

طراحی و شبیه‌سازی مبدل DC/DC جدید در سامانه اویونیک مطابق با استانداردهای نظامی

محمدحسین خانزاده*^۱، سید محسن حسینی^۲

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) - ۲- کارشناس ارشد دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۴/۰۴/۱۰، پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۱)

چکیده

از مهم‌ترین بخش‌های سامانه اویونیک هواپیما، واحد تغذیه توان الکتریکی آن است. در این مقاله، یک مبدل سوئیچینگ DC/DC با ساختار جدید و خروجی چندگانه برای استفاده در سامانه اویونیک هواپیماهای نظامی ارائه شده است. مبدل پیشنهادی قادر است یک خروجی اصلی با توان بالا و یک خروجی جانبی برای بخش کنترلی سامانه را به صورت هم‌زمان و بدون افزودن سیم‌پیچ‌های اضافی به ترانسفورماتور، یا تغییر در سیکل وظیفه و فرکانس سوئیچ فراهم نماید. به علاوه، نیاز به سیم‌پیچ ثالثیه مغناطیس‌زدا نیز برطرف خواهد شد. فیلتر EMI متناسب، مدار مهار جریان هجومی و حالات گذرا، و همچنین فیلتر کاهنده ریبیل نیز مدارهای جانبی هستند که مطابق با استانداردهای نظامی MIL-STD طراحی و در مبدل تعبیه شده‌اند. مبدل پیشنهادی نسبت به نمونه‌های موجود دارای مزایایی همچون سادگی طراحی و افزایش سرعت پردازش سامانه کنترلی، افزایش چگالی توان و بازده، کاهش وزن و ابعاد، حذف تداخلات EMI و افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سامانه اویونیک جنگنده‌ها، مبدل سوئیچینگ DC/DC نظامی، افزایش چگالی توان، افزایش قابلیت اطمینان

Design and Simulation of a New DC/DC Converter for Avionic System According to Military Standards

M. H. Khanzadeh*, S. M. Hosseini

Imam Hossein University

(Received: 01/07/2015; Accepted: 31/05/2016)

Abstract

One of the most important parts in the aircraft avionic system is the electrical power supply, requiring special design considerations. Thus, many international standards have been adopted to achieve the best performance and highest system reliability. In this paper, a multi-output DC/DC switching converter with new forward-flyback structure for using in the military avionic system is presented. The proposed converter can provide a main high power output and an auxiliary output for control unit. It is performed without adding extra transformer winding, or change of switching frequency and duty cycle. Moreover, demagnetizing tertiary winding will be removed. The suitable electromagnetic interference (EMI) filter, inrush current suppressor circuit, and output ripple filter are designed according to MIL-STD standards. The proposed converter has many advantages such as simplicity of design, high processing speed of control system, high power density and efficiency, low size and weight, low electromagnetic noise, and good reliability.

Keywords: Aircraft Avionic System, Military DC/DC Switching Converter, Increasing Power Density, Reliability Improvement

*Corresponding Author E-mail: mhokhanzade@gmail.com

۱. مقدمه

مبدل‌هایی با ساختار تمام‌پل برای استفاده در سامانه‌های اویونیک پیشنهاد شده است [۴-۶]. به‌کارگیری چهار سوئیچ قدرت در این ساختارها، موجب افزایش تلفات کلیدزنی و هدایت سوئیچ‌ها و افزایش هزینه و پیچیدگی طراحی سامانه کنترلی آن‌ها می‌شود. در حالی که امروزه با پیشرفت سریع تکنولوژی نیمه‌هادی‌ها و تولید ترانزیستورها و دیودهای قدرت با سطح ولتاژ و جریان نامی بالا، مانند ماسفت‌های توان بالای سیلیکون کاربید و دیودهای شاتکی، امکان استفاده از سایر ساختارهای مبدل‌های سوئیچینگ با بازده بالاتر و در بازه توان‌های بالا برای استفاده در سامانه‌های تغذیه رادارها وجود دارد. یک مبدل سوئیچینگ تشدیدی نیز پیشنهاد شده است [۷]. این مبدل نیز دارای معایبی همچون افت قابل توجه راندمان در توان‌های پایین، امکان تشدید با پارامترهای سامانه و پیچیدگی کنترل و افزایش تلفات هدایتی سوئیچ‌ها است. تحقیقاتی جامع و مناسب منتشر شده در زمینه اصول طراحی تجهیزات تبدیل توان الکتریکی به منظور کاربرد در سامانه‌های نظامی مانند سامانه اویونیک‌های هواپیماها، تانک‌ها، سامانه‌های کنترل سلاح‌ها، سامانه تغذیه رادارها، سامانه‌های هوا فضا و ... وجود ندارد. از این رو، ضرورت توجه به طراحی مناسب و تحلیل مدارات داخلی و کمک به بهبود عملکرد مبدل‌ها با رویکرد نظامی و مطابق با استانداردهای نظامی کاملاً احساس می‌شود.

با توجه به مطالب عنوان شده، و با در نظرگیری نیاز روزافزون صنایع هوایی به مبدل‌های تغذیه با عملکرد مناسب و کارایی بالا در سامانه‌های الکتریکی هواپیماها و بالگردها، در این مقاله به بررسی ریزمدارهای سوئیچینگ تبدیل DC/DC با الزامات نظامی پرداخته خواهد شد که عموماً دارای خروجی چندگانه هستند. ساختار داخلی منابع تغذیه سوئیچینگ DC/DC مورد استفاده در این سامانه‌ها بررسی شده و ساختاری جدید برای بهبود عملکرد، افزایش چگالی توان و قابلیت اطمینان این مبدل‌ها ارائه شده است. ساختمان این منبع تغذیه شامل بخش‌هایی همچون مدار مهار جریان هجومی^۹، فیلتر حذف کننده تداخلات الکترومغناطیسی^{۱۰} مد مشترک و مد تفاضلی، یک ساختار ترکیبی از مبدل سوئیچینگ فلای‌بک-فوروارد^{۱۱} دارای خروجی چندگانه در ولتاژهای مختلف با قابلیت ایزولاسیون خروجی از ورودی، فیلتر کاهنده ریبیل خروجی و همچنین بخش‌های کنترلی مبدل خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار PSIM.V.9.3 صحت و کارایی روش ارائه شده را تأیید می‌نماید.

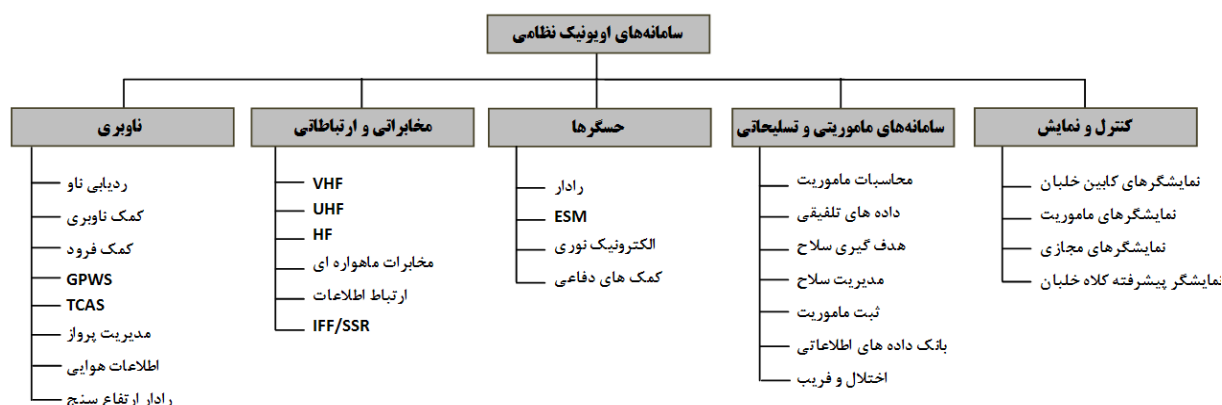
سامانه‌های مرتبط با الکتریکی هواپیماها با عنوان اویونیک^۱ شناخته می‌شوند که ترکیبی از واژه‌های الکتریکی و هوانوردی است. برخی از زیر بخش‌های سامانه اویونیک هواپیما شامل سامانه متمرکز نظارت و کنترل^۲، سامانه هشدار نزدیکی به موانع زمین^۳، سامانه مکان‌یابی^۴، سامانه فرود ماکروویو در شرایط عدم دید مناسب^۵، سامانه‌های الکتریکی رادار^۶، سامانه فرود با دستگاه^۷، و سامانه‌های اضافی حفاظتی مانند فریب رادار^۸ هستند [۱].

شکل (۱) ساختار تفکیک شده و زیرسامانه‌های اویونیک هواپیماهای نظامی را نمایش می‌دهد. تقریباً تمامی تجهیزات الکتریکی موجود در هواپیماها نیازمند منابع تغذیه‌ای هستند که سطح انرژی را به میزان مطلوب برای تأمین تغذیه مورد نیاز این سامانه‌ها تبدیل نمایند. منابع تغذیه مذکور به دلیل حساسیت کاربرد در سامانه هواپیماها و جنگنده‌های نظامی نیازمند دقت بالا در طراحی هستند تا الزاماتی همچون قابلیت اطمینان بالا، نویز و تشعشعات پایین، پایداری مناسب و امکان دفع حالات گذرا، بازده بالا، ابعاد کوچک و ریبیل پایین در خروجی را فراهم نمایند [۲].

حساسیت و اهمیت عملکرد با قابلیت اطمینان بالا و بدون اغتشاش این منابع در کاربردهای نظامی کاملاً روشن است. هواپیماهای نظامی در سامانه اویونیک خود به مبدل‌های ایزوله با کارایی بالا و چگالی توان مناسب برای تغذیه توان بارهایی مانند تجهیزات رادار و جنگ الکتریکی، ناوبری و ارتباطی، سامانه‌های مانیتورینگ و نظارت، سامانه‌های کنترل سلاح و سایر مصارف الکتریکی نیاز دارند. تاکنون، طراحی و ساختارهای مختلفی در زمینه مبدل‌های تغذیه سامانه اویونیک مورد بحث قرار گرفته‌اند. از اتصال ترکیبی مبدل نیم‌پل به مبدل باک در سامانه اویونیک به منظور تغذیه تقویت کننده‌های مایکروویو در سامانه فریب رادار هواپیما استفاده شده است [۳].

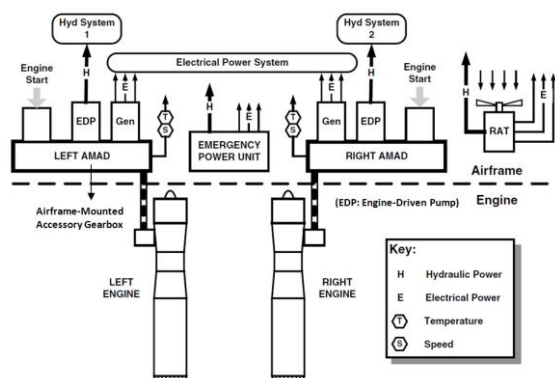
با وجود چگالی توان مناسب این مبدل، روش سری‌سازی مورد استفاده موجب کاهش راندمان و پایداری و همچنین پیچیدگی کنترل کلی مبدل خواهد شد. فرکانس کاری متفاوت سوئیچ‌ها منجر به پدید آمدن مشکلات هارمونیک و نویز شده و احتمالاً به فیلترینگ میانی نیاز خواهد بود.

^۹ Inrush Current^{۱۰} Electromagnetic Interference (EMI)^{۱۱} Hybrid Flyback-Forward Converter^۱ Avionic^۲ ECAM^۳ EGPWS^۴ GPS^۵ MLS^۶ ESRS^۷ ILS^۸ TRD



شکل ۱. ساختار تفکیک شده سامانه اویونیک هواپیماهای نظامی

الکتریکی هواپیما به‌شمار می‌رود. در طراحی این مبدل‌ها باید مسائلی همچون کیفیت سیگنال خروجی و ریپل پایین، بازده بالا، کمینه میزان تداخلات الکترومغناطیسی، قابلیت اطمینان مناسب و تعبیه تجهیزات حفاظتی برای دفع حالات گذرا، وزن و ابعاد پایین، چگالی توان بالا، تبادل حرارتی مناسب مبدل با محیط، طراحی بهینه برد چاپی و ... مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۲. سامانه قدرت الکتریکی نمونه یک هواپیمای نظامی [۱]

امروزه با پیشرفت سریع تکنولوژی نیمه‌هادی‌ها و تولید ترانزیستورها و دیودهای قدرت با سطح ولتاژ و جریان نامی بالا، مانند ماسفت‌های توان بالای سیلیکون کاربید^۵ و دیودهای شاتکی^۶، امکان استفاده از ساختارهای مبدل‌های سوئیچینگ با بازده بالاتر و در بازه توان‌های بالا برای استفاده در سامانه‌های تغذیه اویونیک وجود دارد. در بسیاری از مبدل‌های سوئیچینگ، برای دستیابی به دو خروجی با ولتاژ و جریان متفاوت نیاز به استفاده از سیم‌پیچ‌های جداگانه و یا ساختارهای چند طبقه است که موجب افزایش تلفات و کاهش بازده مبدل، پیچیدگی و افزایش زمان پردازش سامانه کنترلی، افزایش ابعاد و وزن، و کاهش چگالی توان می‌شود.

۲. مبدل‌های تغذیه در سامانه‌های اویونیک

سامانه قدرت الکتریکی هواپیماها از بخش‌هایی چون منبع توان اصلی و اضطراری، تجهیزات تبدیل سطح انرژی، ادوات حفاظت و کنترل و همچنین شبکه اتصال داخلی (سیم‌ها، کابل‌ها، رابط‌ها و...) تشکیل می‌شود. توان اصلی به‌طور معمول از ژنراتورهای موتورگرد سرعت ثابت^۱ و یا ژنراتورهای سرعت متغیر با فرکانس ثابت^۲ تأمین می‌شود [۸]. این ژنراتورها بخ‌طور معمول دارای مشخصات AC سه‌فاز چهارسیمه با ولتاژ خروجی ۱۱۵V و فرکانس نامی ۴۰۰ Hz و یا DC دو سیمه با ولتاژ ۲۸V هستند که به همراه ژنراتورهای اضطراری^۳ و باتری‌های کمکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کاربردهای حساس تر و به ویژه هواپیماهای نظامی، از توربین‌های هوای رم (RAT) که انرژی خود را از جریان‌های هوایی حاصل از سرعت حرکت هواپیما به‌دست می‌آورند نیز به عنوان برق اضطراری استفاده می‌شود [۹]. تولید انرژی الکتریکی با فرکانس بالا موجب کاهش ابعاد و وزن تجهیزات الکتریکی می‌گردد. ولی از سوی دیگر، افزایش فرکانس می‌تواند منجر به افزایش تلفات و نویز شود. از این رو، راهکارهای بهبود بازده تجهیزات و کاهش تداخلات امواج در این سامانه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. شکل (۲) یک سامانه قدرت الکتریکی نمونه را در یک هواپیمای نظامی نمایش می‌دهد.

به منظور تبدیل سطح ولتاژ و جریان به مقدار قابل استفاده برای برخی از تجهیزات الکتریکی، نیاز به استفاده از انواع مبدل‌های ساخته شده از ادوات نیمه‌هادی است که با عملکرد سوئیچینگ، سطح ولتاژ و جریان را به مقدار مناسب تبدیل نمایند [۹]. به همین دلیل، مبدل‌های سوئیچینگ DC/DC با طراحی متناسب با این نوع سامانه‌ها از تجهیزات مهم سامانه

^۱ IDG^۲ VSCF^۳ Auxiliary Power Unit^۴ Ram Air Turbine^۵ SiC MOSFET^۶ Schottky Diodes

۱-۲. استانداردهای نظامی در طراحی مبدل‌های سوئیچینگ

به منظور دستیابی به کیفیت بالای تجهیزات الکتریکی در سامانه‌های نظامی، سازمان‌های نظامی به تصویب و اجرای استانداردهای متعددی در زمینه این نوع سامانه‌های قدرت و تجهیزات الکتریکی پرداخته‌اند. به دلیل حساسیت این ادوات و نیاز به ایمنی و قابلیت اطمینان بالا، استانداردهای مذکور نسبت به نسخه‌های تصویب شده برای مناطق صنعتی یا مسکونی سختگیرانه‌تر است. برای نمونه، در زمینه محدودیت تولید تداخلات الکترومغناطیسی، استانداردهایی مانند FCC Class-A برای مناطق صنعتی و تجاری، استاندارد FCC Class-B برای مناطق مسکونی، و استانداردهای نظامی مانند MIL-STD461 و MIL-HDBK-241B وجود دارند، که استاندارد MIL-STD-461 از عمومیت بیشتری در کاربردهای نظامی برخوردار است. اولین نسخه از استاندارد MIL-STD-461 در سال ۱۹۶۷ و مدتی پس از شناسایی تداخلات الکترومغناطیسی با امواج رادیویی انتشار یافت و محدودیت‌ها و الزاماتی را برای کاهش سطح این امواج در تجهیزات نیروی هوایی و دریایی اعمال نمود. پس از چندین نوبت تکمیل و ویرایش، در سال ۲۰۰۷، جدیدترین و کامل‌ترین نسخه از این استاندارد (نسخه F) به چاپ رسید که به ارائه مشخصه‌های سازگاری الکترومغناطیسی در تجهیزات نظامی پرداخته است و در بسیاری از کشورهای دنیا مورد استناد قرار می‌گیرد [۱۰]. سایر الزامات تصویب شده شامل استاندارد MIL-I-46058C برای پوشش‌های عایق برای حفاظت از مدارهای الکتریکی، استاندارد MIL-PRF-38534H درجه حرارت کاری و تبادل حرارتی مبدل، استاندارد MIL-HDBK-217F برای سنجش قابلیت اطمینان تحت شرایط تنش و ... می‌باشد. این مبدل‌ها باید برای سنجش کیفیت تحت آزمون‌های کامل زیست‌محیطی، مکانیکی و الکتریکی مطابق استاندارد MIL-STD 883 قرار گیرند. برخی از استانداردهای لازم در طراحی مبدل‌های تغذیه سوئیچینگ در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

۲-۲. مبدل پیشنهادی

به منظور دستیابی به مزایایی همچون عملکرد بهتر واحد تغذیه سامانه‌های رادار، کاهش تلفات و ابعاد منبع تغذیه و ساده‌سازی ساختمان مدار، یک مبدل با ساختار جدید ارائه شده است. ترسیم بلوکی ساختار کلی مبدل شامل مبدل اصلی، مدار مهار جریان هجومی و حالات گذرا، فیلتر تداخلات الکترومغناطیسی و فیلتر ریپل خروجی در شکل (۳) ارائه شده است. شماتیک مدار

اصلی مبدل سوئیچینگ پیشنهادی در شکل (۴) نمایش داده شده است.

در این مبدل، به جای استفاده از ساختارهایی نظیر تمام‌پل یا نیم‌پل، از واحدی ترکیبی در سمت ثانویه استفاده شده است. مبدل پیشنهادی از ترکیب بخش ثانویه مبدل‌های تک‌سوئیچ فلائی‌بک^۱ و فوروارد^۲ تشکیل شده و عملکرد این دو به صورت مکمل یک‌دیگر هستند. سیکل عملکرد مبدل فوروارد به نوعی متمم عملکرد مبدل فلائی‌بک است، یعنی ترانسفورماتور در مبدل فوروارد در زمان هدایت سوئیچ (مافست) انرژی را به سمت ثانویه و عنصر ذخیره کننده انرژی (سلف) انتقال می‌دهد در حالی که در مبدل فلائی‌بک، انتقال انرژی به سمت ثانویه در دوره قطع سوئیچ صورت می‌گیرد. از این قاعده کلی به منظور ترکیب عملکرد این دو مبدل در ساختار پیشنهادی استفاده شده است. بخش فوروارد به عنوان مبدل اصلی با توان بالا (تا چند کیلووات) و بخش فلائی‌بک با توان پایین‌تر (معمولاً زیر ۱۰۰ وات) قابل استفاده است.

جدول ۱. مهم‌ترین استانداردهای نظامی مورد استفاده در طراحی مبدل‌های تغذیه

نام استاندارد	زمینه مورد بررسی
MIL-STD-704F	مشخصه‌های ورودی سامانه قدرت هواپیما
MIL-STD-461	محدودیت تولید EMI
MIL-I-46058C	پوشش‌های عایق برای مدارهای الکتریکی
MIL-PRF-38534H	درجه حرارت کاری و تبادل حرارتی مبدل
MIL-HDBK-217F	برآورد قابلیت اطمینان
MIL-STD-883	آزمایش‌های زیست‌محیطی، مکانیکی، الکتریکی برای ریزمدارهای نظامی و هواضا
MIL-STD-1275D	مشخصات سامانه‌های الکتریکی ۲۸۷ مستقیم در وسایل نقلیه نظامی

قواعد عملکرد مبدل اصلی: عملکرد مبدل پیشنهادی در

سه بخش اصلی صورت می‌گیرد. بخش اول در زمان هدایت سوئیچ T_1 ، بخش دوم در زمان خاموش بودن سوئیچ و قبل از به صفر رسیدن جریان سلف مغناطیس کننده سمت اولیه ترانس (I_m) ، و بخش سوم در مدت خاموش بودن سوئیچ و پس از صفر شدن جریان I_m زمانی که سوئیچ اصلی مبدل (T_1) هدایت می‌کند، دیود D_2 روشن و D_3 خاموش شده و سلف L شروع به ذخیره انرژی از منبع می‌کند. این عمل تا زمان روشن بودن سوئیچ ادامه می‌یابد. در این حالت، دیود D_4 بایاس معکوس بوده و هدایت نمی‌کند. از آنجایی که جریان سلف I_m در زمان روشن

¹ Flyback Converter

² Forward Converter

علاوه بر استفاده از تنها یک سیکل وظیفه و نسبت تبدیل برای ترانسفورماتور، برای تخلیه جریان شارژ شده سلف نیز مورد استفاده قرار گیرد. ولتاژ خروجی به ورودی مبدل (ضریب تبدیل) در خروجی ۱ و ۲ به ترتیب برابر است با:

$$\frac{V_{o1}}{V_d} = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) D \quad (6)$$

$$\frac{V_{o2}}{V_d} = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \frac{D}{1-D} \quad (7)$$

که در آن، D سیکل وظیفه^۲ سوئیچ بوده و برابر با نسبت $\frac{t_{on}}{T_s}$ است. با استفاده از رابطه‌های (۶ و ۷)، می‌توان سیکل وظیفه و نسبت دور ترانسفورماتور را برای این مبدل با استفاده از رابطه‌های (۸ و ۹) محاسبه نمود:

$$D = 1 - \frac{V_{o1}}{V_{o2}} \quad (8)$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{o1}}{DV_d} = \frac{V_{o1}}{\left(1 - \frac{V_{o1}}{V_{o2}}\right)V_d} = \frac{V_{o1}V_{o2}}{V_d(V_{o2} - V_{o1})} \quad (9)$$

همان‌طور که از رابطه‌های بالا مشاهده می‌شود، مقادیر D و نسبت تبدیل به پارامترهای ثابت وابسته بوده و با توجه به ولتاژهای ورودی و خروجی مورد نظر تعیین می‌شوند.

طراحی فیلتر محدود کننده تداخلات الکترومغناطیسی

(EMI): مبدل‌های سوئیچینگ قدرت به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع EMI در تجهیزات الکترونیکی شناخته می‌شوند. به طوری که تداخلات الکترومغناطیسی مربوط به جریان از نقاط ضعف اصلی این مبدل‌ها به حساب می‌آیند [۱۱]. به منظور تبعیت از الزامات سازگاری الکترومغناطیسی^۳، به فیلتر EMI در ورودی مبدل سوئیچینگ نیاز است. طراحی فیلترهای EMI با هدف فراهم کردن انرژی تضعیف (IL)، یعنی انرژی لازم برای حذف توان ناخواسته منتشر شده از امواج الکترومغناطیسی^۴ در یک مبدل سوئیچینگ DC/DC، صورت می‌گیرد. در غیر این صورت این تداخلات بر سامانه‌های حساس مجاور مانند رادارها و تجهیزات مخابراتی، مکان‌یابی و سایر ادوات الکترونیکی تأثیر نامطلوب می‌گذارند. طراحی فیلتر ورودی، برای عملکرد خود مبدل ضروری نبوده و وظیفه آن تضمین کردن EMC داخل سامانه و یا با سامانه‌های مجاور و مطابقت با استانداردهای EMI است. چون استانداردها توان امواج الکترومغناطیسی را محدود می‌کنند، فیلترهای EMI طراحی می‌شوند تا مقدار مشخصی از انرژی تضعیف (IL) را فراهم نمایند. با این وجود، فیلتر EMI ممکن است بر روی پایداری و رفتار دینامیکی مبدل تأثیر بگذارد و این موضوع باید در طراحی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد [۱۱]. شکل (۷) مدار یک فیلتر EMI را نشان می‌دهد.

بودن سوئیچ با شیب V_d/L_m افزایش می‌یابد، باید مسیری برای دشارژ سلف در زمان خاموش شدن سوئیچ و باز شدن مسیر جریان وجود داشته باشد. در غیر این صورت جریان فرصت به صفر رسیدن پیدا نکرده و به مرور افزایش می‌یابد تا ترانسفورماتور به وضعیت اشباع رفته و عملکرد مبدل مختل شود. برای حل این مشکل در مبدل فوروارد، از یک سیم‌پیچ ثالثیه (N_t) بر روی هسته ترانسفورماتور استفاده می‌شود که با عنوان سیم‌پیچ مغناطیس‌زدا^۱ نیز شناخته می‌شود. دیود سری با این سیم‌پیچ در زمان قطع سوئیچ هدایت می‌کند تا جریان سلف از این مسیر تخلیه شود. با ساختار پیشنهاد شده در این مقاله، جریان در مدت زمان قطع سوئیچ از طریق مبدل فلای‌بک تخلیه شده و این سیم‌پیچ و دیود معکوس از مدار حذف می‌شوند. به طور معمول تعداد دور سیم‌پیچ ثالثیه بالا بوده و حذف آن به کاهش ابعاد کمک می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده، مدار معادل مبدل در زمان هدایت سوئیچ به صورت شکل (۵-الف) است. در دوره روشن بودن سوئیچ و هدایت دیود D_2 ، ولتاژ سلف L از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$V_L = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) V_d - V_{o1} \quad (1)$$

که در آن، V_L ولتاژ سلف، V_d ولتاژ ورودی مبدل، V_{o1} ولتاژ خروجی شماره ۱ و $\frac{N_s}{N_p}$ نسبت تبدیل ترانسفورماتور است. در اینجا مبدل فوروارد در مد هدایت پیوسته (CCM) عمل می‌کند یعنی جریان سلف همواره بزرگ‌تر یا مساوی صفر است. در این حالت جریان I_L برابر است با:

$$I_L^{ton} = \frac{1}{L} \left[\left(\frac{N_s}{N_p}\right) V_d - V_{o1} \right] t + I_L^0 \quad (2)$$

جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور برابر با رابطه (۳) است. در صورت مغناطیس‌زدایی از سلف، جریان اولیه برابر با صفر است.

$$I_m^{ton} = \frac{1}{L_m} \int_0^t V_{pri} dt + I_m^0 \xrightarrow{I_m^0=0} I_m^{ton} = \frac{V_d}{L_m} t \quad (3)$$

که در آن، V_{pri} ولتاژ دو سر سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور است. در زمان خاموش بودن سوئیچ مطابق شکل (۵-ب)، دیود D_2 قطع و دیودهای D_3 و D_4 هدایت می‌کنند. در این شرایط جریان‌های I_L و I_m برابر با روابط (۴ و ۵) هستند.

$$I_L^{toff} = -\frac{V_{o1}}{L} (t - t_{on}) + I_{L,t_{on}} \quad (4)$$

$$I_m^{toff} = -\frac{1}{L_m} \left(\frac{N_p}{N_s}\right) V_{o2} \quad (5)$$

که در آن، L_m سلف مغناطیس کننده سمت اولیه و $I_{L,t_{on}}$ پیک جریان در لحظه خاموش شدن سوئیچ است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، جریان مبدل فلای‌بک در مد هدایت ناپیوسته (DCM) عمل می‌کند.

عملکرد متمم این دو مبدل نسبت به یکدیگر موجب می‌شود تا مبدل فلای‌بک تکمیل کننده ساختار فوروارد بوده و

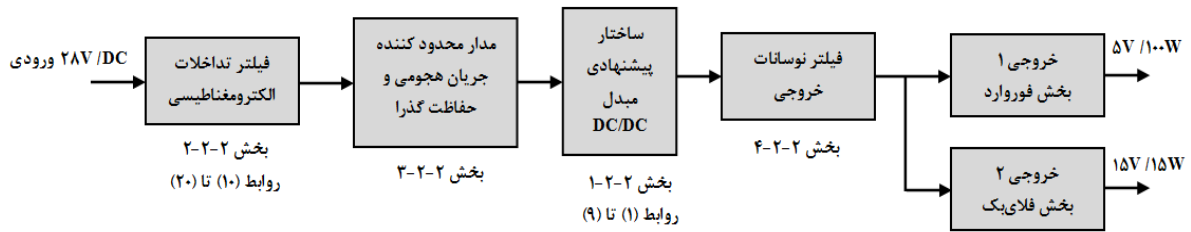
² Duty cycle

³ Electromagnetic Compatibility

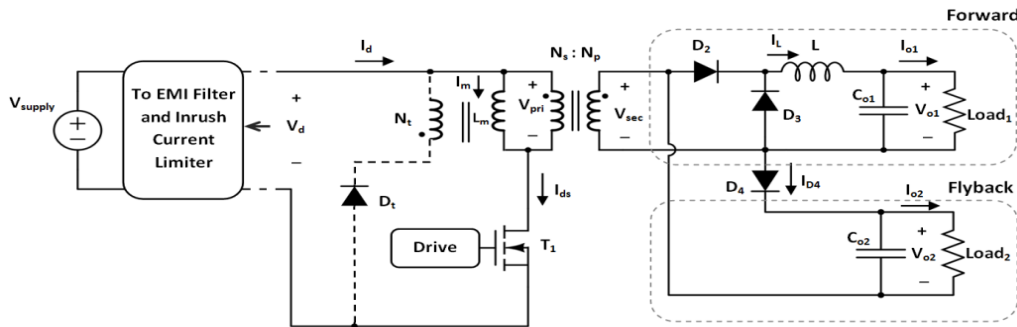
⁴ Insertion Loss (Attenuation)

⁵ Electromagnetic Emissions

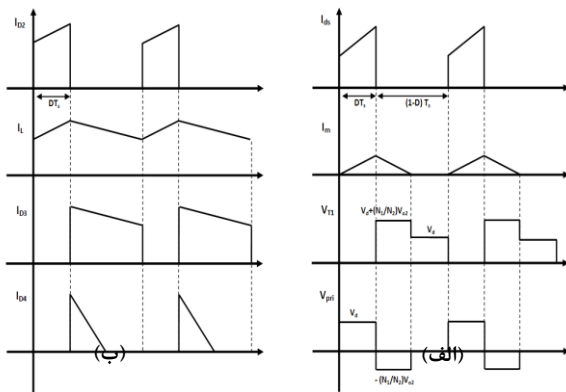
¹ Demagnetizing Winding



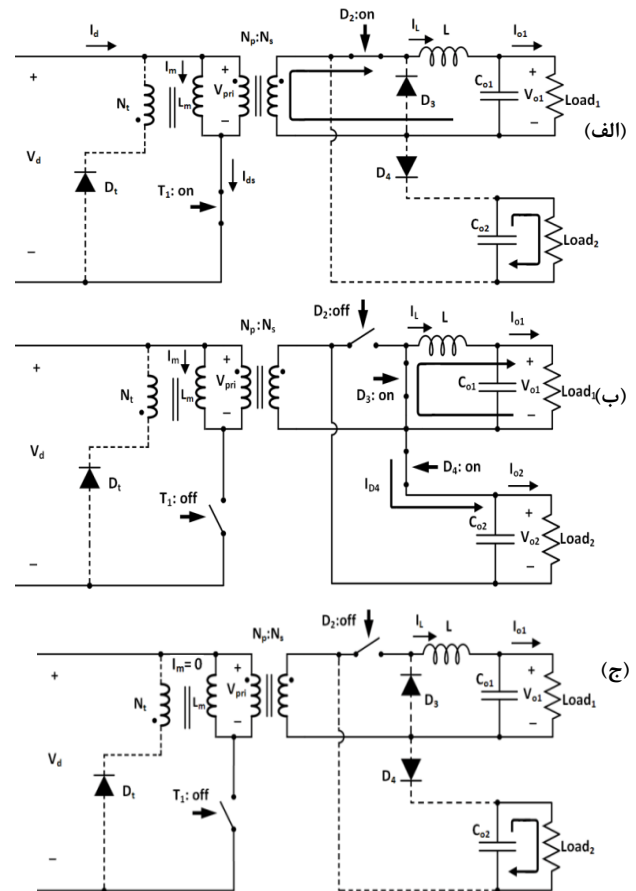
شکل ۳. ترسیم بلوکی اجزای مبدل پیشنهادی



شکل ۴. شماتیک بخش اصلی مبدل پیشنهادی



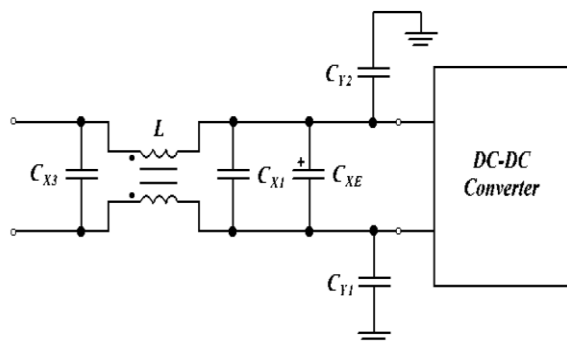
شکل ۶. نمودار شکل‌موج‌های مبدل پیشنهادی: (الف) سمت اولیه ترانسفورماتور، (ب) سمت ثانویه ترانسفورماتور



شکل ۵. مدار معادل مبدل: (الف) در دوره هدایت سوئیچ T_1 (DT_s),

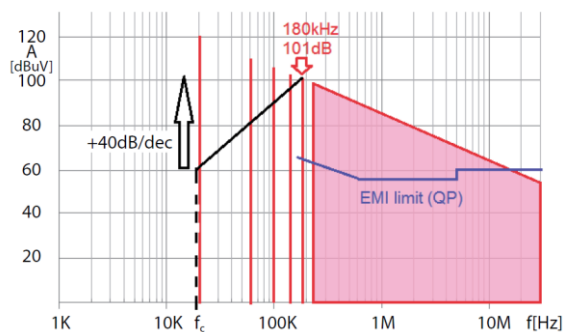
(ب) در دوره خاموش بودن سوئیچ T_1 , (ج) در دوره خاموش بودن

سوئیچ T_1 و صفر شدن جریان I_m



شکل ۷. فیلتر EMI نمونه در مبدل سوئیچینگ [۱۱]

صورت می‌گیرد. در حالی که حذف نویز مد تفاضلی (DM) به وسیله خازن C_X (در صورت وجود) و فیلتر پایین‌گذر متشکل از اندوکتانس پراکندگی L_S سلف CM (که در حدود ۱٪ مقدار L_N است) و خازن سمت خط C_X انجام می‌شود [۱۴]. شکل (۹) قاعده محاسبه IL مورد نیاز را نشان می‌دهد (A). این مقدار از حاصل تفریق بین سطح نویز (قرمز) و محدوده مجاز EMI (آبی) به‌دست می‌آید.



شکل ۹. محاسبه انرژی تضعیف (IL) در فیلتر EMI [۱۴]

با در نظر گرفتن حاشیه امنیت اضافی m برای حفظ نویز EMI زیر محدوده مجاز با توجه به خطاهای موجود در تجهیزات، مقدار تضعیف مورد نیاز A می‌تواند از رابطه (۱۰) محاسبه شود:

$$A [dBuV] = A_n - L_{QP} + m \quad (10)$$

که در آن، A_n دامنه EMI هارمونیک مرتبه n (اولین هارمونیک بالای ۱۵۰ kHz)، L_{QP} محدوده مجاز EMI در استاندارد، و m حاشیه امنیت مورد نیاز است. با آگاهی از اینکه تضعیف فیلتر LC از فرکانس گوشه با شیب $40 \text{ dB}\mu\text{V}$ آغاز می‌شود، فرکانس گوشه می‌تواند مطابق رابطه (۱۱) به‌دست آید:

$$A [dBuV] = 40 \log\left(\frac{f}{f_c}\right) \Rightarrow f_c = 10^{\frac{-A}{40}} f \quad (11)$$

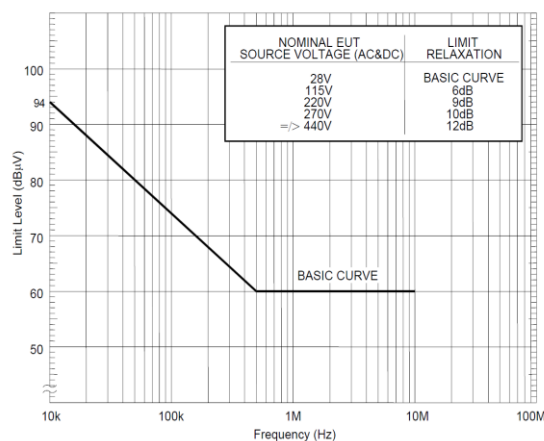
شیب منحنی روند عملکرد فیلتر مربوطه در شکل (۹) نمایش داده شده است (رنگ مشکی). نقطه شروع منحنی که با شیب 40 dB زیر محدوده EMI افزایش می‌یابد، فرکانس گوشه (f_c) مورد نیاز فیلتر است. این مقدار با داشتن میزان تضعیف A قابل محاسبه است. با مقادیر حاصل از معادلات فوق، خازن‌های مورد نیاز C_X و C_Y با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$f_{CDM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_S C_X}} \quad f_{CCM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_N C_Y}} \quad (12)$$

$$C_{X1} = C_{X2} = \frac{1}{8\pi^2 L_S f_{CDM}^2} \quad C_{Y1} = C_{Y2} = \frac{1}{8\pi^2 L_N f_{CCM}^2} \quad (13)$$

که در آن، f_{CDM} و f_{CCM} به ترتیب فرکانس گوشه مد تفاضلی و مد مشترک هستند. مقدار L_S به نوع هسته بستگی دارد. به دلیل وجود جریان نشتی، مقدار خازن C_Y توسط الزامات استاندارد

نمودار محدودیت EMI بر حسب $dBuV$ در آخرین نسخه از استاندارد نظامی Mil-Std-461F در شکل (۸) نمایش داده شده است (CE102 برای تجهیزات هوایی و دریایی نظامی). در اینجا طراحی فیلتر بر اساس این استاندارد صورت گرفته است (زیر 60 dBuV برای فرکانس‌های بالای 500 kHz).



شکل ۸. محدوده مجاز EMI مطابق استاندارد نظامی Mil-Std-461F برای ولتاژهای AC و DC [۱۲]

تداخلات الکترومغناطیسی به دو دسته هدایتی و تشعشعی تقسیم می‌شوند. نوع هدایتی شامل دو مؤلفه مد مشترک (CM) و مد تفاضلی (DM) است. EMI هدایتی از طریق سیم‌کشی‌های مشترک نظیر خطوط تغذیه انتقال می‌یابد، در حالی که انتشار EMI تشعشعی که همان انتشار میدان الکترومغناطیسی است، از طریق محیط فیزیکی صورت می‌پذیرد [۱۳]. در این مقاله، طراحی فیلتر EMI متناسب با مبدل پیشنهادی مطابق استاندارد نظامی Mil-Std 461 و طی مراحل زیر صورت گرفته است:

- اندازه‌گیری نویزهای مد مشترک (CM) و مد تفاضلی (DM) در شرایط عدم وجود فیلتر (به کمک شبکه تثبیت امپدانس خط یا LISN).

- محاسبه میزان تضعیف (میرایی) (Insertion یا Attenuation) مورد نیاز در مد مشترک و تفاضلی بر حسب دسی‌بل (با توجه به نمودار سطح مجاز در استاندارد نظامی Mil-STD 461).

- تعیین فرکانس‌های گوشه فیلتر، که نقطه افزایش شیب نمودار مماس بر منحنی انرژی تضعیف می‌باشد.

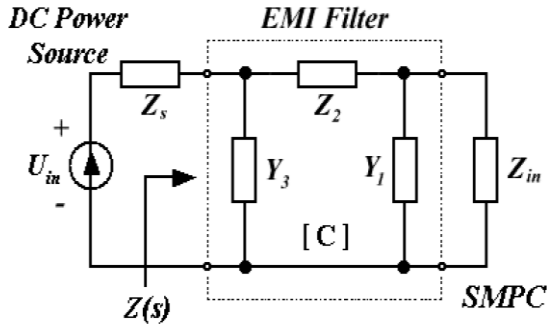
- محاسبه مقادیر مؤلفه‌های تشکیل دهنده فیلتر با توجه به نتایج حاصل از مراحل قبلی.

میرایی نویز مد مشترک (CM) توسط اندوکتانس نامی L_N سلف و همچنین خازن‌های سمت بار C_Y با اتصال به زمین

با مدل کردن Y_1 و Y_3 با خازن به همراه مقاومت ESR، و سلف Z_2 با یک اندوکتانس سری به همراه مقاومت پارازیتی داریم:

$$Y_1 = \frac{sC_1}{1+s\tau_{c,1}C_1}, \quad Z_2 = r_L + sL, \quad Y_3 = \frac{sC_3}{1+s\tau_{c,3}C_3} \quad (۱۹)$$

در نتیجه امپدانس نقطه تحریک فیلتر π با امپدانس ورودی Z_{in} برابر است با آنچه از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.



شکل ۱۱. مدار معادل فیلتر EMI برای تحلیل پایداری [۱۱]

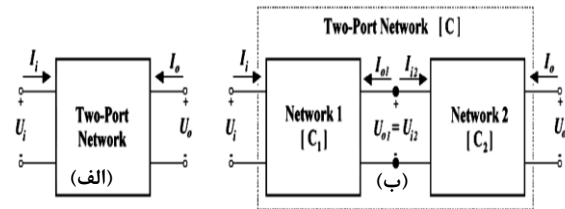
$$Z(s) = \frac{\{s^2L(Z_{in} + r_{c,1})C_1 + s[L + (r_L Z_{in} + r_{c,1}Z_{in} + r_L r_{c,1})C_1] + Z_{in} + r_L\}(1 + s\tau_{c,3}C_3)}{Z_{in}\{s^2C_1C_3(r_L + sL) + s[C_1(1 + s\tau_{c,3}C_3) + (1 + s\tau_{c,1}C_1)C_3]\} + (1 + s\tau_{c,1}C_1)(1 + s\tau_{c,3}C_3 + (r_L + sL)C_3)} \quad (۲۰)$$

با در نظرگیری معادله $I = Y(s) \cdot U$ رابطه فوق نشان می‌دهد تحت تحریک ولتاژ، قطب‌های ادمیتانس نقطه تحریک Y باید روی محور موهومی یا سمت چپ محور باشد (LHP) تا پایداری تضمین شود. قطب‌های Y برابر با صفرهای امپدانس نقطه تحریک Z هستند. بنابراین کفایت تا بررسی شود که صفرهای Z در LHP باشند، تا تضمین شود که یک مدار الکتریکی تحت تحریک ولتاژ پایدار است [۱۱]. در مورد فیلتر π مورد نظر، از رابطه (۲۰)، مشاهده می‌شود که صفر مربوط به C_3 در LHP است، چون ESR آن بزرگ‌تر از صفر است ($r_{c,3} > 0$). بنابراین، C_3 تأثیری روی پایداری سامانه ورودی ندارد. از جمله او در صورت کسر رابطه (۲۰)، می‌توان نتیجه گرفت که اگر Z_{in} یک عدد حقیقی مثبت باشد، یعنی یک مقاومت، تمامی ریشه‌ها در LHP خواهند بود و سامانه پایدار خواهد بود. اگر مقاومت‌های پارازیتی صفر باشند، یعنی $r_L = r_{c,1} = 0$ و Z_{in} عدد حقیقی منفی باشد (یعنی یک مقاومت منفی)، سامانه ناپایدار خواهد بود، چون کمینه یکی از ریشه‌ها در RHP است. ادمیتانس نقطه تحریک ناپایدار موجب افزایش نوسانات جریان ورودی، افزایش شارژ و دشارژ C_1 (یعنی ولتاژ خروجی فیلتر که ولتاژ ورودی مبدل است)، و نوسان آن همراه با افزایش دامنه می‌شود. نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که حتی مقدار کوچک مقاومت‌های پارازیتی r_L یا $r_{c,1}$ می‌تواند سامانه را پایدار نماید. به همین دلیل است که عموماً مقاومت داخلی سلف و ESR خازن C_1 برای میرایی سامانه کفایت. تأثیر مثبت ESR در خازن C_1 یکی از دلایل استفاده از خازن الکترولیت در ورودی مبدل است.

ایمنی محدود می‌شود. جریان نشستی ناشی از ولتاژ خط برای این ادوات تک‌فاز می‌تواند مطابق رابطه زیر محاسبه شود:

$$I_{IK} = 2\pi f_R U_R \quad (۱۴)$$

که در آن، f_R فرکانس نامی و U_R ولتاژ نامی است. همان‌طور که اشاره شد، به دلیل حساسیت این مبدل‌ها در کاربردهای نظامی، باید تأثیر فیلتر EMI بر پایداری مبدل نیز بررسی شود تا عملکرد مبدل اصلی را دچار اختلال ننماید. بررسی پایداری فیلتر EMI با استفاده از پارامترهای انتقال بررسی می‌شود. مطابق شکل (۱۰)، فیلتر EMI می‌تواند به عنوان یک شبکه دو قطبی متوالی در نظر گرفته شود که هر شبکه دو قطبی یک مؤلفه منفرد (سلف، خازن و یا مقاومت) را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰. (الف) یک شبکه دو قطبی با ولتاژ و جریان‌های تعریف شده (ب) شبکه‌های دو قطبی متوالی [۱۱]

ماتریس انتقال شبکه‌های متوالی از ضرب ماتریسی ماتریس‌های انتقال شبکه‌های متوالی به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} U_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{i1} \\ I_{i1} \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} U_{o1} \\ -I_{o1} \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} U_{i2} \\ I_{i2} \end{bmatrix} = C_1 \cdot C_2 \cdot \begin{bmatrix} U_{o2} \\ -I_{o2} \end{bmatrix} = C_1 \cdot C_2 \cdot \begin{bmatrix} U_o \\ -I_o \end{bmatrix} \Rightarrow C = C_1 \cdot C_2 \quad (۱۵)$$

پارامترهای انتقال شبکه دو قطبی یک سلف و خازن عبارتند از:

$$C_L = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

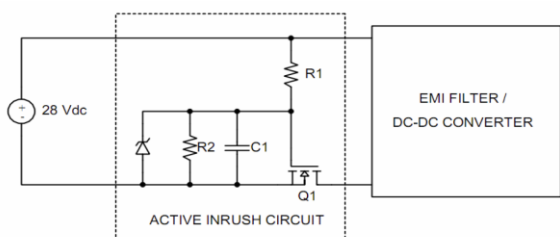
Z و Y در رابطه‌های بالا به ترتیب امپدانس سلف و ادمیتانس خازن است که یا با اندازه‌گیری یا از مدار معادل سلف در فرکانس مورد نظر حاصل می‌شود. برای تحلیل پایداری، پارامترهای انتقال از دید خط قدرت DC نیاز است که برای یک فیلتر π عبارتند از:

$$C = C_3 C_2 C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Y_1 Z_2 & Z_2 \\ Y_1 + Y_1 Z_2 Y_3 + Y_3 & 1 + Z_2 Y_3 \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

وقتی فیلتر ورودی به مبدل اضافه می‌شود، منفی بودن امپدانس ورودی مبدل قدرت DC/DC به عنوان دلیل ناپایداری در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از شکل (۱۱)، امپدانس نقطه تحریک Z یک شبکه دو قطبی به کمک پارامترهای انتقال برابر است با:

$$Z(s) = \frac{U_i}{I_i} = \frac{c_{11} \cdot U_o - c_{12} \cdot I_o}{c_{21} \cdot U_o - c_{22} \cdot I_o} = \frac{c_{11} \cdot Z_{in}(s) + c_{12}}{c_{21} \cdot Z_{in}(s) + c_{22}} \quad (۱۸)$$

روش‌هایی مانند استفاده از مقاومت با ضریب حرارتی منفی (NTC)، یک مقاومت با یک سوئیچ بای‌پس، یک سلف سری، یا یک ماسفت کنترل شده وجود دارد. هر یک از این روش‌ها دارای مشکلاتی نظیر نیاز به خنک شدن NTC در زمان وصل مجدد، ایجاد تلفات، نیاز به سلف با مقدار و ابعاد بزرگ و امکان تشدید آن با خازن‌های مبدل و ... هستند. یک روش مناسب استفاده از یک ماسفت کانال P در پایه منفی ورودی مدار مطابق شکل (۱۳) است [۱۵].



شکل ۱۳. مدار مهار فعال جریان هجومی با استفاده از یک ماسفت سری کانال P [۱۵]

در این حالت ابتدا سوئیچ Q_1 خاموش بوده و با وصل تغذیه، گیت ماسفت از طریق R_1 شارژ می‌شود. به دلیل وجود خازن C_1 ، روشن شدن سوئیچ Q_1 به آرامی صورت خواهد گرفت. مقادیر R_1 و C_1 باید طوری انتخاب شوند تا خازن‌های ورودی اجازه دهد که کم‌کم شارژ شوند، و از این طریق جریان هجومی محدود شود. بعد از اینکه خازن‌های ورودی شارژ شدند، گیت Q_1 تا ولتاژ زبر شارژ شده و ترانزیستور به طور کامل روشن خواهد ماند.

فیلتر حذف اعوجاج‌های خروجی: به دلیل حساسیت

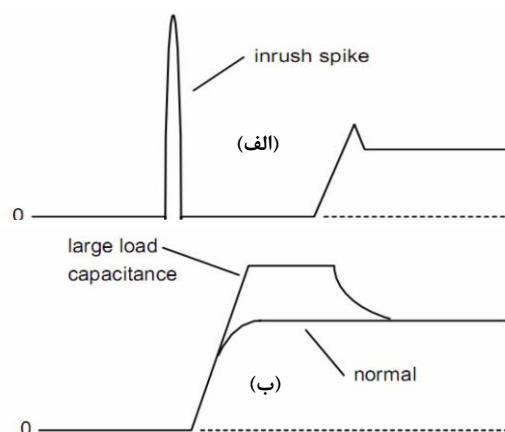
بارهای الکتریکی موجود در سامانه اویونیک، تأمین بالاترین کیفیت ولتاژ و جریان از اهمیت بالاتری برخوردار است و از این رو، استفاده از فیلتر خروجی مناسب به منظور حذف نوسانات ولتاژ خروجی ضروری است. ریپل خروجی مبدل مطابق استاندارد MIL-STD 883H باید کمتر از ۵٪ ولتاژ خروجی باشد. شکل (۱۴) مقدار ریپل ولتاژ خروجی منبع تغذیه نظامی (۱۴-ج) VPT-DVTR2805S را در سه حالت با فیلتر خروجی متفاوت نشان می‌دهد. استفاده از فیلتر CLC مطابق مدار شکل (۱۴-ج) میزان نوسانات خروجی را به کمینه خواهد رساند [۲].

ملاحظات دمای بدنه و تبادل حرارتی مبدل: مطابق

استاندارد MIL-PRF-38534H این مبدل‌ها باید دارای قابلیت عملکرد در بازه وسیع از ۵۵- درجه سلسیوس تا ۱۲۵ درجه سلسیوس در توان نامی باشند. انتقال حرارت مبدل با محیط باید مطابق شکل (۱۵) از سطح زیرین مبدل صورت گیرد. دمای عملکرد نیز از همین قسمت به وسیله ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود.

مدار دفع جریان هجومی و حالات گذرا: یکی از

راهکارهای افزایش قابلیت اطمینان در مبدل‌های نظامی، تعبیه مدار دفع جریان‌های هجومی و حالات گذرا است. جریان هجومی جریانی است که توسط مبدل در زمان روشن شدن کشیده می‌شود. فیلتر EMI ورودی دارای خازن‌هایی است که به طور موازی با ورودی قرار گرفته‌اند. مبدل‌های سوئیچینگ نیز دارای ظرفیت خازنی داخلی در دو سمت ورودی و خروجی خود هستند. هر یک از این خازن‌ها برای شارژ شدن نیازمند جریانی هستند تا از حالت اولیه یا صفر به ولتاژ حالت ماندگار نهایی برسند. این جریان وابسته به زمان افزایش ولتاژ و امپدانس منبع می‌تواند دارای دامنه پیک بالا باشد که به آن جریان هجومی اطلاق می‌شود. جریان‌های اسپایک بالا موجب مشکلاتی مانند ایجاد خطا در ادوات حفاظتی مدار یا تولید تداخلات الکترومغناطیسی، اختلال در مدارهای مجاور، یا تداخل با سیگنال‌های رادیویی RF می‌گردد. یک شکل موج جریان هجومی نمونه در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که دارای دو پیک جریان است. اولین "اسپایک هجومی" جریان در زمان وصل منبع ولتاژ ورودی رخ می‌دهد. این جریان پیک در خازن‌های فیلتر EMI و هر خازنی که در سمت ورودی مبدل DC/DC وجود دارد جاری می‌شود و آن‌ها را تا مقدار حالت ماندگار شارژ می‌کند. دومین پیک جریان در زمان روشن شدن مبدل DC/DC رخ می‌دهد. این جریان پیک از طریق ترانسفورماتور مبدل در خازن خروجی و هر خازنی که در سمت بار موجود باشد جاری شده و آن‌ها را تا مقدار حالت ماندگار شارژ می‌کند. در صورت وجود چند مبدل این اتفاق می‌تواند چندین بار تکرار شود [۱۵].



شکل ۱۲. (الف) شکل موج جریان اسپایک هجومی ناشی از مشخصه‌های ورودی؛ (ب) جریان هجومی بعد از روشن شدن مبدل ناشی از ظرفیت‌های خازنی در خروجی مبدل [۱۵]

تنها روش محدود کردن جریان اسپایک هجومی، وارد کردن یک عنصر سری در مسیر خازن‌ها است. برای این منظور

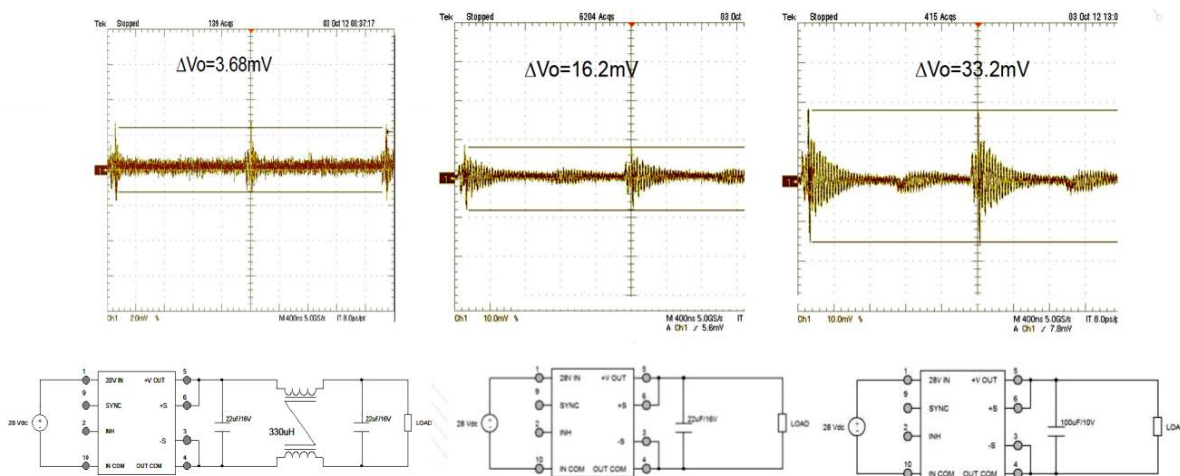
تلف فرکانسی جریان ورودی به مبدل در حالت بدون فیلتر EMI (قرمز) و پس از قرارگیری فیلتر در مدار (آبی) بر حسب $\text{dB}\mu\text{V}$ در شکل (۲۰-الف) نمایش داده شده است. مطابق شکل پس از جبران‌سازی جریان، شکل موج جریان ورودی استاندارد نظامی MIL-STD 461 را برآورده می‌سازد. میزان ریپل ولتاژ در حضور فیلتر CLC موازی در دو خروجی مبدل در شکل (۲۰-ب) مشاهده می‌شود که برای خروجی 15V و 5V به ترتیب برابر با $11/2\text{mV}$ و $6/5\text{mV}$ می‌باشد. این میزان ریپل خروجی استاندارد MIL-STD 883H را کاملاً برآورده می‌سازد. شکل‌های (۲۰-ج و ۲۰-د) محدود شدن جریان هجومی در لحظه وصل ولتاژ ورودی را پس از اضافه شدن مدار مهار جریان هجومی به مبدل نشان می‌دهند. با توجه به اینکه بیشتر قطعات مورد استفاده در این منابع تغذیه از نوع SMD هستند، ترانسفورماتورها معمولاً بیشترین فضای مبدل‌های سوئیچینگ را اشغال می‌کنند. به همین دلیل مطالعات مختلفی در زمینه کاهش حجم و ابعاد آن‌ها از جمله افزایش فرکانس کاری، جنس هسته و... صورت گرفته است. همچنین بالا بودن تعداد دورهای روی هسته ترانسفورماتور موجب افزایش اندوکتانس مغناطیس کننده و کاهش جریان مغناطیس کننده شده و مقاومت سیم‌پیچ را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر این موارد، تعداد زیاد سوئیچ‌های مبدل در ساختارهایی نظیر تمام‌پل، به افزایش تلفات کلیدزنی و هدایت سوئیچ‌ها و کاهش بازده مبدل منجر خواهد شد. مبدل پیشنهادی با به کارگیری یک ساختار ساده موجب بهبود بازده منبع تغذیه می‌گردد. نمودار مقایسه بازده مبدل پیشنهادی با ساختار تمام‌پل و نیم‌پل بر حسب درصد تغییرات توان خروجی و مقایسه بازده خروجی بخش توان بالا و توان پایین مبدل در شکل (۲۱) ارائه شده‌اند.

صفحه انتقال حرارت برای هدایت گرما به سطح زیرین مبدل متصل می‌شود. اتصال این صفحه باید مطابق شکل (۱۶-ب) کاملاً به مبدل چفت شود. در غیر این صورت تبادل حرارتی به درستی صورت نپذیرفته و افزایش درجه حرارت قطعات الکتریکی مبدل موجب کاهش راندمان و آسیب به مبدل، و درنهایت در صورتی که مطابق شکل (۱۷) درجه حرارت از حداکثر مقدار مجاز (125 درجه سلسیوس) بالاتر رود، توان خروجی مبدل به سرعت به صفر خواهد رسید.

شماتیک مدار نهایی مبدل: با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان مدار نهایی مبدل را با ترکیب مبدل سوئیچینگ پیشنهادی، مدار محدود کننده جریان هجومی، فیلتر کاهنده تداخلات الکترومغناطیسی و فیلترهای حذف ریپل خروجی به صورت شکل (۱۸) نمایش داد. مشخصات این مبدل در جدول (۲) ارائه شده است.

۳. نتایج شبیه‌سازی و مزایای سامانه پیشنهادی

به منظور سنجش صحت عملکرد مبدل تغذیه طراحی شده، شبیه‌سازی آن به کمک نرم‌افزار PSIM.V.9.3 صورت گرفته است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۳) ارائه شده‌اند. شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی شامل ولتاژهای خروجی، جریان سلف L ، و دیود D_2 به ترتیب در شکل‌های (۱۹-الف) تا (۱۹-ج) و شکل موج‌های جریان و ولتاژ سوئیچ و جریان دیود D_4 نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۹-د) تا (۱۹-و) نمایش داده شده‌اند.



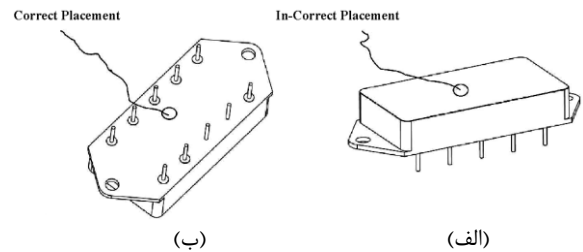
شکل ۱۴. مقایسه ریپل ولتاژ در منبع تغذیه نظامی DVTR2805S؛ (الف) با فیلتر خازنی موازی $22\mu\text{F}$ ؛ (ب) فیلتر خازنی $100\mu\text{F}$ ؛ (ج) با فیلتر CLC [۲]

جدول ۲. مشخصات الکتریکی مبدل پیشنهادی

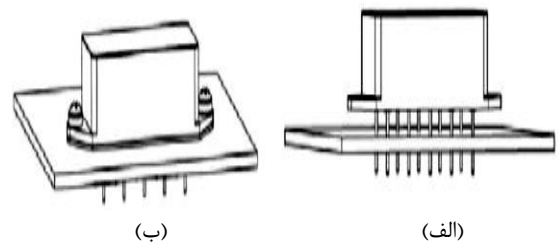
فولای‌بک- فوروارد ترکیبی کاهنده	نوع مبدل
۲۸۷	ولتاژ ورودی
۵۷ / ۲۰A	خروجی مبدل اصلی (فوروارد)
۱۵۷ / ۱A	خروجی مبدل جانبی (فولای‌بک)
۲۵۰ KHz	فرکانس سوئیچینگ
مد هدایت پیوسته (CCM)	نوع عملکرد بخش فوروارد
مد هدایت ناپیوسته (DCM)	نوع عملکرد بخش فولای‌بک

جدول ۳. پارامترهای شبیه‌سازی

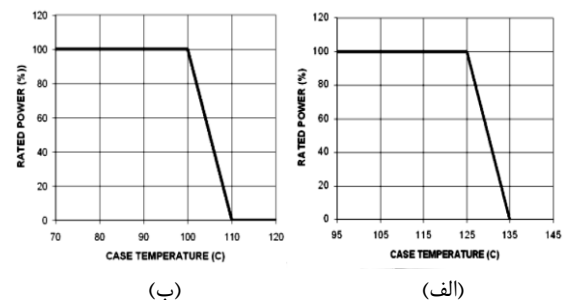
۲۸/۵/۱۵(V)	سطح تبدیل ولتاژ
۱۰۰W , ۱۵W	توان خروجی
۰/۲۷	نسبت تبدیل ترانسفورماتور
۱۰ μH	اندوکتانس نشستی ترانسفورماتور (L_s)
۲۵۰ μH	اندوکتانس مغناطیس‌کننده (L_m)
۴۷ μH	سلف مبدل فوروارد (L)
۰/۶۶۶	سیکل وظیفه سوئیچ
۱ μF	خازن‌های $C_{x2} / C_{x1} / C_{xE}$
۲۲ nF	خازن‌های C_{y2} / C_{y1}
۸ μH	سلف فیلتر L_1



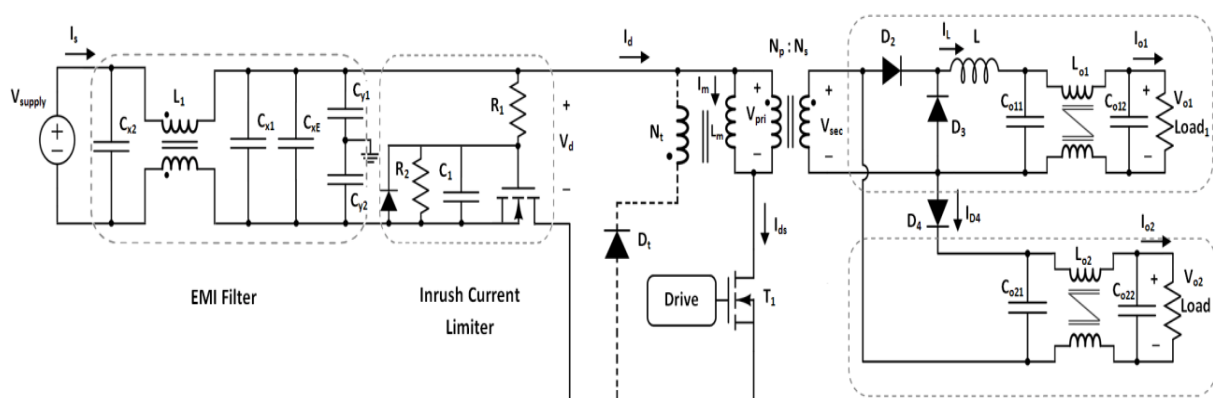
شکل ۱۵. قرارگیری ترموکوپل برای اندازه‌گیری درجه حرارت مبدل؛ (الف) قرارگیری نادرست (ب) قرارگیری صحیح بر صفحه پایه [۲]



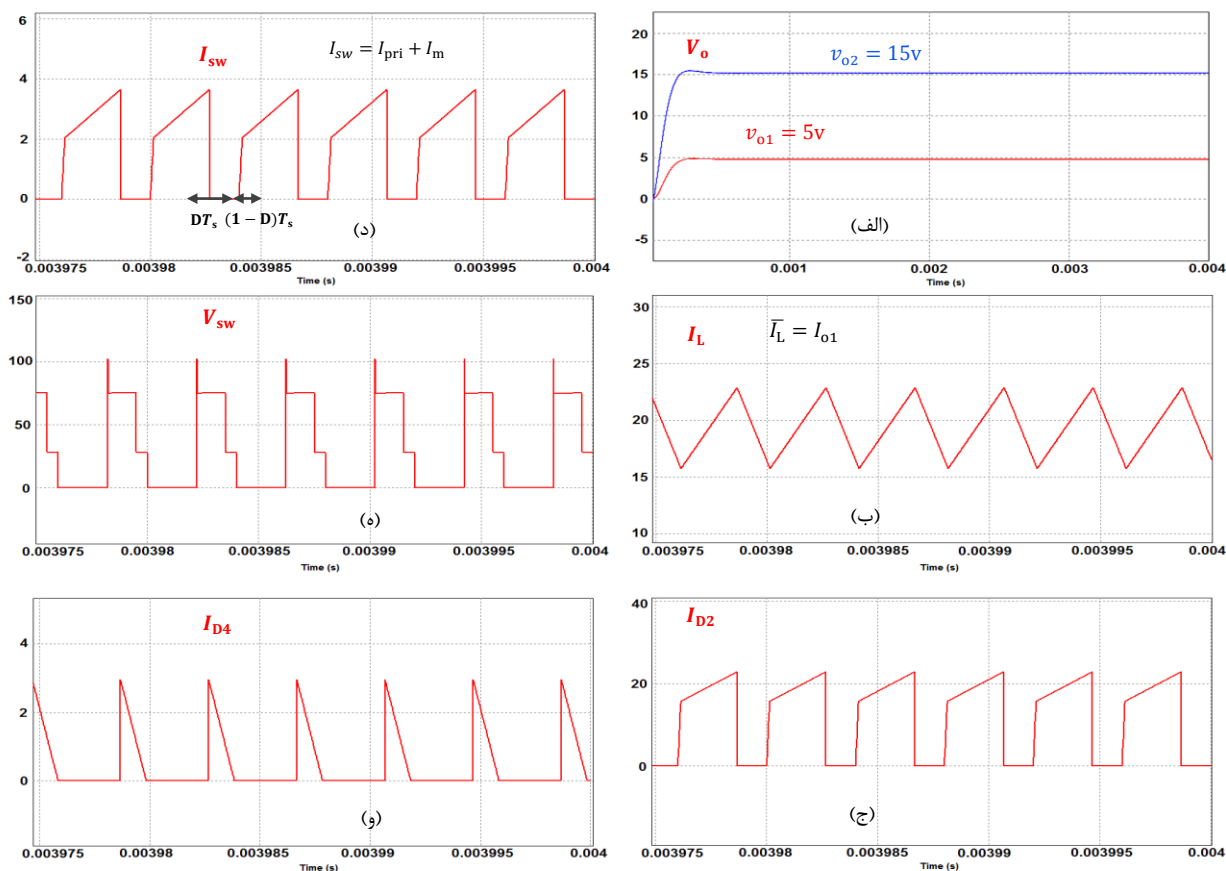
شکل ۱۶. (الف) قرارگیری نادرست مبدل بر روی صفحه انتقال حرارت و وجود فاصله هوایی (ب) قرارگیری صحیح کاملاً مماس با صفحه [۲]



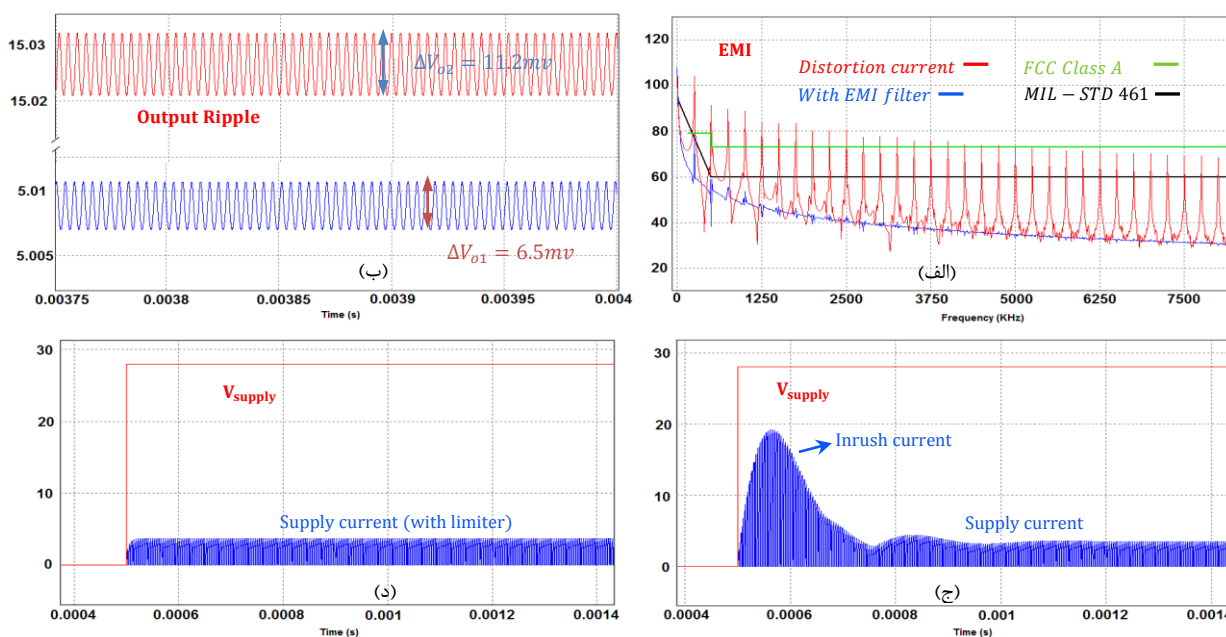
شکل ۱۷. نمودار مقایسه توان خروجی بر حسب دمای بدنه در یک مبدل نظامی نمونه؛ (الف) مبدل با ظرفیت حرارتی ۱۰۰ درجه سلسیوس؛ (ب) مبدل با ظرفیت حرارتی ۱۲۵ درجه سلسیوس [۲]



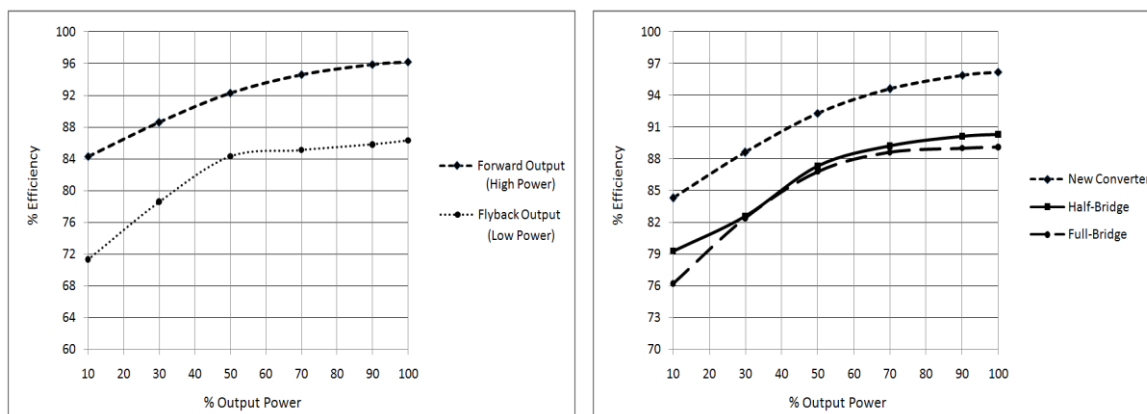
شکل ۱۸. شماتیک نهایی مبدل پیشنهادی با اضافه شدن مدارهای جانبی



شکل ۱۹. شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی مبدل؛ (الف) ولتاژهای خروجی، (ب) جریان سلف خروجی، (ج) جریان دیود بخش فورارد، (د) جریان سوئیچ، (ه) ولتاژ سوئیچ، (و) جریان دیود بخش فلی‌بک



شکل ۲۰. (الف) برآورده شدن استاندارد MIL-STD 461 با فیلتر EMI طراحی شده، (ب) ریبیل ولتاژ در دو خروجی مبدل پس از قرارگیری فیلتر CLC خروجی، (ج) جریان ورودی به مبدل در لحظه وصل ولتاژ بدون حفاظت گذرا، (د) جریان ورودی در لحظه وصل ولتاژ پس از حفاظت گذرا



شکل ۲۱. الف) مقایسه بازده مبدل پیشنهادی با ساختار تمام‌پل و نیم‌پل بر حسب تغییرات بار، ب) مقایسه بازده بخش فوروارد با فلای‌بک

MIL-STD طراحی و به منبع تغذیه اصلی اضافه شد. قواعد عملکرد مبدل، شکل موج‌های بخش‌های مختلف مدار و نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار PSIM.V.9.3 ارائه شدند. این ساختار به عنوان جایگزینی مناسب برای ساختارهای سنتی می‌تواند منجر به دستیابی به مزایایی همچون کاهش تلفات و افزایش بازده به بالای ۹۶ درصد در توان نامی، ساختار ساده و تک‌سوئیچه مدار، حذف سیم‌پیچ ثالثیه، کاهش ابعاد هسته ترانسفورماتور و افزایش چگالی توان گردد. عملکرد دو بخش خروجی مبدل به صورت هم‌زمان و بدون افزودن سیم‌پیچ‌های جانبی به ترانسفورماتور و یا تغییر در سیکل وظیفه و فرکانس سوئیچ، موجب افزایش سرعت پردازش طرح کنترلی و کاهش زمان نشست پاسخ گذرای خروجی تا ۱/۱۰ms شده است. استفاده از این مبدل می‌تواند عملکرد منابع تغذیه موجود در سامانه اویونیک را که نیازمند فشردگی ابعاد و بازده بالا هستند بهبود بخشد. همچنین وجود نویز پایین، حفاظت گذرا، و کیفیت ولتاژ بالا از دیگر مزایای مبدل طراحی شده است.

۵. مراجع

- [1] Moir, I.; Seabridge, G. A. "Military Avionics Systems"; John Wiley & Sons Ltd Publication eBook: England, 2006.
- [2] Pyle, M.; Leslie, L. "Power Conversion Solutions for Aerospace, Defense, and Space Systems"; VPT Company Overview, 2013, 1-93.
- [3] Jain, K. A.; McIntosh, D.; Jones, M.; Ratliff, B. "A 2.5kV to 22V, 1kW Radar Decoy Power Supply Using Silicon Carbide Semiconductor Devices"; Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), England, 2011.
- [4] Papastergiou, K. D.; Macpherson, D. E. "An Airborne Radar Power Supply with Contactless Transfer of Energy—Part II: Converter Design"; IEEE Trans. Industrial Electronics 2007, 54, 2885-2893.
- [5] De, D.; Lopez-Arevalo, S.; Lamantia, A. "SiC MOSFET Based Avionic Power Supply"; Proc. of 7th IET Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, UK, 2014.

پنج عامل تأثیرگذار در چگالی توان هر مبدل سوئیچینگ عبارت است از تعداد المان‌های سوئیچینگ، مدار کنترلی، تعداد و ابعاد عناصر پسیو، سامانه خنک کننده، و نوع بسته‌بندی و اتصالات داخلی. در مبدل پیشنهادی علاوه بر کاهش تعداد المان‌های سوئیچینگ (یک ترانزیستور و سه دیود)، تعداد عناصر پسیو نسبت به سایر ساختارها کمتر بوده و ابعاد ترانسفورماتور نیز کوچک‌تر است، بنابراین به چگالی توان بالاتری می‌توان دست یافت. از این رو سامانه پیشنهادی برای کاربرد به عنوان منبع تغذیه در سامانه‌های اویونیک که نیازمند چگالی توان بالا هستند (مانند تغذیه سامانه اسکن الکترونیکی (ESRS)، واحدهای فرستنده-گیرنده (TRmodule) و ... مورد استفاده قرار گیرد. پاسخ گذرای سریع و زمان نشست ۱/۱۰ms (T_{settle})، حذف تعداد دورهای سیم‌پیچ ثالثیه (N_t) و دیود معکوس سری، استفاده از یک سیم‌پیچ برای هر دو بخش فلای‌بک و فوروارد خروجی، و به‌کارگیری بخش فلای‌بک به عنوان مکمل عملکرد بخش فوروارد از جمله مزایای سامانه پیشنهادی است. همچنین، استفاده از یک سیکل وظیفه (D) برای هر دو بخش خروجی ثانویه موجب کاهش پیچیدگی کنترل و افزایش سرعت پردازش کنترلی می‌شود. کاهش تعداد دور و شار هسته منجر به کاهش ابعاد و حجم و وزن سامانه تغذیه و همچنین بهبود چگالی توان مبدل خواهد شد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی مبدل‌های سوئیچینگ DC/DC نظامی در سامانه اویونیک هواپیماها پرداخته شد. سپس یک مبدل با ساختار جدید و خروجی دوگانه برای به‌کارگیری در این سامانه ارائه شد. الزامات جانبی این نوع مبدل‌ها شامل مدار محدود کننده تداخلات الکترومغناطیسی (EMI) مد مشترک و تفاضلی، مدار مهار جریان هجومی و حفاظت گذرا، و فیلتر حذف اعوجاج‌های خروجی همگی با توجه به استانداردهای نظامی

- [11] Kostov, K.; Kyyrä, J.; Suntio, T. "Analysis and Design of EMI Filters for DC-DC Converters Using Chain Parameters"; Proc. of the 10th European Conf. on Power Electronics and Applications, France, 2003.
- [12] Military Standard. "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Department of Defence Interface Standard (MIL-STD-461E)"; USA, 2007.
- [13] Baharlouie, M.; Yazdani, M. R. "Improvement of Electromagnetic Compatibility Using Soft Switching and Active Noise Compensation Technique in Flyback Topology"; Proc. of the National Conf. New Idea on Electrical Eng., Iran, 2012 (In Persian).
- [14] Application Note "EMC/EMI Filter Design with RB Common-Mode Chokes"; Schaffner Group, Germany, 2013.
- [15] Butler, S. "Controlling Inrush Current in DC-DC Power Converters"; VPT Company Application Note, USA.
- [6] Castellazzi, A.; De, D.; Lamantia, A. "1.2kW Dual-Active Bridge Converter Using SiC Power MOSFETs and Planar Magnetics"; Proc. Int. Power Electronics Conf., Japan, 2014.
- [7] Yaskiv, V.; Shabliy, O.; Alpatov, A.; Gurnik, O. "Development of Switch Power Supplies for Radar Applications"; Proc. of the Int. Conf. on Radar, 2001, China.
- [8] Athalye, P.; Maksimovic, D.; Erickson, R. "High-Performance Front-End Converter for Avionics Applications [Aircraft Power Systems]"; IEEE Trans. Aerospace and Electronic Syst. 2003, 39, 462-470.
- [9] Military Standard "Aircraft Electric Power Characteristics"; Department of Defense Interface Standard (MIL-STD-704F), 2004, USA.
- [10] Mazzola, S. "MIL-STD-461: The Basic Military EMC Specification and its Evolution Over the Years"; Proc. of IEEE Long Island Syst., Applications and Tech. Conf. USA, 2009, 1-5.