

طراحی و ساخت مبدل فلای بک جدید با کلید زنی نرم و کنترل مدولاسیون پالس

محسن وکیلی فر^۱، مجید دلشاد^۲

^۱منطقه دو عملیات انتقال گاز m.vakilifar@gmail.com

^۲دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) delshad.majid@gmail.com

چکیده - امروزه در تمامی سیستم‌های کنترلی مربوط به ادوات توربوکمپرسورها و تجهیزات بکار رفته در ایستگاه‌های مخابراتی، کمتر وسیله ای را می‌توان یافت که در آن از منابع تغذیه سوئیچینگ استفاده نشده باشد. این منابع وظیفه تهیه ولتاژ مستقیم از ولتاژ متناوب برق شهر را دارند و از ۱۹۷۰ تا کنون تحقیقات زیادی بر روی افزایش بازده و فرکانس کلید زنی این منابع و همچنین کاهش تلفات آن‌ها صورت گرفته است. یکی از پرکاربردترین مبدل‌های سوئیچینگ مبدل فلای بک می‌باشد. تاکنون مبدل‌های سوئیچینگ نرم گوناگونی ارائه گردیده است بطوری که دارای راندمان بالایی هستند و استرس زیادی نیز به سوئیچ‌ها تحمیل نمی‌کنند ولی یکی از مشکلات اصلی این مبدل‌ها داشتن سوئیچ کمکی و در نتیجه احتیاج به مدار درایو اضافی می‌باشد. در این مقاله یک مبدل فلای بک با کلیدزنی نرم ارائه گردیده است. مدار کمکی این مبدل فاقد سوئیچ کمکی است و در عین حال استرس زیادی نیز توسط مدار کمکی به سوئیچ تحمیل نمی‌گردد. برای اثبات درستی عملکرد مبدل پیشنهادی یک نمونه از آن طراحی و ساخته شده است و نتایج آن با مبدل‌های دیگر با استفاده از شبیه سازی *pspice* مقایسه گردیده است.

کلید واژه- کلیدزنی نرم، مبدل فلای بک، مدولاسیون پهنای پالس

مبدل تحمیل می‌کند. از این رو افزایش فرکانس کلیدزنی، منجر به افزایش تلفات کلیدزنی می‌گردد. علاوه بر این، علت اصلی نویز EMI تغییرات سریع ولتاژ و جریان سوئیچ‌ها در لحظات کلیدزنی می‌باشد که افزایش فرکانس کلیدزنی نیز منجر به تشدید این نویز می‌شود.

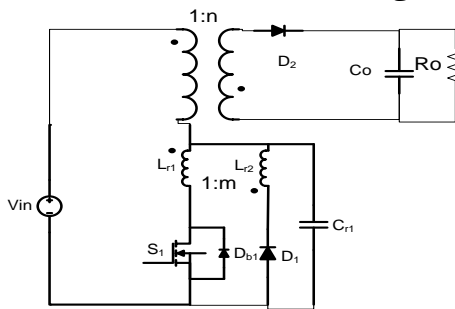
اما با ارائه شدن روش‌های مختلف سوئیچینگ نرم به منظور حل مشکلات فوق، این مبدل‌ها جایگاه ویژه‌ای در میان مبدل‌های دیگر بدست آورده‌اند که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی مبدل‌های رزونانسی و شبه رزونانسی و مبدل‌های مدولاسیون پهنای باند PWM تقسیم کرد. [۲]-[۳]-[۵]

در مبدل‌های رزونانسی و شبه رزونانسی یک مدار رزونانس شامل سلف و خازن به مدار اصلی افزوده می‌شود. این مدار رزونانسی باعث نوسانی شدن ولتاژ و جریان سوئیچ می‌گردد، که با کنترل فرکانس کلیدزنی، کلیدزنی سوئیچ‌ها می‌تواند در لحظه دلخواهی که ولتاژ و یا جریان سوئیچ صفر است، صورت بگیرد. بنابراین شرایط کلیدزنی نرم فراهم می‌گردد و تلفات کلیدزنی ناشی از هم پوشانی ولتاژ و جریان سوئیچ‌ها در مدت زمان تغییر وضعیت آن‌ها کاهش می‌یابد. از این رو با افزایش فرکانس کلیدزنی علاوه بر کاهش حجم و وزن مبدل می‌توان

۱- مقدمه

امروزه لوازم الکترونیکی بسیاری در تجهیزات کنترلی توربو کمپرسورها و ایستگاه‌های مخابراتی بکار رفته است. استفاده بیش از پیش این وسایل باعث توسعه و پیشرفت تجهیزات الکترونیکی گردیده است. با توجه به تحقیقات و بررسی‌های انجام گرفته در خصوص این وسایل، منابع تغذیه جهت آماده کردن انرژی مورد نیاز این تجهیزات طراحی شده‌اند بنابراین منابع تغذیه برای فراهم کردن ولتاژ dc از ولتاژ ac برق شهر در سیستم‌های الکترونیکی به کار برده می‌شوند. مبدل‌های ولتاژ همزمان با پیشرفت سریع تجهیزات الکترونیک در سال‌های اخیر نیز پیشرفتهای وسیعی کرده‌اند. در ابتدای کار جهت برآورده کردن انرژی مورد نیاز این وسایل از منابع تغذیه خطی استفاده شده است [۱]. اما با توجه به مزایا و معایب آن‌ها، مهندسان الکترونیک ایده منابع تغذیه سوئیچینگ را در سال ۱۹۷۰ مطرح کرده‌اند که این منابع در ابتدای امر از بازدهی پایینی برخوردار بودند و از آنجایی که سوئیچ‌های قدرت در لحظات کلیدزنی از ناحیه خطی عبور می‌کنند، در این لحظات ولتاژ و جریان سوئیچ دارای مقادیر بزرگی می‌باشند که هم پوشانی آن‌ها تلفات کلیدزنی عمده‌ای را به

- فراهم کردن شرایط کلیدزنی نرم (سوئیچ مبدل تحت شرایط ZCS روشن و ZVS تقریبی خاموش می شود)
- روشن شدن دیودهای کمکی تحت شرایط ZCS
- عدم وجود سوئیچ کمکی
- کاهش تلفات کلیدزنی
- استرس ولتاژ و جریان پایین
- سادگی عملکرد و پیاده سازی مبدل، به دلیل تشابه هر دو مدار کمکی



شکل ۱: نمای شماتیک مبدل فلای بک پیشنهادی

در این مبدل S_1 سوئیچ اصلی مبدل فلای بک پیشنهادی می باشد و L_{r1} و L_{r2} سلف های کوپل شده مدار کمکی، L_m سلف مغناطیس کنندگی، D_1 دیود مدار کمکی و C_{r1} خازن رزونانس مدار کمکی هستند. D_{b1} نیز دیود بدنه سوئیچ S_1 می باشد. ضمناً نسبت دور سلف های کوپل شده L_{r1} و L_{r2} از رابطه (۱) بدست می آید.

$$m = \sqrt{\frac{L_{r2}}{L_{r1}}} \quad (1)$$

۳- ملاحظات طراحی

مدار پیشنهادی مشابه یک مبدل فلای بک متداول طراحی می شود، اما المان های کمکی شامل خازن ها و سلف های کوپل شده باید طراحی شوند.

۳-۱- طراحی خازن های کمکی

خازن C_{r1} ، شرایط ZVS را برای لحظه خاموش شدن سوئیچ ها فراهم می کنند. بنابراین مقادیر آنها می تواند شبیه به خازن های اسنابر بصورت زیر انتخاب شود.

$$C_{r1} > C_{r,\min} = \frac{I_{sw} t_f}{2V_{sw}} \quad (2)$$

چگالی و راندمان مبدل را تا حد زیادی افزایش داد. اما مبدل های رزونانسی و شبه رزونانسی به علت طبیعت رزونانس نسبت به مبدل های PWM استرس ولتاژ و جریان بالاتری دارند و از طرفی به علت کنترل فرکانس متغیر امکان طراحی بهینه ای المان های مغناطیسی از جمله سلف و ترانسفورمر در آنها وجود ندارد. به همین دلیل مبدل های کلیدزنی نرم PWM بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. در مبدل های PWM فرکانس کلیدزنی ثابت می باشد و کنترل توان خروجی با کنترل ضریب وظیفه انجام می گیرد. در این مبدل ها برای ایجاد کلیدزنی نرم اغلب یک مدار کمکی به سوئیچ های مبدل افزوده می شود به طوری که کنترل مبدل همچنان بصورت PWM باقی می ماند.

در مبدل های ZVS، ZCS، یا ZVZCS نیز علاوه بر اینکه سعی می شود خواص مبدل های PWM حفظ شود، شرایط کلیدزنی نرم برای المان های نیمه هادی فراهم می گردد. در این مبدل ها یک مدار کمکی شامل یک سوئیچ، المان های رزونانسی و دیود به مبدل اصلی افزوده می شود که در زمان های کلیدزنی وارد عمل می شود تا ولتاژ یا جریان سوئیچ اصلی را در این لحظات صفر کند. معمولاً در این مبدل ها استرس ولتاژ و جریان اضافی به سوئیچ اعمال نمی شود. اما عیب عمده آنها استفاده از یک سوئیچ کمکی برای نرم کردن هر سوئیچ اصلی مبدل می باشد. [۴]-[۶]-[۷]

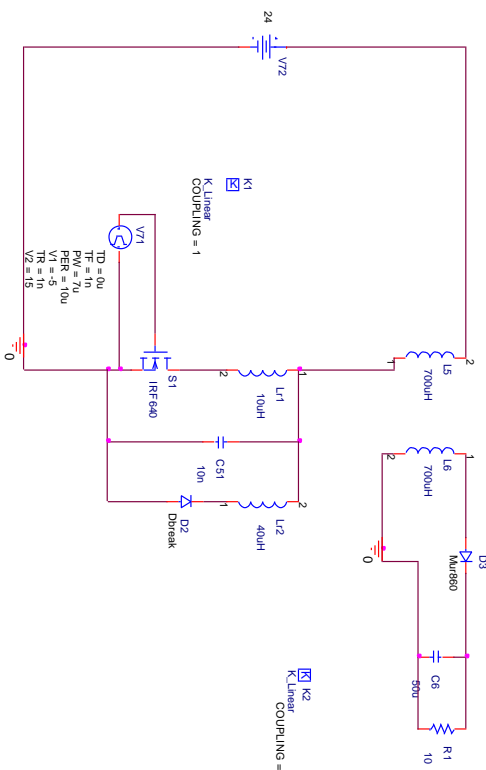
از این رو، هدف از ارائه این مقاله طراحی یک مبدل با قابلیت کلیدزنی نرم با استفاده از حداقل المان کمکی می باشد که مبدل فلای بک این نیاز را فراهم می کند. این مبدل را به عنوان ساده ترین، پرکاربردترین و ارزان قیمت ترین مورد با کلیدزنی نرم پیشنهاد شده است که تمام المان های نیمه هادی آن اعم از سوئیچ ها و دیودها بصورت نرم کلیدزنی می شوند در این مبدل ها شرایط ZCS با کمترین المان کمکی فراهم می گردد. مبدل پیشنهادی به طور کامل تجزیه و تحلیل و صحت تحلیل تئوریک آنها توسط نتایج عملی اثبات می شود.

۲- توصیف مبدل فلای بک پیشنهادی

مبدل فلای بک پیشنهادی تنها دارای یک سوئیچ می باشد، که توسط سیگنال PWM کنترل می شود بنابراین مدار کنترل این مبدل بسیار ساده و دارای مزایای زیر می باشد:

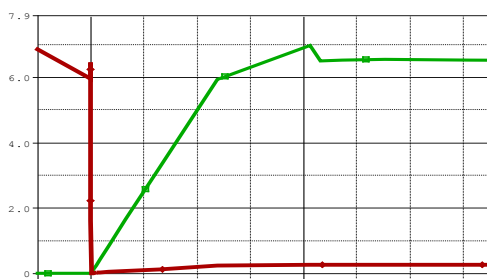
۴- نتایج شبیه سازی مبدل فلای بک پیشنهادی

برای اثبات درستی تحلیل های صورت گرفته، مبدل پیشنهادی طراحی و سپس در نرم افزار PSpice شبیه سازی شده است. مشخصات و مقادیر المان های مبدل طراحی شده در جهت مستقیم در جدول ۱ و نمای شماتیک مبدل شبیه سازی شده در شکل ۲ نشان داده می شود.



شکل ۲: شماتیک مبدل شبیه سازی شده پیشنهادی

شکل موج های شبیه سازی شده ولتاژ و جریان سوئیچ S1 در جهت مستقیم در شکل های ۳ و ۴ نشان داده می شوند. همانطور که مشاهده می شود، مطابق با نتایج تئوری سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS تقریبی خاموش می شود.



که t_f زمان نزول جریان سوئیچ می باشد. I_{sw} جریان سوئیچ قبل از خاموش شدن و V_{sw} ولتاژ سوئیچ بعد از خاموش شدن می باشند. در عمل برای تضمین کلیدزنی نرم مقدار خازن ها خیلی بیشتر از C_{rmin} در نظر گرفته می شود.

۳-۲ طراحی سلف های کمکی

سلف L_{r1} ، شرایط ZCS را برای لحظه روشن شدن سوئیچ فراهم می کند. این سلف می تواند بصورت زیر انتخاب شود:

$$L_{r1,2} > L_{r,min} = \frac{V_{sw} t_r}{I_{sw}} \quad (3)$$

که t_r زمان صعود جریان سوئیچ است. در عمل مقادیر L_{r1} و L_{r3} خیلی بزرگتر از $L_{r,min}$ در نظر گرفته می شوند. مقدار سلف L_{r2} به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L_{r2} = m^2 L_{r1} \quad (4)$$

المان های مبدل طراحی شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول (۱): مشخصات و مقادیر المان های مبدل پیشنهادی

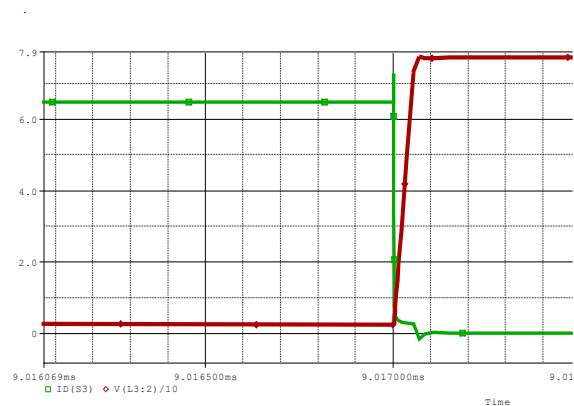
نام قطعه/مقدار	المان ها/ مشخصات
S1	IRF640
D1-D2	MUR860
C _{r1}	10nF
L _{r1,2}	10-40µH
N	1
L _m	700µH
ولتاژ ورودی (V ₁)	24V
ولتاژ خروجی (V ₀)	48V
فرکانس کلیدزنی	100KHz

این نکته قابل ذکر است که کلیدزنی نرم در بارهای سبک همانند بار کامل قابل توجه نمی باشد. بنابراین در بارهای خیلی سبک شرایط کلیدزنی نرم می تواند صرف نظر شود و مقدار بزرگتری برای n انتخاب شود.

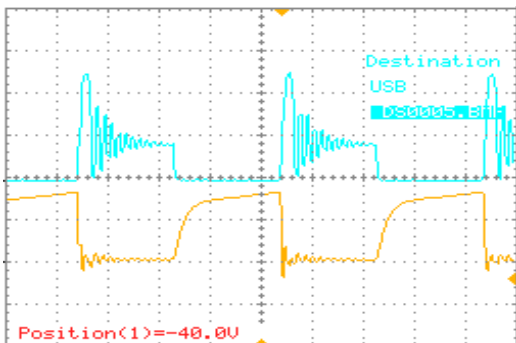
۵- نتایج آزمایشگاهی مبدل فلای بک پیشنهادی

برای تایید درستی آنالیز مبدل پیشنهادی، در این بخش یک نمونه آزمایشگاهی از این مبدل مطابق با جدول ۱ طراحی و ساخته شده است. شکل موج های آزمایشگاهی ولتاژ و جریان سوئیچ S1 در شکل ۵ نشان داده می شوند. همانطور که مشاهده می شود، سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS خاموش می شود. در شکل موج های عملی در زمان خاموش بودن سوئیچ به دلیل وجود خازن های پارازیتی دو سر سوئیچ و رزونانس این خازن با سلف کمکی کوپل شده، ولتاژ دارای ریپل می باشد. علاوه بر این در وضعیت (۳) به دلیل وجود سلف نشتی و رزونانس بین این سلف و خازن اسنابر، جریان سوئیچ دارای ریپل می باشد. در نهایت شرایط ZVS تقریبی در هنگام خاموش شدن سوئیچ برقرار است.

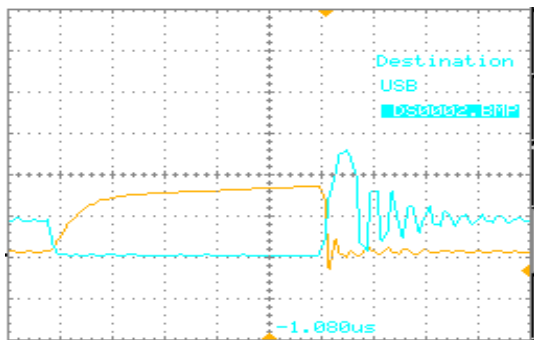
شکل ۳: شکل موج های شبیه سازی ولتاژ درین - سورس و جریان سوئیچ S1 (در حالت روشن شدن سوئیچ)



شکل ۴: شکل موج های شبیه سازی ولتاژ درین - سورس و جریان سوئیچ S1 (در حالت خاموش شدن سوئیچ)



(مقیاس زمان 2.5µS/DIV)



(مقیاس زمان 1µS/DIV)

شکل ۵: شکل موج ولتاژ (بالا) و جریان (پایین) درین - سورس سوئیچ S1

وابسته نمی باشد علاوه بر آن می توان همزمان چند خروجی مختلف داشت. در این مقاله به بررسی چند نمونه از مبدل های سوئیچینگ نرم پرداخته شد و در نهایت با اضافه کردن یک مدار کمکی بسیار ساده پیشنهادی به مبدل فلای بک ، این مبدل سوئیچینگ سخت را به یک مبدل سوئیچینگ نرم تبدیل کرد تا فرکانس سوئیچینگ و راندمان آن افزایش یابد. سپس به بررسی مدهای عملکردی مبدل پیشنهادی پرداخته شد.

مدار کمکی استفاده شده شرایط کلید زنی نرم را برای مبدل فراهم می کند و استرس ولتاژ و جریان بالایی را به مبدل تحمیل نمی کند. با توجه به اینکه تمام المانهای نیمه هادی این مبدل به صورت نرم کلید زنی می شوند، فرکانس کلید زنی به راحتی افزایش یافته و چگالی توان این مبدل را افزایش می دهد.

بنابراین مزایای مبدل ارائه شده به صورت زیر بیان می شود:

- به دلیل فراهم کردن شرایط کلیدزنی نرم (سوئیچ مبدل تحت شرایط ZCS روشن می شود و تحت شرایط ZVS تقریبی خاموش می شود) تلفات کلیدزنی تا حد زیادی کاهش می یابد و بازده افزایش می یابد.
- دیود های کمکی تحت شرایط ZCS روشن می شوند.
- مدار کنترل مبدل پیشنهادی بسیار ساده می باشد، زیرا از هیچ سوئیچ کمکی در مبدل استفاده نشده است و کنترل به صورت PWM باقی می ماند.
- مدارهای کمکی استرس ولتاژ و جریان بالایی به مبدل تحمیل نمی کنند.
- با توجه به اینکه ذاتاً سوئیچینگ نرم باعث کاهش نویز EMI خواهد شد و در مدل پیشنهادی ، طراحی بر همین اساس بوده، لازم بذکر است اندازه گیری نویز هزینه بسیار بالایی دارد و مقرون به صرفه نمی باشد .

البته با مشاهده نتایج عملی این مبدل مشاهده می شود که به دلیل رزونانس بین دو سر سوئیچ و سلفهای مدار کمکی ولتاژ دو سر سوئیچ دارای ریبیل می باشد که با طراحی دقیق تر سلفهای تزویج این مشکل تا حد زیادی بر طرف خواهد شد. ضمناً از دیگر معایب مبدل مذکور می توان به تلفات هدایتی ناشی از مدار کمکی که باعث کاهش بازده آن می شود اشاره کرد.

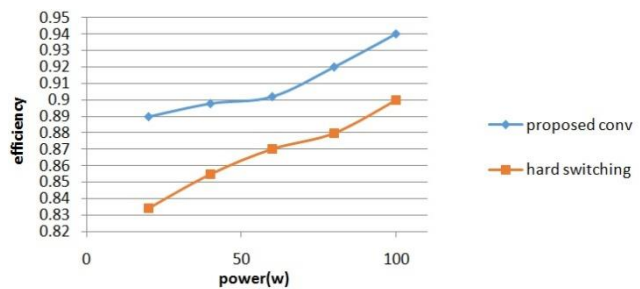
۶- مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدلهای مشابه

به منظور بررسی ویژگیهای مبدل پیشنهادی نسبت به سایر مبدلهای فلای بک مبدلهای مراجع در توان و ولتاژ ورودی و خروجی مشابه با مبدل پیشنهادی، شبیه سازی گردیده و مهمترین پارامترهای آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲) : مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدلهای مشابه

تعداد المان کمکی	راندمان مبدل	ولتاژ ولتاژ سوئیچ	مکزیم جریان سوئیچ	مکزیم تعداد سوئیچ کمکی	نوع مبدل
۵	۹۲ درصد	90V	3.0A	۱	مبدل [8]
۶	۹۴ درصد	72V	3.5A	۱	مبدل [4]
۴	۹۴ درصد	80V	3.2A	۰	مبدل پیشنهادی

همانطور که مشاهده می گردد مبدل پیشنهادی کمترین المان کمکی را دارد درحالیکه استرس بالایی نیز به سوئیچ تحمیل نشده است. مبدل پیشنهادی نسبت به مبدل فلای بک سوئیچینگ سخت نیز راندمان بهتری دارد این نتیجه از مقایسه راندمان این مبدل با مبدل فلای بک معمولی در بارهای مختلف که در شکل ۶ به کمک شبیه سازی رسم شده است بدست آمده است.



شکل ۶ : مقایسه راندمان مبدل فلای بک پیشنهادی با مبدل فلای بک سوئیچینگ سخت

۷- نتیجه گیری

همانگونه که قبلاً بیان شد مبدل های فلای بک به علت تک سوئیچه بودن و استرس پایین کاربرد وسیعی در منابع تغذیه سوئیچینگ دارند. این مبدل علاوه بر سادگی و ارزانی ، دارای ترانسفورمر ایزوله دو منظوره می باشد که هم نقش سلف را بازی می کند و هم نقش ترانسفورمر، لذا ولتاژ خروجی به ورودی

سیاسگزاری

بر خود لازم می دانم از مسئولین محترم منطقه ۲ عملیات انتقال گاز که در انجام این تحقیق با اینجانب همکاری و مساعدت کافی را داشته اند تشکر نمایم. هم چنین از دکتر دلشاد که با راهنمایی های خود نقش مهمی در اتمام تحقیق داشته اند نیز تشکر می نمایم.

مراجع

- [1] Brown, m., Power Supply Cookbook, 2nd ed, p. cm, 2001.
- [۲] ابریشمی فر، منابع تغذیه سوئیچینگ، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.
- [3] J. Zhou, W. Dehaene, "An on-chip power supply regulator to reduce the switching noise", IEEE Trans. OnEne., Vol.53, pp.157-168, 2011.
- [4] E. Adib and H. Farzanehfard, "Family of zero-current transition PWM converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 8, pp. 3055-3063, Aug. 2008.
- [5] C. M. Wang, "A novel zcs pwm flyback converter with a simple zcs pwm commutation cell," IEEE Transactions industrial electronics, vol. 55, no. 2, pp. 749-757, Feb. 2008.
- [6] E. Adib and H. Farzaneh fard, "Family of soft- switching pwm converters with current sharing in switches," IEEE Transactions on power electronics, vol. 24, no. 84, pp. 979-985, April. 2009.
- [7] E. Adib and H. Farzaneh fard, "Family of zero current zero voltage transition pwm converters," IET power electron, vol. 1, no. 2, pp. 214-223, 2008.
- [8] C. M. Wang, "A new family zero current switching (ZCS) pwm converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 4, pp.1117-1125, Aug. 2005.