkowym*. „Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne” 106/2015.
- [6] TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320-F28332, TMS320F28235, TMS320F28234, TMS320F28232, Digital Signal Controllers (DSCs). Data Manual, Texas Instruments, 2014.
- [7] ZYGMANOWSKI M., MICHALAK J., BISKUP T., KOŁODZIEJ H.: *Straty mocy w trójpoziomowym przekształtniku AC/DC/AC o napięciu 3,3 kV i mocy 1 MW*. „Przegląd Elektrotechniczny” R 92, nr 6, 2016.
- [8] ZYGMANOWSKI M., MICHALAK J., BISKUP T., KOŁODZIEJ H.: *Power loss evaluation for medium voltage drive system based on back-to-back three-level NPC converter integrated with induction machine*. 18th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE'16 ECCE Europe, Karlsruhe, Niemcy 2016, s. 1–10.

Informacje dodatkowe

Artykuł prezentuje wyniki związane ze zrealizowanym projektem współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka nr POIG.01.04.00-24-099/13, pt. *Dwukierunkowy przekształtnik częstotliwości średniego napięcia zintegrowany z silnikiem dużej mocy*.

dr inż. Tomasz Biskup – ENEL-PC Sp. z o.o.,

e-mail: t.biskup@enel-pc.pl;

dr inż. Henryk Kołodziej – ENEL-PC Sp. z o.o.,

e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl;

mgr inż. Dariusz Paluszcak – ENEL-PC Sp. z o.o.,

e-mail: d.paluszcak@enel-pc.pl;

mgr inż. Jacek Sontowski – ENEL-PC Sp. z o.o.,

e-mail: j.sontowski@enel-pc.pl;

dr inż. Jarosław Michalak – Politechnika Śląska,

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki,

e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl;

dr inż. Marcin Zygmanski – Politechnika Śląska,

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki,

e-mail: marcin.zygmanski@polsl.pl;

mgr inż. Krzysztof Kwaśniewski – DFME DAMEL SA,

e-mail: kkwasniewski@damel.com.pl

inż. Jacek Przybyłka – DFME DAMEL SA,

e-mail: jprzybylka@damel.com.pl