

Krzysztof WRÓBEL*
Krzysztof TOMCZEWSKI*

BADANIA SYMULACYJNE NAPĘDU Z PRZEŁĄCZALNYM SILNIKIEM RELUKTANCYJNYM ZE ZMODYFIKOWANYM UKŁADEM ZASILANIA C-DUMP

W artykule przedstawiono nowy układ typu C-dump przeznaczony do zasilania przełączalnych silników reluktancyjnych, będący modyfikacją układu przedstawionego w [1]. Omówiono budowę i zasadę jego działania. W układzie tym zastosowano niezależne sekcje zasilające dla każdego pasma silnika. Omówiono różnice w budowie i działaniu obu układów oraz ich wpływ na uzyskiwaną sprawność napędu. Przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych przebiegów prądów i momentu elektromagnetycznego. Zastosowanie nowego układu spowodowało wzrost sprawności napędu.

SŁOWA KLUCZOWE: przełączalny silnik reluktancyjny, SRM, napęd elektryczny, C-dump

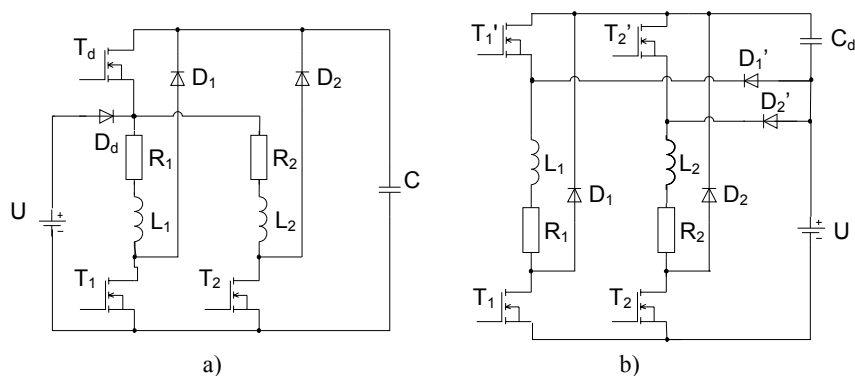
1. WSTĘP

W napędach z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi (SRM) układ zasilania ma duży wpływ na ich charakterystyki. Wpływ ten jest zdecydowanie większy, niż w napędach z silnikami przełączalnymi z magnesami trwałymi. Z tego powodu powstało wiele różnych topologii układów zasilania tych maszyn. Podstawowym i jednocześnie najbardziej rozpowszechnionym jest układ złożony z niezależnych półmostków H, z których każdy zasila jedno pasmo silnika [3]. Układ tego typu, pomimo szeregu zalet, nie pozwala w pełni wykorzystać możliwości silnika. W przypadku napędów z SRM najlepsze efekty można byłoby uzyskać zasilając pasma silnika prostokątnymi impulsami prądowymi w zakresie pracy silnikowej i wyłączając całkowicie przepływ prądu w uzwojeniach w zakresie pracy hamulcowej. W układach rzeczywistych, ze względu na inercję uzwojeń i dużą wartość siły elektromotorycznej rotacji, przy zasilaniu silnika ze źródła napięciowego warunki te pogarszają się wraz ze wzrostem prędkości.

Rozwiązaniem tego problemu może być zasilanie silnika ze źródła prądowego. Prowadzi to jednak do pogorszenia warunków pracy napędu w zakresie małych prędkości. Rozwiązanie kompromisowe stanowią układy typu C-dump, w których

* Politechnika Opolska.

kondensator pełni rolę dynamicznego źródła zasilania o podwyższonym napięciu. Umożliwiają one chwilowe zasilanie silnika wyższym napięciem w celu przyspieszenia procesów narastania i zaniku prądu w uzwojeniach. Dzięki temu przebiegi prądu stają się bardziej zbliżone do przebiegów prostokątnych. Układy te posiadają jednak również pewne wady spowodowane głównie koniecznością przełączania źródeł zasilania. Prezentowany w tej pracy układ jest modyfikacją układu przedstawionego w [1, 2, 5]. Poprzez wprowadzenie zmian w topologii tego układu uzyskano zmniejszenie strat komutacyjnych w zakresie niskich i średnich prędkości obrotowych i ograniczono generowanie momentu hamującego przez wyłączane pasma. Oba układy pokazano na rys. 1.

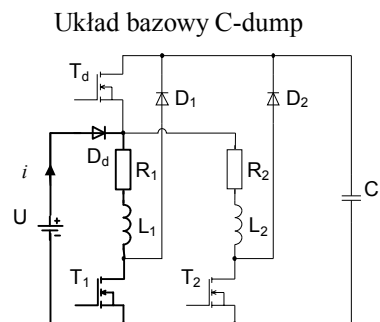


Rys. 1. Układ bazowy (a) i proponowany układ zasilania (b) dla silnika dwupasmowego

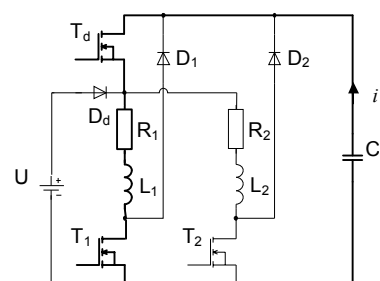
2. OPIS DZIAŁANIA UKŁADÓW

W proponowanym układzie wprowadzono następujące modyfikacje: w każdej sekcji zasilającej zastosowano niezależny tranzystor połączony z kondensatorem C-dump, natomiast kondensator podłączono do dodatniego bieguna źródła zasilania (szeregowo ze źródłem zasilania). W układzie bazowym [1] występuje wspólny tranzystor dla wszystkich sekcji zasilających, a kondensator połączony jest z ujemnym biegunem źródła zasilania (quasi-równolegle ze źródłem).

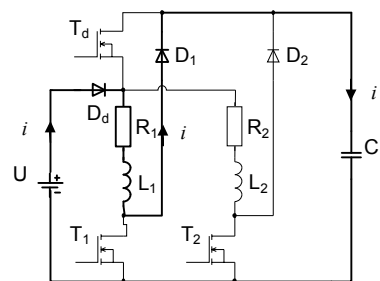
Na rys. 2. pokazano różne stany pracy obu układów. Stan zasilania napięciem znamionowym ze źródła zasilania Rys. 2a i 2b oraz stan pętli jałowej rys. 2g i 2h w obu układach nie różnią się między sobą. Istotne różnice występują w pozostałych stanach pracy. W stanie zasilania podwyższonym napięciem w układzie bazowym uzwojenie pasma zasilane jest z kondensatora (rys. 2c), natomiast w proponowanym układzie z połączonych szeregowo: źródła zasilania i kondensatora (rys. 2d). Dodatkowo, w proponowanym układzie, dzięki zastąpieniu tranzystora wspólnego niezależnymi tranzystorami we wszystkich sekcjach możliwe jest jednoczesne zasilanie jednego uzwojenia napięciem podwyższonym i zwrot energii z wyłączanego uzwojenia.



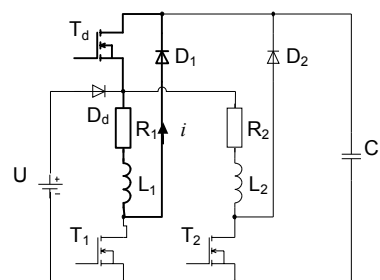
a) stan zasilania ze źródła $u_k \approx U$



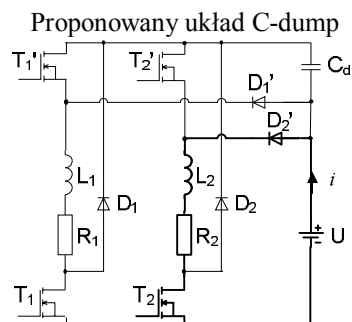
c) stan zasilania z kondensatora $u_k \approx u_C$



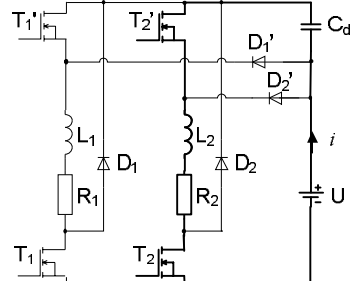
e) stan zwrotu energii $u_k \approx U - u_C$



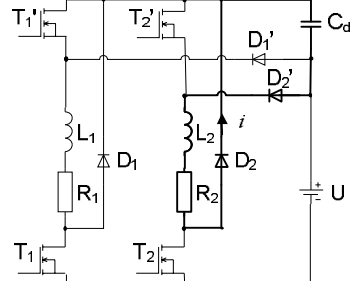
g) stan pętli jałowej $u_k \approx 0$



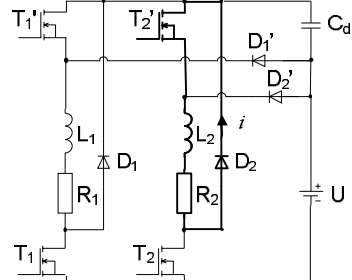
b) stan zasilania ze źródła $u_k \approx U$



d) stan zasilania z kondensatora $u_k \approx U + u_C$



f) stan zwrotu energii $u_k \approx -u_C$



h) stan pętli jałowej $u_k \approx 0$

Rys. 2. Stany pracy układu bazowego i układu zmodyfikowanego

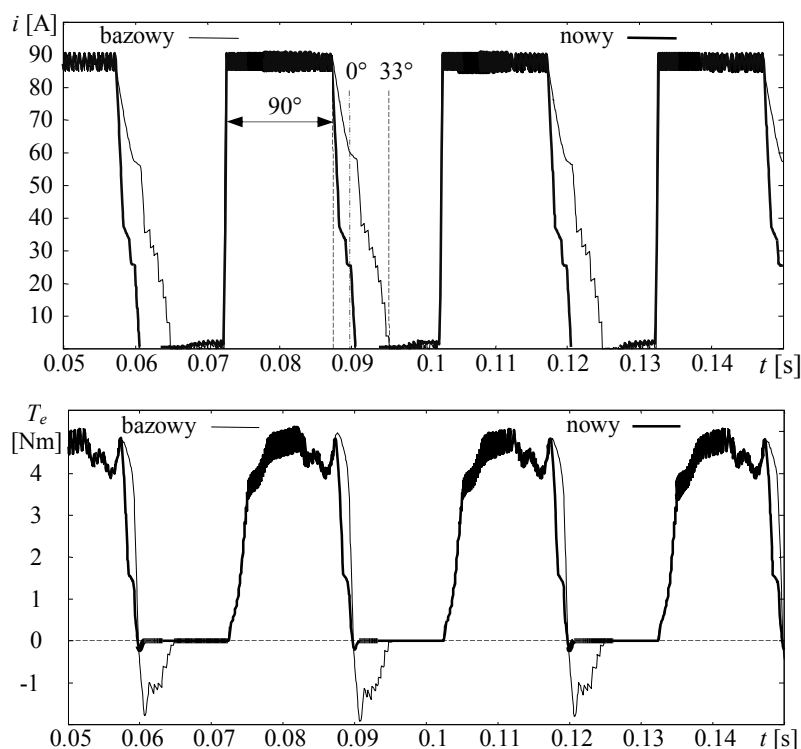
W układzie bazowym (rys. 1a) załączenie tranzystora wspólnego w celu zasilenia jednego uzwojenia napięciem podwyższonym uniemożliwia ładowanie kondensatora energią zwracaną z uzwojeń innego pasma, ponieważ jego załączenie powoduje przełączenie układu w stan pętli jałowej (rys. 2g).

Po wyłączeniu tranzystorów, w stanie zwrotu energii (ładowania kondensatora) w układzie bazowym (rys. 2e) prąd przepływa przez źródło zasilania w kierunku zgodnym z zasilaniem. W rezultacie w tym stanie pracy następuje pobór energii ze źródła. Jednocześnie w obwodzie przepływu prądu źródło zasilania i kondensator są spolaryzowane przeciwnie. Obniża to wartość napięcia wypadkowego na uzwojeniach pasma. W efekcie napięcie na uzwojeniu w trakcie zwrotu energii ma wartość niższą od napięcia zasilania, o wartość napięcia źródła. Powoduje to, że prąd w uzwojeniu zanika wolniej niż narasta w stanie zasilania podwyższonym napięciem. Czas rozładowania energii z uzwojeń z tego powodu wydłuża się. W proponowanym układzie (rys. 2f) występuje podobne obniżenie napięcia na uzwojeniach pasma, ponieważ energia z uzwojeń zwracana jest tylko do kondensatora, a w czasie zasilania pasma pobierana jest z szeregowo połączonych: źródła zasilania i kondensatora. Jednak w proponowanym układzie wyeliminowano przepływ prądu przez źródło zasilania podczas zwrotu energii do kondensatora. W związku z tym nie jest z niego pobierana dodatkowa energia powodująca wydłużenie procesu zaniku prądu.

3. WYNIKI SYMULACJI

Praca obu układów została zasymulowana w programie Matlab Simulink. Do obliczeń wykorzystano model SRM przedstawiony w [4]. Układy zasilania zamodelowano w programie PLECS. Obliczenia wykonano dla napędu z silnikiem dwupasmowym o danych znamionowych: napięcie zasilania – 36 V, prąd maksymalny – 90 A, moment 3,5 Nm przy prędkości 3600 obr/min (przy zasilaniu z układu typowego). Dokładniej silnik ten opisano w [4]. Podczas symulacji wyznaczono charakterystyki obu układów oraz przebiegi napięć, prądów i momentu w stanach ustalonych. W przypadku układu bazowego zwiększone napięcie podawano do silnika w przedziale pierwszych 10° zakresu kąta zasilania pasma. Dalej pasmo zasilano napięciem znamionowym w celu umożliwienia rozładowania energii z uzwojeń i doładowania kondensatora.

W proponowanym układzie, w zakresie niskich prędkości, tranzystory komutujące zwiększone napięcie załączano w całym przedziale kąta zasilania pasma. Dzięki temu, w zakresie sterowania prądowego, kondensator doładowywany jest tylko częściowo w początkowej części przedziału zasilania. Po osiągnięciu zadanej wartości prądu w paśmie, przy jego wyłączaniu, energia przekazywana jest bezpośrednio do uzwojeń kolejnego, załączanego pasma.



Rys. 3. Przebieg prądu pasma i momentu elektromagnetycznego generowanego przez jedno pasmo przy stosowaniu układu bazowego i proponowanego (kąt załączania zasilania pasma $\theta_{on} = -105^\circ$, kąt wyłączenia zasilania pasma $\theta_{off} = -15^\circ$)

Dzięki temu, w tym zakresie prędkości, średnia wartość napięcia zasilania pasma jest niższa niż w układzie bazowym, w którym kondensator musi być doładowywany w celu przyspieszenia procesu rozładowania energii.

Wpływa to bezpośrednio na obniżenie strat w tranzystorach. W tranzystorach kluczujących zwiększone napięcie T_k' nie ma strat komutacyjnych ze względu na ich ciągle załączenie w całym przedziale zasilania pasma, natomiast w tranzystorach komutujących od strony masy T_k straty komutacyjne są niższe niż w układzie bazowym ze względu na obniżoną wartość komutowanego napięcia. Dodatkowo, skrócenie czasu rozładowania energii z uzwojeń dzięki wyeliminowaniu przepływu prądu przez źródło zasilania powoduje obniżenie wartości momentów hamujących i ograniczenie strat w rezystancjach układu. Powoduje to wzrost średniej wartości momentu elektromagnetycznego i poprawia sprawność układu. Na końcu zakresu pracy ze stałym momentem dla układu bazowego, przy prędkości 5000 obr/min uzyskano sprawność odpowiednio: w układzie bazowym – 72% i w proponowanym układzie – 77%.

4. WNIOSKI

Stosowanie układów zasilania z kondensatorami C-dump w napędach z SRM umożliwia znaczne rozszerzenie zakresu prędkości i zwiększenie mocy napędu. Negatywną stroną tego rozwiązania jest zazwyczaj wzrost strat spowodowany przepływem prądu przez dodatkowe elementy. W przypadku omawianych układów nie zwiększono liczby elementów w stosunku do układu typowego złożonego z półmostków. Z zastosowaniem proponowanego układu uzyskano lepsze parametry napędu, co wynika z ograniczenia liczby komutacji i wartości komutowanego napięcia oraz skrócenia czasu rozładowania energii z uzwojeń i wyeliminowania poboru energii ze źródła w tym czasie.

LITERATURA

- [1] Ahmed M. Hava., Vladimir Blasko, Thomas A. Lipo: A Modified C-Dump Converter for Variable-Reluctance Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 5, 1992, pp. 1017-1022.
- [2] Hava A. M., Blasko V., Lipo T. A.: A Modified C-Dump Converter for Variable-Reluctance Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 5, 1992, pp. 1017-1022.
- [3] Miller T. J. E.: Switched reluctance motors and their control, Magna Physics, Oxford, 1993.
- [4] Tomczewski K.: Układy zasilania rozszerzające zakresy pracy przełączalnych silników reluktancyjnych. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
- [5] Yong-Ho Y., Sang-Hoon S., Tae-Won L., Chung-Yiien W., Gyu-Sik K.: High Performance Control of C-dump Converters fed Switched Reluctance Motor for Automobiles. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 20-25 June 2004, vol. 2, pp. 1322 – 1328.

SYMULATION STUDIES OF SWITCHED RELUCTANCE DRIVE BASED ON MODIFIED C-DUMP SUPPLY SYSTEM

In the article a new type of the C-dump converter type was presented, it was intended to supply switched reluctance drives, which is a modification of the configuration introduced in [1]. A structure and a principle of its working were discussed. In this construction independent supplying sections for each motor phase were used. Differences in construction and working both of the configurations and their influence on efficiency of the drive were discussed. Model results of simulation calculations of electromagnetic torque and phase current waveforms were presented. Applying the new system caused the increase in the efficiency of the drive.