

Przegląd nieizolowanych przekształtników podwyższających napięcie z dławikami sprzężonymi

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd nieizolowanych przekształtników podwyższających napięcie z dławikami sprzężonymi. Omówiono czternaście układów opisanych w literaturze naukowej. Przedstawione układy zawierają zrealizowane w różny sposób układy odciążające tranzystory z przepięć spowodowanych zmianami prądu w indukcyjności rozproszenia oraz różnią się techniką uzyskiwania wzmocnienia napięcia. Porównano współczynniki transformacji napięcia, maksymalne napięcia na elementach półprzewodnikowych, liczbę elementów potrzebnych do ich budowy oraz wyniki przedstawionych w literaturze naukowej badań laboratoryjnych.

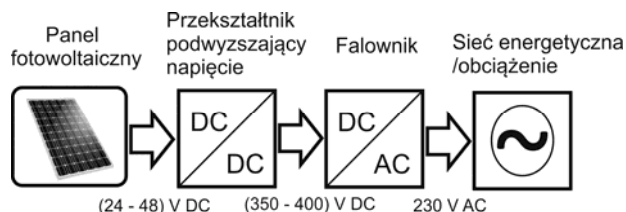
Abstract. The article presents a review of non-isolated boost converters with coupled inductors. Fourteen converters described in the scientific literature are discussed. The presented converters contain different clamp circuits which reduce voltage spikes on main active switch, and differ in the technique of obtaining voltage gain. The voltage gain, maximum voltages on semiconductors, the number of elements needed for their construction and the results of laboratory tests described in the scientific literature were compared. (**Overview of non-isolated boost converters with coupled inductors**).

Słowa kluczowe: dławik sprzężony, przekształtnik podwyższający napięcie, układ odciążający, przekształtnik zaporowy.

Keywords: coupled inductor, DC/DC boost converter, clamp circuit, flyback converter.

Wstęp

W ostatnich latach wzrosła intensywność badań nad nieizolowanymi przekształtnikami DC/DC podwyższającymi napięcie, spowodowana coraz częstszym pozyskiwaniem energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, w szczególności z paneli fotowoltaicznych [1]. Przekształtnik podwyższający napięcie DC/DC pracujący w systemie fotowoltaicznym o niskim napięciu wyjściowym panelu ma za zadanie podwyższyć jego napięcie do napięcia wejściowego falownika, który zmienia napięcie na zmienne i dopasowane do autonomicznego obciążenia lub sieci elektroenergetycznej (rys. 1).



Rys.1. Schemat ideowy systemu konwersji energii fotowoltaicznej

Przekształtnik pracujący w takim systemie powinien odznaczać się nawet kilkunastokrotnym współczynnikiem transformacji napięcia oraz maksymalną mocą wyjściową około 300 W. Jest to typowa maksymalna moc wyjściowa pojedynczego panelu fotowoltaicznego. Ponadto, produkcja energii elektrycznej przez panel fotowoltaiczny jest zmienna i zależna od warunków atmosferycznych. Dlatego też przekształtnik powinien pracować w szerokim zakresie mocy wejściowej realizując jednocześnie algorytm MPPT. Umożliwia to możliwie najefektywniejszą konwersję energii elektrycznej. Jednocześnie sprawność przekształtnika ma istotny wpływ zarówno na ilość energii dostarczonej do falownika oraz na wielkość układu chłodzenia, dlatego też układ powinien osiągać możliwie wysokie sprawności w szerokim zakresie mocy wyjściowej.

W podstawowym przekształtniku podwyższającym napięcie nie jest możliwe jednoczesne uzyskanie wysokiej sprawności konwersji energii, wysokiego współczynnika transformacji napięcia oraz dużej mocy wyjściowej przynajmniej z trzech powodów:

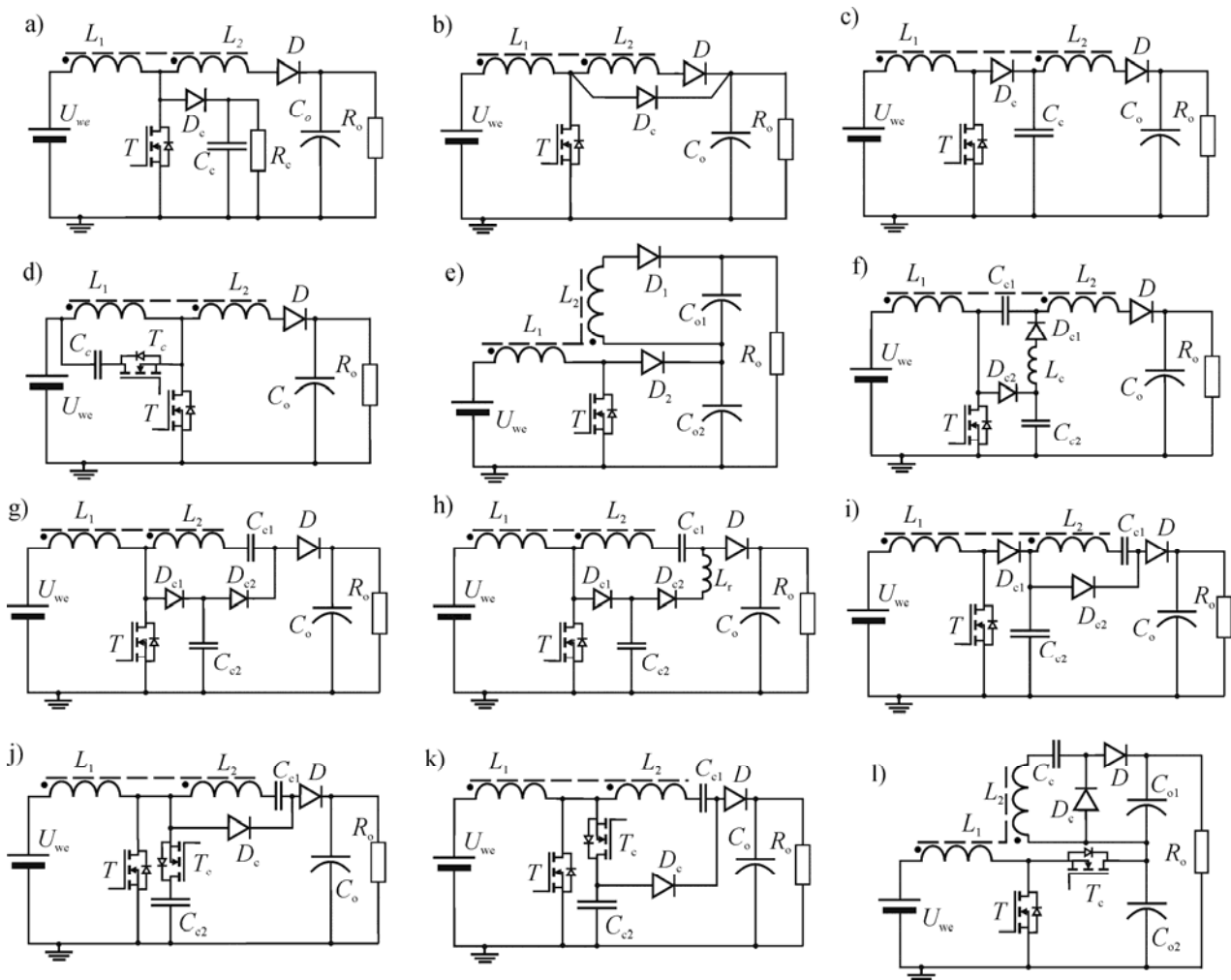
1. uzyskanie wysokiego współczynnika transformacji napięcia wymagałoby sterowania tranzystora z wysokim współczynnikiem wypełnienia, co zwiększyłoby tętnienia

2. maksymalne napięcie U_{DS} tranzystora w podstawowym przekształtniku podwyższającym napięcie jest zbliżone do napięcia wyjściowego. Tranzystory z wysokim napięciem przebicia $U_{DS(bd)}$ charakteryzują się wysoką rezystancją kanału $R_{DS(on)}$, zwiększa to straty mocy w tym elemencie,
3. w czasie załączania tranzystora przez diodę wyjściową w czasie odzyskiwania jej zdolności zaworowych płynie prąd wsteczny o dużych wartościach powodujący duże straty I^2R w diodzie, tranzystorze oraz kondensatorze wyjściowym.

W systemach fotowoltaicznych, w których przekształtnik musi charakteryzować się nawet kilkunastokrotnym współczynnikiem transformacji napięcia, niewymagających izolacji galwanicznej, często stosowane są układy z dławikami sprzężonymi lub dzielonymi. W układach tych wykorzystując przekładnię dławika sprzężonego można uzyskać znacznie wyższy współczynnik transformacji napięcia oraz mniejsze maksymalne napięcie na głównym tranzystorze niż w podstawowym przekształtniku podwyższającym napięcie [1]. Ponadto, w przekształtnikach nieizolowanych z dławikiem sprzężonym w przeciwieństwie do przekształtnika zaporowego, odpowiednie połączenie uzwojeń dławika sprzężonego powoduje, że strumienie magnetyczne poszczególnych uzwojeń w czasie wyłączenia głównego tranzystora sumują się. Umożliwia to uzyskanie wyższego współczynnika transformacji napięcia oraz zmniejszenie wymiarów elementu magnetycznego [2].

Nieizolowane przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami sprzężonymi

W przekształtnikach podwyższających napięcie z dławikami sprzężonymi, w czasie załączania tranzystora T (rys.2) energia ze źródła napięcia U_{we} jest przekazywana do dławika i magazynowana w jego polu magnetycznym. Natomiast energia z kondensatora wyjściowego C_o jest przekazywana do obciążenia R_o . W czasie wyłączenia tranzystora energia uprzednio zgromadzona w dławiku sprzężonym oraz energia ze źródła napięcia U_{we} jest przekazywana za pośrednictwem spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diody D do obciążenia składającego się z równoległego połączenia kondensatora C_o i rezystora R_o .



Rys. 2 Nieizolowane przekształtniki podwyższające napięcie z dławikiem sprzężonym i różnymi układami odciażającymi: a) pasywny układ RDC, b) pasywny układ D, c) pasywny układ DC, d) układ aktywny, e) przekształtnik podwyższająco-zaporowy, f) przekształtnik z pompą ładunkową. Przekształtniki z przełączanym kondensatorem: g) pasywny układ odciażający DCD, h) pasywny układ odciażający DCDL, i) pasywny układ odciażający DC, j) aktywny układ odciażający, k) aktywny układ odciażający z kondensatorem rezonansowym, l) przekształtnik podwyższająco-zaporowy.

W układach tych w momencie wyłączenia tranzystora T duże wartości di/dt w indukcyjności rozproszenia dławika sprzężonego narażają tranzystor na przebiecia, które mogą doprowadzić do jego uszkodzenia, zmniejszając sprawność układu oraz powodując emisję zaburzeń elektromagnetycznych. Dlatego w tego typu przekształtnikach potrzebny jest układ odciażający tłumiący przebiecia spowodowane zmianami prądu w indukcyjności rozproszenia.

Rysunek 2 przedstawia schematy przekształtników z dławikami sprzężonymi i różnymi obwodami odciażającymi. Na rysunku 2a przedstawiono przekształtnik, w którym układ odciażający składa się z diody D_c , kondensatora C_c i rezystora R_c [3]. W tym układzie podczas wyłączenia tranzystora energia z indukcyjności rozproszenia jest przekazywana do kondensatora C_c . Rezystor R_c służy do rozładowywania kondensatora C_c , ograniczając w ten sposób maksymalne napięcie u_{DS} tranzystora T oraz zmniejszając poziom emisji zaburzeń elektromagnetycznych. Istotną wadą tego układu są straty mocy w rezystorze R_c . W przekształtniku przedstawionym na rysunku 2b przebiecia na tranzystorze T ogranicza dioda D_c [4]. W czasie wyłączenia tranzystora T energia z indukcyjności rozproszenia jest przekazywana do obciążenia za pośrednictwem diody D_c . W porównaniu z pozostałymi przekształtnikami przedstawionymi na rysunku

2, w przekształtniku tym wymagany jest tranzystor o dużym napięciu przebicia $U_{DS(bd)}$, które wymusza użycia tranzystora o wyższej rezystancji drenu $R_{DS(on)}$. Zwiększa to straty mocy w tym elemencie. W przekształtniku przedstawionym na rysunku 2c układ odciażający jest zrealizowany za pomocą diody D_c i kondensatora C_c gromadzącego energię z indukcyjności rozproszenia [5], która następnie jest przekazywana do obciążenia. Istotną wadą tego układu są straty energii powodowane odzyskiwaniem zdolności zaworowych diody D_c w czasie załączania tranzystora T oraz straty przewodzenia w tej diodzie w czasie wyłączenia tranzystora T . Przekształtnik przedstawiony na rysunku 2d [6] jest wyposażony w aktywny układ odciażający składający się z tranzystora T_c i kondensatora C_c . W momencie wyłączenia tranzystora T energia z indukcyjności rozproszenia jest przekazywana za pośrednictwem diody zwrotnej tranzystora T_c do kondensatora C_c . W momencie wyłączenia tranzystora T , tranzystor T_c jest załączany, a energia z kondensatora C_c jest przekazywana do obciążenia. W układzie tym istnieje możliwość uzyskania miękkiego przełączania elementów półprzewodnikowych, jednak wiąże się to z koniecznością zwiększenia przekładnia dławika sprzężonego. Przekształtniki z aktywnym układem odciażającym charakteryzują się wysoką sprawnością, jednak dodatkowy tranzystor oraz układ nim sterujący zwiększa koszt takiego rozwiązania. Na

rysunku 2e przedstawiono przekształtnik podwyższająco-zaporowy [7]. Wykorzystanie powielacza napięcia składającego się z dwóch diod $D_1 - D_2$ oraz dwóch kondensatorów $C_{o1} - C_{o2}$ umożliwia uzyskanie wyższego współczynnika transformacji napięcia w stosunku do przekształtnika zaporowego. Ponadto, dioda D_{o2} i kondensator C_{o2} ograniczają przepięcia na tranzystorze T , powodowane zmianami prądu w indukcyjności rozproszenia. W układzie tym maksymalne napięcie na tranzystorze oraz współczynnik transformacji napięcia są opisane takimi samymi równaniami jak w przekształtniku przedstawionym na rysunku 2c, jednak diody tego przekształtnika są wyłączane przy zerowym prądzie co likwiduje straty związane z ich odzyskiwaniem zdolności zaporowych. Na rysunku 2f przedstawiono przekształtnik z dławikiem sprzężonym i pompą ładunkową [8]. W układzie tym w czasie wyłączania tranzystora T energia z indukcyjności rozproszenia jest przekazywana za pośrednictwem spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diody D_{c1} do kondensatora C_{c2} , ograniczając w ten sposób napięcie na tranzystorze T . W czasie załączania tranzystora szybkość narastania jego prądu jest ograniczona indukcyjnością rozproszenia oraz indukcyjnością L_c , umożliwiając jego załączenie przy zerowym prądzie.

Nieizolowane przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami sprzężonymi oraz przełączanymi kondensatorami

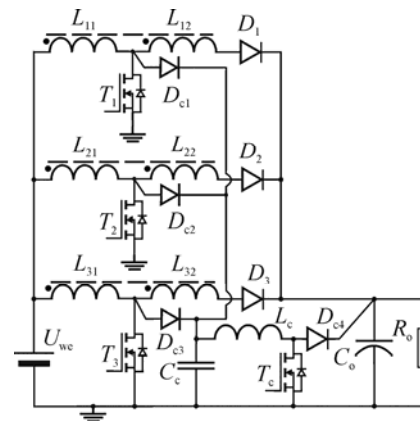
Na rysunkach 2g-l przedstawiono przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami sprzężonymi i przełączanymi kondensatorami. W rozpatrywanych przekształtnikach szeregowo z dławikiem L_2 jest umieszczony kondensator umożliwiający uzyskanie wyższego współczynnika transformacji napięcia oraz ograniczający maksymalne napięcia na tranzystorach, w stosunku do układów przedstawionych na rysunkach 2a-e. W układach tych w czasie załączenia tranzystora T energia ze źródła napięcia U_{we} jest przekazywana do dławika sprzężonego oraz poprzez sprzężenie magnetyczne do kondensatora umieszczonego szeregowo z dławikiem L_2 . W czasie wyłączenia tranzystora T energia ze źródła napięcia U_{we} , kondensatora C_{c1} oraz z dławika sprzężonego jest przekazywana do obciążenia składającego się z równoległego połączenia kondensatora C_o i rezystora R_o .

W układzie przedstawionym na rysunku 2g [9], układ odciążający składa się z kondensatora C_{c2} oraz diody D_{c1}, D_{c2} . W czasie wyłączania tranzystora T energia z indukcyjności rozproszenia jest przekazywana za pośrednictwem spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diody D_{c1} do kondensatora C_{c2} , natomiast podczas załączania tranzystora energia z kondensatora C_{c2} jest przekazywana do kondensatora C_{c1} . W przekształtniku tym tranzystor T jest wyłączany przy dużych wartościach prądu, w dużym stopniu zależnych od indukcyjności rozproszenia. Utrudnia to projekt dławika sprzężonego oraz zmniejsza sprawność przekształtnika. Prąd, przy którym jest wyłączany tranzystor został znacznie ograniczony w układzie przedstawionym na rysunku 2h [10]. Ponadto, w przekształtniku tym dławik L_r , indukcyjność rozproszenia oraz kondensator C_{c1} tworzą obwód rezonansowy. Usprawnia to warunki przełączania elementów półprzewodnikowych. W przekształtniku przedstawionym na rysunku 2i wykorzystano pasywny układ odciążający [11], a w przekształtniku na rysunku 2j układ aktywny [12]. Zasada działania tych układów jest identyczna jak w układach z dławikiem sprzężonym bez dodatkowego przełączanego kondensatora (rys. 2c, d). Na rysunku 2k [13] przedstawiono przekształtnik z aktywnym układem odciążającym i obwodem rezonansowym

składającym się z kondensatora C_{c1} i indukcyjności rozproszenia. Obwód rezonansowy i praca przekształtnika przy nieciągłym strumieniu magnetycznym skojarzonym z dławikiem sprzężonym oraz dodatkowy tranzystor umożliwiają miękkie przełączanie elementów półprzewodnikowych. Przekształtnik przedstawiony na rysunku 2l [14] swoją zasadą działania jest zbliżony do przekształtników z rysunku 2e-k, dioda D_c oraz kondensator C_c podobnie jak w powyżej omawianych układach umożliwiają uzyskanie wyższego współczynnika transformacji napięcia, natomiast dodatkowy tranzystor T_c umożliwia poprawę warunków przełączania pozostałych półprzewodnikowych elementów mocy.

Sekcyjne nieizolowane przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami sprzężonymi

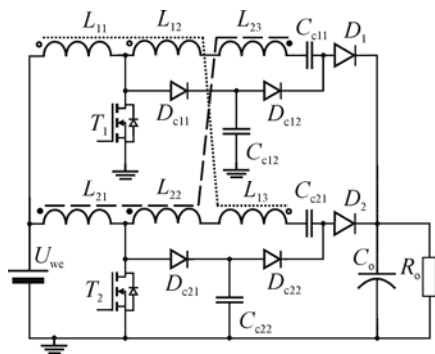
Na rysunkach 3 i 4 pokazano przekształtniki sekcyjne. Przedstawiony na rysunku 3 przekształtnik trójsekcyjny [15], składa się z połączonych równolegle podstawowych przekształtników podwyższających napięcie z dławikami sprzężonymi. Równoległe łączenie przekształtników umożliwia zwiększenie mocy wyjściowej oraz zmniejszenie tętnień zarówno prądów jak i napięć wejściowych i wyjściowych.



Rys. 3 Trójsekcyjny przekształtnik podwyższający napięcie z dławikiem sprzężonym i wspólnym aktywnym układem odciążającym

W układzie wykorzystano wspólny obwód odciążający składający się z diod $D_{c1} - D_{c4}$, dławika L_c , kondensatora C_c oraz tranzystora T_c . Energia z indukcyjności rozproszenia poszczególnych dławików sprzężonych w czasie wyłączania tranzystorów $T_1 - T_3$ jest przekazywana do kondensatora C_c . Z kondensatora C_c energia jest przekazywana do obciążenia za pomocą układu podwyższającego napięcie składającego się z dławika L_c , tranzystora T_c oraz diody D_{c4} . Relatywnie wysokie napięcie wyjściowe i ograniczenie wartości maksymalnych napięć na tranzystorach $T_1 - T_2$ uzyskano w układzie dwusekcyjnego przekształtnika z przełączanymi kondensatorami (rys. 4), dzięki zastosowaniu dławika trójzwojowego [16]. Obwód odciążający działa podobnie jak w przekształtniku uwidocznionym na rysunku 2g.

W tabelach 1-2 dla celów porównawczych, zestawiono podstawowe parametry konstrukcyjne, elektryczne, eksploatacyjne oraz wyniki badań eksperymentalnych układów przedstawionych na rysunkach 1 - 4. Na podstawie przeglądu wyodrębnionych cech przedłożonych przekształtników można stwierdzić, że układy zawierające mniejszą liczbę elementów, bez obwodu z przełączanym kondensatorem, charakteryzują się niższą sprawnością i niższym współczynnikiem transformacji napięcia $k_u = (ND + 1) / (1 - D)$.



Rys. 4 Dwusekcyjny przekształtnik podwyższający napięcie z przełączanymi kondensatorami oraz trójzwojowymi dławikami sprzężonymi

Najwyższą sprawność spośród układów bez przełączanego kondensatora uzyskał przekształtnik przedstawiony na rysunku 2c. Jest to spowodowane użyciem układu odciążającego, w którym jest odyskiwana energia z indukcyjności rozproszenia oraz niskim wzmocnieniem napięcia tego układu. W układach z przełączanym kondensatorem dodatkowy kondensator umieszczony szeregowo z dławikiem L_2 wpływa na

zwiększenie współczynnika transformacji napięcia ($k_{u1} = (2 + N) / (1 - D)$ lub $k_{u1} = (1 + N) / (1 - D)$) oraz na zmniejszenie maksymalnego napięcia u_{DS} głównego tranzystora przekształtnika. Mniejsze napięcie $U_{DS(bd)}$ umożliwia użycie tranzystora o mniejszej rezystancji $R_{DS(on)}$, co z kolei powoduje zmniejszenie strat mocy w tym elemencie i w konsekwencji zwiększenie sprawności konwersji energii. Ponadto, w układach z przełączanymi kondensatorami istnieje możliwość zmniejszenia przekładni dławika sprzężonego, a w konsekwencji gabarytów całego przekształtnika. Maksymalna moc wyjściowa przekształtników przedstawionych na rysunku 2 nie przekraczała 500 W, poza przekształtnikiem z poz. 5, który przy mocy wyjściowej wynoszącej 750 W osiągnął stosunkowo niską sprawność 90,8%. Ograniczona do kilkuset watów maksymalna moc wyjściowa jest charakterystyczną cechą przekształtników, w których głównym elementem indukcyjnym jest dławik sprzężony gromadzący energię w jednym takcie pracy przekształtnika i oddający ją w kolejnym. Przy wyższych mocach wyjściowych w przekształtnikach tych dominują straty w dławiku sprzężonym spowodowane histerezą oraz prądami wirowymi ograniczające maksymalną moc wyjściową przekształtnika.

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów oraz wielkości fizycznych przekształtników z dławikami sprzężonymi

Lp.	Tranzystory	Diody	Dławiki	Kondensatory	Maksymalne napięcie U_{DS} tranzystora	Współczynnik transformacji napięcia k_u	Moc wyjściowa P_{wy}	Napięcie wejściowe U_{we}	Napięcie wyjściowe U_{wy}	Częstotliwość przełączania f_s	Sprawność η	Rysunek	Literatura
-	szt.	szt.	szt.	szt.	[V]	[V/V]	[W]	[V]	[V]	[kHz]	[%]	-	-
1	1	2	1*/2**	2	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{ND+1}{1-D}$	30 – 70	20	27 - 100	25	92	Rys. 2a	[3]
2	1	2	1/2	1	U_{wy}	$\frac{ND+1}{1-D}$	150	25	-	100	-	Rys. 2b	[4]
3	1	2	1/2	2	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{ND+1}{1-D}$	200	24	200	100	90,3 – 94,1	Rys. 2c	[5]
4	2	1	1/2	2	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{ND+1}{1-D}$	20 – 200	30	200	66	75 – 93	Rys. 2d	[6]
5	1	2	1/2	2	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{ND+1}{1-D}$	750	48 – 75	380	50	90,8 – 92,4	Rys. 2e	[7]
6	1	3	1/2, 1	3	$\frac{U_{wy}}{ND+2}$	$\frac{ND+2}{1-D}$	25 – 250	20 – 70	450	85	93,5 – 97,4	Rys. 2f	[8]
7	1	3	1/2	3	$\frac{U_{wy}}{N+2}$	$\frac{N+2}{1-D}$	40 – 300	12	400	100	92,4 – 96,8	Rys. 2g	[9]
8	1	3	1/2, 1	3	$\frac{U_{wy}}{N+2}$	$\frac{N+2}{1-D}$	30 – 200	20 – 45	400	74,5	96,1 – 97,4	Rys. 2h	[10]
9	1	3	1/2	3	$\frac{U_{wy}}{N+1}$	$\frac{N+1}{1-D}$	50 – 500	40 – 56	380	100	93,9 – 96,6	Rys. 2i	[11]
10	2	2	1/2	3	$\frac{U_{wy}}{N+1}$	$\frac{N+1}{1-D}$	70 – 500	40 – 56	380	100	92,5 – 96,9	Rys. 2j	[12]
11	2	2	1/2	1	$\frac{U_{wy}}{N+2}$	$\frac{N+2}{1-D}$	25 – 250	20 – 45	380	100	96,7 – 97,3	Rys. 2k	[13]
12	2	2	1/2	2	$\frac{U_{wy}}{N+1}$	$\frac{N+1}{1-D}$	25 – 250	42	400	70	90 – 96	Rys. 2l	[14]
13	4	7	3/2, 1	2	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{ND+1}{1-D}$	1500	42	380	25	94,8 – 95,1	Rys. 3	[15]
14	2	6	2/3	5	$\frac{U_{wy}}{ND+1}$	$\frac{2(N+1)}{1-D}$	200 – 1000	30 – 45	380	50	94 – 96	Rys. 4	[16]

*liczba dławików sprzężonych, **liczba sprzężeń każdego z dławików sprzężonych

Zwiększyć moc wyjściową można stosując przekształtnik wielosekcyjny, poprzez równoległe połączenie dwóch lub więcej takich samych przekształtników. Maksymalna moc wyjściowa układów wielosekcyjnych ukazanych na rysunkach 3 i 4 wynosiła odpowiednio 1,5 kW i 1 kW. Większość omówionych przekształtników badano przy napięciu wejściowym (12 – 70) V i napięciu wyjściowym (380 – 400) V. Są to typowe poziomy napięć przekształtników podwyższających napięcie pracujących w systemach fotowoltaicznych. Maksymalna częstotliwość przełączania w zaprezentowanych układach nie przekracza 100 kHz.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd przekształtników podwyższających napięcie z dławikami sprzężonymi. Przegląd składa się z przedstawienia czternastu różnych układów opisanych w literaturze naukowej. Przekształtniki tego typu różnią się przede wszystkim sposobem realizacji układu odciążającego, który często poza gromadzeniem energii z indukcyjności rozproszenia poprawia również warunki przełączania półprzewodnikowych elementów mocy. W artykule przedstawiono również przekształtniki z przełączanym kondensatorem, w układach tych uzyskuje się wyższy współczynnik transformacji napięcia, niższe napięcia na półprzewodnikowych elementach mocy oraz wyższą sprawność konwersji energii.

Autorzy: dr inż. Michał Harasimczuk, Politechnika Białostocka, Katedra Automatyki i Elektroniki, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: m.harasimczuk@pb.edu.pl; dr hab. inż. Jakub Dawidziuk prof. PB, Politechnika Białostocka, Katedra Automatyki i Elektroniki, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok.

LITERATURA

- [1] Forouzes M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A., Blaabjerg F., Lehman B., Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32 (2017), nr.12, 9143-9178
- [2] Li W., He X., Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), nr.4, 1239-1250
- [3] Vazquez N., Estrada L., Hernandez C., Rodriguez E., The Tapped-Inductor Boost Converter, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, (2007), 538-543
- [4] Berkovich Y., Axelrod B., Switched-coupled inductor cell for DC-DC converters with very large conversion ratio, *IET Power Electronics*, 4 (2011), nr.3, 309-315
- [5] Syde D. M., Gusseme K. D., Renders B., Bossche A. R., Melkebeek J. A., A single switch boost converter with a high conversion ratio, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 3 (2005), 1581-1587
- [6] Wu T. F., Lai Y. S., Hung J. C., Chen Y. N., Boost Converter with Coupled Inductors and Buck-Boost Type of Active Clamp, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (2008), nr.1, 154-162
- [7] Zhao Q., Lee F. C., High performance coupled-inductor DC-DC converters, *Power Electronics Conference and Exposition*, 1 (2003), nr.18, 109-113
- [8] Lai J. S., Yu W., Hutchens C., High efficiency converter with charge pump and coupled inductor for wide input photovoltaic AC module applications, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, (2009), 3895-3900
- [9] Ju-Won B., Myung-Hyo R., Tae-Jin R., Dong-Wook Y., Jong-Soo K., High boost converter using voltage multiplier, *Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, (2005), 6-10
- [10] Gu B., Dominic J., Lai J. S., Zhao Z., Liu C., High Boost Ratio Hybrid Transformer DC-DC Converter for Photovoltaic Module Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28 (2013), nr.4, 2048-2058
- [11] Zhao Y., Li W., Deng Y., He X., High step-up boost converter with passive lossless clamp circuit for non-isolated high step-up applications, *IET Power Electronics*, 4 (2011), nr.8, 851-859
- [12] Zhao Y., Li W., He X., Single-Phase Improved Active Clamp Coupled-Inductor-Based Converter with Extended Voltage Doubler Cell, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2012), nr.6, 2869-2878
- [13] Gu B., Dominic J., Chen B., Zhang L., Lai J. S., Hybrid Transformer ZVS/ZCS DC-DC Converter with Optimized Magnetics and Improved Power Devices Utilization for Photovoltaic Module Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (2015), nr.4, 2127-2136
- [14] Seong H. W., Kim H. S., Park K. B., Moon G. W., Youn M. J., High Step-Up DC-DC Converters Using Zero-Voltage Switching Boost Integration Technique and Light-Load Frequency Modulation Control, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2012), nr.3, 1383-1400
- [15] Dwari S., Parsa L., An Efficient High-Step-Up Interleaved DC-DC Converter with a Common Active Clamp, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (2011), nr. 1, 66-78
- [16] Li W., Zhao Y., Wu J., He X., Interleaved High Step-Up Converter with Winding-Cross-Coupled Inductors and Voltage Multiplier Cells, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27, 2012, nr.1, 133-143