

ارائه یک مبدل دو طرفه ایزوله جدید با جریان خروجی پیوسته

بهادر فانی^(۱) - مجید دلشاد^(۲) - داریوش نظرپور^(۳)

(۱) دانشجوی دکترای برق - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

(۲) استادیار - گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان

(۳) استادیار - گروه برق، دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۸۹

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۸

خلاصه: در این مقاله یک مبدل دو طرفه جدید ایزوله ارائه شده است. این مبدل از دو ترانسفورمر فوروارد و فلائی بک تشکیل گردیده و تنها یک سویچ در طرف اولیه و یک سویچ در طرف ثانویه ترانسفورمر دارد. این مبدل به صورت PWM کنترل می‌گردد و از آنجایی که در هر دو حالت خاموش و روشن بودن سویچها توان به خروجی منتقل می‌گردد، چگالی توان آن نسبت به مبدلهای قبلی بالاتر است. از طرفی مبدل مذکور قادر است که از هر دو طرف به صورت باک-بوست عمل نماید. به همین علت مبدل ارائه شده می‌تواند تحت تغییرات زیاد ولتاژ ورودی به خوبی کار کند.

کلمات کلیدی: کلیدزنی سخت، باک-بوست، مبدل دو طرفه، PWM.

۱- مقدمه

امروزه مبدلهای دو طرفه کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا کرده‌اند. این مبدلها در خودروهای الکتریکی، سیستمهای پیل سوختی، سلولهای خورشیدی و غیره به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۴]. این مبدلها قادر به انتقال انرژی از هر دو طرف (ورودی به خروجی و بالعکس) می‌باشند و در اغلب موارد از یک جهت به صورت افزایشنده (بوست) عمل کرده و از جهت دیگر به صورت کاهشنده (باک) عمل می‌کنند. این مبدلها به طور کلی به دو دسته غیر ایزوله و ایزوله تقسیم می‌گردند. مبدلهای غیر ایزوله در کاربردهایی که اختلاف ولتاژ در دوطرف مدار بالا نیست و زمین شناور نیز مورد نیاز نمی‌باشد، استفاده می‌شوند [۵]. از آنجایی که در اکثر کاربردهای مبدلهای دو جهته یک طرف باطری با ولتاژ پایین قرار گرفته است، بنابراین به بهره بالا نیاز است و در این موارد مبدلهای ایزوله بسیار پرکاربردتر از مبدلهای غیر ایزوله می‌باشد.

مبدلهای ایزوله دو طرفه بسیاری تا کنون ارائه گردیده‌اند. یکی از پرکاربردترین آنها مبدل دو طرفه فلائی بک می‌باشد، که می‌تواند به صورت باک-بوست از هر دو طرف عمل نماید [۶]. این مبدل دارای دو سویچ در اولیه و ثانویه می‌باشد و به صورت PWM عمل می‌نماید. ولی این مبدل دارای جریان گسسته در خروجی می‌باشد و از طرفی

استرس ولتاژ و جریان سویچ آن بالا است.

مبدلهای دوطرفه PWM نامتقارن، نمونه دیگر پرکاربرد است. این مبدلها کلیدزنی نرم را برای سویچها فراهم می‌سازند اما رفتار دینامیکی آنها پیچیده است [۷].

این مقاله یک مبدل دو طرفه جدید ایزوله ارائه شده است. این مبدل از دو ترانسفورمر فوروارد و فلائی بک تشکیل گردیده و تنها یک سویچ در طرف اولیه و یک سویچ در طرف ثانویه ترانسفورمر دارد. مبدل پیشنهادی به صورت PWM کنترل می‌گردد و از آنجایی که در هر دو حالت خاموش و روشن بودن سویچها توان به خروجی منتقل می‌گردد چگالی توان آن نسبت به مبدلهای قبلی (فلائی بک) بالاتر است. از طرفی مبدل مذکور قادر است که از هر دو طرف به صورت باک-بوست عمل نماید. به همین علت مبدل ارائه شده می‌تواند تحت تغییرات زیاد ولتاژ ورودی به خوبی کار کند.

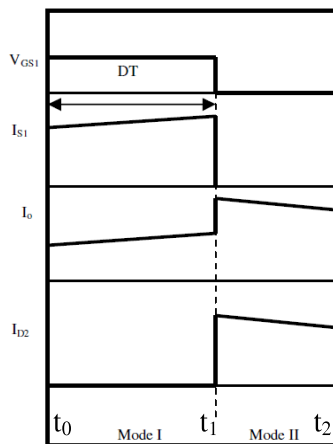
۲- مبدل دو طرفه پیشنهادی

مبدل دو طرفه پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مبدل S_1 و S_2 سویچهای اصلی مبدل، D_1 و D_2 دیودهای موازی - معکوس سویچهای S_1 و S_2 ، C_b خازن بلوک کننده و T_1 و T_2 به ترتیب ترانسفورمرهای فلائی بک و فوروارد می‌باشند. L_{m1} سلف

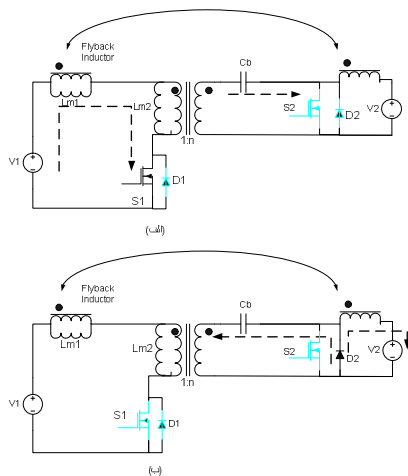
شکل (۲) شکل موجهای اصلی مبدل را در حالت مستقیم نشان می‌دهد. شکل (۳) نیز مبدل را در وضعیتهای اول و دوم در حالت مستقیم نشان می‌دهد.

۳-۲- عملکرد در حالت معکوس

در این حالت سوئیچ S_2 کلیدزنی گردیده و کلید S_1 در طول سیکل سوئیچینگ خاموش است. مبدل پیشنهادی در این حالت نیز دارای دو وضعیت عملکرد در یک سیکل کلیدزنی می‌باشد. شکل موجهای اصلی مبدل در این حالت در شکل (۴) نشان داده شده است.

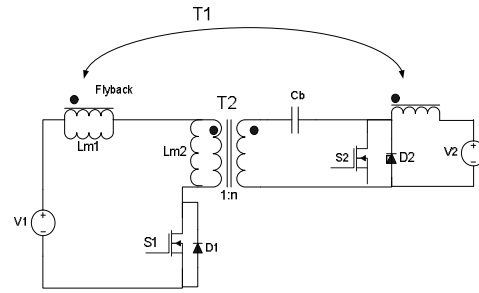


شکل (۲): شکل موجهای اصلی مبدل در حالت عملکرد مستقیم
Fig. (2): The waveforms of the converter



شکل (۳): مبدل در حالت مستقیم (الف) وضعیت اول (ب) وضعیت دوم
Fig. (3): The converter: (a) Indirect case, (b) In the second case

مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فلای‌بک و L_{m2} سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فوروارد می‌باشد. m نسبت دور ترانسفورمر فلای‌بک و n نسبت دور ترانسفورمر فوروارد است. همچنین ولتاژ V_{Lm1} و ولتاژ دو سر سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فلای‌بک (L_{m1}) و V_{Lm2} ولتاژ دو سر سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فوروارد (L_{m2}) می‌باشد. V_2 و V_1 نیز به ترتیب منابع طرف اولیه و ثانویه مبدل هستند.



شکل (۱): نمای شماتیک مبدل دوطرفه پیشنهادی
Fig. (1): The schematic of proposed bidirectional converter

۳-۳- عملکرد مبدل

برای ساده سازی تحلیل مبدل فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود.
- از تمام المانهای پارازیتی مبدل صرف نظر می‌گردد.
- ولتاژهای V_2 و V_1 در یک سیکل کلیدزنی ثابت در نظر گرفته می‌شوند.
- خازن C_b به اندازه کافی بزرگ است و در نتیجه می‌توان ولتاژ آن را در یک سیکل سوئیچینگ ثابت در نظر گرفت.

۳-۱- عملکرد در حالت مستقیم

در این حالت سوئیچ S_1 کلیدزنی می‌گردد و سوئیچ S_2 در تمام مدت کلیدزنی خاموش است. مبدل دو جهت پیشنهادی در این حالت دو وضعیت عملکرد در یک سیکل کلیدزنی دارد.
وضعیت اول: این وضعیت با روشن شدن سوئیچ S_1 و خاموش شدن دیود D_2 آغاز می‌گردد. در این وضعیت هر دو ترانسفورمر، انرژی به خروجی انتقال می‌دهند و جریان سوئیچ به طور خطی افزایش می‌یابد.
وضعیت دوم: این وضعیت با خاموش شدن سوئیچ S_1 آغاز می‌گردد. در این وضعیت دیود D_2 هدایت کرده و جریان سلف مغناطیس کنندگی L_{m2} خازن C_b را دشارژ می‌کند. در این وضعیت تنها ترانسفورمر فلای‌بک به خروجی توان ارسال می‌نماید. روابط مهم این وضعیت در زیر آورده شده است.

$$n.(I_{Lm1} - I_1)D + (1-D).n.I_{Lm1} = I_0 \quad (1)$$

$$m.(I_{Lm2} - I_1)D = (1-D).m.I_{Lm2} \quad (2)$$

$$I_{Lm1} = DI_1 + \frac{I_0}{n} \quad (3)$$

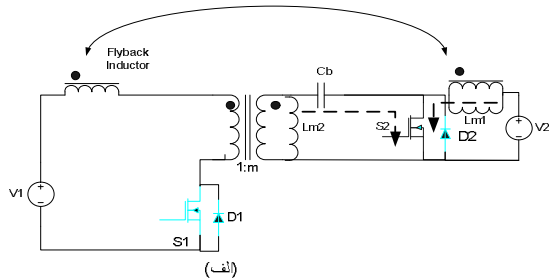
$$I_{Lm2} = \frac{D}{2D-1} I_1 \quad (4)$$

$$V_{cb} = \frac{mDV_2}{1-D} \quad (۶)$$

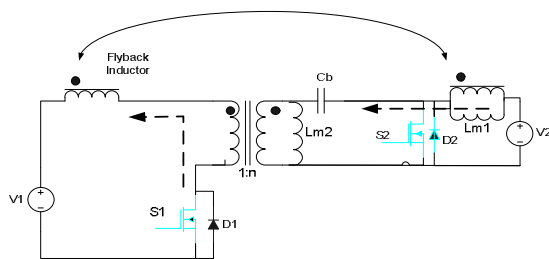
با نوشتن رابطه بالانس ولت - ثانیه ترانسفورمر فلای بک رابطه (۷) به دست می آید و از این رابطه ولتاژ V_1 می تواند مطابق با رابطه (۸) محاسبه شود.

$$DV_1 = (1-D) \frac{V_o}{n} \quad (۷)$$

$$V_1 = \frac{(1-D)}{D} \cdot \frac{V_o}{n} \quad (۸)$$



(الف)



(ب)

شکل (۵): مبدل در دو وضعیت عملکرد (الف) وضعیت اول (ب) وضعیت دوم
Fig. (5): The converter in two cases: (a) In the first case, (b) In the second case

همچنین روابط (۹) و (۱۰) هنگامیکه سویچ روشن است، برقرار است. بنابراین با توجه به رابطه (۶) و (۸)، V_2 نیز به راحتی از رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$V_1 + V_2 = V_{in} \quad (۹)$$

$$V_o + nV_1 - V_{cb} = mV_2 \quad (۱۰)$$

$$V_2 = \frac{V_o \cdot (1-D)}{mD} \quad (۱۱)$$

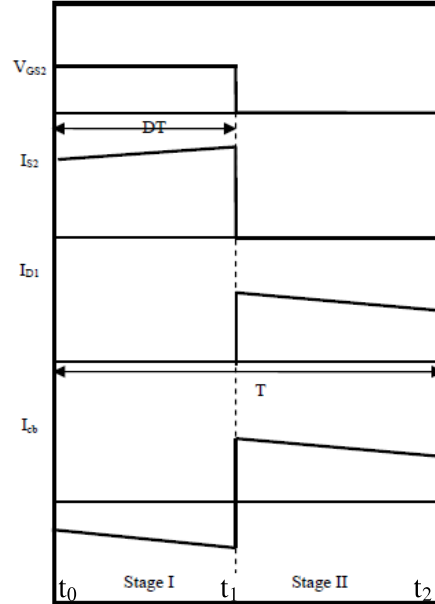
در نهایت بهره مبدل پیشنهادی با استفاده از روابط (۸) و (۱۰) و (۱۱) می تواند مطابق رابطه زیر به دست آید.

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{mnD}{(1-D) \cdot (m+n)} \quad (۱۲)$$

۴-۲- آنالیز مبدل در حالت معکوس

با نوشتن رابطه ولت - ثانیه برای ترانسفورمر فرورارد رابطه (۱۳) حاصل می شود.

$$V_{cb} DT = (V_{S2} - V_{Cb}) \cdot (1-D)T \quad (۱۳)$$



شکل (۴): شکل موجهای اصلی مبدل در حالت عملکرد معکوس
Fig. (4): The waveforms of the converter in the reverse case action

وضعیت اول: در این وضعیت، سویچ S_2 روشن است و جریانهای سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمرهای فلای بک و فرورارد (I_{Lm2} و I_{Lm1}) از S_2 می گذرد. در این وضعیت دیود بدنه S_1 ، D_1 خاموش است و انرژی نمی تواند به خروجی منتقل گردد. در این وضعیت انرژی از سلف مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فلای بک ذخیره می گردد. وضعیت دوم: وقتی که سویچ S_2 خاموش می شود، این وضعیت آغاز می گردد. در این وضعیت D_1 هدایت کرده و انرژی از طریق ترانسفورمرهای فلای بک و فرورارد به خروجی منتقل می شود. مبدل پیشنهادی در دو وضعیت اول و دوم در حالت معکوس در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴- آنالیز مبدل پیشنهادی

در این قسمت آنالیز مبدل در دو حالت مستقیم و معکوس ارایه شده است.

در این مبدل همیشه جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورمر فلای بک بزرگتر از ترانسفورمر فرورارد می باشد و بنابراین ترانسفورمر فلای بک همیشه در حال انتقال انرژی به خروجی است.

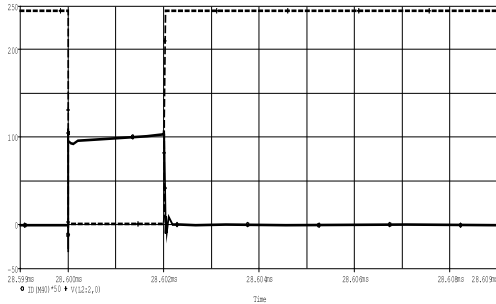
۴-۱- آنالیز مبدل در حالت مستقیم

با استفاده از رابطه بالانس ولت - ثانیه ترانسفورمر فرورارد رابطه (۵) حاصل می شود و از این رابطه می توان V_{cb} را از رابطه (۶) به دست آورد.

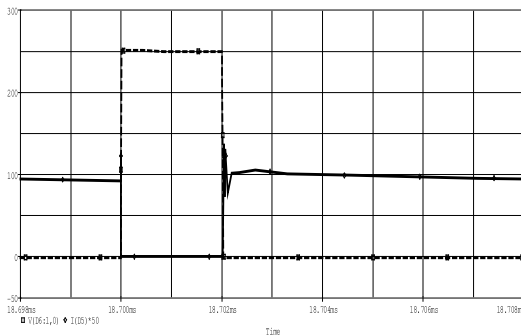
$$DV_2 = (1-D) \cdot \frac{V_{cb}}{m} \quad (۵)$$

Table (1): The specification of the proposed converter
جدول (۱): مشخصات مبدل پیشنهادی

Components	Part name/ Value
S ₁ -S ₂	IRF740
D ₁ -D ₂	MUR460
Lm1-Lm2	1mH
C _b	3.3μF
m,n	1
frequency	20KHz



(الف)



(ب)

شکل (۶): شکل موجهای ولتاژ (خط چین) و جریان (خط کامل) سوئیچ S₂ (الف) و دیود بدنه S₁ (ب) مبدل دو جهته پیشنهادی در حالت مستقیم (مقیاس ولتاژ 50V/div، مقیاس جریان 1A/div و مقیاس زمان 1μs/div)
Fig. (6): The voltage waveform (dashed) and current waveform (continous) of (a) Switch S₁, (b) Body diode of proposed bidirectional converter in the direct case (voltage scale 50V/div, current scale 1A/div and time scale 1μs/div)

همچنین با نوشتن رابطه ولت - ثانیه برای ترانسفورمر فلای‌بک، می‌توان ولتاژ دو سر سوئیچ S₂ مطابق رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$V_2 \cdot DT = (V_{S2} - V_2) \cdot (1 - D)T \quad (14)$$

$$V_{S2} = \frac{V_2}{1 - D} \quad (15)$$

ولتاژ خازن C_b به صورت زیر به دست می‌آید.

$$V_{Cb} = V_{S2} \cdot (1 - D) = V_2 \quad (16)$$

با نوشتن رابطه KVL در حلقه خروجی در وضعیت دوم رابطه (۱۷) به دست می‌آید. همچنین با در نظر گرفتن رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) بهره مبدل در این حالت به راحتی از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{(V_{S2} - V_2)}{m} + \frac{(V_{S2} - V_{Cb})}{n} = V_o \quad (17)$$

$$G = \frac{V_1}{V_2} = \frac{D}{1 - D} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right) \quad (18)$$

همچنین با نوشتن بالانس جریان - ثانیه خازن C_b و همچنین فرض راندمان 100 درصد برای مبدل، جریانهای سلف مغناطیس کنندگی فلای‌بک و فوروارد مطابق با روابط زیر به دست می‌آید.

$$I_{Lm2}DT = I_2(1 - D)T \quad (19)$$

$$DT \cdot I_{Lm1} \cdot V_{in} + I_2(1 - D)TV_{in} = P_o \quad (20)$$

$$I_2 = \frac{D}{1 - D} I_{Lm2} \quad (21)$$

$$DT \cdot I_{Lm1} + DT \cdot I_{Lm2} = GI_o \quad (22)$$

$$(m + n) \frac{D}{1 - D} I_{Lm2} - n \cdot I_{Lm2} = m \cdot I_{Lm1} \quad (23)$$

$$I_2 = \frac{G \cdot I_o \cdot f}{\frac{n}{m}(2D - 1) + 1} \quad (24)$$

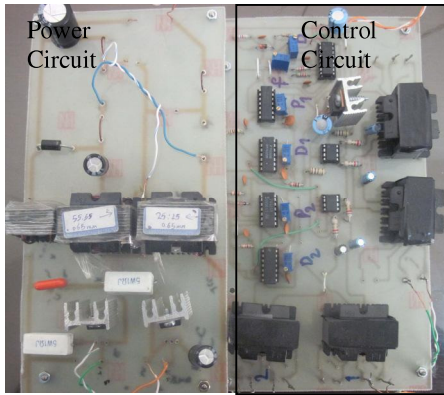
$$I_{Lm1} = \frac{G \cdot I_o}{DT} \cdot \frac{\frac{n}{m}(2D - 1) + D}{\frac{n}{m}(2D - 1) + 1} \quad (25)$$

$$I_{Lm2} = \frac{GI_o}{DT} \cdot \frac{1 - D}{\frac{n}{m}(2D - 1) + 1} \quad (26)$$

۵- شبیه سازی مبدل پیشنهادی

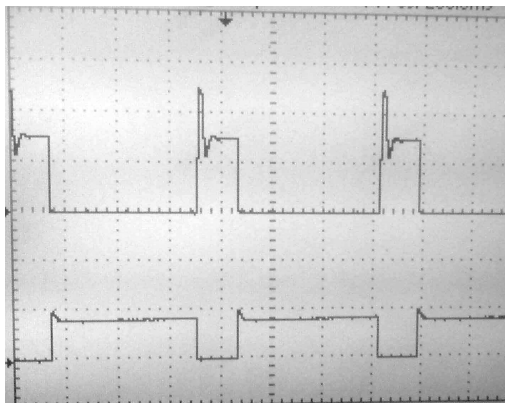
در این قسمت برای اثبات تحلیل تئوری مبدل دو طرفه پیشنهادی، یک نمونه از آن شبیه سازی و ساخته شده است. المانها و مشخصات مبدل در جدول (۱) آورده شده است. مبدل در توان 80 وات و برای ولتاژهای 48 و 200 ولت در ورودی و خروجی طراحی گردیده است. نتایج شبیه سازی در شکل‌های (۶) الی (۹) آورده شده است و همانطور که از شکلها مشخص است این شکلها نتایج تحلیل تئوری مبدل را تایید می‌کنند.

شکل (۱۰) نمونه آزمایشگاهی ساخته شده مبدل دو جهته پیشنهادی را نشان می دهد. همچنین شکل موج جریان و ولتاژ سویچ اصلی مبدل در حالت مستقیم نیز در شکل (۱۱) آورده شده است.



شکل (۱۰): شکل نمونه آزمایشگاهی مبدل دو جهته پیشنهادی

Fig. (10): A laboratory prototype of the proposed bidirectional converter

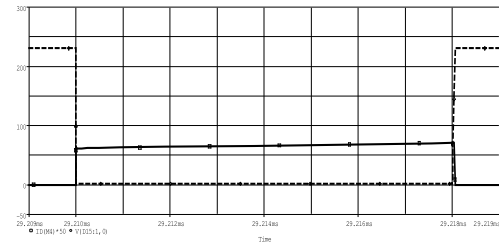


شکل (۱۱): ولتاژ و جریان سویچ S_1 در حالت عملکرد مستقیم

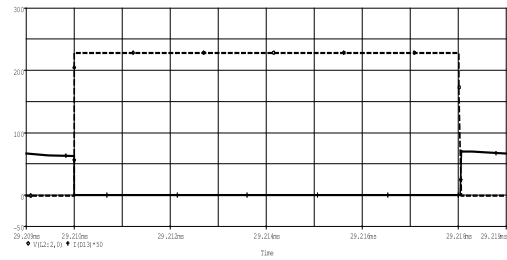
Fig. (11): The voltage and current waveforms of switch S_1 in the direct case

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مبدل دو طرفه جدید ایزوله ارائه شده است. این مبدل تنها یک سویچ در طرف اولیه و یک سویچ در طرف ثانویه ترانسفورمر دارد و به صورت PWM کنترل می گردد. از طرفی مبدل در هر دو حالت خاموش و روشن بودن سویچها توان به خروجی منتقل می کند و در نتیجه چگالی توان آن نسبت به مبدلهای قبلی بالاتر است. مبدل پیشنهادی قادر است که از هر دو طرف به صورت باک-بوست عمل نماید، به همین علت مبدل ارائه شده می تواند تحت تغییرات زیاد ولتاژ و رودی به خوبی کار کند. درستی تحلیل مبدل از طریق نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.

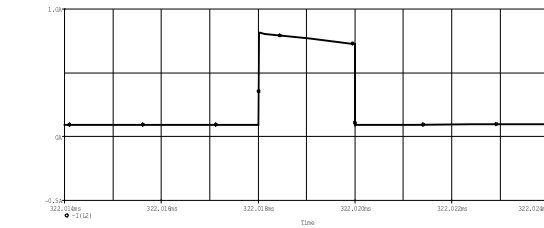


(الف)



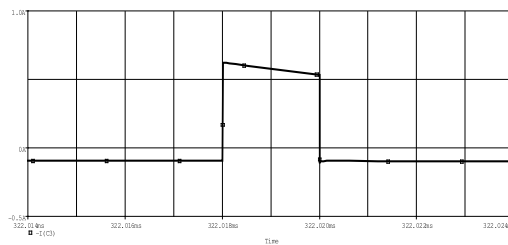
(ب)

شکل (۷): شکل موجهای ولتاژ (خط چین) و جریان (خط کامل) سویچ S_2 (الف) و دیود بدنه S_2 (ب) مبدل دو جهته پیشنهادی در حالت معکوس (مقیاس ولتاژ 50V/div، مقیاس جریان 1A/div و مقیاس زمان 1μs/div)



شکل (۸): شکل موجهای جریان خروجی (الف) و خازن بلوک کننده (ب) مبدل دو جهته پیشنهادی در حالت مستقیم (مقیاس جریان 0.5A/div و مقیاس زمان 1μs/div)

Fig. (8): The output current waveform (a) and the blocking capacitor (b) of proposed bidirectional converter in the direct case (current scale 0.5A/div and time scale 1μs/div)



شکل (۹): شکل موجهای جریان خروجی (الف) و خازن بلوک کننده (ب) مبدل دو جهته پیشنهادی در حالت معکوس (مقیاس جریان 0.5A/div و مقیاس زمان 1μs/div)

Fig. (9): The output current waveform (a) and the blocking capacitor (b) of the proposed bidirectional converter in the reverse case (current scale 0.5A/div and time scale 1μs/div)

مراجع

- [1] D.M. Sable, F.C. Lee, B.H. Cho, "A zero-voltage-switching bi-directional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite", *IEEE/APEC*, pp.614-621, Feb. 1992.
- [2] F. Zhang, L. Xiao, Y. Yan, "Bi-directional forward-flyback DC-DC converter", *Pow. Elec. Spec. Conf., 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, Vol.5, pp.4058-4061, June 2004.
- [3] S. Inoue, H. Akagi, "A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system", *IEEE Trans. on Pow. Elec.*, Vol.22, No.2, pp.535-542, Mar. 2007.
- [4] B. Fani, M. Delshad, "Design and implementation of a new current fed converter with zero current switching conditions", *Jou. of Trans. on Elec. Tech. (JTET)*, Vol.1, No.2, pp.11-18, Spring 2009.
- [5] P. Das, B. Laan, S.A. Mousavi, G. Moschopoulos, "A nonisolated bidirectional ZVS-PWM active clamped DC-DC converter", *IEEE Trans. on Pow. Elec.*, Vol.24, No.2, pp.553-558, 2009.
- [6] A.L. Kirsten, T.B. Marchesan, M.A. Dalla Costa, R.N.do Prado, "Resonant technique for bidirectional flyback converter", *Elec. Lett.*, Vol.45, No.25, pp.1345-1346, 2009.
- [7] B.R. Lin, C.L. Huang, Y.E. Lee, "Asymmetrical pulse-width modulation bidirectional DC-DC converter", *IET Pow. Elec.*, Vol.1, No.3, pp.336-347, 2008.