ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2011
ZESZYT 13
ROK 108
ISSUE 13
YEAR 108

TADEUSZ PŁATEK*, WOJCIECH MYSIŃSKI**, WALDEMAR ZAJĄC***

PRZEKSZTAŁTNIK PODWYŻSZAJĄCY NAPIĘCIE 600 V NA 3000 V DLA DWUSYSTEMOWEGO POJAZDU TRAKCYJNEGO

A STEP-UP MULTI-PHASE CONVERTER 600 VDC/3000 VDC FOR DUAL SYSTEM TRACTION VEHICLES

Streszczenie

W Europie rozwija się idea zbiorowego transportu zintegrowanego w aglomeracjach miejskich. Powstają dwusystemowe pojazdy tramwajowo-kolejowe, ale są one przystosowane do innych systemów zasilania niż stosowanych w Polsce. W ostatnim czasie takie przedsięwzięcia podejmowane są w aglomeracji krakowskiej, szczecińskiej oraz przez WKD w Warszawie. Aby można było zrealizować takie połączenie, wymagane jest zbudowanie nowoczesnego pojazdu dwusystemowego, który miałby możliwość jazdy zarówno w systemie trakcji kolejowej 3000 Vdc, jak i w systemie trakcji tramwajowej 600 Vdc. Nowoczesne i niezawodne rozwiązanie układu zasilania pojazdu dwusystemowego powinno zapewnić dużą sprawność, małe wymiary i masę oraz niski koszt przekształtnika. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika opartego na konfiguracji wielofazowego układu podwyższającego napięcie (ang. *multiphase boost converter, step-up converter*) (600 Vdc na 2400 Vdc).

Słowa kluczowe: pojazd dwusystemowy, wielofazowy przekształtnik podwyższający napięcie, naprzemienny przekształtnik podwyższający, symulacja, wyniki laboratoryjne

Abstract

The launch of an integrated public transport system in large cities and surrounding areas (e.g. in Kraków, Warszawa and its conurbation) requires the railway network and tram network to be combined by means of a sufficient number of link points. The operation of such an integrated system will also require modern dual-system tramcars. As there is a difference in voltage between the two overhead supply systems, it is necessary to build a converter enabling tramcars to run on two different traction voltages, $3000V_{DC}$ and $600V_{DC}$. A modern and reliable solution of the power supply system of a dual system tram is expected to feature such performance properties as high reliability, small dimensions and weight of the converter and low cost. This article discusses the advantages and disadvantages of solutions based on an interleaved (multiphase) boost converter, (600Vdc – 2400Vdc). Some simulations results are presented, too.

Keywords: dual system tram car, multiphase boost converter, interleaved boost converter, step-up converter, simulation, laboratory results

* Dr inż. Tadeusz Płatek, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska.

** Dr inż. Wojciech Mysiński, Katedra Elektrotechniki i Elektroniki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

*** Dr inż. Waldemar Zając, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektronicznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

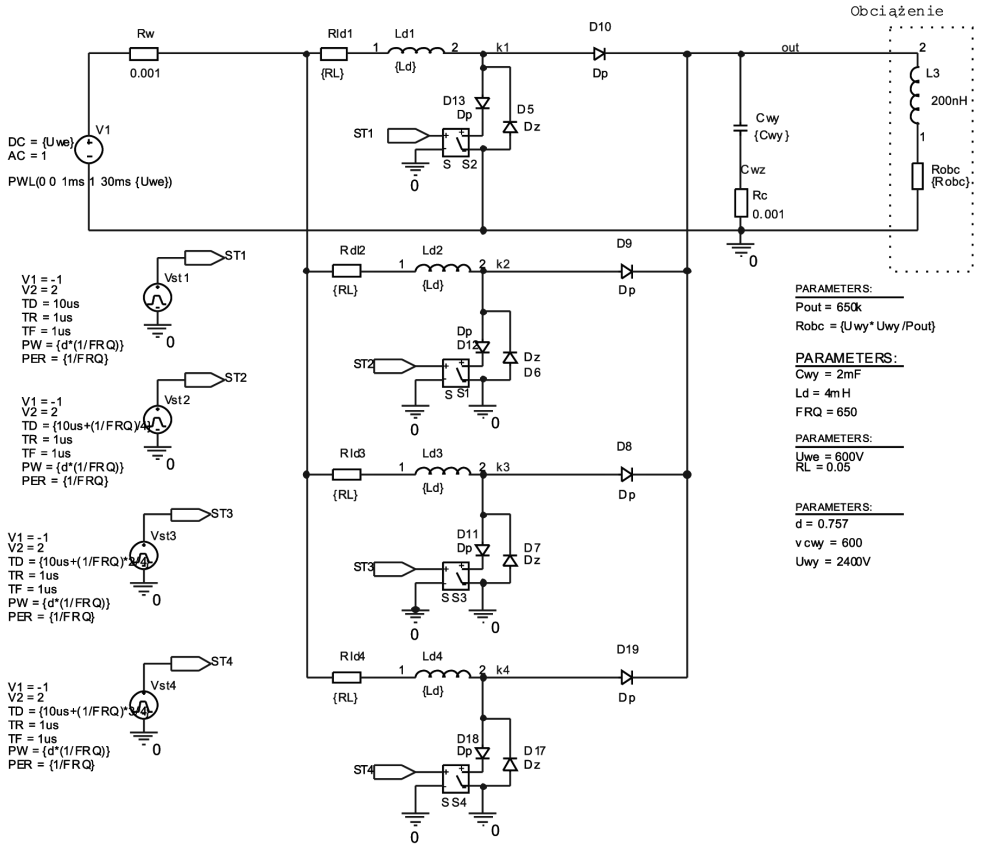
1. Wstęp

W Europie rozwija się idea zbiorowego transportu zintegrowanego w aglomeracjach miejskich. Powstają dwusystemowe pojazdy tramwajowo-kolejowe, ale są one przeznaczone dla innych systemów zasilania niż stosowanych w Polsce. W ostatnim czasie takie przedsięwzięcia podejmowane są w aglomeracji krakowskiej, szczecińskiej oraz przez WKD w Warszawie. Aby można było zrealizować takie połączenie, wymagane jest zbudowanie pojazdu dwusystemowego, który miałby możliwość jazdy zarówno w systemie trakcji kolejowej 3000 Vdc, jak i w systemie trakcji tramwajowej 600 Vdc. W artykule omówiono rozwiązanie oparte na konfiguracji wielofazowego układu podwyższającego napięcie (*multiphase boost converter, step-up converter*). Obecne moduły mocy IGBT na 6,5 kV pozwalają budować niezawodne i efektywne układy przetwarzające napięcie 3000 Vdc na 600 Vdc lub odwrotnie o mocy rzędu setek kilowatów.

2. Układ wielofazowy podwyższający napięcie

Przy założeniu, że cały pojazd trakcyjny będzie zwymiarowany na napięcie zasilania 3000 Vdc, to w tym przypadku jest wymagany układ podwyższający napięcie z 600 Vdc na 2400 Vdc. Napięcie o wartości 2400 Vdc jest wystarczające do zasilania falownikowego układu napędowego. Do podwyższenia napięcia można zastosować układ zasilacza impulsowego w tzw. konfiguracji podwyższającej napięcie (*step-up converter* lub *boost converter*) (rys. 1). Na podstawie doświadczeń i rozeznania literaturowego wielofazowy układ podwyższający napięcie w pojeździe dwusystemowym charakteryzuje się następującymi właściwościami: zmniejszenie tętnień prądu wejściowego i wyjściowego, zmniejszenie indukcyjności i wymiarów dławików szeregowych, mniejsze prądy przez elementy półprzewodnikowe, przełącznik systemu przy zasilaniu 3000 V tylko dla redukcji strat w dławikach szeregowych, układ z podwójną filtracją dla zasilania 3000 V. Należy się też liczyć z ograniczeniami i wadami takiego rozwiązania: niska częstotliwość przełączania tranzystorów mocy, relatywnie duże wartości dławików mocy (kilka mH), duży współczynnik wysterowania tranzystorów mocy, straty mocy na tranzystorach, bardziej rozbudowany system regulacji całego układu, wymagane kontrolowanie prądu każdego dławika szeregowego.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 1. Schemat przekształtnika czterofazowego podnoszącego napięcie, przyjęty do badań symulacyjnych

Fig. 1. Schematic circuit diagram of the four phase step-up converter for simulation programme

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.

Do obliczeń przyjęto następujące parametry przekształtnika i warunki wstępne:

– napięcie wejściowe nominalne Uwe = 600 V (Uwemin = 420 V, Uwemax = 720 V),
– napięcie wyjściowe nominalne Uwy = 2400 V dla Pmax = 650 kW,
– przekładnia przekształtnika N = 600/2400 = 1:4 = 0,25,
– prąd maksymalny Iwymax = 270 A (Pmax = 650 kW),
– częstotliwość sterowania tranzystorów f = 650 Hz,
– indukcyjność dławika obwodu głównego 4 mH,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– założono wstępnie ciągły tryb pracy przekształtnika, tzw. CCM (CCM – *Continuous Conduction Mode*), oznacza to, że minimalny chwilowy prąd pojedynczego dławika może się zbliżyć do wartości bliskiej zero tylko dla obciążenia minimalnego,
– rozpatrywany jest też tryb pracy nieciągłej tzw. DCM (DCM – *Discontinuous Conduction Mode*), co spowoduje, że chwilowy prąd pojedynczego dławika może mieć wartość zerową,
– liczba gałęzi równoległych (faz) pracujących naprzemiennie M = 4.

Głównym zadaniem przekształtnika będzie przetworzenie niskiego napięcia wejściowego, które może się zmieniać w dość dużym zakresie (420 V–720 V), na napięcie 2400 Vdc i stabilizację w pewnych granicach tego napięcia przy zmieniającym się obciążeniu. Zakłada się, że można zastosować dwa lub więcej układów w pojeździe. Obciążeniem przekształtnika będzie falownikowy napęd asynchroniczny. Do badań symulacyjnych w programie Pspice przyjęto model zastępczy układu, przedstawiony na rys. 1. Do wstępnych symulacji zrezygnowano z dokładnych modeli elementów półprzewodnikowych, pasożytniczych indukcyjności połączeń i pasożytniczych pojemności w układzie. W modelu dławika zastosowano tyko rezystancję zastępczą. Sumaryczną rezystancję źródła napięcia wejściowego i dławika filtru wejściowego przyjęto Rw = 1 mΩ.

Elementy półprzewodnikowe:
– ze względu na możliwe do zastosowania tranzystory mocy i diody mocy (moduły IGBT typu FD800R33KF2C, firmy Infineon) chwilowe maksymalne prądy nie mogą przekroczyć około 1000 A.

Parametry zastępcze kondensatora:
– ze względu na ograniczoną dostępność kondensatorów wyjściowych do tego typu przekształtnika przyjęto pojemność pojedynczego kondensatora wyjściowego Cwy = 2000 μF, rezystancja wewnętrzna Rc = 1 mΩ.

Parametry zastępcze dławików:
– po szacunkowych obliczeniach wstępnie przyjmuje się, że indukcyjność pojedynczego dławika będzie miała wartość około 4 mH,
– dla tego typu dławików dla prądu około 500 A przyjęto rezystancję wewnętrzną Rd = 50 mΩ.

Obliczenia współczynnika wypełnienia

Dla przekształtnika typu DC/DC podnoszącego napięcie wartość średnia napięcia wyjściowego w funkcji współczynnika wypełnienia sterowania tranzystora jest wyrażona wzorem (1a).

$$U\text{wy} = U\text{we}\left(\frac{1}{1-d}\right) \tag{1a}$$

$$U\text{wy} = U\text{we}^{*}\frac{1+\sqrt{1+\frac{4\cdot d^2}{K}}}{2} \tag{1b}$$

gdzie:

$$K = \frac{2\cdot L\cdot f}{Robc}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wzór ten jest prawdziwy dla układu idealnego przy założeniu ciągłości prądu przez dławik i zerowych spadkach napięć na rezystancji dławika, diodzie, tranzystorze i zerowej rezystancji wewnętrznej źródła oraz założeniu, że kondensator wyjściowy jest idealny o bardzo dużej pojemności. Jak widać napięcie wyjściowe zależy tylko od napięcia wejściowego i współczynnika wypełnienia.

Jeżeli układ pracuje w trybie nieciągłym, to napięcie wyjściowe jest wyrażone wzorem (1b) i wtedy wartość tego napięcia zależy od: napięcia wejściowego, współczynnika wypełnienia, indukcyjności dławika, rezystancji obciążenia i częstotliwości sterowania. W dalszych rozważaniach przyjęto, że projektowany przekształtnik będzie pracował w trybie ciągłym w zakresie od ok. 35% do 100% mocy wyjściowej.

Aby obliczyć wymagany współczynnik wypełnia, do uzyskania zadanego napięcia wyjściowego można zastosować wzór

$$d = \frac{U\text{wy} - U\text{we}}{U\text{wy}} \tag{2}$$

Na podstawie minimalnej wartości napięcia wejściowego Uwemin = 420 V można wyliczyć (zgodnie ze wzorem 2) maksymalny współczynnik wypełnienia dmax dla otrzymania Uwy = 2400 V, a dla maksymalnej wartości napięcia wejściowego Uwemax = 720 V można wyliczyć minimalny współczynnik $d$mim, dla otrzymania Uwy = 2400 V.

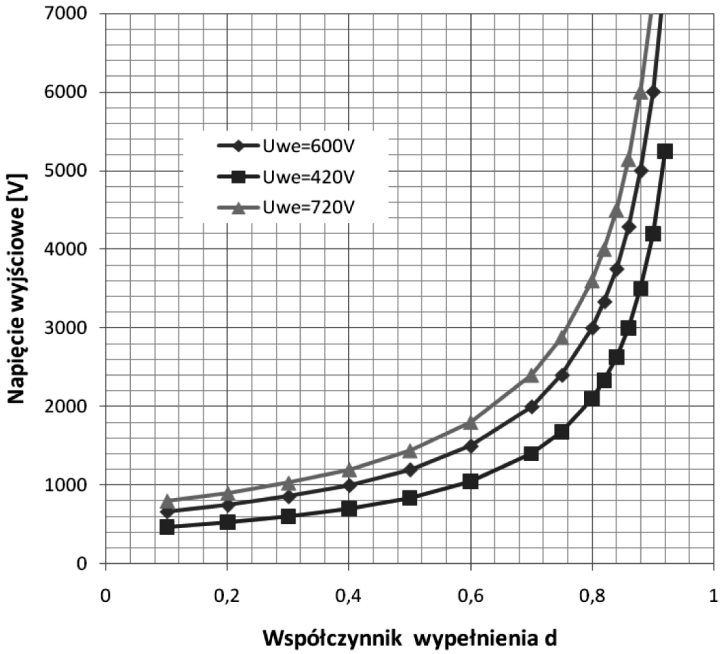
$$d\text{max} = \frac{U\text{wy} - U\text{wemin}}{U\text{wy}} \qquad d\text{min} = \frac{U\text{wy} - U\text{wemax}}{U\text{wy}} \tag{3}$$

Obliczone współczynniki wysterowania tranzystorów mocy:
- Uwe = 420 V $d$max = 0,825,
- Uwe = 600 V $d$nom = 0,75,
- Uwe = 720 V $d$min = 0,7.

Ważne jest też, jak wygląda charakterystyka napięcia wyjściowego przy granicznych wartościach napięcia wejściowego w funkcji współczynnika wypełnienia.

Jak można zauważyć na poszczególnych wykresach w zakresie od 0,7 do 0,9 jest bardzo nieliniowa zależność napięcia wyjściowego od współczynnika d. Dodatkowo, zmienność napięcia wejściowego od 420 V do 720 V przy stałej wartości współczynnika, np. d = 0,75, może spowodować skok napięcia wyjściowego od 1500 V do 2700 V. Niestety, wartość przełożenia N = 4 przekształtnika podnoszącego napięcie powoduje, że układ sterowania i regulacji do stabilizacji napięcia wyjściowego musi być bardzo dobrze dobrany i musi reagować na skokowe zmiany napięcia wejściowego, co w warunkach trakcyjnych jest dosyć często spotykane.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 2. Wykres zależności napięcia wyjściowego od współczynnika wypełnienia *d* dla napięcia wejściowego minimalnego, nominalnego i maksymalnego

Fig. 2. Output voltage vs. duty cycle for minimum, nominal and maximum input voltage

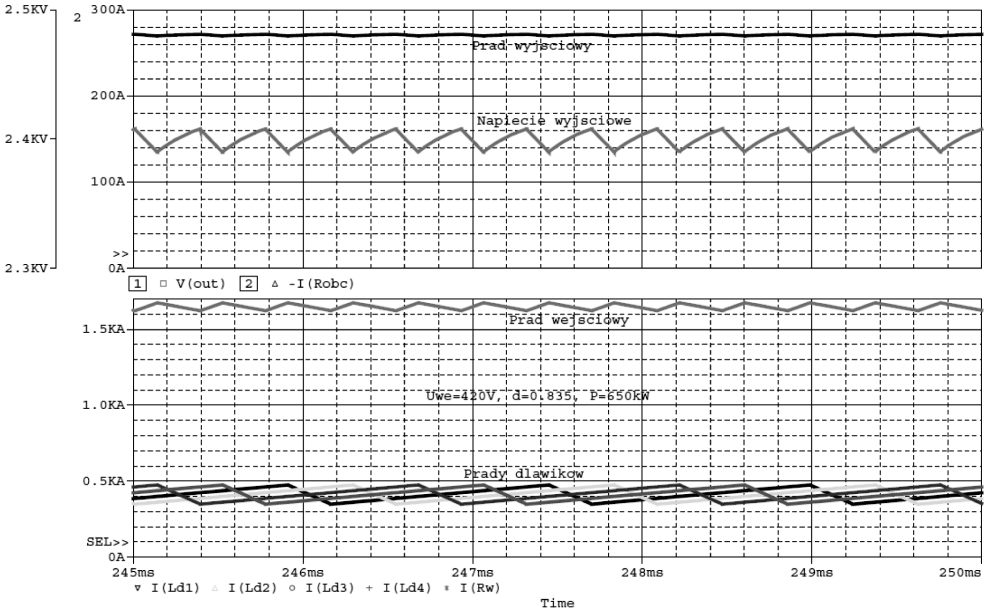
4. Badania symulacyjne

Przeprowadzono obliczenia symulacyjne w programie Pspice układu z rys. 1. Do symulacji przyjęto następujące parametry:

- indukcyjność pojedynczego dławika Ld = 4 mH o rezystancji Rl = 50 mΩ,
- kondensator wyjściowy Cwy = 2 mF, ESR = 1 mΩ,
- indukcyjność połączenia przekształtnika i falownika 200 nH,
- częstotliwość sterowania pojedynczego tranzystora f = 650 Hz,
- uproszczone modele elementów półprzewodnikowych, które uwzględniają spadki napięć w zakresie prądu przewodzenia do ok. 800 A.

Sprawdzono wartości prądów i napięć w układzie dla najgorszego przypadku, kiedy Uwe = 420 V, Uwy = 2400 V i Pwy = 650 kW. Dla tych parametrów współczynnik wypełnienia teoretycznie wynosi d = 0,825.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Wykres napięcia wyjściowego *V*(out), prąd wejściowy *I*(Rw), prąd wyjściowy *I*(Robc) i prądy poszczególnych dławików *Ld*1, *Ld*2, *Ld*3, *Ld*4 przy mocy *P*wy = 650 kW, *U*we = 420 V, *d* = 0,835

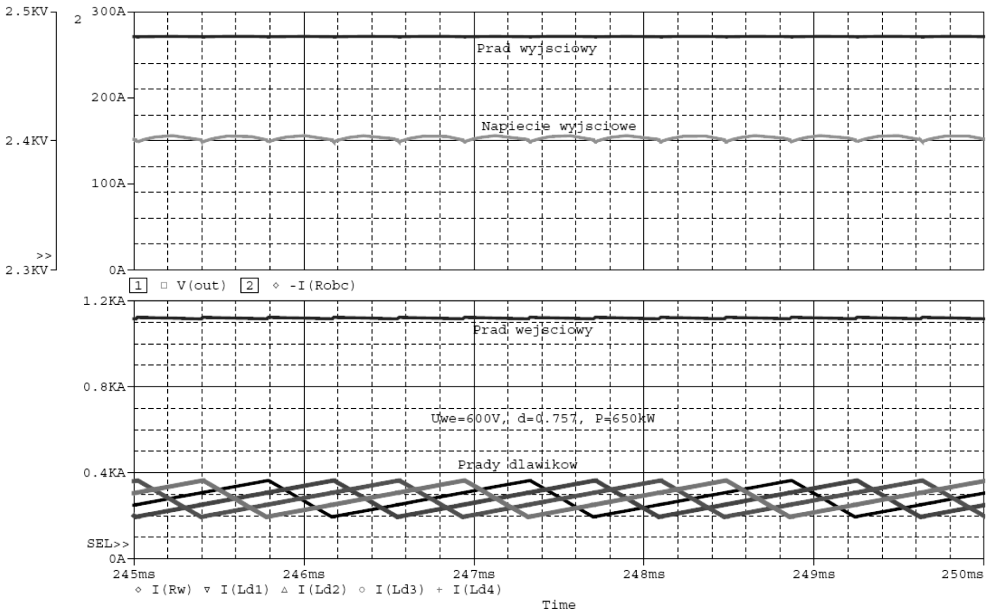
Fig. 3. Waveforms: output voltage *V*(out), input inductor current *I*(Rw), output current *I*(Robc) and inductor current *Ld*1, *Ld*2, *Ld*3, *Ld*4, for output power *P*wy = 650 kW, *U*we = 420 V, *d* = 0,835

Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 3. Wartość średnia napięcia wyjściowego wynosi 2400 V przy wartości średniej prądu wejściowego *I*wesre = 1645 A. Aby osiągnąć napięcie wyjściowe na poziomie 2400 V, współczynnik wypełnienia osiągnął wartość *d* = 0,835 i jest to więcej niż w obliczeniach teoretycznych. Jest to spowodowane tym, że w symulacji zostały uwzględnione spadki napięć na elementach półprzewodnikowych, na rezystancji dławików, na rezystancji wewnętrznej źródła napięcia zasilania i rezystancji indukcyjności filtru wejściowego. Aby wyrównać te spadki, współczynnik wypełnienia sterowania tranzystora musiał być trochę zwiększony.

Na rysunku 4 przedstawiono prądy dławików, prąd wejściowy i napięcie wyjściowe, ale dla nominalnego napięcia wejściowego *U*we = 600 i nominalnego obciążenia, *P*wy = 650 kW. Poszczególne prądy mają mniejsze wartości niż w przypadku, kiedy *U*we = 420 V.

Przy założonych parametrach dławików (*Ld* = 4 mH) i warunków obciążenia (*P* = 650 kW) oraz częstotliwości taktowania *f* = 650 Hz, układ zapewnia ciągłość prądu przez dławiki, a tym samym ciągły tryb pracy całego przekształtnika (CCM). W badaniach symulacyjnych sprawdzono też, dla jakiego obciążenia wystąpi warunek graniczny prądu dławika (dla jakiej mocy wyjściowej wartość minimalna prądu pojedynczego dławika osiągnie 0 A przy nominalnym napięciu zasilania *U*we = 600 V). Warunek graniczny osiągnięto dla mocy wyjściowej ok. 220 kW. Wynika z tego, że jeżeli moc pobierana będzie coraz mniejsza, to przekształtnik przejdzie w tryb pracy nieciągłej (DCM) i aby utrzymać na wyjściu napięcie na poziomie 2400 V, należy zmniejszać współczynnik wypełnienia, bo inaczej zacznie rosnąć napięcie wyjściowe.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 4. Wykres napięcia wyjściowego *V*(out), prąd wejściowy *I*(Rw) i prądy poszczególnych dławików *Ld*1, *Ld*2, *Ld*3, *Ld*4 przy mocy *P*wy = 650 kW, *U*we = 600 V, *d* = 0,757

Fig. 4. Waveforms: output voltage *V*(out), input inductor current *I*(Rw), output current *I*(Robc) and inductor current *Ld*1, *Ld*2, *Ld*3, *Ld*4, for output power *P*wy = 650 kW, *U*we = 600 V, *d* = 0,757

Dla napięcia wejściowego *U*we = 720 V prądy dławików i tranzystorów oraz diod są jeszcze mniejsze, jest to najbardziej korzystny przypadek dla przekształtnika.

5. Budowa prototypu przekształtnika

Badania symulacyjne czterofazowego układu podwyższającego napięcie posłużyły do zbudowania prototypu przekształtnika dla celów trakcyjnych, którego zdjęcie zamieszczono na fot. 1. Schemat blokowy przekształtnika pokazano na rys. 5.

Szeregowe dławiki od *Ld*1 do *Ld*4 zostały wykonane w postaci cewek powietrznych, ale rozważane jest zastosowanie dławików na rdzeniu magnetycznym. Prototyp, oprócz układu podwyższającego napięcie, zawiera wejściowy filtr typu LC na sieć 600 V/3000 V oraz inne niezbędne układy kontrolno-sterujące, które są wymagane dla pojazdu trakcyjnego. Jak można zauważyć jest to prawie gotowe urządzenie do zabudowy w pojeździe trakcyjnym.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 1. Zdjęcie prototypu przekształtnika podwyższającego napięcie dla pojazdu trakcyjnego dwusystemowego

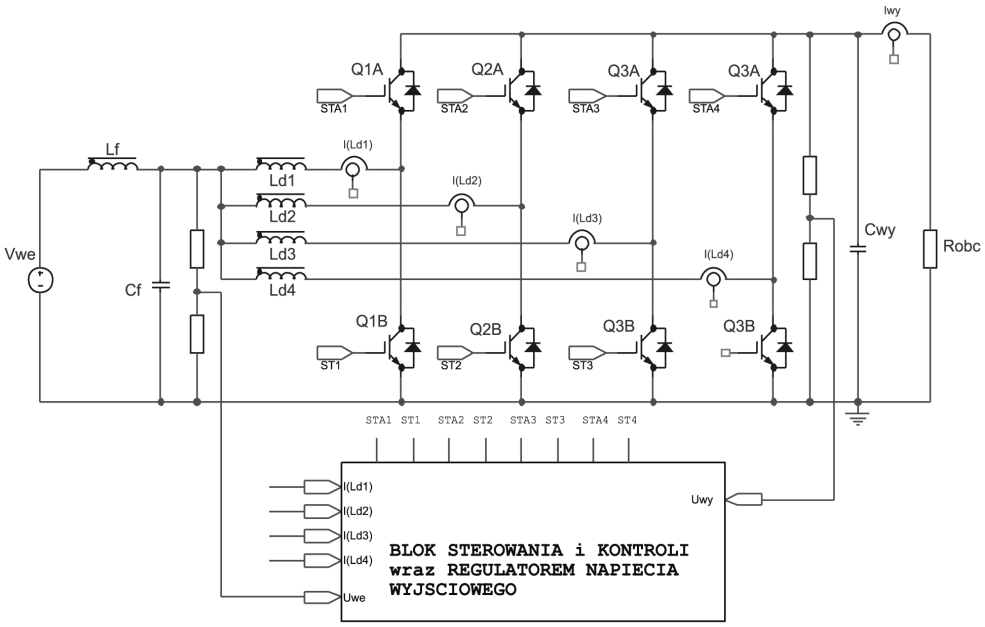
Photo 1. Photograph of the prototype step-up converter for a dual system traction vehicle

6. Pomiary laboratoryjne prototypu przekształtnika *step-up*

Pomiary obejmowały różne konfiguracje pracy przekształtnika:
- załączenie w stanie jałowym,
- załączenie przy obciążeniu,
- praca w stanie ustalonym,
- skokowe załączenie obciążenia,
- praca ze zwrotem energii do sieci.

Podczas przeprowadzonych prób realizowany był pomiar napięć wejściowych i wyjściowych oraz prądu wyjściowego. Wykonano także rejestracje przebiegów czasowych prądów w czterech fazach przekształtnika oraz napięcia i prądu wyjściowego. Przykładowe wyniki pomiarów zamieszczono w formie oscylogramów.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Schemat blokowy przekształtnika prototypowego

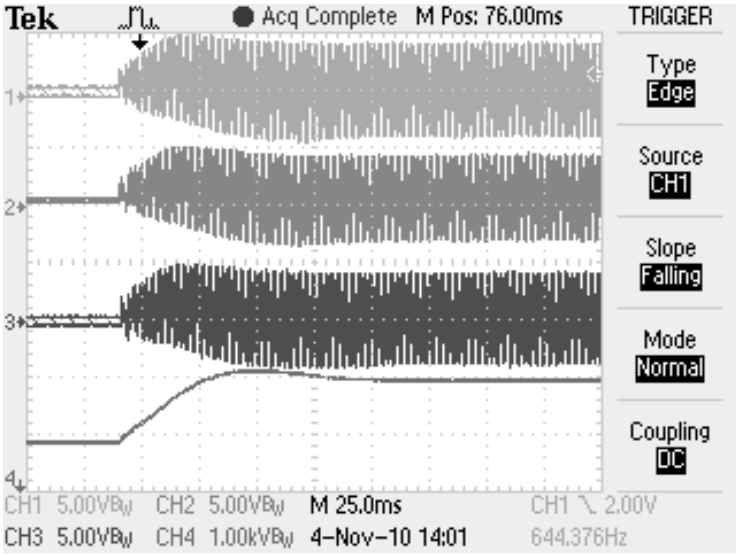
Fig. 5. Circuit block diagram of the prototype converter

Częstotliwość przełączania tranzystorów w przekształtniku wynosiła 650 Hz, a indukcyjności dławików 4 mH.

Badanie układu w stanie jałowym

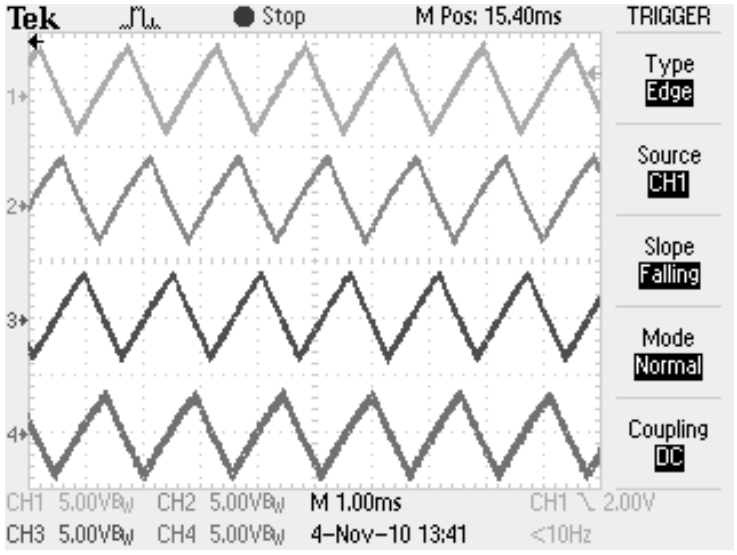
Sprawdzenie napięć i prądów w układzie w momencie włączenia układu pokazują prawidłowe działanie regulatora napięcia wyjściowego, który nie dopuszcza do zbyt dużego wzrostu napięcia w momencie włączenia przekształtnika (rys. 6). Kształt prądów przez poszczególne dławiki można zaobserwować na rys. 7.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 6. Przebiegi prądów dławików (CH1-CH3 140 A/dz) oraz napięcia wyjściowego (CH4, 1 kV/dz) dla załączenia układu w stanie jałowym

Fig. 6. Waveforms: inductor current (CH1-CH3, 140 A/div), output voltage (CH4, 1 kV/div), during the switching on of the converter without the load



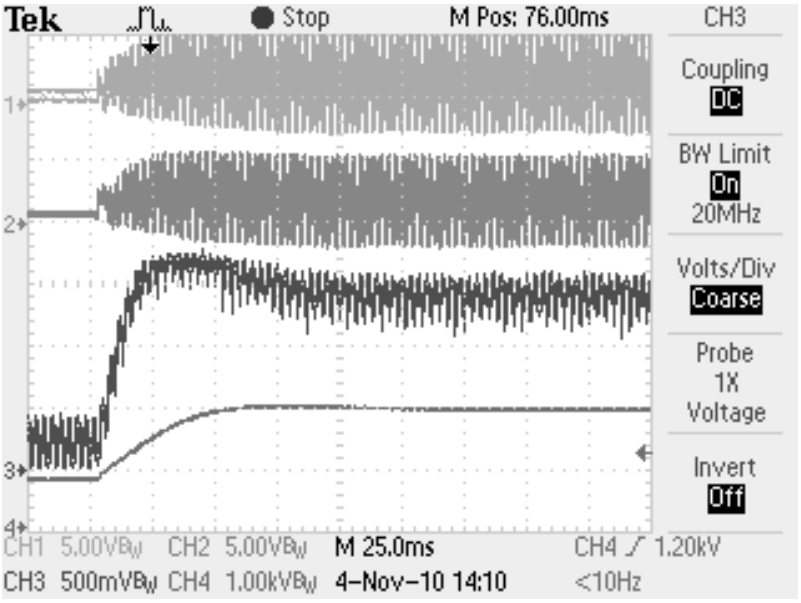
Rys. 7. Przebiegi prądów (CH1-CH4, 140 A/dz) dławików dla pracy ustalonej układu w stanie jałowym

Fig. 7. Waveforms: inductor current (CH1-CH4, 140A/div), with the converter operating without the load

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Badanie układu w stanie obciążenia

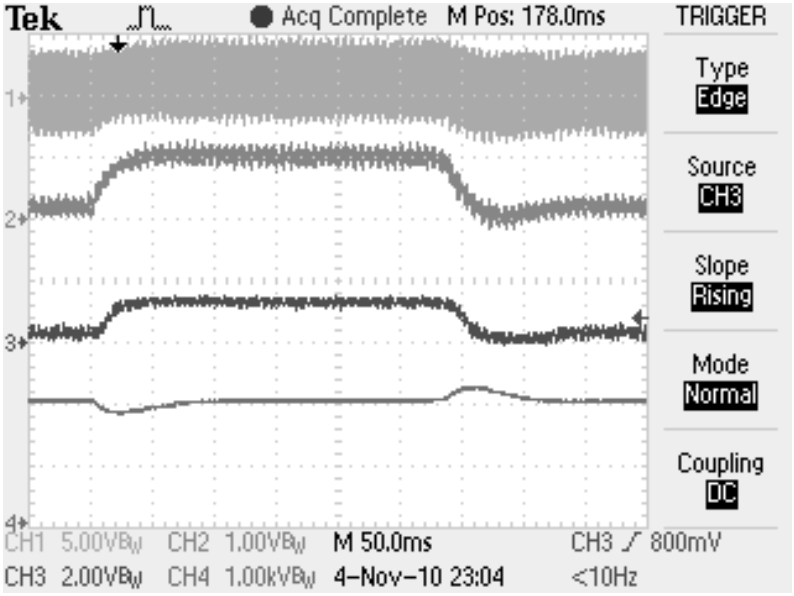
Badania miały na celu sprawdzenie napięć i prądów w układzie przy włączeniu obciążenia i zmiennych warunkach obciążenia. Wyniki pokazują prawidłowe działanie regulatora napięcia wyjściowego, który nie dopuszcza do zbyt dużego spadku napięcia wyjściowego w momencie włączenia układu pod obciążeniem (rys. 8), a także spadku i wzrostu napięcia w momencie skokowej zmiany obciążenia (rys. 9).



Rys. 8. Przebiegi prądów dławików (CH1-CH2, 140 A/dz) oraz prądu wyjściowego (CH3,50 A/dz) i napięcia wyjściowego (CH4, 1 kV/dz) dla załączenia układu w stanie obciążenia

Fig. 8. Inductor current (CH1-CH2, 140 A/div), output current (CH3, 50 A/div) and output voltage (CH4, 1 kV/div) during the switching on of the converter with the load

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 9. Przebiegi prądu jednego dławika (CH1, 140 A/dz), suma prądów dławików (CH2, 140 A/dz). Prąd wejściowy (CH3, 200 A/dz) i napięcie wyjściowe (CH4, 1 kV/dz) dla skokowego załączenia i wyłączenia obciążenia

Fig. 9. Waveforms: inductor current (CH1, 140A/div), the sum of two inductor currents (CH2, 140 A/div), input current (CH3, 200 A/div) and output voltage (CH4, 1 kV/div) during the load step change

Wyznaczenie sprawności układu przekształtnika

Celem tego badania było zmierzenie prądów i napięć wejściowych i wyjściowych, aby można było oszacować sprawność układu przekształtnika. Dokonano dwóch pomiarów dla skrajnych wartości napięcia zasilania przy jednakowym obciążeniu przekształtnika. Ze względu na brak odbiornika o mocy wyjściowej rzędu 600 kW wyznaczenie sprawności przeprowadzono dla obciążenia mniejszego i dla pracującej tylko jednej fazy, a następnie przeliczono to na cztery fazy. Napięcie wyjściowe było stabilizowane przez układ i miało wartość Uwy = 2200 V.

Dla Uwe = 783 V i mocy obciążenia Pwy = 527 kW, sprawność wynosi ok. 90,8%.

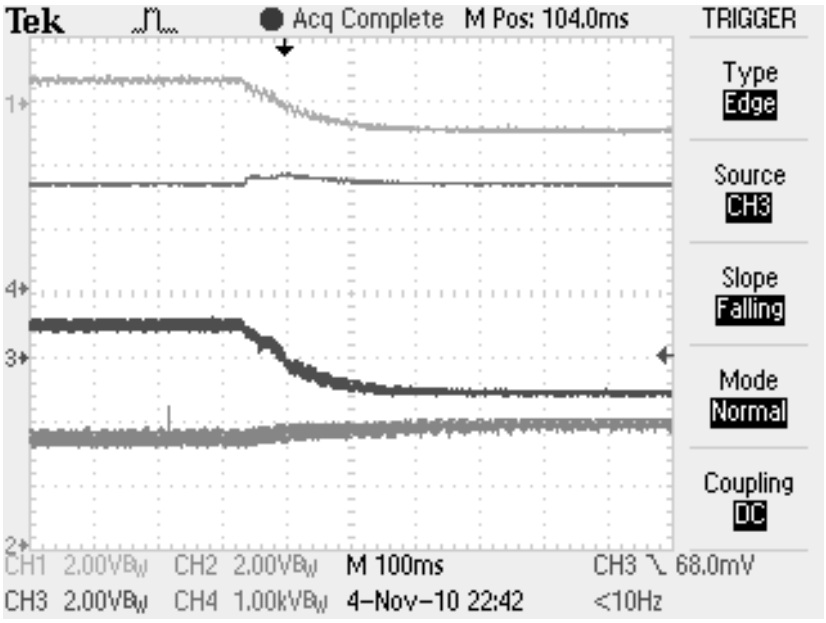
Dla Uwe = 499 V i mocy obciążenia Pwy = 527 kW, sprawność wynosi ok. 89,3%.

Sprawność układu na poziomie 90% należy uznać za zadowalającą. Elementami, na których tracona jest największa moc są dławiki (Rd = 50 mΩ), tranzystory mocy i diody w układzie.

Praca układu przekształtnika ze zwrotem energii do sieci

Konfiguracja przekształtnika, który jest zbudowany na modułach IGBT składających się z dwóch tranzystorów oraz odpowiedniego układu sterowania i kontroli umożliwia pracę przekształtnika podnoszącego napięcie jako przekształtnik obniżający napięcie i zwrot energii do sieci. Na stanowisku laboratoryjnym sprawdzono taki przypadek, a wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 10.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 10. Suma prądów dławików (CH1, 280 A/dz), napięcie wyjściowe (CH4, 1 kV/dz), prąd wejściowy (CH3, 200 A/dz) i napięcie wejściowe (CH2, 400 V/dz)

Fig. 10. Waveforms: the sum of two inductor currents (CH1, 280 A/div), output voltage (CH4, 1 kV/div), input current (CH3, 200 A/div) and input voltage (CH2, 400 V/div) while the converter operates in the step-down mode with energy recovery

Na oscylogramie można zaobserwować zmianę kierunku prądu wejściowego (CH3) wskutek wzrostu napięcia wyjściowego (CH2), wymuszonego zewnętrznym zasilaczem podłączonym do zacisków wyjściowych. Na początku układ pobiera prąd ze źródła V_{we}, następnie w sposób płynny następuje zmiana kierunku prądu i układ oddaje energię do źródła V_{we}. Jest to bardzo ważna i cenna własność tego przekształtnika szczególnie dla trakcyjnych układów napędowych.

7. Podsumowanie

Konstrukcja przekształtników DC/DC dużej mocy pracujących w warunkach znacznego podwyższenia wartości średniej napięcia stanowi wyzwanie techniczne i stawia firmy energoelektroniczne przed trudnym zadaniem. Jest to nie tylko problem wyboru odpowiedniego układu silnoprądowego, ale także problem kosztów oraz możliwości technologicznych. Ważnym zagadnieniem jest opracowanie i wyprodukowanie odpowiednich dławików o stosunkowo dużej indukcyjności i dużej mocy. Decyzja o zastosowaniu układów beztransformatorowych nie jest decyzją czysto techniczną i wymaga nie tylko oceny sprawności tych układów, ale także zapewnienia bezpieczeństwa całego układu. Pojazd trakcyjny dwu-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

systemowy będzie od początku pod względem bezpieczeństwa zaprojektowany na wysokie napięcie zasilania 3000 Vdc. Z tego względu przyjęto koncepcje beztransformatorowego rozwiązania układu podwyższającego napięcie.

Praca została wykonana w ramach projektu celowego 6ZR6 2008C/07039.

Literatura

[1] Takahara E., *Power Converters Technologies for High Speed Electric Motive Unit for Low Cost and Energy Conservation*, IPEC, Tokyo 2000.
[2] Kowalczewski M., Mysiński W., Zając W., A *new concept of a converter for dual system trams*, 9th European Conference on POWER ELECTRONICS and APPLICATIONS, EPE 2001, 27–29 August, Austria.
[3] Kowalczewski M., Mysiński W., Zając W., 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.
[4] Li Jieli, Stratakos A., Schultz A., Sullivan C., *Using Coupled Inductors to Enhance Transient Performance of Multi Phase Buck Converters*, IBM Symposium September 14-15, 2004.
[5] Mysiński W., Zając W., Skarpetowski G., *Rozwiązania obwodu głównego dla dwusystemowego pojazdu trakcyjnego 3000 Vdc/600 Vdc*, 9 th International Conference Modern Electric Traction 2009, 24-26.09.2009 Gdańsk.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ