

کاهش نویز EMI در مبدل‌های DC-DC فضایی

و پیشنهاد مبدل مناسب با طیف EMI قابل قبول و قابلیت اطمینان بالا

سید مهدی موسوی بادجانی^۱

توحید رحیمی^۲

چکیده

در سیستم‌های تامین توان الکتریکی ماهواره، انواع مبدل‌های DC-DC در توانها و فرکانس‌های کاری مختلف، کاربردهای وسیعی دارند. جهت کاهش تداخل‌ها الکترومغناطیسی این مبدل‌ها در سایر ادوات الکترونیکی ماهواره، تولید نویز آنها می بایست حداقل شود. برای این منظور در این مقاله طیف EMI تولید شده در مبدل DC-DC توان پایین و فرکانس بالا در دو حالت کلی کلید-زنی سخت و نرم مقایسه شده است. در جهت افزایش قابلیت اطمینان مبدل، توپولوژی جدیدی پیشنهاد شده است. همچنین جهت کاهش نویز EMI از روشی جدید با تاثیرگذاری مناسب در طیف استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی موید این پیشنهاد می‌باشد.

کلید واژه

مبدل DC-DC، طیف EMI، قابلیت اطمینان

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر Mosavi@irsig.ir

^۲ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

قوانین بین‌المللی در سازگاری الکترومغناطیسی، فعالیت‌های زیادی را جهت کاهش تداخل‌های الکترومغناطیسی در انواع مبدل‌های بکار رفته در ادوات الکترونیکی و الکتریکی مدرن از قبیل کامپیوتر برانگیخته است. مطالعات تداخل‌ها الکترومغناطیسی روی سه بخش تمرکز می‌کند: منبع نویز، مسیر کوپلاژ و هدف (سیستم الکتریکی که تحت تاثیر تداخل‌ها الکترومغناطیسی عملکردش مختل می‌شود). اکثر موارد کاهش مسیرهای کوپلاژ مغناطیسی یا ایجاد قابلیت‌ها روی هدف، پیچیدگی و هزینه پیاده سازی زیادی به همراه دارد، لذا یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش نویز، پرداختن به خود منبع نویز است [۱]. منابع نویز معمولاً مبدل‌هایی هستند که در اثر کلیدزنی، تغییرات شدیدی در پارامترهای الکتریکی (آهنگ تغییرات ولتاژ و جریان) ایجاد می‌کنند که این تغییرات ولتاژ و جریان ناگهانی خود عامل بروز پدیده EMI^۳ هستند. نامناسب بودن زمان خیزش و افت ولتاژ در خروجی مبدل، همان‌طور که در [۲] به آن پرداخته شده‌است، می‌تواند در تشدید EMI تولیدی به خصوص در مبدل‌هایی با کلید زنی نرم و فرکانس بالا مؤثر باشد. روش‌های مختلفی جهت کاهش نویز در مقالات ذکر شده‌است. انواع روش‌های کلیدزنی خاص مطرح شده‌است مثل^۴ SFM [۳-۵]، انواع کلیدزنی نرم [۶-۷] عمده روش‌هایی هستند که در جهت کاهش نویز EMI، استفاده شده است.

کارایی و نحوه پیاده‌سازی انواع روش‌های کلیدزنی در مرجع [۸] مورد بررسی قرار گرفته است که همگی روش‌ها قله‌ی نویز را در بازه‌ی فرکانسی معین کاهش می‌دهند.

روش کلیدزنی SFM به روش‌های کنترلی پیچیده‌ای نیاز دارد به خصوص وقتی که SFM از نوع تصادفی یا نامنظم باشد و در ضمن چگالی موجود طیف نویز را هم کم نمی‌کند بلکه آن را در کل طیف فرکانسی EMI تولید شده توسط مبدل پخش می‌نماید.

روش کلیدزنی نرم سبب کاهش چگالی طیف انرژی نویز می‌شود. این روش مشتمل بر سه نوع کلید زنی است. کلیدزنی ZVS^۵ (کلید زنی در ولتاژ صفر)، کلیدزنی ZVZCS^۶ (کلیدزنی در ولتاژ صفر و جریان صفر) و کلیدزنی ZCS^۷ (کلیدزنی در جریان صفر). نتایج حاصل از اندازه‌گیری نویز EMI و سایر پارامترهای مدار در دو نوع کلیدزنی سخت و نرم حاکی از آن است که: [۹]

^۳ Electromagnetic interference
^۴ Switching Frequency Modulation
^۵ Zero Voltage Crossing
^۶ Zero Voltage, Zero Current Crossing
^۷ Zero Current Crossing

۱) پاسخ گذرای کلیدزنی نرم سریع‌تر از کلیدزنی سخت می‌باشد.

۲) نویز EMI هدایتی و تابشی به دلیل این‌که در کلیدزنی در ولتاژ صفر یا جریان صفر سبب کاهش در آهنگ تغییرات شدید ولتاژ و جریان می‌شود، کاهش می‌یابد.

۳) بازده در کلیدزنی نرم بیشتر از کلیدزنی سخت می‌شود.

البته کلیدزنی نرم نیاز به اندوکتانس و خازن (Cr و Lr) داشته و اکثر مواقع نیاز به کلید قدرت اضافی دارد که هزینه مبدل را بالا می‌برد.

فیلترهای اکتیو و پسیو از روش‌های دیگری نیز در جهت کاهش EMI می‌باشد. در [۱۰] به مطالعه‌ی تأثیر فرکانس کلیدزنی بر فیلتر نویز مد تفاضلی و مشترک پرداخته است. در [۱۱] نیز از ترکیب فیلتر اکتیو و پسیو با هدف کاهش اندازه و حجم جهت غلبه بر EMI استفاده کرده است. فیلترهای پسیو حجم و وزن زیادی از کل مبدل را تشکیل می‌دهند و با افزایش چگالی توان انتقالی بر حجم فیلتر پسیو افزوده می‌شود. فیلترهای اکتیو نیز به منبع ولتاژ مستقل و اضافی نیازمند هستند که این امر عیب بزرگی برای این نوع فیلترهاست.

مبدل‌های DC-DC مورد استفاده در ماهواره بایستی قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند. آنالیز قابلیت اطمینان و حرکت به سوی استفاده از سیستم توان با قابلیت اطمینان بالا یک امر ضروری در ماهواره هاست [۱۲-۱۳]. چرا که تعمیر هر گونه خرابی در سیستم توان ماهواره، به دلیل عدم دسترسی یا دسترسی دشوار یک امری بسیار مسأله‌ساز است. در این مقاله دو کلید قدرت که طبق الگوی کلیدزنی خاصی، کلیدزنی می‌شوند تا هم قابلیت اطمینان مبدل بالا رود و هم چگالی طیفی EMI مناسب باشد.

نویز EMI به دو نوع هدایتی و تابشی تقسیم می‌شود. از آن جایی که اندازه‌گیری نویز تابشی در عمل نیاز به اتافک بدون انعکاس الکترومغناطیسی و آنتن مخصوص است، معمولاً در مقالات روی نویز هدایتی بحث می‌شود. انواع مبدل‌ها بایستی برای مقایسه تأثیرگذاری در بازه‌های فرکانسی خاصی تحت استاندارد مربوطه بررسی شوند. طبق استانداردهای مختلف بازه فرکانسی EMI هدایتی تابشی کمی متفاوت تعریف می‌شود که نویز هدایتی از 9kHz تا 30 MHz و نویز تابشی از 30 MHz تا 300 MHz تعریف می‌شود. محدوده‌ی طیف نویز هدایتی طبق استاندارد FCC، 450KHz-30MHz، مطابق استاندارد VDE، 10KHz - 30KHz و طبق استاندارد CISR22، 150KHz - 30MHz تعریف می‌شود [۳-۵]. در این مقاله طیف EMI، بازه فرکانسی صفر تا چهارصد کیلو هرتز برای بررسی بهتر، انتخاب شده است.

در این مقاله یک مبدل بر اساس مفهوم افزایش قابلیت اطمینان و کاهش نویز هدایتی پیشنهاد شده است. در مبدل پیشنهادی با استفاده از دو کلید قدرت، قابلیت اطمینان بالا برده شده است و

به کمک روش کلیدزنی پیشنهادی، نویز هدایتی نسبت به مبدل معمول کاهش یافته، کاهش پیدا کرده است.

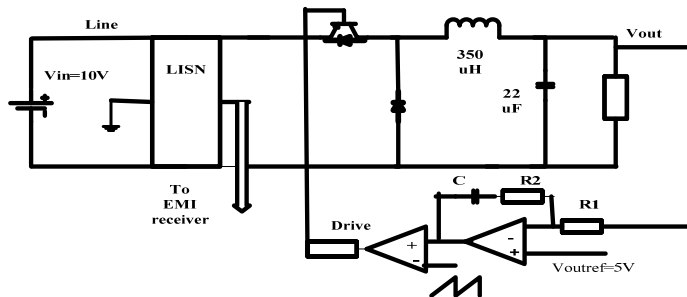
این مبدل در ادامه دارای سه بخش به ترتیب: بررسی روش‌های کلیدزنی (بخش ۲)، پیشنهاد مبدل با توپولوژی مناسب (بخش ۳) و نتیجه‌گیری (بخش ۴) است.

بررسی روشهای کلیدزنی متفاوت در کاهش نویز EMI

در کلیدزنی سخت حلقه باز کنترل دقیقی روی ولتاژ خروجی نیست و صرفاً با تنظیم پهنای پالس مربعی می‌توان ولتاژ خروجی را نزدیک مقدار مطلوب قرار داد. ولی در کلیدزنی حلقه بسته با تنظیم مناسب کنترل‌کننده که معمولاً کنترل‌کننده PI استفاده می‌شود، با تنظیم ولتاژ پایه روی مقدار مطلوب، می‌توان ولتاژ خروجی مطلوب داشته باشیم. از طرفی به دلیل وجود قله‌های شدیدی که در فرکانس کلیدزنی و مضارب آن در طیف فرکانسی EMI مربوط به آن دیده می‌شود، معمولاً از کلیدزنی حلقه بسته استفاده می‌شود. چگالی انرژی دو سر $LISN^A$ به جریان عبوری از آن وابسته است به طوری که جریان DC کمتر، چگالی انرژی کمتری برای طیف فرکانسی ولتاژ خروجی LISN نمونه‌گیری شده جهت تحلیل فرکانسی را مسبب می‌شود. و در بخش ۱-۲ توضیح داده می‌شود که به دلیل قابلیت تنظیم ضعیف ولتاژ خروجی مبدل در حالت کنترل حلقه باز، ولتاژ کمتر در دوسر بار مبدل ظاهر می‌شود که نشان از عبور جریان کمتر از LISN دارد. بدین دلایل نویز تولیدی حلقه باز کمتر بوده ولی وجود قله‌های بزرگ در فرکانس کلیدزنی و مضارب آن همچنان مشهود است.

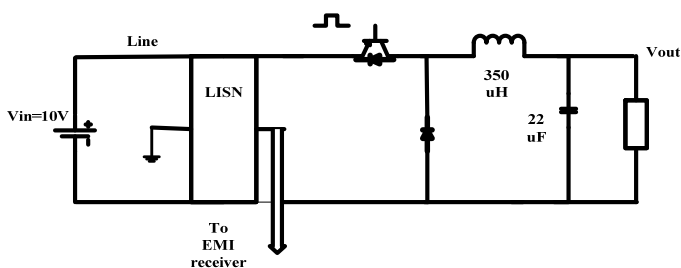
کلیدزنی سخت با کنترل حلقه باز و حلقه بسته

مدار شکل (۱) نمای مبدل کاهش‌دهنده‌ای است که اهداف مقاله روی آن پیاده شده است (حلقه بسته). توان بار ۲/۵ وات است. ولتاژ ورودی به واسطه LISN (شبکه‌ی پایدار کننده امپدانس خط) به مبدل متصل است. LISN به کاررفته براساس استاندارد CISR طراحی شده است. خروجی LISN به گیرنده EMI وصل می‌گردد تا طیف EMI قابل مشاهده باشد.



شکل ۱. نمای کنترل حلقه بسته مبدل کاهشده

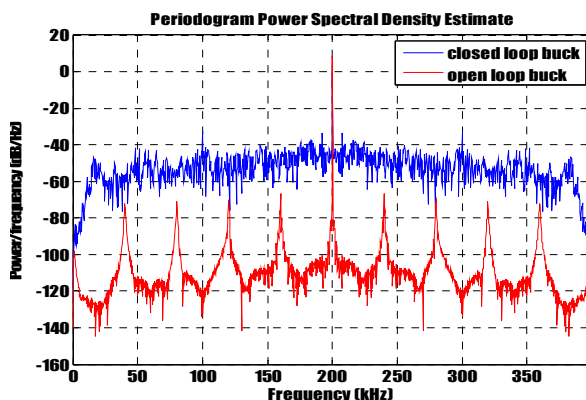
اگر مبدل به حالت کنترل حلقه باز باشد، نمای آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمای کنترل حلقه باز مبدل کاهشده

فرکانس شکل موج حامل دندان‌اره‌ای ۱۰۰ کیلو هرتز است که سبب تولید ولتاژ ۵ ولت می‌شود. فرکانس موج حامل مربعی هم در کلیدزنی حلقه باز ۱۰۰ کیلو هرتز بوده و طول روشن بودن کلید در هر بازه درصد ثابتی دارد. ولی در این حالت ولتاژ خروجی نزدیک ۵ ولت است و مثل حالت کنترل حلقه بسته روی ۵ ولت با اختلاف کم، پایدار نمی‌شود. در کنترل حلقه باز مورد بحث نمی‌توان با تنظیم طول بازه وصل کلید در هر پریود به ۵ ولت دقیق رسید که یکی از معایب کنترل حلقه باز است. نتایج نویز اندازه‌گیری شده در نرم‌افزار متلب به در شکل ۳ آورده شده است. رنگ قرمز مربوط به کلیدزنی سخت حلقه باز و رنگ آبی مربوط به کلیدزنی حلقه بسته است. علت پایین بودن چگالی طیف EMI در کلیدزنی حلقه باز پایین بودن جریان ورودی و نوسانات کمتر در شکل موج جریان است. در کلیدزنی حلقه بسته بایستی نوسانات جریان کلید زیاد باشد تا ولتاژ خروجی روی مقدار مطلوب تنظیم شود. وجود قله‌های شدید در فرکانس کلیدزنی و مضارب آن در کنترل

حلقه باز مشهود است. شکل ۳ به کمک تابع DSP در نرم‌افزار متلب از خروجی LISN بدست آمده است. DSP در واقع همان کار EMI Receiver یا Spectrum Analyser را در نرم‌افزار متلب انجام می‌دهد. در این مقاله هدف بررسی تأثیر گذاری روش‌های مختلف کلیدزنی در تولید نویز است و هدف بررسی دقیق طیف نویز نیست. بدست آوردن طیف واقعی نویز در اندازه‌گیری عملی یا با مدل‌سازی دقیق ممکن می‌باشد. دلایل آورده شده، مقایسه‌ی طیف شبیه‌سازی شده را با استانداردهای واقعی بی‌معنی می‌کند.

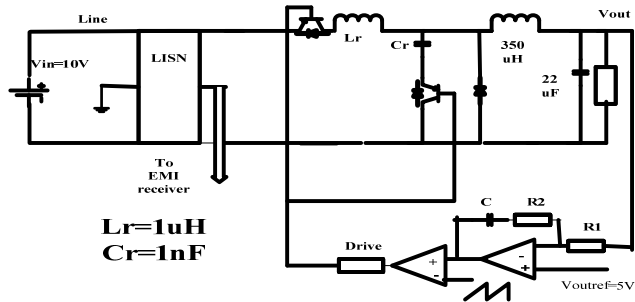


شکل ۳. طیف فرکانس EMI حلقه باز و حلقه بسته
محور عمودی بر حسب dB/Hz و محور افقی بر حسب KHz

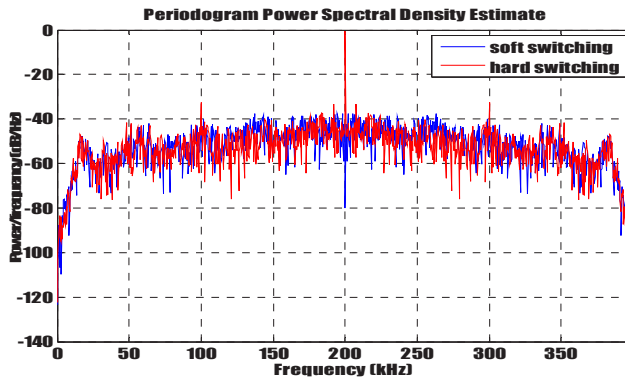
کلیدزنی نرم

با توجه به خصوصیتی که برای کلیدزنی نرم بیان شد، کلیدزنی نرم هم مورد مقایسه قرار گرفته شده است. در این مدار از سلف و خازن Lr و Cr و کلید برای تشدید استفاده می‌شود. شکل ۴ مدار کلیدزنی نرم به صورت نمای را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود منبع DC از طریق مدار LISN به مبدل متصل است. در این مبدل کلید موازی با دیود و خود دیود تقریباً در جریان صفر کلیدزنی می‌شوند (ZCS). آهنگ رشد جریان کلیدی که به صورت سری قرار دارد، به صورت ناگهانی نیست و این خود عامل کاهش چگالی انرژی نویز می‌شود. مقایسه کلیدزنی حلقه بسته سخت و نرم در شکل ۵ آورده شده است. مقایسه‌ی انجام شده حاکی از کاهش مقدار کل چگالی انرژی EMI در کلیدزنی نرم دارد. در ضمن در کلیدزنی نرم قله‌های کمتری در طیف

فرکانسی EMI وجود دارد. رنگ آبی مربوط به کلیدزنی نرم و رنگ قرمز مربوط به کلیدزنی سخت حلقه بسته است.

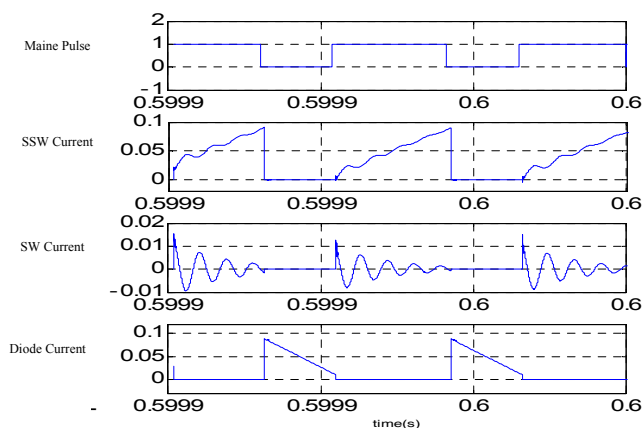


شکل ۴. نمای کلیدزنی نرم به صورت حلقه بسته



شکل ۵. چگالی طیف انرژی کلیدزنی نرم وسخت حلقه بسته

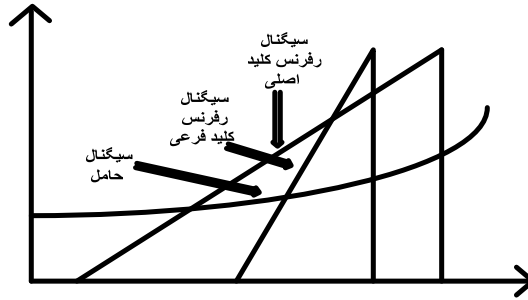
محور عمودی بر حسب dB/Hz و محور افقی بر حسب KHz



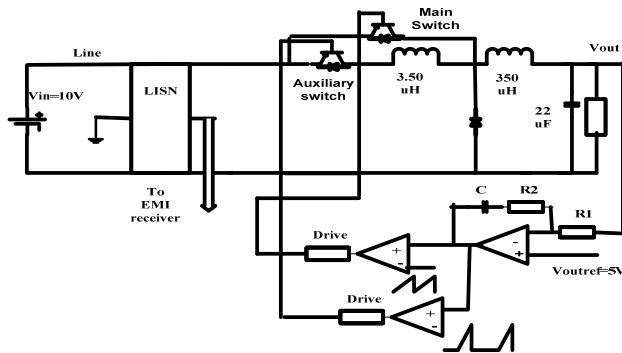
شکل ۶. شکل موج فرمان پالس، جریان کلید سری، جریان کلید فرعی و جریان دیود

پیشنهاد مبدل با توپولوژی مناسب

در این قسمت یک مبدل جدید برای اولین بار پیشنهاد شده است. این مبدل جدید در گام اول جهت بالا بردن قابلیت اطمینان مبدل مطرح می‌شود، به طوری که هر کدام از کلیدها خراب شود، کلید دیگری وارد مدار شود. از طرفی جهت کاهش نویز هدایتی روش کلیدزنی جدیدی مطرح می‌شود. اگر کلید اصلی خراب شود، روند کلیدزنی قطع و صرفاً به کلید کمکی یا فرعی فرمان پالس صادر می‌شود. وجود دو کلید که می‌توانند به طور موازی کار کنند و در صورت خرابی هر کلید، کلید دیگر به تنهایی وظیفه اصلی مبدل کاهنده برای تنظیم ولتاژ مناسب را انجام دهد، قابلیت اطمینان بالایی به مبدل می‌دهد. اعمال الگوی کلیدزنی که در شکل ۷ مشخص است، طیف نویز مناسب EMI در کارکرد هر دو کلید در مبدل را نتیجه می‌دهد. با توجه به توضیحات داده شده توپولوژی که در شکل ۸ دیده می‌شود، پیشنهاد شده است. فرمان پالس برای کلید اصلی و فرعی با مقایسه سیگنال پایه با شکل موج حامل مورد نظر بدست می‌آید.



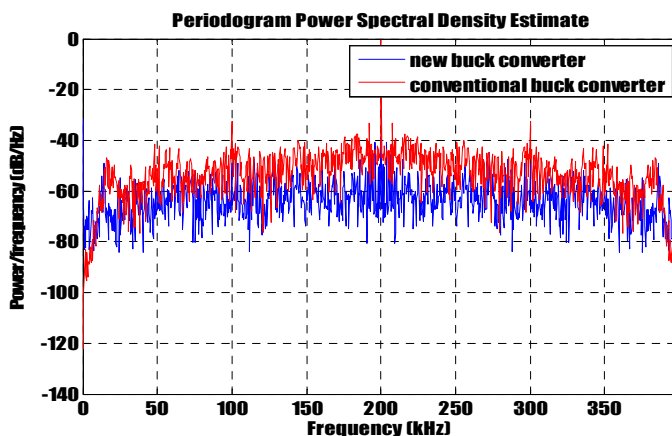
شکل ۷. تولید فرمان پالس برای کلید اصلی و فرعی



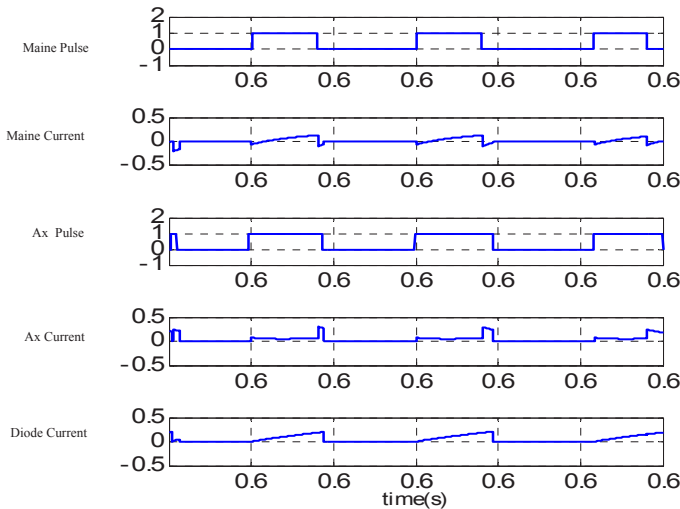
شکل ۸. نمای مبدل کاهنده جدید با قابلیت اطمینان بهتر

برای هر کلید اصلی و فرعی با مقایسه سیگنال پایه با شکل موج حامل مورد نظر فرمان پالس بدست می‌آید. هر زمانی که موج پایه از موج حامل بزرگتر شود فرمان پالس صادر می‌شود. در هر سیکل ابتدا کلید فرعی وارد عمل می‌شود و جریان بار شروع به افزایش می‌کند. با اعمال سیگنال به کلید اصلی، کلید فرعی بایاس معکوس شده و با وجود فرمان پالس، قطع شده و جریان به دلیل اضافه بودن سلف اضافی با آهنگ کمتری صعود کرده بود. بعد از عبور جریان از طریق کلید اصلی، فرمان پالس به کلید فرعی داده شده و کلید فرعی وارد عمل می‌شود. در این حالت هم کلید اصلی در ولتاژ کمی کلیدزنی می‌شود. مثل این که کلیدزنی برای کلید اصلی مثل کلیدزنی نرم رخ داده است و در کلیدزنی نرم نیز چگالی انرژی نویز کم می‌شود. از جنبه‌ی دیگر با توجه به نحوه کلیدزنی، هنگامی که فرمان قطع و وصل در طول هر سیکل به ترتیب به کلید فرعی و اصلی داده می‌شود افت و صعود جریان‌های این دو کلید در خلاف هم عمل می‌کنند و می‌شود گفت اثر di/dt همدیگر را خنثی می‌کنند.

(علامت di/dt دو کلید در میان هر سیکل خلاف همدیگر است). پدیده‌های بیان شده سبب کاهش قله‌های نویز و چگالی آن می‌شود که در شکل ۹ نمایان است. طیف فرکانسی EMI تولیدی این مبدل با مبدل DC-DC حلقه بسته مقایسه می‌شود که مقایسه انجام شده حاکی از قابل قبول بودن EMI تولیدی توسط مبدل جدید دارد. این مقایسه در شکل ۹ نشان داده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، از قله‌های مربوط به فرکانس کلیدزنی حلقه بسته خبری نیست در ضمن قله‌های مربوط به طیف فرکانسی هم چندان شدید نیستند و مقدار کل انرژی طیف هم در مقایسه با مبدل معمولی قابل قبول است. (ماکزیمم دامنه نویز کلیدزنی معمول و پیشنهادی به ترتیب برابر صفر و ۲۰- دسی بل است). رنگ قرمز مربوط به کلیدزنی سخت حلقه بسته و رنگ آبی مربوط به کلیدزنی با توپولوژی جدید است. تاکید بر قله‌ها در چگالی طیف انرژی EMI بدین سبب است که مدارهای الکترونیکی و برخی مدارات کنترل بهره ولتاژ ضعیف تحت این قله‌ها ناخواسته ممکن است وارد عمل بشوند و روند عادی کارکرد سیستم را مختل کنند. در این مبدل هدف اصلی به کار بردن کلید ذخیره (کلید فرعی) در کاهش نویز است. تلاش می‌شود کلید ذخیره هم در کارکرد مبدل تأثیر بگذارد و از طرفی به دلیل وجود دو کلید، قابلیت اطمینان مبدل هم بالا می‌رود. روش‌های کاری خاصی برای مبدل به وجود نمی‌آید و به این دلیل از آوردن جزئیات بیشتر که در درک موضوع مقاله تأثیر گذار نیستند، اجتناب می‌شود. فقط شکل موج جریان کلید اصلی و فرعی در نمودار ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹. مقایسه نویز EMI مبدل حلقه بسته معمولی و جدید
محور عمودی بر حسب dB/Hz و محور افقی بر حسب KHz



شکل ۱۰. شکل موج جریان کلید اصلی و فرعی

نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع مبدل‌های DC-DC از نقطه نظر طیف EMI بررسی شده و به کمک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی‌های لازم انجام شده است. در نهایت مبدل با توپولوژی پیشنهادی، انتخاب می‌شود.

با توجه به فعالیت‌های فوق مشخص گردید:

۱- این که به دلایل معایب کنترلی و وجود قله‌های شدید در طیف فرکانسی مبدل DC-DC حلقه باز اصلاً توصیه نمی‌شود (شکل ۳ و ۴).

۲- این که مبدل کلیدزنی نرم در صورت مهم نبودن هزینه مربوط به ادوات اضافی در مبدل در جهت کاهش نویز پیشنهاد می‌شود (شکل ۵ و ۶).

۳- و نهایتاً مبدل DC-DC کاهنده با توپولوژی و کلیدزنی جدید از لحاظ قابلیت اطمینان بالاتر و طیف فرکانسی نویز مناسب می‌تواند جایگزین مبدل معمولی شود (شکل ۸ و ۹).

نتایج بدست آمده مبدل پیشنهادی را جهت استفاده در سیستم‌های فضایی با هدف داشتن حداقل نویز EMI و با قابلیت اطمینان بالاتر نسبت به سایر مبدل‌های متداول در سیستم توان ماهواره مناسب نشان می‌دهد.

- [1] A. Knitter , J. Luszcz and P. J. Chrzan , “Conducted emi mitigation in switched mode dc-dc converters by spread spectrum techniques,” Proc. Compat. Power Electron., IEEE, 2005, pp.166 -171
- [2] Raul Monterio, Beatriz Borges ,Vuctor Anunciad, “EMI Reduction by Optimizing the Output Voltage Rise Time anf Fall Time in High-Frequency Soft-Sowitching Converter, ” Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04 IEEE 35th Annual, 2004, Vol.2. p.p1127 – 1132.
- [3] D. Gonzalez , J. Balcells , A. Santolaria , J.-C. Le Bunetel , J. Gago , D. Magnon and S. Brehaut , “Conducted EMI reduction in power converters by means of periodic switching frequency modulation,” IEEE Trans. Power Electron., vol.22, no.6, pp.2271 -22812007
- [4] F. Mihalic, D. Kos, “Conductive EMI reduction in DC-DC converters by using the randomized PWM,” Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005 Volume 2, 20-23 June 2005 vol. 2 pp.809 - 814
- [5] D. Gonzalez , J. Balcells , A. Santolaria , J.-C. Le Bunetel , J. Gago , D. Magnon and S. Brehaut , “Conducted EMI reduction in power converters by means of periodic switching frequency modulation,” IEEE Trans. Power Electron., 2007, vol. 22, no. 6, pp.2271 -2281
- [6] A. Jangwanitlert , J. C. Balda and K. J. Olejniczak , “Analysis of conducted EMI emissions on a soft-switched full bridge DC-DC converter with a fixed switching frequency,” Proc. 29th IEEE IECON, 2003, vol. 3, pp.2906 -2910,
- [7] Spiazzi, G., A. Zuccato, and P. Tenti. , “Analysis of conducted and radiated noise of soft-switched flyback DC-DC converter,” In Telecommunications Energy Conference, 1996. INTELEC'96., 18th International, pp. 297-304. IEEE, 1996
- [8] S. Mohseni and A. Roomizadeh, “Study on periodic and non periodic frequency modulation techniques for EMI suppression in SMPS,” in Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011 2nd, 2011, pp. 615-619.
- [9] H. Chung , S. Y. R. Hui and K. K. Tse , “Reduction of power converter EMI emission using soft-switching technique,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1998, vol. 40, no. 3, pp.282 -287
- [10] Danilovic.M, Fang Luo, Lingxio Xue, Wang.R, Mattavelli.P, Boroyevich.D, “Size and weight dependence of the single stage input EMI filter on switching Frequency for low voltage bus aircraft applications, ”15th International Power electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), sept.2012
- [11]Hamzad.D,Swan.M,Jain.P.K, “ Suppression of common–mode input electromagnetic interference noise in DC-DC converter using the active filtering method ,”IEEE Journal of Power Electronics, 2012, vol. 4,no.7, pp.776-784,
- [12]GH.Farahani, M. Taherbaneh,” Extracting Best Reliable Scheme for Electrical Power Subsystem (EPS) of Satellite,” IEEE Aerospace Conference,2011
- [13]M. Zahran, S. Tawfik and G. Dyakov, “L.E.O. Satellite Power Subsystem Reliability Analysis,” in Journal of Power Electronics,, 2006, vol. 6,no. 2, pp.104-113.