

Wojciech Czuchra
Wojciech Mysiński
Waldemar Zajac
Politechnika Krakowska
Tadeusz Piatek
Politechnika Warszawska

Przekształtnik rezonansowy z transformatorem toroidalnym dla pojazdu tramwajowo-kolejowego

Aby zrealizować ideę komunikacji kolejowo-tramwajowej, niezbędne jest posiadanie pojazdu trakcyjnego, który będzie mógł być zasilany z sieci kolejowej 3300Vdc i typowej sieci tramwajowej 600Vdc. Jednym z rozwiązań jest zbudowanie przekształtnika obniżającego wysokie napięcie. W artykule przedstawiono projekt i wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika rezonansowego z transformatorem toroidalnym. Ze względu na zakres napięcia wejściowego 3300Vdc zastosowano konfigurację układu półmostka z szeregowym obwodem rezonansowym po stronie pierwotnej transformatora. Praca w trybie rezonansowym umożliwia zwiększenie częstotliwości pracy układu, dzięki temu mogą być mniejsze wymiary i masa transformatora. Głównym zastosowaniem przekształtnika ma być zasilanie układu napędowego (falownikowego) w dwusystemowym pojeździe tramwajowo-kolejowym 3000Vdc/600Vdc. Do tego celu został specjalnie zaprojektowany i wykonany transformator z nanokrystalicznym rdzeniem toroidalnym o mocy czynnej 120kW. Artykuł zawiera wyniki badań sprawności przekształtnika rezonansowego.

Wstęp

Połączenie systemu komunikacji kolejowej i miejskiej tramwajowej wprowadziło by nową jakość w komunikacji aglomeracyjnej. Są przykłady takich rozwiązań w innych krajach, ale są to rozwiązania dla innych systemów zasilania niż stosowane w Polsce. W ostatnim czasie są takie przedsięwzięcia podejmowane w aglomeracji krakowskiej, gdańskiej, szczecińskiej czy na WKD. Dla realizacji tych idei niezbędne jest posiadanie pojazdu dwusystemowego tramwajowo-kolejowego. Najtańszym rozwiązaniem jest modernizacja pojazdu tramwajowego na dwusystemowy poprzez zabudowę przekształtnika (minimum dwóch sztuk) omówionego w tym artykule [1]. W świetle ciągle obowiązujących przepisów niezbędne jest zapewnienie izolacji galwanicznej przy zasilaniu z 3000V.

Proponowane przez autorów rozwiązanie oparte na konfiguracji rezonansowego przekształtnika obniżającego napięcie z toroidalnym transformatorem wykonanym na rdzeniu nanokrystalicznym spełnia to zadanie. Specjalnie wykonany na zamówienie transformator, pracujący w zakresie średnich częstotliwości pozwala na obniżenie masy urządzenia i zabudowy w istniejących pojazdach tramwajowych, albo produkcji nowych na napięcie 600V, mogących jeździć pod sieć 3000V [2][3].

Wymagania dla przekształtnika

Aby można było zaprojektować i użytkować układy mocy w systemach napędowych pojazdów trakcyjnych kolejowych i tramwajowych należy przedstawić główne założenia projektowe i znać specyfikę parametrów sieci trakcyjnej kolejowej i tramwajowej. Główne założenia projektowe dla pojazdu dwusystemowego 3000Vdc/600Vdc

- nominalne napięcie zasilania 3000Vdc, dopuszczalny zakres napięcia zasilania od 2200Vdc do 3900Vdc,
- nominalne napięcie wyjściowe z przekształtnika 600Vdc, dopuszczalny zakres napięcia od 420Vdc do 750Vdc,
- moc na cele trakcyjne jednego przekształtnika do 120kW przy napięciu nominalnym 600V,
- maksymalne tętnienia napięcia wyjściowego przy maksymalnym obciążeniu 10%,
- przy granicznych wartościach napięcia zasilania, moc maksymalna ograniczona,
- jeden pantograf na 3000Vdc/600Vdc,
- jeden przełączalny filtr wejściowy dla 3000Vdc i dla 600Vdc,

Głównym zadaniem przekształtnika będzie przetworzenie napięcia wysokiego, które może się zmieniać w dość dużym zakresie, na napięcie 600Vdc i stabilizację w pewnych granicach tego napięcia przy zmienia-

jącym się obciążeniu.

Zakłada się, że można zastosować dwa lub więcej układów przekształtnikowych na pojeździe aby otrzymać wymaganą moc trakcyjną. Obciążeniem przekształtnika będzie falownikowy napęd asynchroniczny.

Ze względu na wysoki poziom napięcia wejściowego 3000Vdc oraz prąd około 200A należy stosować tranzystory mocy typu IGBT na napięcie pracy 6.5kV. Dostępne tranzystory mocy, umożliwiają praktyczną częstotliwości przełączania około 300 do 400Hz przy tzw. twardym przełączaniu i około 1.5kHz do 2kHz przy przełączaniu w układach rezonansowych. W celu zwiększenia częstotliwość przełączania tranzystorów IGBT bez zwiększania strat mocy na tych elementach, można zastosować konfigurację przekształtnika z szeregowym obwodem rezonansowym wraz z transformatorem obniżającym napięcie, (Rys.1). W takim układzie mamy do czynienia z tzw. miękkim przełączaniem tranzystorów (przełączanie następuje przy prawie zerowym prądzie kolektora) i częstotliwość można zwiększyć do około 1kHz - 2kHz. Dzięki temu, wymiary transformatora też będą mniejsze, ale wymagany jest odpowiedni materiał magnetyczny na rdzeń transformatora aby uzyskać niskie straty mocy.

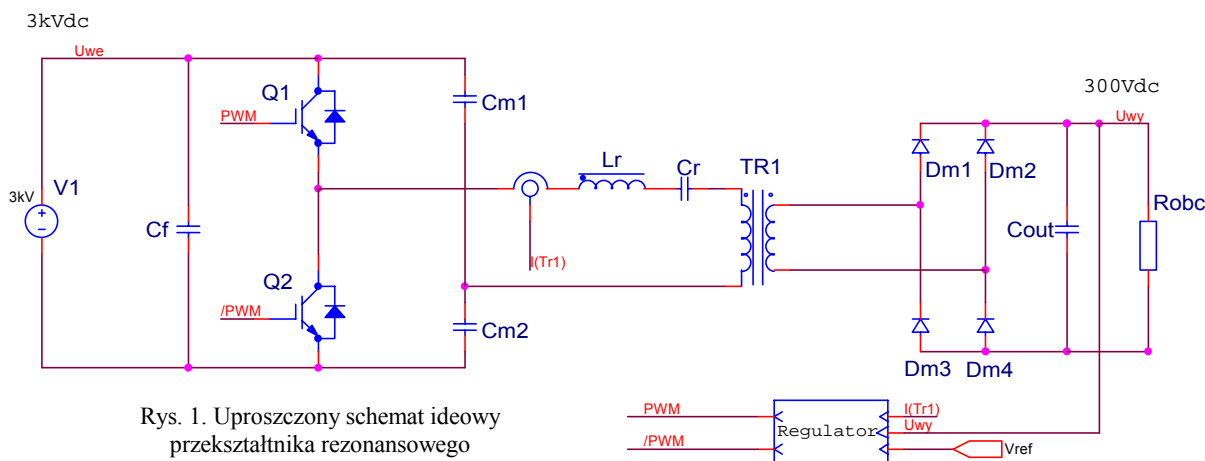
Zalety układu rezonansowego z transformatorem:

- izolacja galwaniczna,
- wysoka częstotliwość pracy tranzystorów, miękkie przełączanie,
- tylko dwa tranzystory mocy
- relatywnie mniejsze gabaryty i masa transformatora

Wady:

- mały zakres regulacji (stabilizacji napięcia wyjściowego)
- rozbudowany układ sterowania i kontroli,
- wymagany dodatkowy kondensator i dławik mocy,
- brak możliwości hamowania odzyskowego

Wstępnie zaprojektowano i wykonano układ przekształtnika, który składa się z następujących elementów (Rys.1):



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowy przekształtnika rezonansowego

- filtru wejściowego LC,
- stopnia mocy w układzie półmostka,
- szeregowego układu rezonansowego LC wraz indukcyjnością rozproszenia transformatora,
- transformatora toroidalnego obniżającego napięcie,
- prostownika dwupołówkowego z pojemnościowym filtrem wyjściowym.

Przyjęto następujące założenia konstrukcyjne:

Przyjęto następujące założenia konstrukcyjne: (dla wersji z obwodem rez. po stronie pierwotnej)

- częstotliwość rezonansowa na poziomie 2kHz, a moc odbiornika 120kW
- tranzystory w układzie półmostka FZ600R65KF1,
- kondensator wejściowy Cf w obwodzie DC o wartości 560μF,
- kondensatory w układzie półmostka $Cm1=Cm2=Cr/2=11,25\mu F$, (pracujące jako kondensator rezonansowy) - układ rezonansowy $Lr=80\mu H$ i $Cr=22,5\mu F$, ($Cr=2 \times 11,25\mu F=22,5\mu F$),
- wyjściowy prostownik niesterowany,
- kondensator wyjściowy $Cout=8000\mu F$,
- transformator $U_{nwe}=1650V$, $U_{nwy}=330V$, przekładnia $n=5$, moc $P_n=120kW$, napięcie zwarcia=1.6%, indukcyjność rozproszenia $116\mu H$, (wypadkowa indukcyjność rezonansowa $116\mu H+80\mu H=196\mu H$)

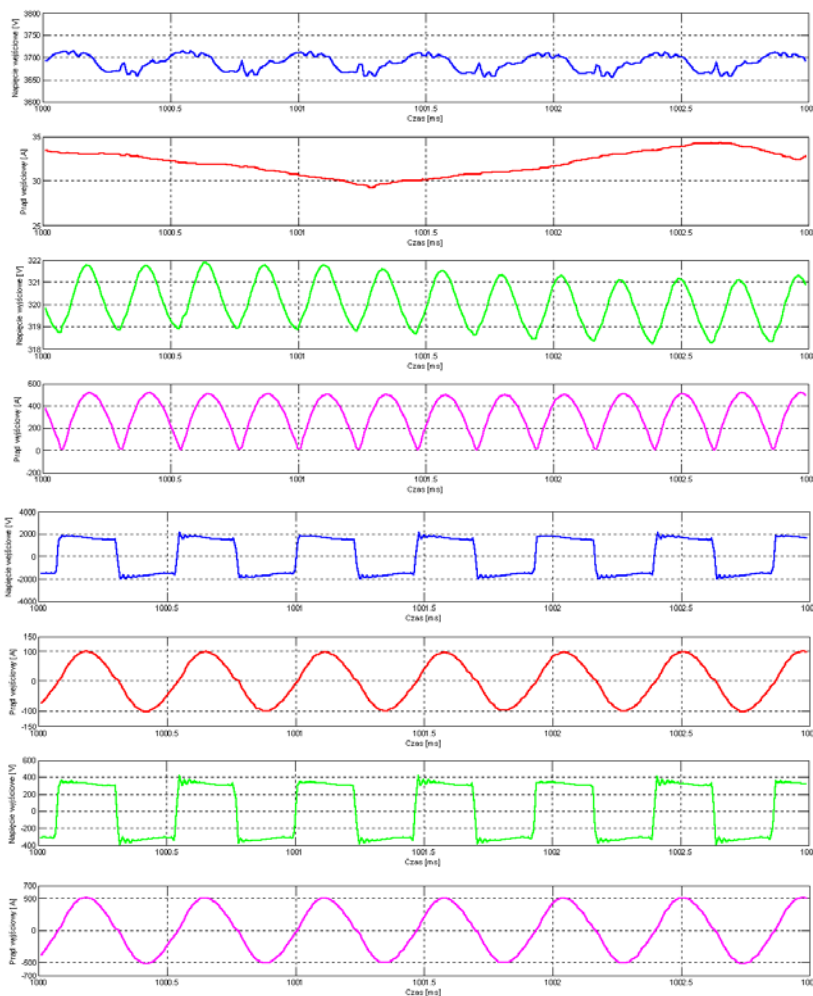
Projekt transformatora mocy

Jednym z najważniejszych elementów przekształtnika jest transformator obniżający napięcie. Dla celów trakcyjnych, szczególnie dla pojazdu tramwajowego, masa takiego transformatora ma istotne znaczenie. Z tego powodu główne założenie dla projektu transformatora było zastosowanie materiałów nanokrystalicznych, dzięki którym można otrzymać transformator o małych gabarytach i dużej sprawności dla częstotliwości pracy ok. 2kHz.

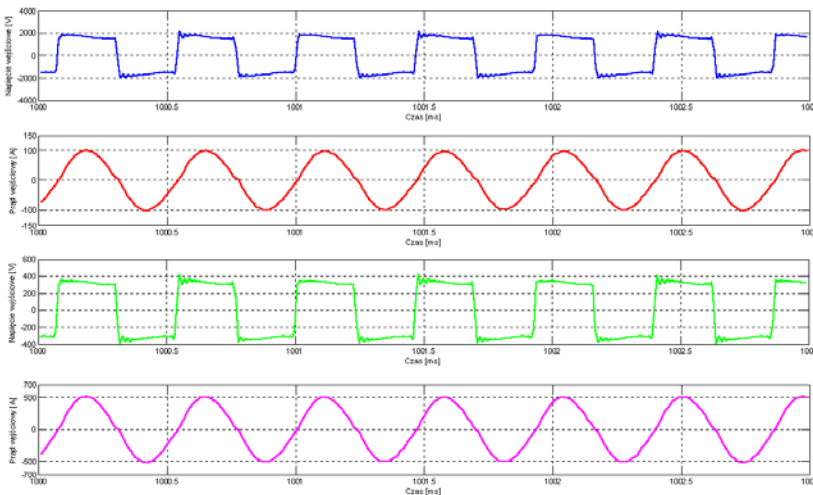
Dla wybranej konfiguracji, mocy i przeznaczenia przekształtnika, zaprojektowano kilka typów transformatorów z różnych materiałów ale wykonano jeden typ transformatora o mocy 120kW z rdzeniem nanokrystalicznym toroidalnym. Jest to transformator do przetwarzania energii na średnich częstotliwościach do kilkudziesięciu kHz, co pozwoliło na obniżenie masy transformatora. Ograniczenie częstotliwości do 2 - 3kHz wynika z możliwości przełączających tranzystorów mocy o napięciu nominalnym 6.5kV. Dla tak przyjętej częstotliwości, wykonany transformator o mocy 120kW waży tylko 64kg, przy wadze transformatora z blach zwijanych 0.15mm i częstotliwości pracy 400Hz 134kg i transformatorze klasycznym kolumnowym o częstotliwości 50Hz, 380kg.

Badania laboratoryjne przekształtnika rezonansowego

Na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w aparaturę pomiarową wykonano badania prototypu przekształtnika obciążonego zestawem rezystorów dużej mocy (Rys.4). Badania obejmowały pomiar i rejestrację sygnałów wejściowych i wyjściowych całego przekształtnika jak również samego transformatora mocy. Do pomiaru przebiegów wejściowych i wyjściowych zostały wykorzystane przetworniki prądowe i napięciowe typu LEM, napięciowe sondy różnicowe, sonda wysokonapięciowa Tektronix oraz prądowa sonda oscyloskopowa. Przebiegi ze wszystkich ośmiu punktów pomiarowych zostały zarejestrowane przez



Rys. 2. Przebiegi napięć i prądów na wejściu i wyjściu przekształtnika przy $f=2,2\text{kHz}$, $P_{\text{obc}}=115\text{kW}$, obwód rezonansowy o stronie pierwotnej



Rys. 3. Przebiegi napięć i prądów na transformatorze przy $f=2,2\text{kHz}$, $P_{\text{obc}}=115\text{kW}$, obwód rezonansowy o stronie pierwotnej

system akwizycji danych typu DEWE-43, o rozdzielczości 24-bitowej i przesłane do komputera. Parametry przeprowadzonych pomiarów i rejestracji, dobrane zostały odpowiednio do wartości i pasma częstotliwości analizowanych sygnałów. Częstotliwość próbkowania przetwornika pomiarowego wynosiła 100kHz na kanał, czas pomiaru wyniósł około 1s z czego do obliczeń sprawności wybrano przedział 100ms. Badania laboratoryjne obejmowały różne konfiguracje pracy przekształtnika dla kilku częstotliwości rezonansowych:

- praca w stanie ustalonym, obwód rezonansowy po stronie pierwotnej,
- praca w stanie ustalonym, obwód rezonansowy po stronie wtórnej,

Przykładowe wyniki pomiarów zamieszczono w formie oscylogramów na rysunku 2 i rysunku 3. Zdjęcie transformatora na stanowisku laboratoryjnym jest przedstawione na rysunku 4.

Ze względu na zaprojektowany transformator obecna wersja przekształtnika dostarczała napięcia wyjścio-

wego na poziomie 315V ale w docelowym przekształtniku, na wyjściu transformatora będzie układ podwajacza napięcia do poziomu 630V.

Głównym celem badań laboratoryjnych było sprawdzenie poprawności działania stopnia mocy, stopnia sterowania oraz określenie dla jakich częstotliwości (powyżej czy poniżej częstotliwości rezonansowej) cały układ ma największą sprawność. Na podstawie przeprowadzonych badań dla różnych konfiguracji, kilku częstotliwości rezonansowych oraz pracy układu przekształtnika przy częstotliwościach poniżej i powyżej częstotliwości rezonansowej wyznaczono sprawności. Wyniki są przedstawione w tabelce 1.

Tabela 1. Wyniki otrzymanych sprawności układu dla kilku częstotliwości pracy, przy frez=2.2kHz

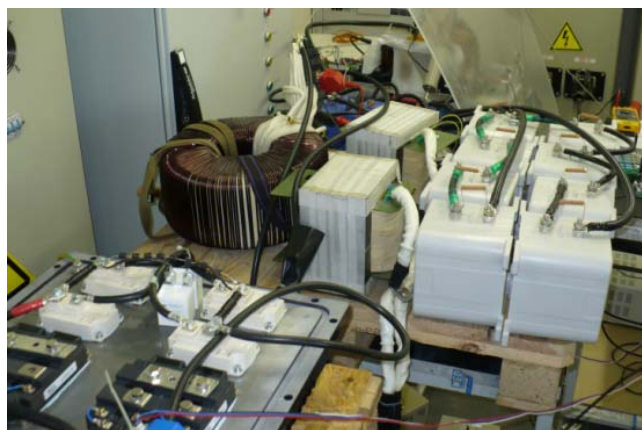
f[kHz]	P _o [W]	P _{in} [W]	η[%]
1,84	105870,85	110142,86	96
1,9	105897,72	110499,09	95,83
2,0	106101,99	110839,99	95,7
2,1	104984,11	110421,21	95,07
2,2	105487,34	110859,64	95,15
2,3	104721,1	110284,64	94,96
2,4	105043,61	110224,83	95,29
2,5	104490,86	109212,89	95,6
2,6	103453,7	108057,66	95,7
2,7	103398,79	108125,18	95,63

Jak można zauważyć sprawność układu rośnie przy pracy poniżej częstotliwości rezonansowej. Otrzyma-
ne wartości sprawności są bardzo wysokie.

Podsumowanie

Badania laboratoryjne przekształtnika wykazały wysoką jakość przetwarzania energii, na co się składa dobrze zaprojektowany i wykonany transformator oraz stopień mocy przekształtnika. Kolejnym etapem będą badania dynamiczne przekształtnika w celu doboru właściwego układu regulacji i sterowania. Następnym etapem badań nad przekształtnikiem będzie sprawdzenie poziomu generowanych zakłóceń elektromagnetycznych ECM promieniowych i przewodzonych. Co ma istotny wpływ na sieć trakcyjną i urządzenia sterowania ruchem. Z powodu, że częstotliwość pracy przekształtnika nie jest stała, (będzie się zmieniać w pewnych granicach) to może mieć wpływ na poziom zakłóceń, szczególnie dla urządzeń torowych.

Wyniki badań układu przekształtnika rezonan-
owego są zadowalające, co pozwala sądzić że będzie możliwe zbudowanie układu o mocy rzędu 200-300kW. Zastosowany kształt i typ rdzenia transformatora oraz możliwości projektowo-konstrukcyjne wykonawców umożliwiają zbudowanie transformatora toroidalnego o tak dużej mocy i małych wymiarach, który będzie spełniał wymagania kolejowo-tramajowe.



Rys. 4. Zdjęcie transformatora na stanowisku laboratoryjnym

Projekt i realizacja przekształtnika oraz transformatora zostały przygotowane w ramach Projektu Celowego nr 6 ZR6 2008C/07039.

Literatura

- [1]. Tadeusz Płatek, Wojciech Mysiński, Waldemar Zajac, „Przekształtnik podwyższający napięcie 600V/3000V DC dla dwusystemowych pojazdów trakcyjnych”. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, SEMTRAK 2010, Zakopane, 14-16.10.2010
- [2]. Wojciech Mysiński, Waldemar Zajac, Grzegorz Skarpetowski, “Solutions of main circuit for double-system 3000Vdc/600Vdc rail vehicle”, rozdział nr 3 w monografii *Modern Electric Traction – Vehicles*, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ISBN:83-911669-6-1, Gdańsk 2009
- [3]. Wojciech Mysiński, Waldemar Zajac, Grzegorz Skarpetowski, „Rozwiązania obwodu głównego dla dwusystemowego pojazdu trakcyjnego 3000Vdc/600Vdc”, 9th International Conference *Modern Electric Traction 2009*, Gdańsk
- [4]. M. Kowalczewski, W. Mysiński, W. Zajac. „Przekształtnik obniżający napięcie dla tramwaju dwusystemowego, badania symulacyjne i laboratoryjne”. VII Międzynarodowa Konferencja *Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI wieku. (MET 2005)*. Warszawa 29.09.-01.10.2005, str. 185
- [5]. M. Kowalczewski, W. Mysiński, W. Zajac. „A step-down multi-phase converter, based on IGBT technology, for traction applications”. 10th International Conference. *EPE-PEMC 2002*, 9-11.09. 2002 Cavtat-Dubrownik, Chorwacja
- [6]. M.Steiner, H.Reinold “Medium Frequency Topology in Railway Applications”. *EPE2007 Aalborg Denmark*
- [7]. M.Carpita, M.Pellerin, J.Herminjard. “Medium frequency transformer for traction applications making use of multilevel converter: Small scale prototype test results”. *SPEEDAM 2006*