

بررسی عملکرد مبدل‌های کاهنده، افزایشنده و کاهنده – افزایشنده در حالت

پیوسته، بحرانی و گسسته

محسن اتحادفرد^۱، شهرام جوادی^۲

Performance review of Buck, Boost and Buck-Boost Converters in the case of CCM, CDCM and DCM

Mohsen Etehadfard, Shahram Javadi

Email: Sh.Javadi@iauctb.ac.ir

چکیده

در این مقاله مبدل‌های DC/DC افزایشنده، کاهنده و کاهنده – افزایشنده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ضمن بررسی نحوه کار این مبدل‌ها، عملکرد آن‌ها در سه حالت مختلف کاری، پیوسته، گسسته و حالت بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج ولتاژ و جریان خروجی سلف در این حالات ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جریان خروجی سلف در عملکرد گسسته نسبت به عملکرد حالت بحرانی، زمان بیشتری صفر خواهد بود و این در حالی است که جریان خروجی در عملکرد پیوسته به صفر نخواهد رسید.

کلمات کلیدی

مبدل کاهنده، مبدل افزایشنده، مبدل کاهنده – افزایشنده، حالت پیوسته، حالت گسسته، حالت بحرانی.

۱. مقدمه

مبدل‌های الکترونیک قدرت امروزه پرکاربردترین مبدل‌ها در صنعت ساخت آرسی‌های دیجیتال و آنالوگ محسوب می‌شوند و روز به روز بر اهمیت آنها افزوده می‌شود. این مبدل‌ها در ساخت منابع تغذیه سوئیچینگ بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. در مبدل‌های از نوع سوئیچینگ، یک المان مانند ترانزیستور وظیفه سوئیچ کردن را بر عهده دارد و از این طریق باعث شارژ و دشارژ المان‌های اصلی مدار که سلف و خازن هستند، می‌شود. بسته به نوع طراحی مدار، ولتاژ خروجی می‌تواند کاهش و یا افزایش یابد، اما در هر صورت این مدارها به صورت فیدبک بسته می‌شوند تا در برابر نویز و دما و اعمال بار، خروجی مدار تغییر داده نشود [2].

۲. مبدل کاهنده^۳

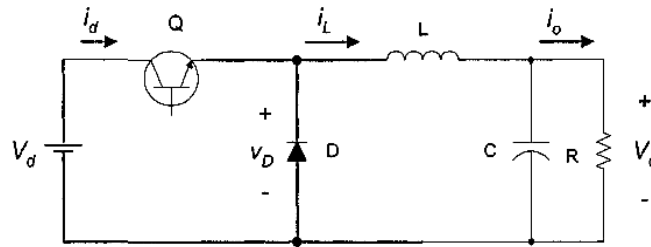
یک مبدل DC/DC پله پایینی ولتاژ ورودی است [3,4]. شکل (۱) مدار قدرت این مبدل را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، رکتیفایر DC/DC است که در اینجا در سه حالت پیوسته و بحرانی و گسسته مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، دو متغییر برای داشتن یک مبدل خوب به کار

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ عضو هیئت علمی، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ Buck Converter

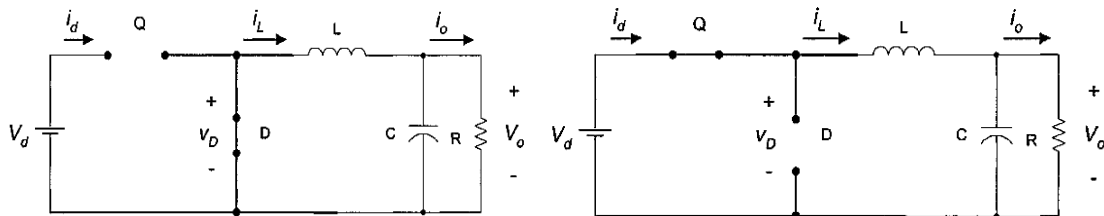
گرفته می‌شود. این دو متغیر برای اجرای این مبدل عبارتند از: جریان سلف و ولتاژ خازن. تغییرات باز وبسته شدن نیمه هادی‌ها باعث تغییر حالت مدار قدرت می‌شوند.



شکل ۱: مبدل کاهنده

بنابراین مدار قدرت بیانگر یک رابطه بین نیمه هادیها و مدار است. عناصر سوئیچ می‌توانند ترانزیستور، IGBT، ماس فت و یا هر چیز قابل کنترل دیگری، باشند.

در عملکرد پیوسته وقتی کلید روشن است، همانند دیاگرام مبدل که در شکل (۲) نمایش داده شده است، زمانی که سویچ روشن شود، جریان نمی‌تواند تغییرات پله‌ای داشته باشد ولی شروع به افزایش با تغییرات خطی میکند.



شکل ۳: مبدل کاهنده در حالت سوئیچ خاموش

شکل ۲: مبدل کاهنده در حالت سوئیچ روشن

در شرایطی که سطح ولتاژ منفی به ورودی اعمال شود، دیود به بایاس معکوس خواهد رفت، خازن خروجی با منبع شارژ شده و بار نیز از طریق منبع تغذیه می‌شود و جریان سلف به صورت خطی افزایش می‌یابد و انرژی را در خود ذخیره می‌کند. در این فاصله جریان دیود صفر است و در بایاس معکوس قرار دارد. معادلات در زمان سوئیچ روشن به شکل زیر است:

$$0 < t < DT :$$

$$V_d = V_L + V_o \quad (1)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_d - V_o}{L} \quad (2)$$

$$i_L(t) = \frac{V_d - V_o}{L} t + I_{L,\min} \quad (3)$$

$$i_L(t = DT) = I_{L,\max} \quad (4)$$

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_d - V_o}{L} DT \quad (5)$$

در این معادلات ولتاژ مرجع و ولتاژ خازن خروجی است و ولتاژ سلف و جریان سلف و DUTY چرخه است. زمانی که سویچ خاموش است دیاگرام مدار مبدل معادل شکل (۳) است. همانطور که دیده می‌شود جریان اعمال شده به بار از طریق دیود فراهم شده و دیود در بایاس موافق قرار می‌گیرد و انرژی ذخیره شده در سلف تخلیه شده و میتواند بار را تامین کند. کار خازن در این فاصله، حفظ ولتاژ خروجی بدون ریپل است. بنابراین مقداری از بار از طریق سلف و خازن تامین می‌شود و در اینجا منبعی نیست. انرژی ذخیره شده در سلف تخلیه شده و جریان در سراسر سلف شروع

به کاهش می‌کند و خازن هم دشارژ شده و تنها ولتاژی که به سلف اعمال می‌شود ولتاژ منفی است. معادلات خروجی در این حالت به شرح زیر است:

$$DT < t < T:$$

$$V_L = -V_O \quad (6)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L} \quad (7)$$

$$i_L(t) = \frac{-V_O}{L}(t - DT) + I_{L,max} \quad (8)$$

$$i_L(t = T) = I_{L,min} \quad (9)$$

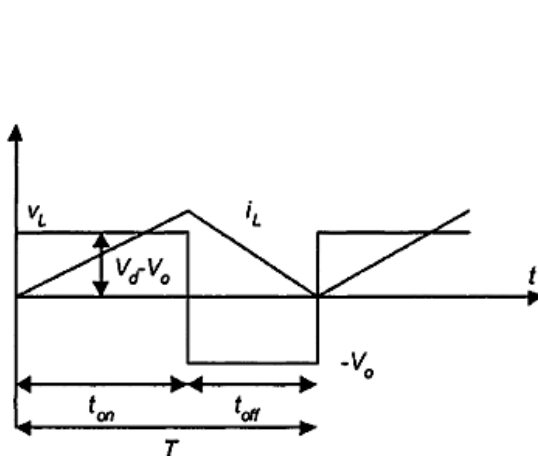
$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_O}{L}(1 - D)T \quad (10)$$

$$\frac{V_d - V_O}{L} DT = \frac{V_O}{L}(1 - D)T \quad (11)$$

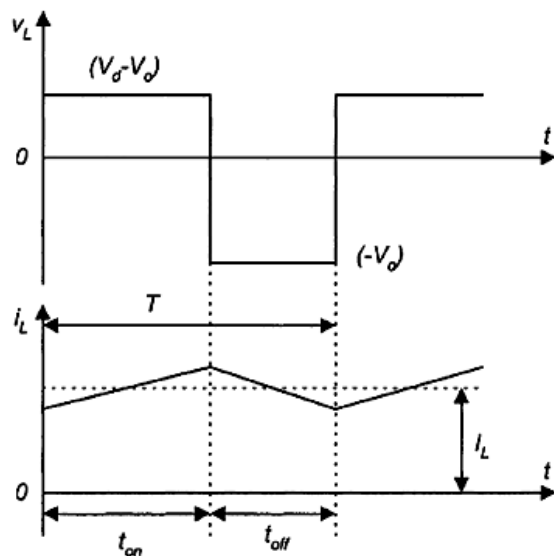
$$V_O = DV_d \quad (12)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (13)$$

درصد تغییرات به میزان تغییرات D بستگی دارد و تغییرات بین ۱۰ و ۱۰۰ است. بنابراین می‌تواند به سادگی بیانگر این نکته باشد که ولتاژ خروجی همیشه کمتر از ولتاژ ورودی است. شکل (۴) شکل موج ولتاژ و جریان سلف در مد عملکرد پیوسته را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، جریان سلف به صفر نمی‌رسد. پس مبدل در مد پیوسته کار می‌کند. یک علت قابل توجه در عملکرد پیوسته تغییر بزرگ در خروجی سلف است و بدیهی است بار همیشه تامین خواهد شد. فرکانس سوئیچینگ بستگی به سلف در حالت پیوسته دارد و در طراحی برای ریزل خروجی باید خازن مناسب دیده شود. یک سیستم بحرانی عملکردی بین پیوسته و ناپیوسته دارد که در شکل (۵) نشان داده شده است. در عملکرد بحرانی جریان سلف صفر می‌شود و زمانی که کلید روشن می‌شود، جریان مجدداً از صفر خارج می‌شود و این بیانگر این است که این مبدل در محدوده باند خودش است.

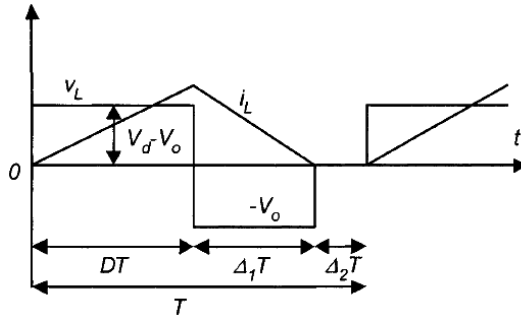


شکل ۵: شکل موج ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده در مد عملکرد بحرانی



شکل ۴: شکل موج ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده در عملکرد پیوسته

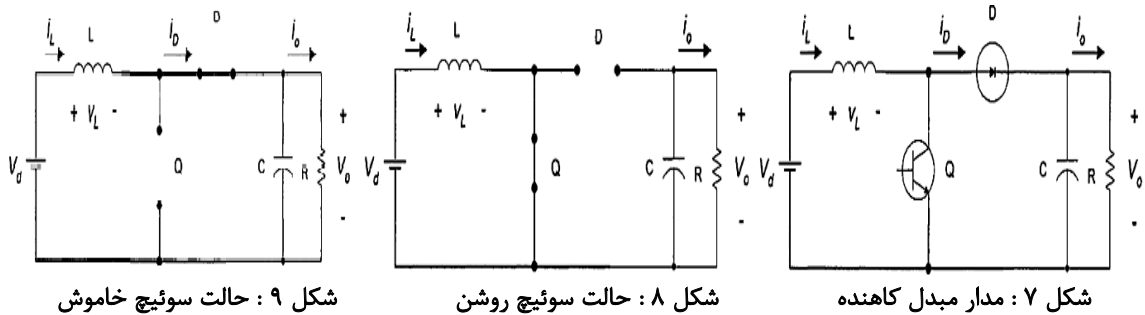
همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، به لحاظ شکل موج مبدل کاهنده در حالت گسسته نسبت به حالت بحرانی متفاوت است. در حقیقت در حالت بحرانی جریان سلف فقط در خط صفر ضربه می‌زند و افزایش می‌یابد. ولی در حالت گسسته جریان در صفر باقی می‌ماند. در واقع در حالت گسسته جریان قبل از T به صفر می‌رسد و تا سوئیچ بعدی صفر می‌ماند اما در حالت بحرانی جریان در لحظه T صفر می‌شود و فقط در خط صفر ضربه می‌زند.



شکل ۶: شکل موج ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده در مد عملکرد گسسته

۳. مبدل افزایشی^۴:

این مبدل سطح ولتاژ DC منبع را افزایش می‌دهد [5]. مدار این مبدل با یک پله ولتاژ ورودی در شکل (۷) نشان داده شده است. در این مبدل یک سوئیچ در موازات ورودی است که در مبدل‌های کاهنده به صورت سری قرار می‌گیرد. تفاوت دیگر با مبدل کاهنده این است که سلف فوراً بعد از مرجع است و این سلف می‌تواند در خروجی یکسو ساز قرار گیرد و این موضوع باعث می‌شود که یک سایز کوچک EMI داشته باشیم، مشکلی است که حفاظت اتصالی در مدار فعال نیست. در عملکرد پیوسته، زمانی که سوئیچ روشن است و $0 < t < DT$ است، دیاگرام مدار مبدل در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است.



همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، با بسته شدن سوئیچ، ولتاژ منفی به دیود اعمال می‌شود و دیود در بایاس معکوس می‌گیرد. در این زمان سوئیچ هدایت کرده و جریان القاگر برابر جریان مرجع شده و جریان در سراسر سوئیچ برقرار است و ولتاژ مرجع به سلف اعمال می‌شود و واضح است که جریان دیود صفر است. بنابراین جریان بار از خازن و انرژی ذخیره شده در سلف تامین می‌شود و خازن دشارژ می‌گردد و معادلات زیر برقرار است:

$$0 < t < DT :$$

$$V_d = V_L \quad (14)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_d}{L} \quad (15)$$

⁴ Boost Converter



$$i_L(t) = \frac{V_d}{L}t + I_{L,\min} \quad (16)$$

$$i_L(t = DT) = I_{L,\max} \quad (17)$$

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_d}{L}DT \quad (18)$$

زمانی که کلید خاموش است، هیچ ولتاژ منفی اطراف دیود نیست و در حقیقت دیود در بایاس موافق قرار می‌گیرد و آماده هدایت است و تنها جریان از طریق دیود به بار اعمال می‌شود. بنابراین در این سوئیچ جریان صفر خواهد شد و جریان سلف برابر با جریان ورودی است و مشابه این جریان در سراسر دیود است. سلف انرژی خود را برای شارژ خازن که دشارژ بود، تخلیه می‌کند و در طول این فاصله بار را هم تامین می‌کند. ولتاژ اطراف سلف منفی است و انرژی از سلف تخلیه شده و جریان به صورت خطی همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، کم می‌شود و معادلات در این فاصله به صورت زیر است:

$$DT < t < T :$$

$$v_L = V_d - V_o \quad (19)$$

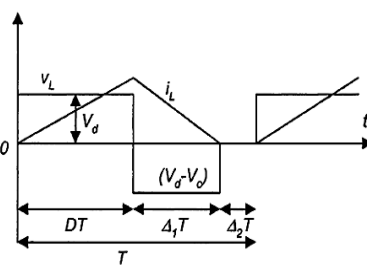
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-(V_o - V_d)}{L} \quad (20)$$

$$i_L(t) = \frac{-(V_o - V_d)}{L}(t - DT) + I_{L,\max} \quad (21)$$

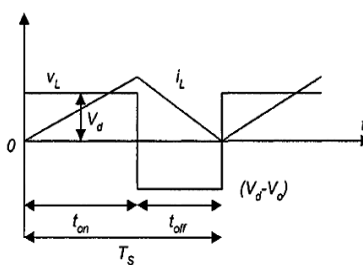
$$i_L(t = T) = I_{L,\min} \quad (22)$$

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{(V_o - V_d)}{L}(1 - D)T \quad (23)$$

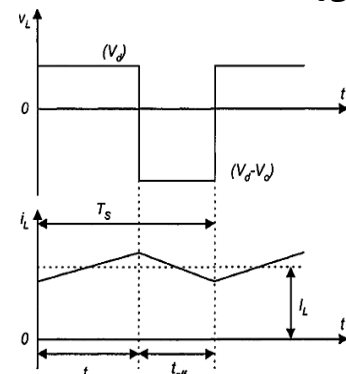
جریان اولیه مبدل در حالت بحرانی صفر است و جریان سلف از صفر ضربه می‌زند و کلید روشن می‌شود. شکل موج جریان و ولتاژ سلف در حالت بحرانی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۲) جریان و ولتاژ سلف در حالت گسسته را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، در یک بازه جریان سلف در صفر می‌ماند (خیلی بیشتر از حالت بحرانی). در حقیقت در حالت بحرانی جریان سلف فقط در خط صفر ضربه می‌زند و افزایش پیدا می‌کند ولی در این حالت جریان در صفر می‌ماند. بنابراین در این حالت حداقل جریان ثابت سلف، صفر است ولی قبل از T به صفر می‌رسد.



شکل ۱۲: ولتاژ و جریان سلف مبدل افزایشنده در مد عملکرد گسسته



شکل ۱۱: ولتاژ و جریان سلف مبدل افزایشنده در مد عملکرد بحرانی



شکل ۱۰: ولتاژ و جریان سلف مبدل افزایشنده در مد عملکرد پیوسته

۴. مبدل کاهنده - افزایشنده^۵:

در مبدل کاهنده ولتاژ خروجی همیشه از ولتاژ ورودی کمتر است و به عکس در مبدل افزایشنده ولتاژ خروجی همیشه بیشتر از ولتاژ ورودی است. در یک مبدل کاهنده-افزاینده ولتاژ خروجی می‌تواند بیشتر و یا کمتر از ورودی باشد و به چرخه سیکل بستگی دارد [7]. شکل (۱۳) مدار قدرت این مبدل را نشان می‌دهد. با توجه به دیاگرام مدار اولین تفاوت بین توپولوژی‌های مطالعه شده دیگر و این توپولوژی این است که قطبیت ولتاژ خروجی مخالف با ولتاژ ورودی است. بنابراین زمین مشترک نمی‌تواند برای این سیستم اعمال شود. بسته به پارامترهای مدار، این مبدل می‌تواند به صورت پیوسته یا ناپیوسته عمل کند. در عملکرد پیوسته وقتی سوئیچ روشن است $0 < t < DT$ ، ولتاژ ورودی در لبه‌ی دیگر به اطراف سلف اعمال می‌شود و بنابراین ولتاژ منفی اطراف دیود است و دیود در بایاس معکوس قرار دارد و هیچ جریانی ندارد و بار هم با خازن، زمانی که مرجع از مدار قطع است تغذیه می‌شود. بنابراین وقتی که کلید بسته است، جریان سلف خطی بالا می‌رود و سلف انرژی را ذخیره می‌کند و خازن در دو سر بار تخلیه می‌شود. دیاگرام مبدل در حالت سوئیچ روشن در شکل (۱۴) و روابط آن در حالت مذکور به صورت زیر است:

$$0 < t < DT:$$

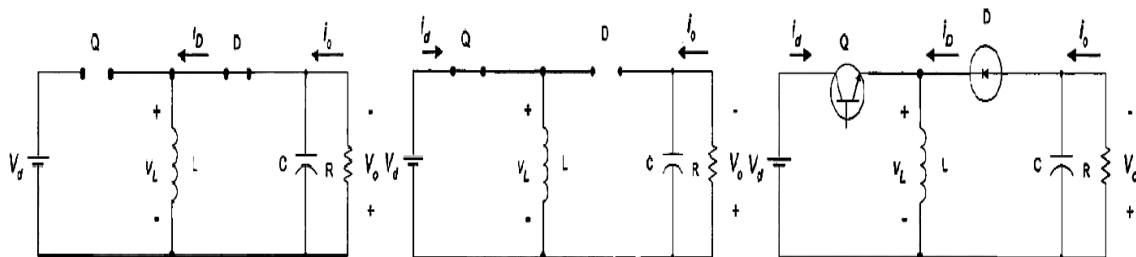
$$V_d = v_L \quad (24)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_d}{L} \quad (25)$$

$$i_L(t) = \frac{V_d}{L}t + I_{L,\min} \quad (26)$$

$$i_L(t = DT) = I_{L,\max} \quad (27)$$

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_d}{L}DT \quad (28)$$



شکل ۱۵: حالت سوئیچ خاموش

شکل ۱۴: حالت سوئیچ روشن

شکل ۱۳: مبدل کاهنده - افزایشنده

وقتی که سوئیچ قطع است $DT < t < T$ مدار مبدل همانند شکل (۱۵) است. با توجه به دیاگرام مدار واضح است که دیود در این حالت جریان سلف را فراهم می‌کند. چون که سوئیچ باز است، هیچ جریان ورودی از مرجع نیست و جریان سوئیچ بر عکس دیود هدایت می‌کند. بنابراین جریانی دارد که معادل جریان سلف است. سلف در این مرحله انرژی خود را تخلیه می‌کند و جریان سلف هم به صورت خطی کاهش می‌یابد. معادلات مدار در این حالت به صورت زیر است:

$$DT < t < T:$$

$$v_L = -V_o \quad (29)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (30)$$

⁵ Buck - Boost Converter

$$i_L(t) = \frac{-V_o}{L}(t - DT) + I_{L,\max} \quad (31)$$

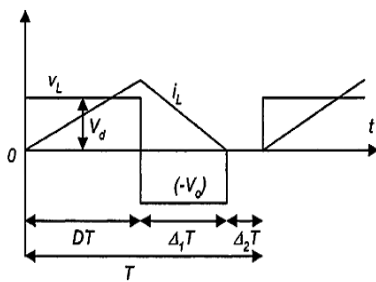
$$i_L(t = T) = I_{L,\min} \quad (32)$$

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_o}{L}(1 - D)T \quad (33)$$

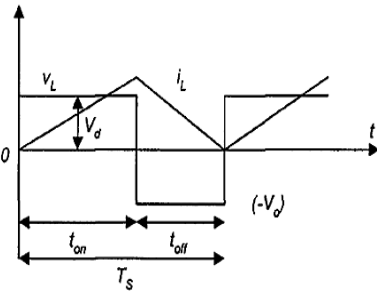
$$\frac{V_d}{L}DT = \frac{V_o}{L}(1 - D)T \quad (34)$$

$$V_o = \frac{D}{1 - D}V_d \quad (35)$$

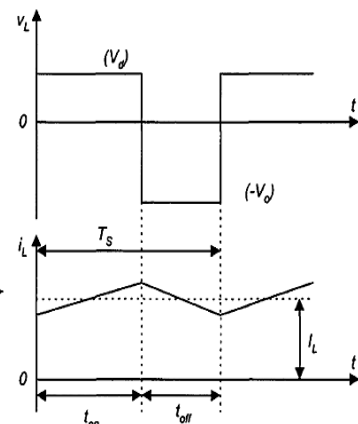
شکل (۱۶) شکل موج جریان و ولتاژ سلف در مدل پیوسته را نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد، به زودی جریان سلف افزایش پیدا می‌کند و در زمان بعدی و زمان خاموش شدن سوئیچ، جریان سلف کاهش پیدا می‌کند. وقتی سوئیچ روشن است، ولتاژ ورودی به سلف اعمال می‌شود و وقتی سوئیچ خاموش است، ولتاژ خروجی به بار اعمال می‌شود. در حقیقت فایده این مبدل این است که جریان ورودی و خروجی به هم وابسته هستند و با سلف مقابله نمی‌کنند. در آینده ممکن است بتوان طراحی را بر اساس کنترل کننده‌های قدرت انجام داد. برای یک محدوده‌ی ولتاژ ورودی و بار خروجی با مطالعه عملکرد بحرانی، محدوده و متغیرهای هدایت مشخص خواهد شد و با توجه به ریپل ولتاژ خازن، خروجی تعریف می‌شود و وقتی مبدل در محدوده هدایت جریان سلف عمل می‌کند، شکل موج ولتاژ در شکل (۱۷) خواهد بود. شکل (۱۸) مبدل DC/DC کاهنده - افزایشنده را در عملکرد گسسته نشان می‌دهد. می‌توان دید که محدوده جریان سلف در صفر، در حالت گسسته خیلی بیشتر است.



شکل ۱۸: ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده-افزاینده در مد عملکرد گسسته



شکل ۱۷: ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده-افزاینده در مد عملکرد بحرانی



شکل ۱۶: ولتاژ و جریان سلف مبدل کاهنده-افزاینده در مد عملکرد پیوسته

۵. نتیجه گیری:

در این مقاله مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور تبدیل سطحی از ولتاژ DC به سطح دیگری از آن مورد بررسی قرار گرفت. در مبدل کاهنده، ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی و در مبدل افزایشنده، بر خلاف آن ولتاژ خروجی بیشتر از ولتاژ ورودی خواهد بود. در مبدل کاهنده - افزایشنده ولتاژ خروجی بسته به چرخه کار می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد. در این مقاله سه عملکرد مختلف این مبدل‌ها، عملکرد پیوسته، گسسته و بحرانی مورد بررسی قرار گرفت و شکل موج جریان و ولتاژ خروجی سلف به کار رفته در مبدل در این سه حالت ارائه و بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت گسسته، جریان سلف برای لحظاتی در صفر باقی می‌ماند، در حالی که در حالت



بحرانی فقط برای یک لحظه به صفر ضربه وارد می‌کند و در حالت پیوسته هم جریان به صفر نمی‌رسد .

تشکر و قدردانی :

این مقاله مستخرج از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد می‌باشد و بدین وسیله از حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی تشکر و قدردانی می‌شود .

۶. منابع و مراجع :

- [1] R. D. Middlebrook, *Power electronics: topologies, modeling, and measurement*, Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., April 1981
- [2] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 2nd ed, New York, 1995
- [3] Husayn Khalkhal Nejad, Saeed Jaafari Fazly, *Nonlinear Modeling and Analysis of DC-DC Buck Converter and Comparing with Other Converters. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). December 2014.*
- [4] Mahesh Gowda N M, Yadu Kiran, Dr. S.S Parthasarthy *Modelling of Buck DC-DC Converter Using Simulink. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology July 2014.*
- [5] *Application Report Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies, TI Literature Number SLVA061, 1999.*
- [6] Steven Trigno, Satya Nimmala, Romeen Rao, *Buck-Boost Converter Analysis Power Electronic System Design , Winter, 2010.*
- [7] Robin Vujanic, *Design and Control of a Buck-Boost DC-DC Power Converter, Semester Thesis July 2008*