

Tomasz Jakubowski, Ryszard Pałka
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ANALIZA PORÓWNAWCZA SPRAWNOŚCI RÓŻNYCH KONFIGURACJI PRZETWORNICY DLA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF DIFFERENT CONFIGURATIONS OF AN CONVERTER FOR ELECTRICAL MACHINES

Abstract: The paper deals with switching power losses of DC–DC step–down converters supplying electrical machines. Due to a wide range of the load current, converter change the transistor duty factors from 0 to 100%. Since conductive losses are strictly connected with transistor parameters, duty factor and transistor currents, switching losses are the only part of losses that can be reduced, especially for small duty factors. The paper discusses two methods of reducing switching losses, the first one with energy recovery snubber and the second with SiC diode connected anti–paralell with the load.

1. Wstęp

Źródło prądu stałego, zarówno regulowane jak i nieregulowane, stanowi podstawowy element różnego rodzaju przekształtników energoelektronicznych, stosowanych do zasilania napędów elektrycznych. Istotnym problemem, z jakim zmagają się projektanci współczesnych przekształtników energoelektronicznych jest uzyskanie możliwie najwyższej sprawności układu przetwarzania energii elektrycznej. Większość energii tracona jest tu w półprzewodnikowych elementach mocy podczas przewodzenia i przełączania. Moc tracona w tranzystorze podczas przewodzenia (przy danym współczynniku wypełnienia) zależy od wartości przewodzonego prądu wymuszonego przez obciążenie oraz spadku napięcia na nim. Inaczej sprawa wygląda przy stratach łączeniowych, gdzie poprzez dodanie odpowiedniego układu odciążającego i/lub zastosowanie elementów o lepszych parametrach elektrycznych możliwe jest znaczne ograniczenie strat. Jednym ze sposobów zwiększenia sprawności jest stosowanie elementów półprzewodnikowych wykonanych z węgliku krzemu (SiC) [1]. Obecnie w sprzedaży dostępne są tylko diody, SiC, natomiast tranzystory JFET–SiC i MOSFET–SiC dostępne są jedynie w seriach próbnych bezpośrednio u producentów. Niewątpliwą zaletą tych elementów jest mały wpływ temperatury na straty mocy podczas przełączania [2], wyższa (w porównaniu z typową strukturą krzemową) temperatura pracy (około 160°C), oraz bardzo mała

pojemność złącza półprzewodnikowego, pozwalająca uzyskać duże szybkości przełączeń przy minimalnych stratach.

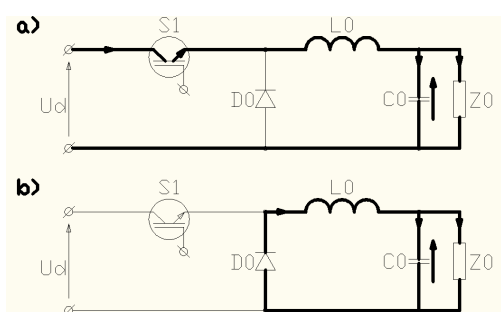
Drugim sposobem redukcji strat łączeniowych jest użycie obwodu odciążającego tranzystor. Znanych jest wiele pasywnych topologii układów odciążania [3], [4]. Do najprostszych należą układy, w których znaczna część energii łączy tracona jest w elementach rezystancyjnych (RC, RCD, RLC2D) [5], [6]. Do bardziej skomplikowanych należą układy, w których energia łączy zwracana jest do źródła napięcia lub do obciążenia [7], [8]. Szeroko omówiona w literaturze jest również grupa układów aktywnych [9], [10], jednak ich wadą jest konieczność stosowania dodatkowego klucza półprzewodnikowego.

W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika obniżającego napięcie w trzech konfiguracjach. W konfiguracji pierwszej klucz półprzewodnikowy przełączany był twardo, w drugiej diodę zwrotną zastąpiono diodą wykonaną z węgliku krzemu, a w konfiguracji trzeciej tranzystor pracował z rekuperacyjnym układem odciążania [7]. Jako klucza użyto tranzystora IGBT, ze względu na jego powszechne stosowanie w układach energoelektronicznych.

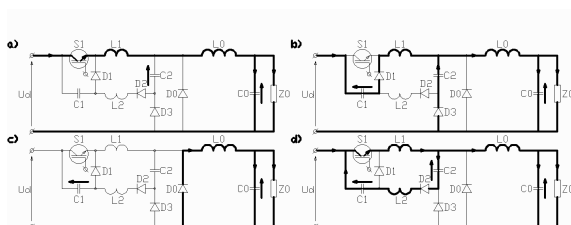
2. Budowa stanowiska laboratoryjnego

Na rys. 1 przedstawiono schemat i podstawowe stany pracy przetwornicy obniżającej napięcie (typu buck). Klucz S1 to tranzystor IGBT typ IRG4PH50UD o maksymalnym prądzie kolektora wynoszącym 24 A i dopuszczalnym

napięciu kolektor–emiter 1200V. Dioda D0 w układzie przełączanym twardo to szybka dioda krzemowa DSEP60–12A o prądzie maksymalnym 60 A oraz maksymalnym napięciu w stanie zaporowym równym 1200V, lub dla konfiguracji z diodą SiC IDT16S60C o prądzie maksymalnym 16 A i maksymalnym napięciu w stanie zaporowym 600 V. Indukcyjność L0 ma wartość 31mH, natomiast pojemność C0 470 μ F. Klucz S1 sterowany jest z generatora zewnętrznego AFG3102 firmy Tektronix z częstotliwością 10 kHz. Obciążeniem przetwornicy są rezystory suwakowe.



Rys. 1. Schemat i podstawowe stany pracy przetwornicy obniżającej napięcie dla przełączania twardego z diodą krzemową oraz diodą SiC (dla przypadku przewodzenia ciągłego).



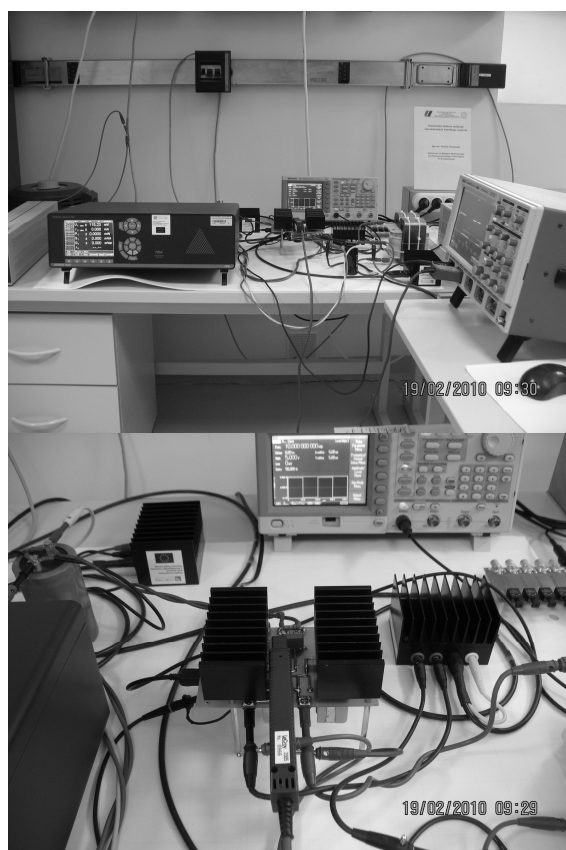
Rys. 2. Schemat i podstawowe stany pracy przetwornicy obniżającej napięcie z układem odzysku energii (dla przypadku przewodzenia ciągłego).

Na rys. 2 przedstawiono schemat i podstawowe stany pracy przetwornicy obniżającej napięcie z układem odzysku energii. Główny układ przerywacza uzupełniono o obwód odciążania oraz rekuperacji energii złożony z elementów D1, D2, D3, C1, C2, L1, L2. Diody D2, D3 to szybkie diody krzemowe DSEP60–12A, natomiast D1 to dioda UF5408 o prądzie 3 A i maksymalnym napięciu w stanie zaporowym 1200 V. Pojemność kondensatora C1 ma wartość 10 nF, natomiast C2 44 nF. Indukcyjności dławików L1 i L2 mają wartość 3,3 μ H. Zadaniem obwodu D1–C1 jest

ograniczanie strat wyłączenia tranzystora, przy czym indukcyjność pętli S1–D1–C1 powinna być jak najmniejsza ze względu na jej istotny wpływ na wielkość strat. Indukcyjność L1 ogranicza straty załączania i dobrano ją w oparciu o wyniki badań przedstawionych w [11]. Dodatkowo zaletą zastosowania dławika L1 jest ograniczenie emisji zakłóceń typu EMI [12].

Układ zasilany był z autotransformatora napięciem 230 VRMS po uprzednim wyprostowaniu i odfiltrowaniu.

Na rys. 3 przedstawiono widok stanowiska doświadczalnego wraz z przetwornicą obniżającą napięcie.

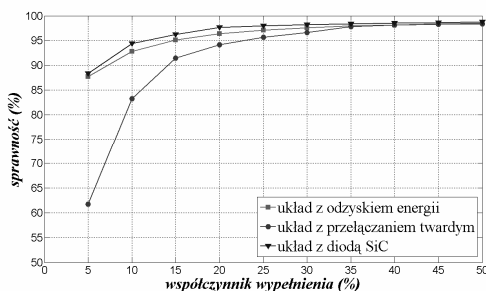


Rys. 3. Widok stanowiska pomiarowego (od góry) i przetwornicy obniżającej napięcie.

3. Pomiar sprawności układu

Pomiaru mocy dokonano przy pomocy urządzenia NORMA5000 firmy LEM. Pomiaru mocy wejściowej dokonano na podstawie pomiaru napięcia U_d i prądu I_d , natomiast pomiaru mocy wyjściowej dokonano na podstawie pomiaru napięcia U_{D0} i prądu I_{L0} tak, aby na sprawność układu nie miały wpływu straty w dławiku L_0 . Moc czynna tracona w rezystorach obciążeniowych przy napięciu zasilania 320 VDC i współczynnika wypełnienia 95% wynosiła 2,4 kW. Układ zasilany był z autotransformatora po uprzednim wyprostowaniu i odfiltrowaniu napięcia.

Dla każdego z trzech badanych układów obliczono i wykreślono charakterystyki sprawności w funkcji współczynnika wypełnienia w zakresie 5–95%. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Sprawność układu impulsowego z: przełączaniem twardym – znacznik okrągły, odzyskiem energii – znacznik kwadratowy, diodą zwrotną SiC – znacznik trójkątny.

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk układ z diodą D0–SiC w zakresie 10 do 20% współczynnika wypełnienia charakteryzuje się do 1% wyższą sprawnością od układu z odzyskiem energii, natomiast w porównaniu do układu przełączanego twardo nawet do 27%.

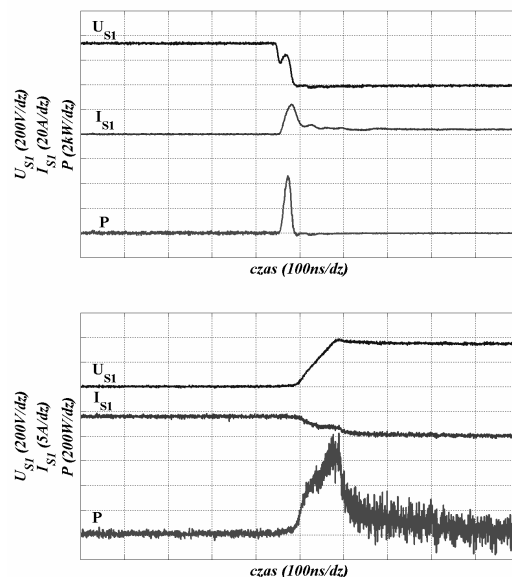
4. Pomiar strat łączeniowych

Przebiegi prądu i napięcia klucza S1 zarejestrowano oscyloskopem LeCroy WaveRunner 6100 A z sondą napięciową PP005A i prądową CP031.

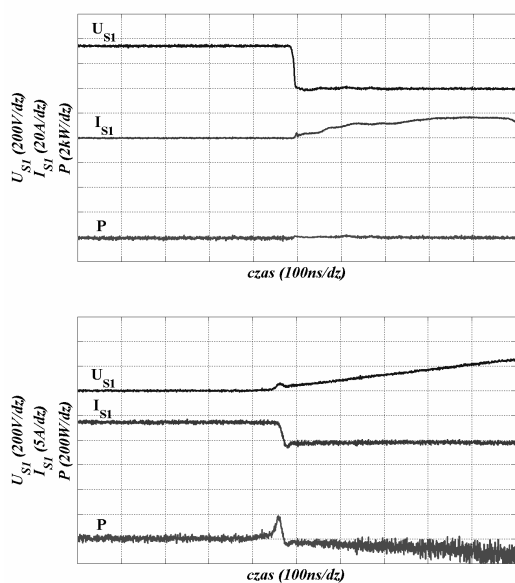
Rysunki 5, 6 i 7 przedstawiają przebiegi napięcia, prądu i mocy wydzielanej w tranzystorze odpowiednio dla załączenia i wyłączenia. Pomiarów dokonano przy częstotliwości przełączeń 10 kHz, współczynnika wypełnienia 50% i mocy wejściowej na poziomie 780 W.

Z przedstawionych pomiarów wynika, że największą wartością energii traconej podczas przełączania tranzystora charakteryzuje się układ z przełączaniem twardym – rys. 5. Energia tracona podczas załączenia wynosi tutaj około 70 μJ natomiast wyłączenia 60 μJ , co sumarycznie daje 130 μJ . Następnym z kolei jest układ z diodą SiC, który charakteryzuje się stratami energii na załączenie na poziomie około 3 μJ , natomiast na wyłączenie około 50 μJ , co daje 53 μJ energii traconej. Ostatnim z układów jest układ z odzyskiem energii i stratami na załączenie na poziomie około 0,5 μJ i wyłączenie około 3 μJ , co daje 3,5 μJ energii strat na cykl. Należy podkreślić, iż wykonany pomiar mocy na tranzystorze nie uwzględnia dodatkowych strat mocy, które są wynikiem gromadzenia energii w indukcyjności doprowadzeń w strukturze obudowy tranzystora [13].

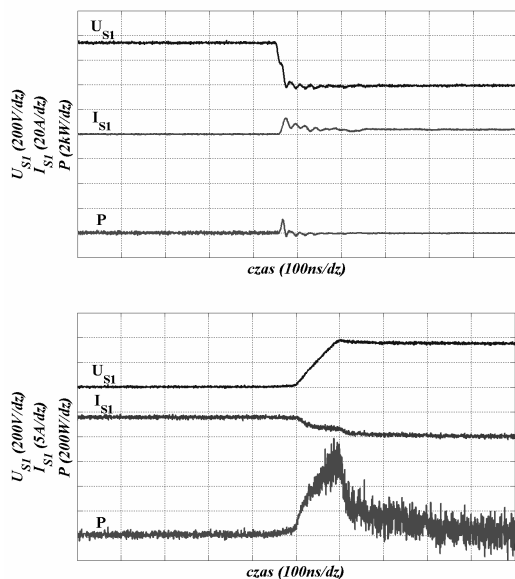
Na tle pomiarów sprawności całego układu, przedstawionych w poprzednim punkcie, pomiary oscyloskopowe pokazują, że układ z odzyskiem energii, pomimo znikomo małych strat na przełączanie, nie posiada najwyższej sprawności. Wynika to z faktu występowania strat łączeniowych i na przewodzenie w elementach półprzewodnikowych obwodu rekuperacji.



Rys. 5. Napięcie U_{S1} , prąd I_{S1} i moc tranzystora P przy przełączaniu twardym, załączenie – rysunek górny, wyłączenie – rysunek dolny



Rys. 6. Napięcie U_{S1} , prąd I_{S1} i moc tranzystora P przy układzie z odzyskiem energii, załączenie – rysunek górny, wyłączenie – rysunek dolny



Rys. 7. Napięcie U_{S1} , prąd I_{S1} i moc tranzystora P przy przełączaniu twardym z diodą zwrotną SiC, załączenie – rysunek górny, wyłączenie – rysunek dolny

5. Badania termowizyjne układu

Aby dokładniej przeanalizować rozkład energii traconej w elementach wykonano zdjęcia kamerą termowizyjną ThermoCAM E300 firmy FLIR. Pomiaru dokonano przy napięciu zasilania wynoszącym 320 VDC, mocy wejściowej 200 W, współczynnika wypełnienia 5%, i prądzie wyjściowym 11 A. Wyniki

pomiarów dla trzech rozpatrywanych przypadków przedstawia rys. 8.

Biorąc pod uwagę radiator tranzystora S1 najwyższą temperaturę posiada układ przełączany twardo (około 45°C), natomiast dwa pozostałe układy charakteryzują się temperaturą radiatora o 8°C niższą. Zupełnie inna sytuacja występuje na radiatorze po prawej stronie, do którego przymocowano diody. W tym przypadku najwyższą temperaturę posiada radiator układu z rekuperacją energii, co świadczy o tym, że mamy do czynienia z dużo wyższymi stratami sumarycznymi w diodach D0, D2, D3, niż w pozostałych przypadkach.

Najniższymi temperaturami radiatorów charakteryzuje się układ z diodą SiC, co potwierdza przeprowadzone na wstępie badania sprawności całego układu.

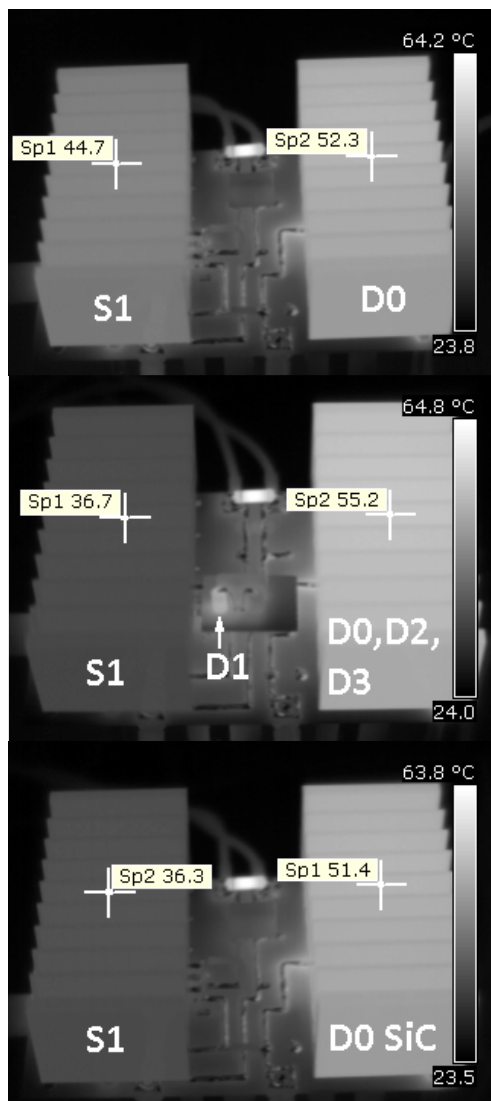
O ile układ odciążania rekuperacyjnego zmniejsza straty w procesie przełączania tranzystora IGBT, to straty dodatkowe w obwodzie rekuperacji (obwód D1, L2, D2, D3) mogą być na tyle duże, iż sumaryczna sprawność układu jest prawie taka sama jak w przypadku użycia diody SiC dla układu o przełączaniu twardym.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że dzięki zastosowaniu diody SiC uzyskano istotne podwyższenie sprawności układu zasilania. W porównaniu do układu z rekuperacją energii różnica jest niewielka i w najlepszym przypadku dochodzi do 1%, jednak ważną zaletą struktury z dioda SiC jest mała liczba elementów, co pozytywnie wpływa na niezawodność układu. Wady tego rozwiązania są związane z przełączaniem twardym i wynikającą z niego stromością prądu i napięcia zwiększającą emisję zakłóceń EMI.

Do zalet układu z rekuperacją energii należą ograniczanie stromości prądu i napięcia pozytywnie wpływające na emisję zakłóceń. Wadą jest natomiast konieczność stosowania większej liczby elementów, co wpływa na jego zawodność.

Zastosowanie jednego z powyższych rozwiązań pozwala osiągnąć wysoką sprawność przetwarzania energii, co wpływa na zwiększenie sprawności całego układu przekształtnik–maszyna elektryczna.



Rys. 8. Zdjęcia termograficzne: od góry, układ bez odciążania, z rekuperacją energii, diodą SiC. Napięcie zasilania: 320 VDC, moc wejściowa 200 W, współczynnik wypełnienia 5%, prąd wyjściowy 10 A.

Literatura

- [1] Burger B., Kranzer D.: *Extreme High Efficiency PV-Power Converters*. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 8-10 Sept. 2009, pp. 1-13.
- [2] Kranzer D., Wilhelm C., Reiners F., Burger B.: *Application of normally-off SiC-JFETs in Photovoltaic Inverters*. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 8-10 Sept. 2009, pp. 1-6.
- [3] McMurray W.: *Selection of Snubbers and Clamps to Optimize the Design of Transistor Switching Converters*. IEEE Trans. on Ind. Applications Vol. IA-16, No. 4/1980, pp. 513-523.
- [4] Todd P.C.: *Snubber circuits: theory, design and application*. Unitrode design resources, May 1993.

Available:

<http://www.focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=slup100&fileType=pdf>

[5] Peng Z., Gui-Jia Su, Tolbert L. M.: *Passive Soft Switching Snubber for PWM Inverters*. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19. No. 2, March 2004, pp. 363-370.

[6] Stevens R.: *Design of snubbers for power circuits*. Unpublished, available: <http://www.cornell-ubiliier.com/tech/design.pdf>

[7] Williams B. W.: *High-voltage high-frequency power switching transistor module with switching-aid-circuit energy recovery*. IEE Proceedings, Vol. 131, Pt. B, No.1, Jan. 1984.

[8] Steyn C.G.: *Analysis and Optimization of Regenerative Linear Snubbers*. IEEE Trans on Ind. Applications Vol. 4 no. 3 July 1989.

[9] Zhu J.Y., Daohong Ding: *Zero-voltage- and zero-current-switched PWM DC-DC converters using active snubber*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35. No. 6, Nov/Dec 1999, pp. 1406-1412.

[10] Ivanovic B., Stojiljkovic Z.: *A novel active soft switching snubber designed for boost converter*. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19. No. 3, May 2004, pp. 658-665.

[11] Semicron: *Features of switches*. Available: http://www.semikron.com/internet/webcms/objects/applica_help/e/3_8_3_3_3_9_2.pdf, pp. 239-245

[12] In-Dong Kim, Bose B.K.: *A new ZCS turn-on and ZVS turn-off unity power factor PWM rectifier with reduced conduction loss and no auxiliary switches*. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record, Vol. 2, 17-22 May 1998, pp. 1344-1350.

[13] Kalisiak S., Holub M.: *A regenerative, passive snubber design for industrial IGBT power modules*. PELINCEC 2005, 16-19 October 2005.

Autorzy

Mgr inż. Tomasz Jakubowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 05, e-mail: tomasz.jakubowski@zut.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 70, e-mail: rpalka@zut.edu.pl.

Praca zrealizowana w ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego) w ramach programu Region Morza Bałtyckiego 2007 - 2013, projekt „Plasma based Technologies for environment protection in BSR - PlasTEP”, kontrakt #033.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Maria Dems