

Michał HARASIMCZUK*

DWUKIERUNKOWY PRZEKSZTAŁNIK DO MAGAZYNOWANIA ENERGII W SYSTEMIE FOTWOLTAICZNYM

Magazynowanie energii pochodzącej z paneli fotowoltaicznych wymaga wykorzystania przekształtnika dwukierunkowego, charakteryzującego się odpowiednio wysokim współczynnikiem wzmocnienia napięciowego. Energia ta jest magazynowana w źródłach napięcia niskiego (akumulatory, superkondensatory). Zadaniem przekształtnika jest wzmocnienie napięcia magazynu energii w trakcie jego rozładowywania do napięcia wysokiego wynoszącego ok. 350–400 V, bądź obniżanie tego napięcia w trakcie jego rozładowywania. W artykule został zaprezentowany dwukierunkowy izolowany przekształtnik podwyższająco - obniżający napięcie. Przekształtnik składa się z mostka podwyższająco - obniżającego po stronie napięcia niskiego oraz zwykłego mostka po stronie napięcia wysokiego. Wysoki współczynnik wzmocnienia uzyskano dzięki wykorzystaniu przekładni transformatora. Wykorzystanie mostka podwyższająco – obniżającego zapewnia stabilną pracę przekształtnika przy zmiennym napięciu magazynu energii. Umożliwia to jego wykorzystanie do obsługi superkondensatorów, w których napięcie jest uzależnione od stopnia ich naładowania. W artykule omówiono zasadę sterowania przekształtnikiem, przedstawiono oraz omówiono wyniki badań symulacyjnych w środowisku PSpice. W badaniach zostały użyte modele tranzystorów z węgla krzemowego.

SŁOWA KLUCZOWE: przekształtnik dwukierunkowy, superkondensator, panel fotowoltaiczny, magazynowanie energii

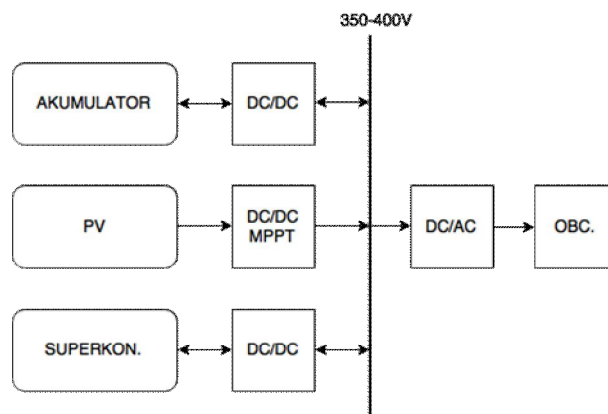
1. WPROWADZENIE

1.1. Hybrydowy system magazynowania energii

Panele fotowoltaiczne stają się jednym z najpopularniejszych źródeł pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych [6]. Niestety wraz ze wzrostem ilości dostarczanej energii do sieci energetycznej przez panele fotowoltaiczne rośnie ich negatywny wpływ na jakość energii w sieci. Jej magazynowanie może być skutecznym rozwiązaniem tego problemu [2]. Coraz częściej zwraca się uwagę na korzyści płynące z hybrydowych systemów magazynują-

* Politechnika Białostocka.

cych energię [1][3]. W systemie takim jako zasobniki są wykorzystywane akumulatory oraz superkondensatory. Akumulatory cechuje duża gęstość energii i niewielka gęstość mocy, natomiast superkondensatory odwrotnie: duża gęstość mocy i niewielka gęstość energii. Wykorzystanie obydwu magazynów pozwala na stworzenie systemu o dużej gęstości mocy i energii. Superkondensatory są źródłami/zasobnikami napięcia niskiego wynoszącego zazwyczaj około 2,7 V i pojemności przekraczającej 3 kF. W praktyce superkondensatory łączy się szeregowo celem uzyskania źródła wyższego napięcia. Zazwyczaj jest to od kilkunastu do dwudziestu czterech wolt. Hybrydowy system fotowoltaiczny zawierający superkondensatory oraz akumulatory jako magazyny energii został przedstawiony na rysunku 1. Napięcie wyjściowe panelu fotowoltaicznego jest wzmacniane do napięcia 350 – 400 V. Jednocześnie jest to napięcie wejściowe falownika o napięciu wyjściowym spełniającym parametry sieci energetycznej. Za obsługę akumulatorów oraz superkondensatorów odpowiadają dwukierunkowe przekształtniki podwyższająco – obniżające napięcie. Tryb pracy przekształtników dwukierunkowych jest uzależniony od kierunku przepływu prądu. W układzie podwyższającym napięcie magazyn energii jest rozładowywany, a w układzie obniżającym ładowany.



Rys. 1. Schemat blokowy hybrydowego systemu fotowoltaicznego

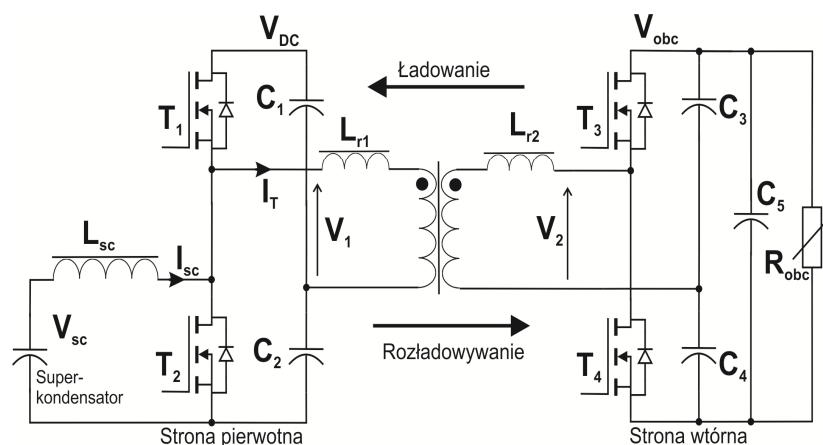
2. PRZEKSZTAŁTNIK OBSŁUGUJĄCY SUPERKONDENSATORY

Przekształtnik obsługujący superkondensatory powinien poza dwukierunkowym przesylem energii zapewnić odpowiednio wysoki współczynnik wzmocnienia, aby wzmocnić napięcie magazynu do napięcia 350 – 400 V. Ze względu na uzależnienie napięcia superkondensatora od stanu jego

naładowania przekształtnik powinien również zapewnić stabilne warunki pracy przy zmieniającym się napięciu superkondensatora.

2.1. Schemat i zasada działania przekształtnika

Na rysunku 2 został przedstawiony schemat dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco – obniżającego napięcie [4–5].



Rys. 2. Schemat dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco - obniżającego napięcie [4]

Wysoki współczynnik wzmocnienia napięciowego uzyskano poprzez wykorzystanie przekładni transformatora. Dwukierunkowy przesył energii umożliwiają tranzystory $T_1 - T_4$. Wykorzystanie półmostka podwyższająco – obniżającego po stronie pierwotnej umożliwia zachowanie stałego napięcia V_1 transformatora, niezależnego od napięcia superkondensatora. Tranzystory T_1 i T_2 są sterowane naprzemian techniką modulacji szerokości impulsu ze zmiennym współczynnikiem wypełnienia uzależnionym od napięć V_{sc} i V_{DC} zgodnej z zależnością (1):

$$D = \frac{V_{DC} - V_{sc}}{V_{sc}} \quad (1)$$

Wypełnienie (D) jest to stosunek czasu przewodzenia tranzystora T_2 do okresu sygnału sterującego tym tranzystorem zgodnie ze wzorem (2):

$$D = \frac{t_{T_2 on}}{T} \quad (2)$$

W transferze energii przez transformator uczestniczy jego indukcyjność rozproszenia. Wpływa ona jednocześnie na maksymalną moc przenoszoną przez przekształtnik. Prąd transformatora jest regulowany przesunięciem jego napięć

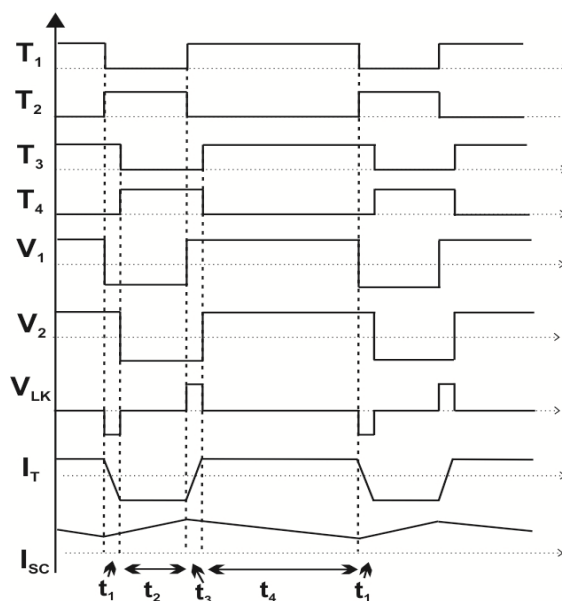
po stronie wtórnej i pierwotnej. Moc transformatora można opisać zależnością (3):

$$P = \frac{V_{DC} V_{OBC}}{2\pi f L_r n} \left(D - D^2 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad (3)$$

gdzie: n – przekładnia transformatora, L_r – całkowita indukcyjność rozproszenia transformatora przeniesiona na stronę pierwotną, f – częstotliwość przełączania tranzystorów, φ – przesunięcie napięć transformatora strony wtórnej względem strony pierwotnej, P – moc przekształtnika.

2.2. Praca w układzie obniżającym napięcie

W układzie obniżającym napięcie, napięcie transformatora po stronie wtórnej jest opóźnione w stosunku do napięcia po stronie pierwotnej. Na rysunku 3 zaprezentowano teoretyczne przebiegi napięć i prądów omawianego przekształtnika, pracującego w układzie podwyższającym napięcie.



Rys. 3. Teoretyczne przebiegi napięć i prądów dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco - obniżającego napięcie w układzie podwyżczającym napięcie [4]

Sterowanie przekształtnika w układzie podwyższającym możemy podzielić na cztery etapy:

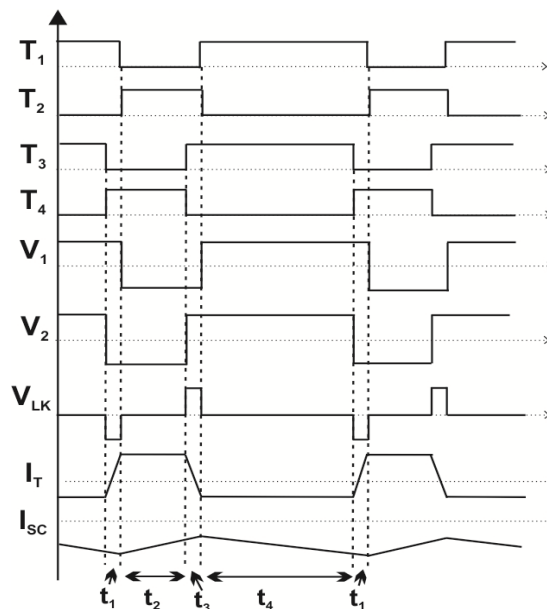
t_1 – zamknięcie tranzystorów T_1 , T_4 i przewodzenie tranzystorów T_2 i T_3 powoduje zaindukowanie się na indukcyjności rozproszenia przeniesionej na

stronę pierwotną napięcia $V_1 - V_2/n$ - prąd transformatora maleje. Prąd superkondensatora wzrasta.

- t_2 – zamknięcie tranzystorów T_1 i T_3 , przewodzenie tranzystorów T_2 i T_4 . Napięcie zaindukowane na indukcyjności rozproszenia transformatora wynosi zero. Dlatego prąd transformatora nie zmienia swojej wartości. Prąd superkondensatora wzrasta.
- t_3 – przewodzenie tranzystorów T_1 , T_4 i zamknięcie tranzystorów T_2 i T_3 powoduje zaindukowanie się na indukcyjności rozproszenia przeniesionej na stronę pierwotną napięcia $V_1 - V_2/n$ - prąd transformatora narasta. Prąd superkondensatora maleje.
- t_4 – przewodzenie tranzystorów T_1 i T_3 , zamknięcie tranzystorów T_2 i T_4 . Napięcie zaindukowane na indukcyjności rozproszenia transformatora wynosi. Dlatego prąd transformatora nie zmienia swojej wartości. Prąd superkondensatora maleje.

2.3. Praca w układzie obniżającym napięcie

W układzie obniżającym napięcie, napięcie transformatora po stronie pierwotnej jest opóźnione w stosunku do napięcia po stronie wtórnej. Na rysunku 4 zostały zaprezentowane teoretyczne przebiegi napięć i prądów zaprezentowanego przekształtnika pracującego w układzie obniżającym napięcie.



Rys. 4. Teoretyczne przebiegi napięć i prądów dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco-obniżającego napięcie w układzie obniżającym napięcia [4]

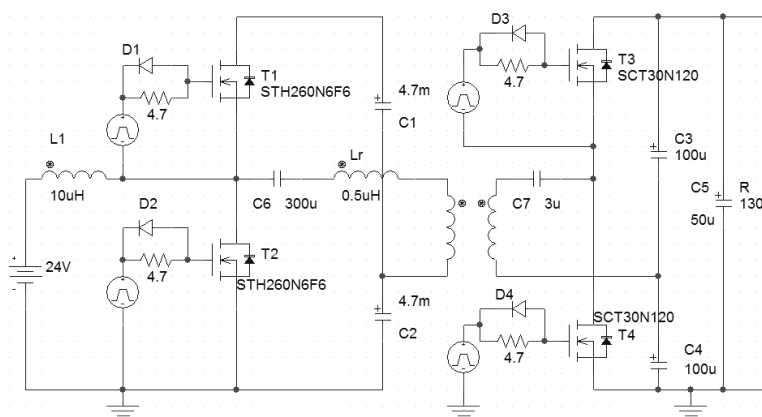
Sterowanie przekształtnika w układzie obniżającym możemy podzielić na cztery etapy:

- t_1 – zamknięcie tranzystorów T_2 , T_3 i przewodzenie tranzystorów T_1 i T_4 , powoduje zaindukowanie się na indukcyjności rozproszenia przeniesionej na stronę pierwotną napięcia $V_1 - V_2/n$ - prąd transformatora narasta. Prąd superkondensatora maleje.
- t_2 – zamknięcie tranzystorów T_2 i T_3 , przewodzenie tranzystorów T_1 i T_4 . Napięcie zaindukowane na indukcyjności rozproszenia transformatora przeniesionej na stronę pierwotną wynosi zero. Dlatego prąd transformatora nie zmienia swojej wartości. Prąd superkondensatora narasta.
- t_3 – zamknięcie tranzystorów T_1 , T_4 i przewodzenie tranzystorów T_2 i T_3 powoduje zaindukowanie się na indukcyjności rozproszenia przeniesionej na stronę pierwotną napięcia $V_1 - V_2/n$ - prąd transformatora maleje. Prąd superkondensatora narasta.
- t_4 – przewodzenie tranzystorów T_1 i T_3 , zamknięcie tranzystorów T_2 i T_4 . Napięcie zaindukowane na indukcyjności rozproszenia transformatora przeniesionej na stronę pierwotną wynosi zero. Prąd transformatora nie zmienia swojej wartości. Prąd superkondensatora maleje.

3. SYMULACJA MODELU PRZEKSZTAŁNIKA W PROGRAMIE PSpICE

3.1. Schemat i założenia

Symulacja przekształtnika została przeprowadzona za pomocą programu PSpice. Schemat symulacyjny przekształtnika w układzie podwyższającym napięcie został przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat symulacyjny przekształtnika w układzie podwyższającym napięcie

Po stronie pierwotnej użyto modelu tranzystora STH260N6F6-6 [7] o rezystancji drenu R_{DSon} wynoszącej $1,7 \text{ m}\Omega$, po stronie wtórnej modelu tranzystora z węgla krzemu SCT30N120 [7] o rezystancji drenu R_{DSon} wynoszącej $90 \text{ m}\Omega$. Kondensatory C_6 i C_7 zapewniają równomierne ładowanie oraz rozładowywanie kondensatorów $C_1 - C_4$. Diody $D_1 - D_4$ zapewniają szybkie rozładowanie pojemności wejściowej tranzystora i w rezultacie jego szybkie zatkanie. W tabeli 1 zostały zaprezentowane ustalone warunki pracy przekształtnika. Indukcyjność rozproszenia strony wtórnej została przeniesiona na stronę pierwotną.

Tabela 1. Założenia symulacyjne przekształtnika

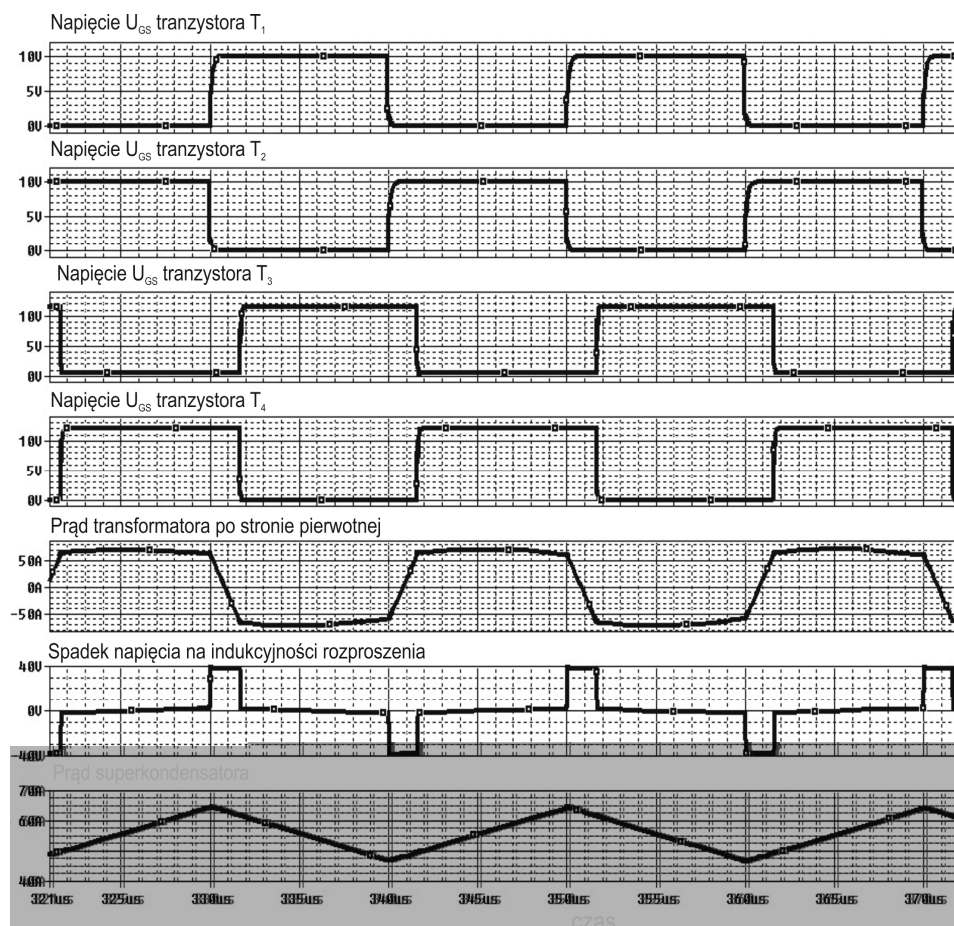
Napięcie superkondensatorów	Vcs [V]	12 – 24
Częstotliwość przełączania tranzystorów	f [kHz]	50
Napięcie mostka po stronie pierwotnej	Vdc [V]	36
Napięcie mostka po stronie wtórnej	Vobc [V]	360
Indukcyjność rozproszenia	Lr [μH]	0,5
Moc przekształtnika	P [W]	0 – 1000
Przekładnia transformatora		1:10

Podczas badań w układzie podwyższającym napięcie źródło napięciowe na rysunku 5 zamieniono na komplementarny rezystor uzależniony od wymaganego napięcia wyjściowego, natomiast rezystor R na źródło napięciowe 360 VDC.

3.2. Wyniki badań symulacyjnych

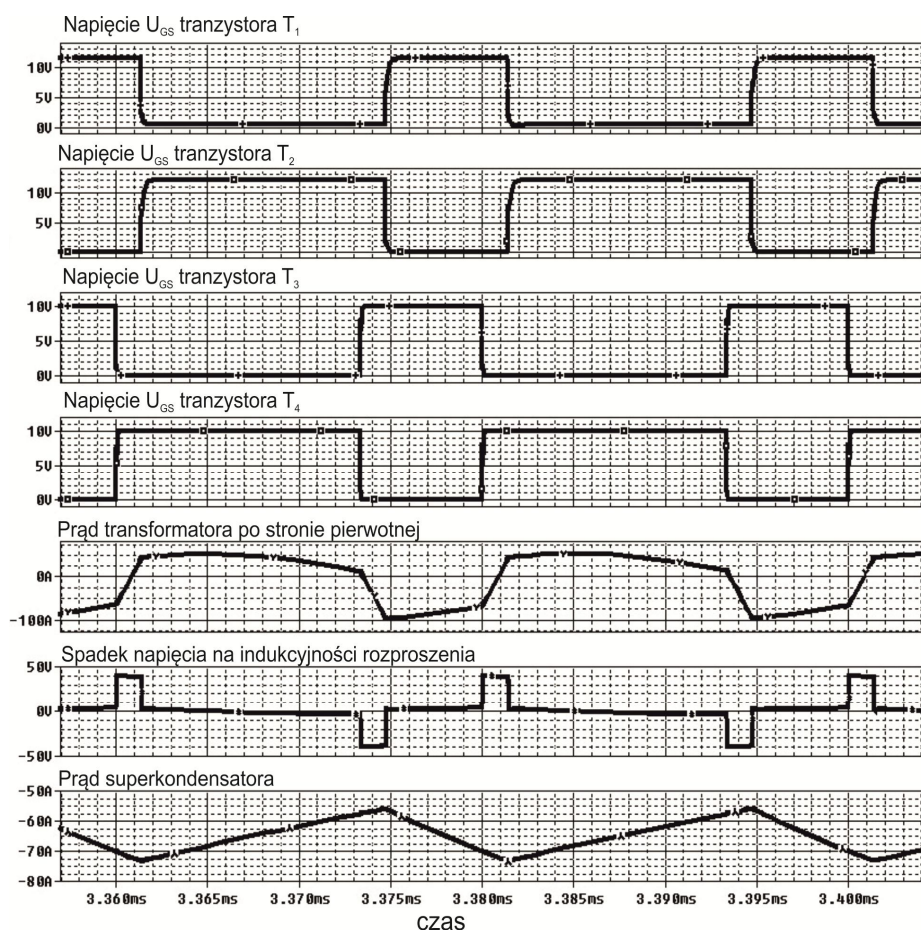
Na rysunku 6 zostały zaprezentowane przebiegi napięć i prądów badanego przekształtnika w układzie podwyższającym napięcie. Zaprezentowane przebiegi otrzymano przy napięciu wejściowym wynoszącym 18 V. Zgodnie ze wzorem 2 wypełnienie zostało ustalone na 50%. Prąd transformatora w momencie otwarcia tranzystorów T_1 i T_3 lub T_2 i T_4 nie przyjmuje stałej wartości z powodu spadków napięcia na tych tranzystorach oraz z powodu użycia kondensatorów C_6 i C_7 zapobiegających nierównomiernemu rozładowywaniu kondensatorów $C_1 - C_4$. Napięcie na indukcyjności rozproszenia transformatora nie jest możliwe do zmierzenia w rzeczywistym przekształtniku, jednak dobrze pokazuje przyczynę zmian prądów transformatora sterowanych przesunięciem jego napięć po stronie wtórnej i pierwotnej. Pobierany prąd przez przekształtnik wynosił 50 – 60 A. Przesunięcie fazy napięcia po stronie wtórnej względem napięcia po stronie pierwotnej w analizowanym przypadku przy mocy wyjściowej 1 kW wynosi około $1/20 \pi$.

Na rysunku 7 zaprezentowano przebiegi napięć i prądów dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco - obniżającego napięcie w układzie podwyższającym napięcie (ładowanie superkondensatora).



Rys. 6. Przebiegi napięć i prądów dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco – obniżającego napięcie w układzie podwyższającym napięcie

Napięcie obciążenia zostało ustalone na 24 V zgodnie z zależnością 2 wypełnienie sygnału sterującego tranzystorem T_1 wynosi 33%. Przesunięcie fazy napięcia transformatora po stronie wtórnej względem napięcia po stronie pierwotnej wynosi ok. $1/15\pi$. W tabeli 2 zostały przedstawione wyniki badań symulacyjnych przekształtnika dla różnych współczynników wzmocnienia i mocy wyjściowej wynoszącej ok. 1 kW.



Rys. 7. Przebiegi napięć i prądów dwukierunkowego izolowanego przekształtnika podwyższająco – obniżającego napięcie w układzie obniżającym napięcie

Tabela 2. Wyniki badań symulacyjnych przekształtnika

	wypełnienie tranzystora T1	wzmocnienie/ tłumienie	sprawność	moc wejściowa	moc wyjściowa
podwyższanie napięcia	33,3%	15	95,38%	1,038	0,990
	50,0%	20	96,23%	1,034	0,995
	66,7%	30	95,42%	1,027	0,980
obniżanie napięcia	33,3%	15	91,19%	1,056	0,963
	50,0%	20	93,78%	0,996	0,934
	66,7%	30	91,44%	1,052	0,962

4. PODSUMOWANIE

Obsługa superkondensatorów w systemie magazynowania energii fotowoltaicznej wymaga zastosowania przekształtników zapewniających wysoki współczynnik wzmocnienia przy zmieniającym się napięciu wejściowym. Zaprezentowany dwukierunkowy przekształtnik podwyższająco – obniżający napięcie spełnia te wymagania. W układzie podwyższającym napięcie umożliwia on zachowanie stałego napięcia wyjściowego przy zmieniającym się napięciu wejściowym. Uzyskano ponad 95% sprawność przy mocy wyjściowej ok. 1 kW dla trzech różnych współczynników wzmocnienia napięciowego przy stałym napięciu wyjściowym. W układzie obniżającym napięcie największą sprawność uzyskano przy wypełnieniu równym 50% i wynosiła ona ok. 94%.

LITERATURA

- [1] Cabrane Z., Ouassaid M., Maaroufi M., *Integration of supercapacitor in photovoltaic energy storage: Modelling and control*, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014, str. 185 - 190.
- [2] Citro C., Luna A., Rocabert J., Munoz-Aguilar R.S., Candela I., Rodriguez, P., *Overview of power processing structures for embedding Energy Storage in PV power converters*, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, str. 2492 – 2498, 2011.
- [3] Glavin, M.E., Chan, P.K.W., Armstrong, S.; Hurley, W.G., *A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system*, 13th. Power Electronics and Motion Control Conference, str. 1688 – 1695, 2008.
- [4] Tao H., Duarte J.L., Hendrix M.A.M., „Novel Zero-Voltage Switching Control Methods for a Multiple-Input Converter Interfacing a Fuel Cell and Supercapacitor” IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference, str. 2341 – 2346, 2006.
- [5] Tao H., Kotsopoulo A., Duarte J.L., Hendrix M.A.M., „Multi-input bidirectional DC-DC converter combining DC-link and magnetic-coupling for fuel cell systems”, Industry Applications Conference, 2005. Fortieth IAS Annual Meeting, tom: 3 str. 2021 – 2028, 2005.
- [6] REN21, "Renewables 2013: Global Status Report (GSR)," http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf (29.02.2016)
- [7] www.st.com (29.02.2016)

DC/DC CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SUPERCAPACITOR STORAGE SYSTEM

Storage energy from the photovoltaic panels required bidirectional converter with high voltage gain. The converter step up voltage during discharge storage elements and step down during charge. In this paper bidirectional boost half bridge converter has been

described. Proposed converter is operated in continuous conduction mode (CCM). Achieved high efficiency in constant output voltage with changing input voltage. This is necessary to use supercapacitors in storage systems because the voltage at its clamps depends on the state of charge of the supercapacitor. In article describes a bidirectional power flow control. Simulation results has been presented in PSpice. During discharge mode maximum efficiency is approximately 96% during charging is approximately 93% has been achieved. In simulation has been used SiC transistors models.

(Received: 8. 02. 2016, revised: 5. 03. 2016)