طراحی نظام‌مند مبدل‌های واحد توزیع توان نانو ماهواره با تدوین الگوریتم حلقه‌بسته

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰٤/۰۷

آرش دهستانی کلاگر[۱*]، میثم حسنی[۲]، محمدرضا علیزاده پهلوانی[۳]
۱- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، a_dehestani@mut.ac.ir
۲- کارشناس ارشد، امور دیسپاچینگ، شرکت توزیع نیروی برق استان زنجان
۳- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

چکیده

در نانوماهواره‌ها به دلیل محدودیت‌های فضا و انرژی مصرفی و تأمین انرژی موردنیاز تمامی واحدها، طراحی بهینه و مناسب زیرسیستم توان اهمیت فراوانی دارد. طراحی نظام‌مند و مبتنی بر الگوریتم برای واحد تبدیل و توزیع توان نانو ماهواره هدف اصلی این مقاله است. به این ترتیب که با ترکیب مناسب منابع مختلف طراحی، از قبیل روابط تحلیلی مبتنی بر تئوری مبدل‌ها و مدارک فنی، تحلیل و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری، آزمایش نمونه عملی، یک الگوریتم حلقه‌بسته برای طراحی مبدل‌های واحد تبدیل و توزیع توان نانو ماهواره پیشنهاد شده است. پیاده‌سازی این الگوریتم موجب می‌شود ضمن دستیابی به طرح بهینه و پوشش تمامی مطالبات پروژه تعداد نمونه‌های آزمایشی موردنیاز برای ساخت و آزمایش، به حداقل برسد. مبنای اصلی الگوریتم استفاده از ترکیب شبیه‌سازی و آزمون‌های آزمایشگاهی است. برای اعتبارسنجی الگوریتم، روش پیشنهادی برای طراحی و ساخت نمونه مهندسی واحد تبدیل و توزیع توان نانوماهواره اجرا شده و نتایج قابل قبولِ به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده کارآمدی الگوریتم پیشنهادی، دقت بالا و قابلیت اطمینان مناسب طراحی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم طراحی، طراحی حلقه‌بسته، مبدل باک، نانوماهواره، واحد توزیع توان

Organized design for PDU convertors of nano-satellite via implementing a closed-loop algorithm

Arash Dehestani Kolagar[*1], Meysam Hasani[2], Mohammad Reza Alizadeh Pahlavani[3]
1 Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran (*Corresponding Author E-mail: a_dehestani@mut.ac.ir)
2 Scholar, Electrical Distribution Co. Zanjan.
3 Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Abstract

Power subsystem of nanosatellites is a major part that effectively has relationships with their entire electrical components. Occurring defects in this subsystem may lead to missing the whole mission. On the other hand, due to the nanosatellite restrictions in space and energy consumption, designing on optimized and appropriate power system will be more significant. In order to design convertors for power distribution units (PDUs) a closed-loop algorithm is presented in this paper, employing a proper combination of extant analytic relations, analyzing and simulating in software interface and testing the experimental sample. Applying this algorithm reduces the number of the required experimental samples in the process of manufacturing and testing. The proposed algorithm is carried out to design and build on engineering sample of PDU for nanosatellite and the results reveals the performance of this algorithm.

Keywords: *Designing algorithm, closed-loop design, Buck convertor, nanosatellite, power distribution Unit (PDU)*

۱. مقدمه

به‌طورکلی هر ماهواره از یک زیرسیستم توان الکتریکی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین قسمت‌ها تشکیل شده است که این زیرسیستم وظیفهٔ تأمین انرژی موردنیاز ماهواره را از زمان پرتاب تا قرارگیری در مدار و پس‌ازآن در تمام مدت مأموریت بر عهده دارد. در طراحی زیرسیستم توان مشابه تمامی بخش‌های دیگر نانوماهواره بایستی به بودجه وزنی، حجمی، توان مصرفی واحد و هزینه آن توجه کرده و تمامی الزامات بالادستی و استانداردهای مرتبط با آن رعایت شود. برای رعایت بودجه‌بندی و دستیابی به الزامات بالادستی بایستی انواع ویژگی‌های فنی در همه مراحل طراحی الکتریکی و شماتیک، انتخاب قطعات و طراحی مدار چاپی لحاظ شود. به‌عنوان مثالی از اهمیت زیرسیستم توان، باید دقت نمود که در صورت عدم کارکرد صحیح هریک از سیستم‌های دیگرِ الکترونیکی و مخابراتی، تنها عملکرد آن قسمت مختل می‌شود، این در حالی است که بروز هرگونه عیب در زیرسیستم توان، موجب اختلال در تمامی زیر سیستم‌ها شده و به از دست رفتن کل مأموریت می‌انجامد [۱]. کما اینکه بسیاری از سیستم‌های ماهواره‌ای اولیه به همین دلیل دچار خرابی یا افت شدند [۲].

مبدل‌های پایه کاهنده[۱] و افزاینده[۲] به دلیل عدم نیاز به ایزولاسیون، ابعاد و وزن کمتر، کاربردهای فراوانی در انواع ماهواره‌های کوچک دارند [۳ و ۴]. زیرسیستم توان ماهواره شامل بخش‌های کلی تولید توان، ذخیره توان و پردازش، تنظیم و توزیع آن است. پس از تولید توان از سوی سلول‌های خورشیدی، انرژی الکتریکی با استفاده از مبدل‌های مناسب، با الگوریتم بهینه و بازدهی کافی، در باتری‌ها ذخیره می‌شود تا امکان تأمین توان همه واحدها در ساعت‌های مختلف فراهم شود. در گام بعدی تبدیل و تنظیم ولتاژ به مقادیری که با هر یک از واحدهای مصرف‌کننده قابل‌استفاده باشد، توسط واحد تبدیل و تنظیم انجام می‌شود. در این مرحله بایستی مقدار ولتاژ، متناسب با میزان نامی موردنیاز هر واحد بوده و توانایی جریان‌دهی کافی و مورد انتظار وجود داشته باشد؛ ضمن اینکه امکان حفاظت‌های کافی نیز در آن پیش‌بینی شده باشد. درنهایت واحد توزیع توان وظیفه قطع و وصل ولتاژ مطابق با فرامین بالادستی را بر عهده دارد که با تمهیدات کنترلی و حفاظتی خاص، موجب راه‌اندازی یا خاموش شدن واحدهای مختلف نانوماهواره می‌شود. در یک نانوماهواره به دلیل محدودیت‌های ناشی از ابعاد و نیز میزان انرژی تولیدی از طریق سلول‌های خورشیدی، طراحی بهینه واحد تبدیل و توزیع توان ازنظر ابعاد و راندمان اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند.

بررسی سوابق و تجربیات مربوط به انواع ماهواره‌های کوچک نشان می‌دهد که بنا بر نیازهای پروژه و برای بهینه‌سازی مقدار راندمان، ملاحظات فنی و موارد اقتصادی، مقادیر مختلفی برای سطح ولتاژ باس ماهواره‌ها انتخاب و به کار گرفته شده است. ازجمله سطوح ولتاژی که در نانوماهواره‌ها برای تغذیه بارها استفاده شده است عبارت‌اند از: ۳/۳، ۵، ۷/۵، ۱۲ و ۱۴ ولت [۵]. اغلب با افزایش ابعاد ماهواره و توان مصرفیِ بخش‌های مختلف آن، سطح ولتاژ باس افزایش پیدا می‌کند. در برخی از نانوماهواره‌ها همچون CanX-1 [۳] ولتاژ باس ماهواره تنظیم شده نبوده و هر واحدی نیاز به یک تنظیم‌کننده توان دارد. در این پروژه برای واحدهای مختلف، از

مبدل‌های افزاینده کم‌توان استفاده شده است. با توجه به نیازهای کنترلی، حفاظتی و تدابیر ویژه در پروژه‌های فضایی، مهم‌ترین ایراد این روش افزایش پیچیدگی و حجم مجموعه مبدل‌ها در صورت تعدد واحدهای کاری است و تنها در شرایطی که واحدهای مختلف در ولتاژهای کاری متعدد و مختلفی طراحی شوند، توجیه‌پذیر است. نکته قابل‌توجه اینکه این ماهواره تجربه موفقی در استفاده از مدارهای مجتمع سری TPS در کنترل‌کننده مبدل‌های DC/DC کسب نموده است. از سوی دیگر، در برخی پروژه‌ها، ولتاژ باس تنظیم شده و در اختیار واحدهای مختلف قرار می‌گیرد. پروژه NTNU به‌عنوان نمونه‌ای از این استراتژی است که در آن چهار باس توان با چهار مبدل کاهنده، تنظیم ولتاژ شده است که شامل دو مبدل با خروجی ۳.۳ ولت و دو مبدل با خروجی ۵ ولت هستند [۴].

در اغلب پروژه‌های انجام‌شده، فرایند طراحی به شکل حلقه باز و بدون بازخوردگیری در طول فرایند طراحی بوده است. در این پروژه‌ها برای رسیدن به طراحی مطلوبی که هم نیازهای پروژه و مشخصات فنی را جوابگو بوده و هم بهینه‌سازی لازم در آن صورت گرفته باشد. اغلب طراحان سیستم‌ها با ساخت و آزمایش مکرر نمونه‌های آزمایشی مختلف تلاش کرده‌اند به نمونه قابل قبولی ازنظر مهندسی و عملکرد دست یابند. اما ساخت و آزمایش نمونه‌های آزمایشی نیز به دلیل پایین بودن انعطاف‌پذیری، هزینه بالا و صرف زمان زیادی را در پی دارد [۶].

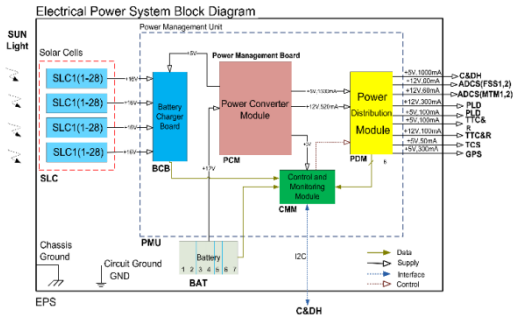
یکی از راه‌های کاهش این هزینه‌ها استفاده از مدل‌های نرم‌افزاری و شبیه‌سازی طرح‌های پیشنهادی است. اما این روش به دلیل پیچیدگی تطابق شرایط، پارامترهای محیط شبیه‌سازی، شرایط عملی و پیچیدگی بسیار بالای مدل‌سازی مدارهای مجتمع، با چالش‌های جدی روبروست. در این مقاله برای غلبه بر این دو چالش مطرح شده، یک الگوریتم طراحی حلقه‌بسته برای بازخورد گرفتن از مراحل مختلف طراحی و رسیدن به طرح قابل قبول ارائه شده است که ضمن استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری مناسب، کارآمد و با بهره‌گیری از منابع چندگانه طراحی، انعطاف‌پذیری بالاتری برای طرح ایجاد کرده و تعداد نمونه‌های آزمایشی موردنیاز را به حداقل می‌رساند. با توجه به پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در طراحی واحد تبدیل و توزیع توان نانوماهواره، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کارآمدی و دقت آن است. در ادامه با توجه به شرایط پروژه و تبیین نقطه شروع، مراحل الگوریتم تدوین‌شده، برای انجام طراحی معرفی شده، سپس مدار کنترل‌کننده مبدل و نرم‌افزارهای انتخاب‌شده همراه با تجربه شبیه‌سازی و طراحی واحد تبدیل توان که در پروژه مربوطه به‌دست آمده است، مورد شرح و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. مشخصات سیستم موردنیاز

در شکل ۱ دیاگرام بلوکی سیستم توان الکتریکی نانوماهواره که شامل بخش‌های مختلفی ازجمله واحد تولید و ذخیره‌سازی توان (سلول‌های خورشیدی، شارژر و باتری‌ها)، واحدهای تبدیل و توزیع توان و واحد کنترل است، آورده شده است.

هدف از تحقیق حاضر، دست‌یابی به یک طراحی قابل‌قبول برای به‌کارگیری در واحد تبدیل و توزیع توان یک نانوماهواره است. ورودی این واحد، ولتاژ تنظیم نشده ۱۸ تا ۲۶ ولت باتری

است که توسط سلول‌های خورشیدی و واحد شارژ باتری تغذیه می‌شود. همچنین فرمان‌های قطع و وصل واحدهای مختلف نانوماهواره جزو ورودی‌های این واحد هستند.



شکل ۱. دیاگرام کلی سیستم توان الکتریکی و بخش‌های مختلف آن [۵]

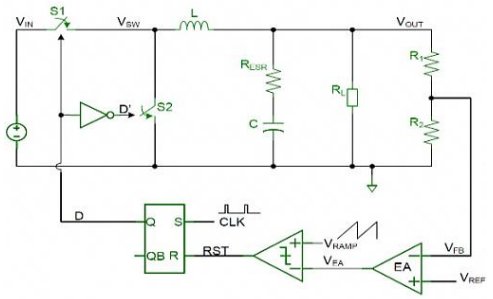
خروجی‌های این واحد ولتاژهای ۵ و ۱۲ ولت تثبیت شده با قدرت جریان‌دهی به ترتیب ۱۵۰۰ و ۵۲۰ میلی‌آمپر هستند که متناسب با نوع مصرف‌کننده‌ها و با توجه به فرمان‌های دریافتی بالادست، از طریق سوئیچ‌های مناسبی در اختیار واحدهای مختلف قرار خواهد گرفت. وجود تدابیر حفاظتی نیز ازجمله الزامات سیستم محسوب می‌شود. برای دست‌یابی به این منظور و با توجه به عدم نیاز به ایزولاسیون ولتاژ و محدودیت ابعادی، به‌کارگیری دو مبدل باک پیشنهاد شده است که ولتاژ تنظیم نشده باتری را به ولتاژهای ۵ و ۱۲ ولت تنظیم شده و با حفاظت‌های کافی تبدیل می‌کنند. در ادامه، واحد توزیع توان از طریق سوئیچ‌های بار[۳] مربوطه ولتاژهای تولیدشده را طبق فرامین بالادستی به واحدهای مختلف اعمال می‌کند.

۳. تبیین نقطه شروع

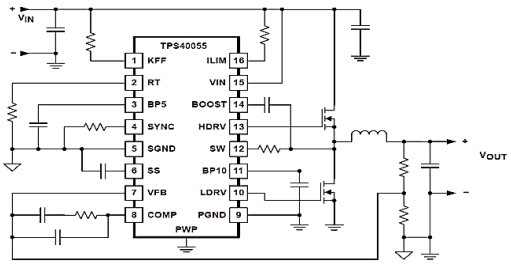
برای تدوین الگوریتم طراحی، با توجه به فعالیت‌های پژوهشی قبلی انجام گرفته در راستای پروژه هدف [۵ و ۷]، در گام نخست بایستی نقطه شروعی که پروژه در آن قرار دارد مشخص شود. پیش از شروع تحقیق حاضر، مراحل طراحی نمونه مدل تخت[۴] مبدل و ساخت آن، طوری که عملکرد کلی و اصلی مبدل و واحد توزیع توان به دست آید، انجام شده بود [۷]. به‌این‌ترتیب یک نمونه عملی از طی شدن مسیر طراحی به شکل حلقه‌باز وجود داشته و امکان برخی آزمون‌های عملی و اعتبارسنجی روی طرح اولیه مقدور بوده است. ازآنجاکه این نمونه می‌تواند برای گرفتن بازخوردِ مناسب و اعتبارسنجی، به کار گرفته شود، نقطه شروع مناسبی برای طراحی نمونه مهندسی محسوب شده و اهمیت زیادی دارد. ازاین‌رو ادامه الگوریتم طراحی با فرض این نقطه شروع، به‌نحوی‌که در ادامه اشاره خواهد شد طراحی و پیشنهاد شده است.

در شکل ۲ مدار پایه ساده‌شده یک رگلاتور باک و نمونه ساده‌ای از سیستم کنترل آن و نیز در شکل ۳ مدار تکمیل شده مبدل همراه با کنترل‌کننده و مدارهای پس‌خور[۵]، جبران‌سازی حلقه‌بسته، پیش‌خور[۶] و انواع بخش‌های حفاظتی که می‌تواند نیازهای پایه‌ای مدنظر را با قابلیت اطمینان خوبی برآورده نماید، آمده است. موضوع مهم در این راستا تعیین مقادیر هریک از پارامترها و المان‌های مختلف و اضافه نمودن مدارهای جانبی برای برآوردن کامل انتظارات است. با توجه به اهمیت واحد کنترل‌کننده مبدل در فرایند طراحی و در انتخاب نرم‌افزارهای تحلیل و شبیه‌سازی، در این بخش ابتدا به معرفی مدار مجتمع انتخاب شده و مشخصات آن پرداخته می‌شود. طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده در مراحل مختلف پروژه، مدار مجتمع TPS40055-EP برای این منظور انتخاب شد. ویژگی‌های بارزی که این

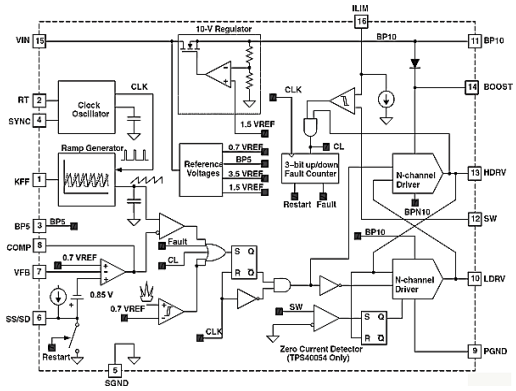
مدار مجتمع را برای استفاده در مبدل‌های این پروژه مناسب می‌نماید، عبارت‌اند از [۸]: مناسب بودن در کاربردهای نظامی و هوافضا، عملکرد دقیق در گسترهٔ وسیعی از ولتاژ ورودی، پاسخ سریع و مناسب به تغییرات ولتاژ ورودی با تکنیک پیش‌خور، شروع به کار نرم قابل تنظیم، قفل ولتاژ پایین قابل تنظیم ورودی، حفاظت در برابر اتصال کوتاه و اضافه جریان به شکل قابل تنظیم، جبران‌سازی حلقه بسته، راه‌اندازهای ماسفت بالا و پایین بدون نیاز به تغذیه مجزا، خاموش شدن خودکار در اثر بالاتر رفتن دما، بهره‌مندی از تکنولوژی پاورپد[۷] [۹] برای مدیریت حرارتی بهتر و درنهایت پایه‌های مجزا برای زمین قدرت و زمین سیگنال و به حداقل رساندن اثرات EMI. در شکل ۴ دیاگرام بلوکی ساده شده این مدار مجتمع شامل واحدها و بخش‌های مختلف آن را نشان می‌دهد



شکل ۲. نمونه دیاگرام مداری و کنترلی پایه و ساده شده مبدل باک [۶]



شکل ۳. دیاگرام مداری پایه مبدل بر اساس مدار مجتمع TPS40055 [۸]



شکل ٤. دیاگرام عملیاتی ساده‌سازی شدهٔ آی‌سی TPS40055-EP [۸]

۴. مراحل الگوریتم پیشنهادی

با توجه به نیاز به طراحی بهینه و در شرایط بالادستی و محدودیت‌های مختلف ازنظر تعدد ساخت نمونه آزمایشی، استفاده از نرم‌افزارهای مختلف برای شبیه‌سازی و تحلیل مبدل قطعاً کمک بسیاری به بهبود طراحی خواهد نمود. فضای تحلیل و شبیه‌سازی رایانه‌ای، درصورتی‌که به شکل مناسبی اعتبارسنجی شود، این امکان را فراهم می‌کند که ضمن برقراری انعطاف بالا در تغییر انواع پارامترها، اثر آن‌ها روی عملکرد کلی سیستم مشاهده و میزان حساسیت مدار به این پارامترها سنجیده شود و امکان بهینه‌سازی و اصلاحات مدنظر به نحو مناسبی فراهم شود. بنابراین انتخاب و استفاده از نرم‌افزارهای مناسب تحلیل و شبیه‌سازی، جزء مهم‌ترین مراحل این الگوریتم است.

در رابطه با شبیه‌سازی مبدل‌های DC/DC، عملکرد کلی مبدل و تحلیل‌های آن به‌طور جزئی در مراجع مختلف الکترونیک قدرت و منابع تغذیه سوئیچینگ صورت گرفته است و این عملکرد کلی به‌راحتی در نرم‌افزارهایی مثل SPICE یا MATLAB قابل پیاده‌سازی و مشاهده است [۱۰ و ۱۱]. آنچه در رابطه با این تحقیق اهمیت

فراوانی دارد، استخراج و استفاده از مدلی مناسب برای آی‌سی کنترل‌کننده پهنای پالس است که در مبدل به کار گرفته می‌شود و علاوه بر وظیفه اصلی تنظیم ولتاژ خروجی با کنترل پهنای پالس، وظایف دیگری ازجمله: امکان عملکرد حلقه‌بسته و مانور صفر و قطب‌ها جهت پایدارسازی، آشکارسازی و محدودسازی جریان خروجی هنگام خطا، قفل ولتاژ پایین ورودی، پاسخ مناسب به تغییرات ولتاژ ورودی یا جریان خروجی، راه‌اندازی ماسفت‌های مبدل و مواردی ازاین‌دست را نیز بر عهده دارد. بنابراین می‌توان گفت در یک مبدل DC/DC، کنترل‌کننده پهنای پالس و امکانات موجود در آن، بالاترین سطح اهمیت را دارد. بنابراین در فرایند شبیه‌سازی بایستی توجه ویژه‌ای به این موضوع شود. با استخراج مدل کنترل‌کننده و با عنایت به موجود بودن مدل سایر عناصر به‌کاررفته در مبدل (شامل انواع قطعات غیرفعال، دیودها و ماسفت‌ها) امکان مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامل یک مبدل که با آی‌سی کنترل‌کننده مذکور کار می‌کند وجود خواهد داشت.

با توجه به نکات مطرح‌شده و نظر به انتخاب آی‌سی کنترل‌کننده مناسب ازنظر مشخصات و عملکرد، اولین گام در راستای طراحی حلقه‌بسته، دست‌یابی به مدلی مناسب و قابل‌قبول از آی‌سی کنترل‌کننده مربوط به مبدل است؛ به‌نحوی‌که این مدل بتواند با دقت قابل قبولی رفتار و عملکرد آن را پیش‌بینی نماید. در این مرحله، توجه به این نکته ضروری است که استخراج مدل کنترل‌کننده و نرم‌افزار شبیه‌سازی، ارتباط نزدیک و دوسویه با یکدیگر دارند و بایستی در تعامل با یکدیگر انتخاب و استخراج شوند. این اهمیت از دو جهت قابل بررسی است. نخست اینکه انتخاب نرم‌افزار، نوع محاسبات و شبیه‌سازی آن می‌تواند در سادگی و پیچیدگی طراحی مدل، اثرگذاری فراوانی داشته باشد. دوم اینکه اعتبارسنجی کامل مدل به‌دست‌آمده، تنها در داخل مدار مبدل و در کنار سایر المان‌هایی که مبدل را تشکیل می‌دهند، قابل‌بررسی است و از این نظر بایستی نرم‌افزار طوری باشد که امکان پیاده‌سازی مدل، شبیه‌سازی همه المان‌های خطی و غیرخطی مبدل را داشته باشد.

در صورت دست‌یابی به این مدل، در گام بعدی می‌توان مدل تخت مبدل را در محیط شبیه‌سازی ایجاد کرده و با پارامترهای برابر یا نزدیک به پارامترهای مبدل ساخته شده، شبیه‌سازی نمود. به‌این‌ترتیب، با توجه به در دست بودن یک نمونه عملی، می‌توان اعتبارسنجی مناسبی از مدل به‌دست‌آمده برای کنترل‌کننده و کل مبدل انجام داد و در صورت نیاز مدل یا مدار شبیه‌سازی را اصلاح نمود. توجه به این نکته ضروری است که استخراج مدل دقیق و مناسب از آی‌سی کنترل‌کننده و در ادامه، اعتبارسنجی آن با استفاده از مدل و شبیه‌سازی کل مبدل، به‌جرئت مهم‌ترین مرحله در الگوریتم طراحی بوده و درصورتی‌که با دقت کافی صورت گیرد، می‌تواند کمک فراوانی در طراحی دقیق و اصولی مبدل اعمال نماید.

پس از اصلاحات موردنیاز و اعتبارسنجی مبدل شبیه‌سازی شده، هنگامی‌که پارامترهای مدار شبیه‌سازی‌شده و نمونه ساخته‌شده با دقت قابل قبولی به یکدیگر نزدیک شدند، می‌توان ادعا کرد که یک مدل نرم‌افزاری مناسب در فضای شبیه‌سازی برای کل مبدل به‌دست آمده است که با دقت زیادی رفتار مبدل را پیش‌بینی می‌کند و در این شرایط می‌توان گام بعدی را آغاز کرد.

توضیح اینکه معیارهای اصلی تطابق شبیه‌سازی رایانه‌ای و آزمایش‌های آزمایشگاهی، خروجی مبدل‌ها به ازای مقادیر مختلف ورودی، مقادیر مختلف بارگذاری و شیوهٔ پاسخ به اغتشاشات خروجی (اضافه‌بار و اتصال کوتاه یا افت ولتاژ ورودی) را شامل می‌شود. در این مرحله با استفاده از تحلیل‌های مربوط به مبدل و کنترل‌کننده، اصلاحات موردنیاز برای بهینه‌سازی و بهبود عملکرد مبدل در محیط شبیه‌سازی قابل‌اعمال است. همچنین می‌توان با برقراری شرایط مختلفی که ممکن است در عمل ایجاد شود، پاسخ مبدل را در شرایط مختلف موردبررسی قرار داده و نیز اثر پارامترهای مختلف و حساسیت خروجی‌ها نسبت به عوامل و پارامترهای مختلف، همچنین عملکرد دینامیکی و حلقه‌بسته سیستم را مطالعه کرد. به‌عنوان‌مثال می‌توان اثر میزان عدم قطعیت المان‌های مدار پس‌خور مبدل را بر خروجی، موردبررسی قرار داد یا نحوه عملکرد مکانیسم محدودکننده جریان و اثر پارامترهای مختلف مدار را روی میزان محدودیت جریان مطالعه و در صورت نیاز اصلاحات مناسب را انجام داد.

در این مرحله، درصورتی‌که میزان تغییرات ناشی از اصلاحات مدار در مدل تخت ساخته شده قابل‌اعمال باشد، می‌توان با اعمال تغییرات در مدار ساخته شده دوباره آن را آزمایش و اعتبارسنجی نمود. همچنین ممکن است مراحل بالا تا رسیدن به نتیجه قابل‌قبول چند بار تکرار شود. درنهایت با حصول نتیجه قابل‌قبول در مرحله بالا، طرح شماتیک مدار با قابلیت اطمینان بالایی به دست می‌آید، در ادامه مراحل انتخاب نهایی قطعات و طراحی مدار چاپی با در نظر گرفتن استانداردها، نکات ویژه طراحی انجام شده و مدار برای مونتاژ و آزمون‌های نهایی آماده می‌شود. در شکل ۵، فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی با جزئیات کامل آمده است. همان‌طوری که در این شکل مشخص است، در مراحل مختلف بازخوردهایی از روند طراحی گرفته می‌شود که به بهبود طرح و رسیدن به یک طراحی دقیق با حداقل تعداد بُردهای آزمایشی کمک فراوانی می‌کند.

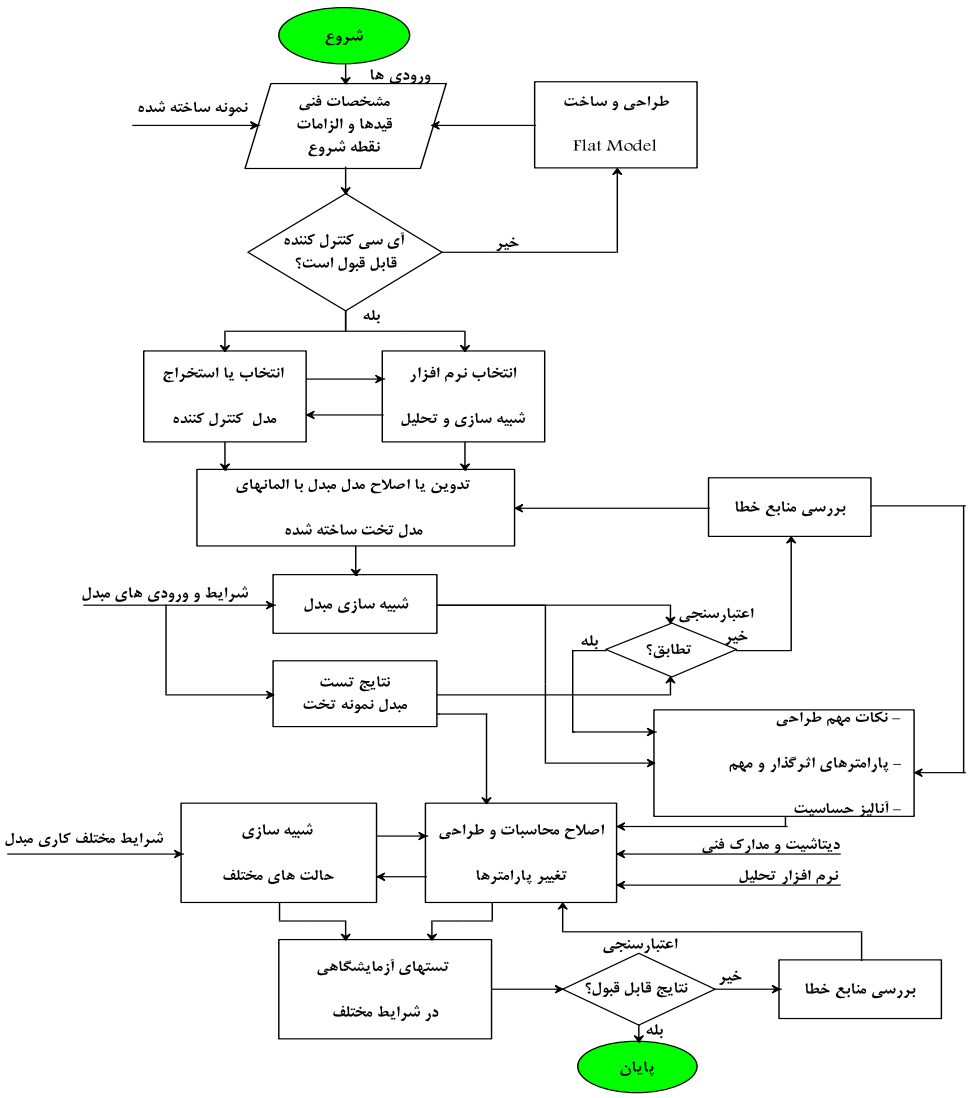
با توجه به موارد مطرح‌شده، مراحل اصلی الگوریتم مدنظر به‌طور خلاصه به ترتیب زیر قابل‌بیان است (بخش‌هایی از این مراحل برای دستیابی به نتیجه مطلوب، مطابق فلوچارت معرفی شده، قابل تکرار هستند): بررسی کنترل-کننده اصلی و انتخاب مورد مناسب، انتخاب نرم‌افزارهای تحلیل، شبیه‌سازی و انتخاب یا استخراج مدل‌های نرم‌افزاری کنترل‌کننده و سایر قطعات، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی مدل تخت و بررسی منابع خطا و اصلاح مدل‌ها در صورت نیاز، استخراج نکات طراحی، پارامترهای مهم و تجزیه‌وتحلیل حساسیت، اصلاح طراحی و بهبود پارامترها همراه با شبیه‌سازی حالت‌های مختلف کاری، آزمون‌های آزمایشگاهی تکمیلی و نهایی‌سازی طرح و اعتبارسنجی نهایی.

۵. انتخاب نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و تحلیل

همان‌طوری که در بخش قبل اشاره شد، یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی الگوریتم، استخراج یک مدل مناسب و دقیق برای کنترل‌کننده مبدل است. یکی از راه‌های پیشنهادی برای دست‌یابی به مدل مناسب، استفاده از دیاگرام بلوکی و پیاده‌سازی آن با نرم‌افزار سیمولینک[۸] است. این روش مزایا و معایبی دارد، ازجمله معایب آن،

طولانی بودن مسیر مدل‌سازی، عدم امکان اعتبارسنجی مدل و رفع خطاهای احتمالی به شکل مجزا و خارج از مبدل است. به‌بیان‌دیگر، ازآنجایی‌که پارامترهای دقیق داخلیِ مدار مجتمع استفاده شده، چه ازلحاظ مداری و چه ازلحاظ بلوک‌های کنترلی، از سوی سازنده ارائه نشده است، پیاده‌سازی مدل مدار مجتمع و اعتبارسنجی آن با این روش بسیار سخت و پیچیده خواهد بود. از سوی دیگر نرم‌افزار سیمولینک بیشتر از جنبه مقاصد کنترلی موردتوجه قرار می‌گیرد و ممکن است بررسی دقیق عملکرد کل مدار، در آن قابل انجام نباشد.

روش دیگر استفاده از نرم‌افزارهای ویژه آنالیز مدارهای الکتریکی و الکترونیکی مانند SPICE است. اما در این نرم‌افزارها تقریباً امکان بررسی دقیق عملکرد کنترلی و حلقه‌بسته سیستم کنترلی وجود ندارد. به‌طور مشابه، پیاده‌سازی دیاگرام شکل ۴ با استفاده از المان‌های الکتریکی و الکترونیکی بسیار پیچیده بوده و با توجه به در دسترس نبودن تمامی جزئیات بخش‌های مختلف آی‌سی، احتمال وجود خطای مدل‌سازی در شرایط مختلف کاری بسیار بالا بوده و فرایند رفع خطا پیچیده و مشکل خواهد بود.



شکل ۵. فلوچارت مربوط به الگوریتم طراحی پیشنهاد شده

در راستای انتخاب بهتر و دقیق‌تر، با بررسی‌های صورت گرفته، نرم‌افزاری به نام Tina TI موردتوجه قرار گرفت که در کتابخانه خود مدل حالت گذرای مدار مجتمع دارد TPS40055. این نرم‌افزار با مشارکت شرکت Texas Instruments و شرکت DesignSoft [۱۱] طراحی و توسعه داده شده است که هسته اصلی آن مبتنی بر SPICE بوده و مشابه SPICE دارای انواع تحلیل‌های DC، AC و Transient است. مدل مربوط به مدار مجتمع TPS40055 نیز به سفارش سازنده و از سوی شرکت AEi Systems تهیه شده است که شرکتی معتبر درزمینهٔ ارائه تحلیل‌های مهندسی پیشرفته (به‌ویژه با کاربردهای فضایی) و نیز مدل‌سازی دقیق مدارات مجتمع مربوط به سازنده‌های مطرح است. طبق ادعای این شرکت، مدل‌های ارائه شده برای انواع عناصر و آی‌سی‌ها، در شرایط مختلف و گستره وسیعی از فرکانس اعتبارسنجی شده و دقت زیادی دارند [۱۲].

همچنین با بررسی مرکز پشتیبانی سازنده مدار مجتمع، نرم‌افزار SwitcherPro نیز که برای تحلیل و طراحی انواع مبدل‌های الکترونیک قدرت و منابع تغذیه سوئیچینگ پیشنهاد شده است، موردبررسی قرار گرفت. این نرم‌افزار نیز در کتابخانه خود دارای مدل پایه مدار مجتمع TPS40055 و نیز مجموعه‌ای از قطعات پسیو و سوئیچ‌های مختلف است. از امکانات این نرم‌افزار می‌توان به انجام محاسبات پایه مبتنی بر مدارک فنی سازنده، ارائه پیشنهادهایی برای طراحی بهتر مبدل و ارائه تحلیل‌های گوناگونی ازجمله میزان راندمان خروجی در بارهای مختلف، میزان استرس‌های ولتاژی و جریانی مبدل، حد بهره و حد فاز در عملکرد حلقه بسته اشاره نمود [۱۳].

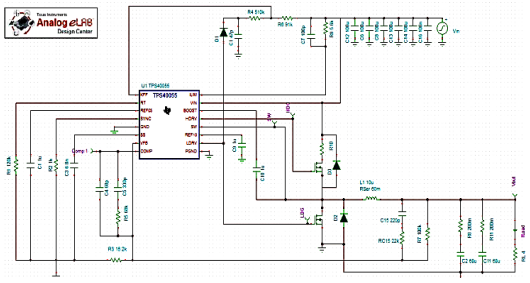
به‌این‌ترتیب در صورت اعتبارسنجی مناسب، می‌توان با بهره‌گیری از این دو نرم‌افزار ضمن انجام انواع تحلیل‌های مداری و کنترلی، شبیه‌سازی مبدل را در شرایط مختلف انجام داده و شکل موج بخش‌های مختلف را در حالت‌های گذرا و دائم در حوزه زمان مشاهده و رفتار مبدل را برای طراحی دقیق، موردبررسی قرار داد.

۶. پیاده‌سازی مبدل در محیط نرم‌افزاری

برای اعتبارسنجی مدل آی‌سی کنترل‌کننده و نرم‌افزار مربوطه و تعیین نکاتی که بایستی برای مدل‌سازی مبدل و شبیه‌سازی آن رعایت شوند، در این مرحله از الگوریتم، مدار مربوط به مدل تخت در محیط شبیه‌سازی، پیاده‌سازی شد تا رفتار مبدل در محیط شبیه‌سازی و آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شود. برای این منظور بایستی نکاتی را در نرم‌افزارهای مربوطه رعایت نمود.

مدل‌هایی که نرم‌افزار Tina TI برای عناصر پسیو ازجمله سلف و خازن استفاده می‌کند، در حالت پیش‌فرض ایده‌ال هستند و با تنظیم پارامترهای هریک می‌توان مطابق مشخصات قطعات، به مدل واقعی‌تری رسید. برای سلف‌های به‌کاررفته در خروجی مبدل می‌توان مطابق دیتاشیت قطعه استفاده شده، مقدار مقاومت معادل سری سلف را وارد نمود. اما در مدل‌سازی خازن‌ها باید توجه کرد که این نرم‌افزار برای خازن، از مقاومت معادل موازی استفاده می‌نماید و این در حالی است که در خازن‌های به‌کاررفته در این مبدل و دیتاشیت آن‌ها، به مقاومت معادل سری[۹] خازن‌ها اشاره شده است. در محاسبات مربوط به مبدل نیز در بخش خازن‌های خروجی و طراحی جبران‌سازی حلقه‌بسته، بایستی میزان

ESR خازن‌ها مشخص و معلوم باشد. ازاین‌رو در تنظیمات این دست خازن‌ها در نرم‌افزار، مقدار مقاومت معادل موازی، بی‌نهایت وارد شده و در عوض یک مقاومت به شکل سری با خازن و مقدار اهمی که در دیتاشیت آمده است، قرار داده می‌شود. این نکته در مدل‌سازی ماسفت نیز رعایت شده و مقاومت معادل حالت روشن کلید که در مشخصات قطعه آمده است، به‌عنوان مرجع لحاظ شده است. در نرم‌افزار SwitcherPro نیز مقادیر مقاومت معادل المان‌های یادشده، به شکل مشابه و مطابق با مقادیر اعلام‌شده در دیتاشیت قطعات، موجود و قابل انتخاب هستند. در شکل ۶ نمونه‌ای از پیاده‌سازی مدار مبدل ۵ ولتی در محیط نرم‌افزار Tina TI مشاهده می‌شود. مشابه این مدار برای مبدل ۱۲ ولتی نیز پیاده‌سازی شده است.



شکل ۶. مبدل ۵ ولتی پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار Tina TI

در شبیه‌سازی مبدل‌های ۵ و ۱۲ ولتی در محیط Tina TI و با توجه به نتایج آزمون‌های مبدل مدل تخت، نتایج زیر به دست آمده است:

- ولتاژ خروجی مبدل ۵ ولتی در مدل تخت، برابر ۴.۹۳۷ ولت؛
- پس از اصلاح مقاومت R_{BIAS} به مقداری برابر مقاومت نصب‌شده در مدار، ولتاژ خروجی در محیط شبیه‌سازی برابر ۴.۹۵ ولت؛
- ولتاژ خروجی مبدل ۱۲ ولتی در مدل تخت برابر ۱۱.۷۷ ولت؛
- ولتاژ خروجی شبیه‌سازی در شرایط مشابه برابر ۱۱.۷ ولت.
- در مبدل ۱۲ ولتی با تغییر مقدار مقاومت R_{BIAS} که در حالت عادی و نرمال موجب تغییر ولتاژ خروجی می‌شود، در هر دو حالت آزمون‌های آزمایشگاهی و محیط شبیه‌سازی، مقدار ولتاژ خروجی در هیچ شرایطی از ۱۱.۷۸ ولت فراتر نمی‌رود.

در شکل‌های ۷ و ۸ شکل موج‌های مربوط به شبیه‌سازی مدار مدل تخت مبدل‌ها نشان داده شده است. لازم به توضیح است که خروجی‌های مربوط به نرم‌افزار Tina TI، علاوه بر ولتاژهای ورودی و خروجی و جریان خروجی، شامل پالس‌های مربوط به درایو ماسفت‌های بالا و پایین HDG، LDG و ولتاژ لحظه‌ای کلیدزنی شدهٔ منبع SW نیز هستند. در شکل‌های آتی و در صورت نیاز به بررسی دقیق‌تر شکل موج‌ها، حالت بزرگ‌نمایی شده شکل موج‌ها نیز آورده شده است.

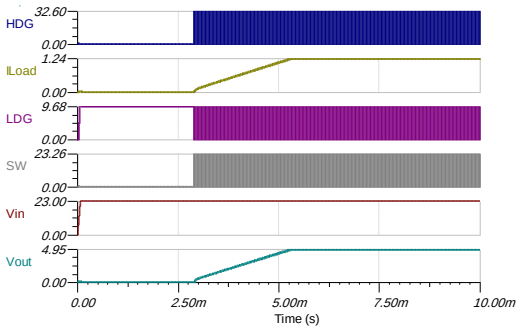
ازجمله آزمایش‌های دیگری که برای اعتبارسنجی دقیق‌تر روی مدل تخت انجام گرفت، بررسی عملکرد قفل ولتاژ پایین مبدل بود. در این حالت، دامنه ولتاژ ورودی به‌تدریج کاهش پیدا می‌کند تا مقدار ولتاژ ورودی که به ازای آن کنترل‌کننده پالس‌های خروجی را قطع و مبدل خاموش می‌شود، مشخص شود. در آزمون‌های صورت گرفته برای مبدل ۵ ولتی، مشخص شده است که با کاهش ولتاژ ورودی تا حدود ۱۲ ولت نیز عملکرد قفل ولتاژ پایین فعال نشده و تنها به ازای ولتاژهای برابر یا کمتر از ۱۱.۹ ولت این اتفاق می‌افتد. برای شبیه‌سازی این حالت در محیط نرم‌افزاری، شکل موج ورودی به نحوی

تنظیم شده است که پس از گذشت حالت گذرایِ شروع به‌کار نرم و تثبیت ولتاژ خروجی، دامنه ولتاژ ورودی از V_1=23 ولت کاهش یافته و به مقدار کمتر از V_2 برسد. با تغییر مقدار V_2 در شبیه‌سازی‌های مختلف مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی، تنها به ازای مقادیر کمتر از ۱۱.۶ ولت عملکرد قفل ولتاژ پایین فعال شده و کنترل‌کننده پالس‌ها را قطع و خروجی را صفر می‌نماید. قابل‌ذکر است که برای مبدل ۱۲ ولتی نیز شرایط مشابهی ایجاد می‌شود. همان‌طور که اشاره شد مواردی که در این بخش بررسی و ارزیابی شده است، همگی نشان از تطابق بالای نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های آزمایشگاهیِ انجام گرفته روی نمونه مدل تخت دارد و حاکی از اعتبارسنجی مناسب نرم‌افزار و مدل‌های انتخاب شده است.

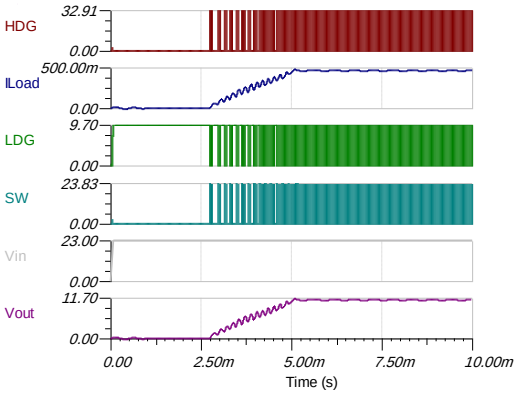
پیاده‌سازی مبدل در نرم‌افزار SwitcherPro و تحلیل آن با کمک این نرم‌افزار نیز مشخص می‌نماید پارامترهای کنترلی مدل تخت نیاز به اصلاح و بهینه‌سازی جدی دارد تا مسائلی که در تبدیل و تثبیت ولتاژ خروجی و عملکردهای حفاظتی آن وجود دارد، حل شود.

بررسی‌ها و نکات مشروح بالا نشان‌دهنده این است که مدل‌های استفاده‌شده و شبیه‌سازی صورت گرفته، می‌توانند رفتار مبدل را در شرایط مختلف با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. همچنین مجموعه نکاتی که هنگام شبیه‌سازی و اعتبار سنجی، در رابطه با طراحی مبدل به دست آمده است، به شرح زیر هستند:

- توجه جدی به حلقه جبران‌سازی مدار و میزان اثرپذیری خروجی از پارامترهای مربوط به آن و تعیین پارامترهای مهم؛
- توجه به حد بهره و حد فاز در سیستم حلقه‌بسته؛
- میزان حساسیت خروجی به پارامترهای مدار پس‌خور؛
- نحوه دقیق‌تر محاسبات مربوط به حفاظت اتصال کوتاه و محدودسازی جریان خروجی؛
- نحوه دقیق‌تر محاسبات مربوط به حلقه پیش‌خور و بخش قفل ولتاژ پایین ورودی.



شکل ۷. موج‌های مبدل ۵ ولتی شبیه‌سازی‌شده با پارامترهای مدل تخت

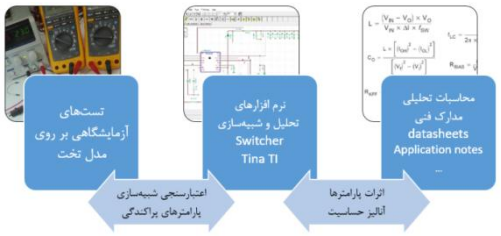


شکل ۸. موج‌های مبدل ۱۲ ولتی شبیه‌سازی‌شده با پارامترهای مدل تخت

۷. انجام مراحل محاسبات و طراحی

پس از اعتبارسنجی نرم‌افزار شبیه‌سازی و استخراج نکات مربوطه، در این مرحله، طراحی و محاسبات بخش‌های مختلف مبدل که با بهره‌گیری از منابع مختلف طراحی صورت گرفته است، معرفی می‌شود. برای طراحی مناسب و دقیق، مطابق شکل ۹ از ترکیب منابع مختلفی

استفاده شده است. این منابع در کنار یکدیگر و با ارتباط و تکمیل هم، موجب دست‌یابی به دقت و اطمینان بالایی از طراحی صورت گرفته، می‌شوند.



شکل ۹. منابع طراحی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر

با توجه به نیازهای پروژه و در نظر گرفتن افت ولتاژ واحد توزیع توان و کابل‌های ارتباطی و سایر حواشی اطمینان، مشخصات سیستم موردنیاز به‌این‌ترتیب خواهد بود که مبدل‌ها بایستی بتوانند در بازه ولتاژ ورودی ۱۶ تا ۲۶ ولت به‌خوبی و بدون هیچ مشکلی، ولتاژهای تثبیت‌شده ۵.۲ و ۱۲.۲ را با ریپل حداقل و جریان‌دهی به ترتیب ۲۲۰۰ و ۷۸۰ میلی‌آمپر و حفاظت‌های مناسب را در خروجی خود تحویل دهند. مقدار فرکانس کلیدزنی، برای کاهش ابعاد عناصر فیلتر خروجی و پایین نگه داشتن ریپل خروجی، برابر ۴۰۰ کیلوهرتز انتخاب می‌شود. به‌این‌ترتیب، مطابق رابطه ۱ مقدار مقاومت R_T مربوط به تنظیم فرکانس، برابر ۱۲۰ کیلو اهم به دست می‌آید.

$$R_T = \left(\frac{1}{f_{SW}.\,17.82\times10^{-6}} - 17\right)[k\Omega] \qquad .۱$$

یکی از موارد مهمی که در طراحی مبدل اهمیت دارد، تعیین المان‌های فیلتر خروجی است. تعیین این مقادیر ضمن اینکه میزان اعوجاج[۱۰] ولتاژ و جریان خروجی را مشخص می‌کند، در طراحی واحد پس‌خور و جبران‌سازی کنترل‌کننده نیز تأثیر زیادی دارد، ازاین‌رو در محاسبه و انتخاب دقیق المان‌ها بایستی توجه زیادی شود. مقادیر سلف و خازن خروجی و حداکثر میزان مقاومت معادل سری خازن، طبق رابطه‌های ۲ تا ۴ به دست می‌آیند.

$$L = \frac{(V_{IN}-V_O).V_O}{V_{IN}.\Delta I.f_{SW}}[H] \qquad .۲$$

$$C_O = \frac{L[I_{OH}^2 - I_{OL}^2]}{[V_f^2 - V_i^2]}[F] \qquad .۳$$

$$\Delta V = \Delta I\left[ESR + \frac{1}{8C_O.f_{SW}}\right][V] \qquad .۴$$

با استفاده از رابطه ۲ مقادیر سلف خروجی در مبدل‌های ۵ و ۱۲ ولتی به ترتیب برابر ۱۷.۳۳ و ۷۷.۸ میلی‌هانری به دست می‌آید. ازآنجاکه برای محاسبه مشخصات خازن بایستی مقدار صحیح سلف وارد شود، با بررسی قطعات در دسترس، سلف ۲۲ میکروهانری با جریان نامی تا ۳ آمپر برای مبدل ۵ ولتی و سلف ۱۰۰ میکروهانری با جریان نامی تا ۲.۱ آمپر برای مبدل ۱۲ ولتی انتخاب شد. درنتیجه مقادیر خازن خروجی به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۶.۳ میکروفاراد و حداکثر مقدار مجاز برای ESR نیز به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۷۰۰ میلی‌اهم به دست می‌آید. با بررسی‌های صورت گرفته دو خازن موازی ۱۰۰ میکروفاراد ۳۵ ولت با ESR برابر ۲۰۰ میلی‌اهم برای مبدل ۵ ولتی و دو خازن موازی ۲۲ میکروفاراد ۳۵ ولت و ESR برابر ۳۰۰ میلی‌اهم برای مبدل ۱۲ ولتی انتخاب شده‌اند. با تعیین مشخصات دقیق سلف و خازن خروجی می‌توان پارامترهای حلقه‌پس‌خور و جبران‌سازی و واحد پیش‌خور را تعیین کرد. برای این منظور از نرم‌افزار SwitcherPro استفاده شده است. با تنظیم مقادیر پارامترهای سلف و خازن خروجی و مقادیر مورد انتظار مبدل در این نرم‌افزار، فرکانس‌های طبیعی حلقه‌باز سیستم، پارامترهای حلقه‌های پس‌خور، جبران‌سازی و پیش‌خور پیشنهاد شده و مقادیر حد بهره، حد فاز

و راندمان مبدل با توجه به این مقادیر محاسبه شده و نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۱ آمده است. در ادامه مقادیر مربوط به مدارهای جانبی نیز با استفاده از روابط پایه، مدارک فنی، پیشنهادات نرم‌افزار SwitcherPro و تجربیات عملی محاسبه شدند.

۸. بررسی رفتار طرح در محیط شبیه‌سازی در شرایط نرمال

برای اعتبارسنجی طراحی صورت گرفته، مبدل طراحی شده در محیط Tina TI پیاده-سازی شده و در شرایط کاری مختلف از جمله گستره مجاز تغییرات ولتاژ ورودی و جریان خروجی، شبیه‌سازی و بررسی شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب شکل موج‌های مربوط به مبدل ۵ ولتی با ولتاژ ورودی ۲۳ ولت و جریان بار ۱ آمپر و مبدل ۱۲ ولتی با ولتاژ ورودی ۲۰ ولت و جریان بار ۰.۸ آمپر، به همراه حالت بزرگنمایی شده آن، آمده است. طبق این شکل‌ها و سایر بررسی‌های انجام‌گرفته، مقادیر ولتاژ خروجی و ریپل ولتاژ و جریان مبدل‌ها در محدوده مناسبی قرار گرفته است.

۹. بررسی عملکرد پیش‌خور و قفل ولتاژ پایین مبدل

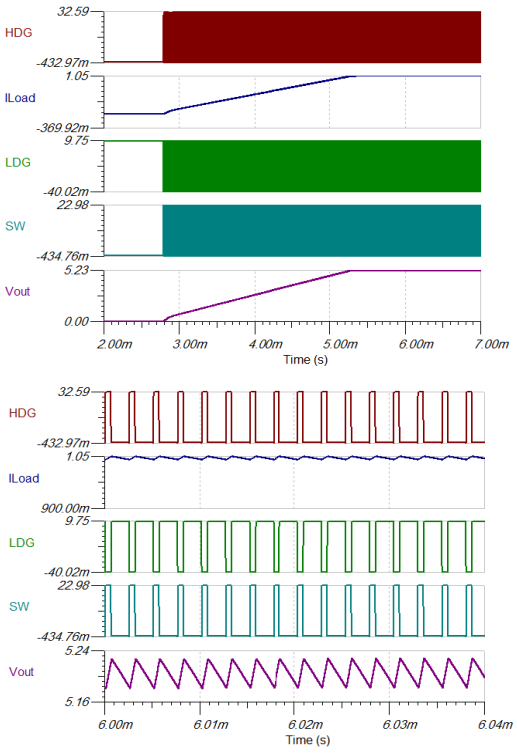
برای بررسی این بخش در مرحله نخست شبیه‌سازی مبدل با اعمال تغییر پله‌ای در ولتاژ ورودی انجام شده است که نتیجه آن در شکل ۱۲ آمده است. در این شبیه‌سازی، مقدار ولتاژ ورودی در لحظه ۶.۰۱ میلی‌ثانیه از ۲۶ ولت به ۱۸ ولت تغییر کرده است. مطابق این شکل، در اولین پالس بعد از تغییر ولتاژ ورودی، پهنای پالس تغییر نموده و به‌این‌ترتیب حلقه پس‌خور، درگیری کمتری با تغییر ورودی پیدا می‌کند و همان‌طور که در نمودار ولتاژ خروجی مشاهده می‌شود، فراجهش بسیار اندکی در خروجی ایجاد می‌شود.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای واحدهای پیش‌خور، پس‌خور و جبران‌سازی مبدل‌ها با نرم‌افزار Switcher Pro

مبدل ۵ ولتی			مبدل ۱۲ ولتی		
پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
R_{KFF}	۱۲۰	kΩ	R_{KFF}	۱۲۰	kΩ
R_1	۱۰	kΩ	R_1	۱۰	kΩ
C_3	۲۷۰۰	pF	C_3	۴۷۰۰	pF
R_3	۲.۲	kΩ	R_3	۷۶۸	Ω
C_2	۶۸۰	pF	C_2	۳۳۰	pF
R_2	۱۱	kΩ	R_2	۱۱	kΩ
C_1	۲۷۰۰	pF	C_1	۴۷۰۰	pF
R_{BIAS}	۱.۵۴	kΩ	R_{BIAS}	۶۰۴	Ω
Gain Margine	۵۰	dB	Gain Margine	۵۰	dB
Phase Margine	۵۹	Degree	Phase Margine	۶۵	Degree
Efficiency	۹۱	%	Efficiency	۸۹	%

واضح است که این شکل، عملکرد مناسب مدارات پس‌خور و جبران‌سازی را نیز نشان می‌دهد. در گام بعدی، برای بررسی عملکرد قفل ولتاژ پایین مبدل، به‌طور مشابه، مقدار ولتاژ ورودی در نرم‌افزار Tina TI طوری تنظیم شده است که پس از گذشت حالت گذرای اولیه (شروع به کار نرم) و تثبیت خروجی، در لحظه ۷ میلی‌ثانیه، مقدار ولتاژ ورودی به‌صورت پله‌ای از ۲۶ ولت به زیر ۱۴ ولت برسد. شکل موج‌های مربوط به این حالت، در شکل ۱۳ آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، با کاهش ولتاژ ورودی به مقدار کمتر از آستانه قفل ولتاژ، پالس‌های خروجی کنترل‌کننده قطع شده و

ولتاژ خروجی صفر می‌شود (ماسفت بالا در حالت خاموش و ماسفت پایین در حالت روشن قرار می‌گیرد). این مورد نیز نشان از طراحی و محاسبات صحیح و عملکرد قابل‌قبول این واحد در محیط شبیه‌سازی دارد.

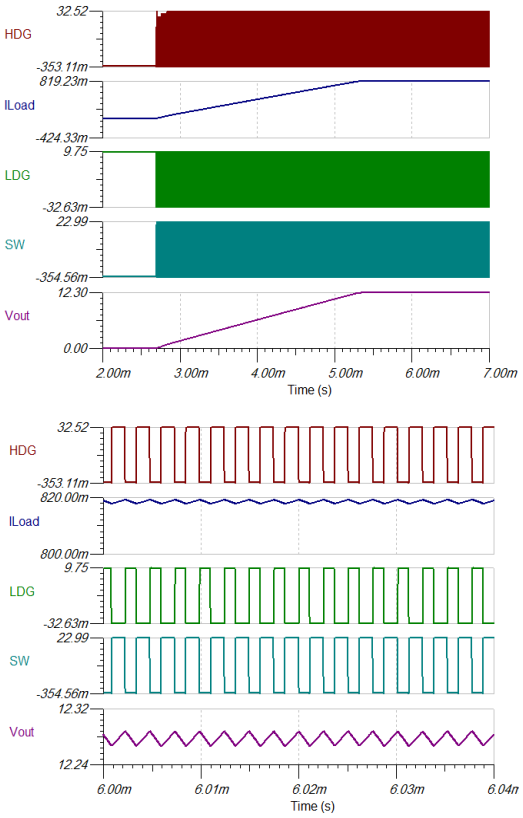


شکل ۱۰. خروجی‌های مبدل ۵ ولتی در شرایط نرمال

۱۰. واحد حفاظت جریان و اتصال کوتاه

پایه اصلی عملکرد دوسطحی حفاظت جریانی در مدار مجتمع کنترل‌کننده پهنای پالس، برمبنای مقایسه میزان افت ولتاژ روی ماسفت بالایی و افت ولتاژ ایجادشده در دو سر مقاومت R_{LIM} که بین ولتاژ ورودی و پایه I_{LIM} قرار گرفته و با یک منبع جریان داخلی با دامنه ثابت تغذیه می‌شود، قرار گرفته است. با توجه به رابطه ۵، برای تنظیم حد آستانه جریان (تنظیم با انتخاب مقدار R_{LIM} صورت می‌گیرد)، در تعیین مقادیر پارامترهای این بخش، علاوه بر حد آستانه جریان و پارامترهای داخلی آی‌سی کنترل‌کننده، مقدار مقاومت حالت روشن ماسفت بالایی نیز نقش مهمی دارد. در این راستا، مقدار پارامترهایی که نرم‌افزار Switcher Pro پیشنهاد می‌دهد، نیز مطابق مشخصات ماسفت انتخابی، با تغییر نوع ماسفت و مشخصات آن تغییر می‌کند.

$$R_{LIM} = \frac{I_{OC} R_{DS(on)(max)} + V_{OS}}{1.2 I_{SINK}} + \frac{42.86 \times 10^{-3}}{I_{SINK}} \quad (۵)$$

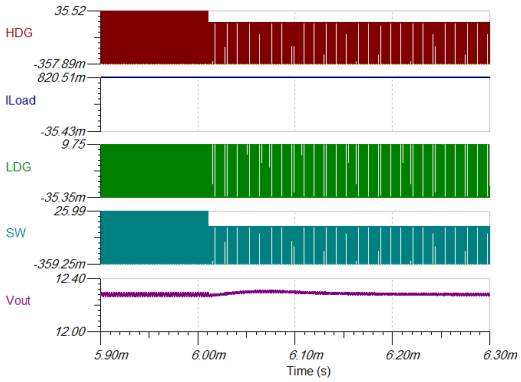


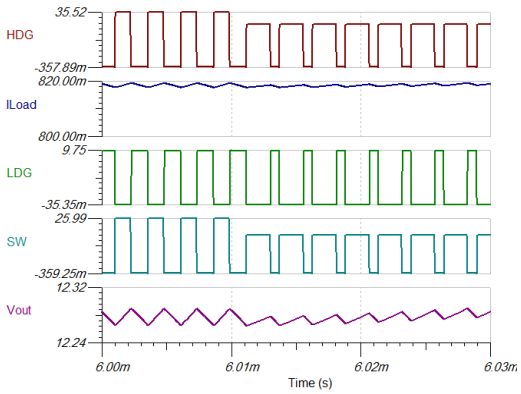
شکل ۱۱. خروجی‌های مبدل ۱۲ ولتی در شرایط نرمال

با توجه به آنالیز عدم قطعیت، در طراحی این بخش بایستی بدترین حالت ممکن و با حفظ حاشیه اطمینان برای آستانه حفاظتی، در نظر گرفته شود تا کارکرد مبدل در حالت عادی و در مقادیر جریان نامی خروجی مختل نشود.

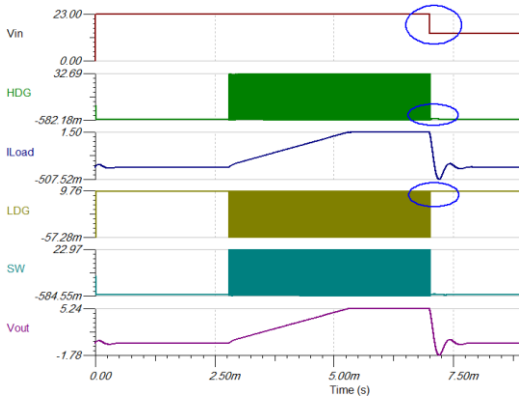
توضیح اینکه با توجه به وجود درصدی

تلرانس در پارامترهای قطعات مختلف و ایده‌آل نبودن قطعات ازلحاظ مداری، آنالیز عدم قطعیت در محیط شبیه‌سازی موجب می‌شود، حساسیت کمیت‌های خروجی و مهم سیستم به پارامترهای مختلف مشخص شده و در انتخاب قطعات موردتوجه قرار گیرد.





شکل ۱۲. عملکرد واحد پیش‌خور در پاسخ به تغییر ورودی



شکل ۱۳. بررسی عملکرد قفل ولتاژ پایین طرح در محیط شبیه‌سازی

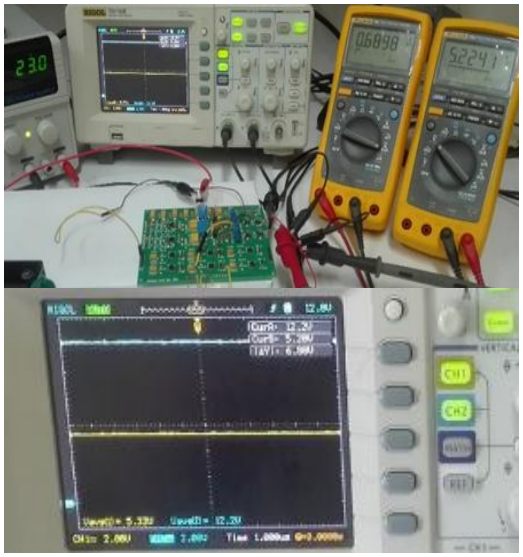
۱۱. آزمون‌های آزمایشگاهی

پس از پیشنهاد الگوریتم طراحی، اجرای کامل مراحل آن و بررسی دقیق پارامترهای مختلف مبدل‌ها در شرایط مختلف، با بهره‌گیری از روابط تحلیلی، نرم‌افزارهای تحلیل و شبیه‌سازی که بخشی از نتایج آن در بخش‌های پیشین آمده، برای اعتبارسنجی کامل الگوریتم، مبدل ساخته شده، در شرایط مختلف آزمایش و نتایج آن بررسی شده و در ادامه به بخش‌هایی از آن اشاره می‌شود. در جدول ۲ مقدار ولتاژ خروجی مبدل‌ها به ازای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی و جریان خروجی، آورده شده است. طبق آزمون‌های انجام‌شده، میزان تغییرات ولتاژ خروجی در گستره تغییرات ولتاژ ورودیِ نسبتاً زیاد (۱۷ تا ۲۶ ولت)، بسیار اندک بوده و کمتر از ۰.۰۳ ولت برای مبدل ۵ ولتی و کمتر از ۰.۰۲ ولت برای مبدل ۱۲ ولتی حاصل شده است. رگولاسیون بار نیز در مبدل‌ها از حالت بی‌باری تا درصدی بالاتر از بار نامی به طرز مناسبی حفظ می‌شود. به‌طوری‌که در مبدل ۵ ولتی میزان تغییرات ولتاژ خروجی از حالت بی‌باری تا جریان خروجی ۱.۵۵ آمپر، کمتر از ۰.۰۲ ولت و در مبدل ۱۲ ولتی میزان تغییرات ولتاژ خروجی از حالت بی‌باری تا جریان ۱ آمپر، کمتر از ۰.۰۴ ولت است. مقدار راندمان مبدل در شرایط نرمال همواره بیشتر از ۸۵.۳ درصد بوده، همچنین توان تلفاتی و مصرفی برد حداکثر برابر ۱.۶۸ وات اندازه‌گیری شد که مقدار مناسبی دارد.

در شکل ۱۴ نمونه‌ای از اجزای مجموعه آزمایشگاهی آماده شده و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، آمده است. در شکل ۱۵ نیز میزان ریپل ولتاژهای خروجی دو مبدل در اسیلوسکوپ قابل

مشاهده است. طبق اندازه‌گیری‌های انجام‌گرفته، ریپل ولتاژ برای مبدل‌ها در حالت بدون بار و در حضور بار، کمتر از ۱۰۰ میلی ولت است.

در گام بعدیِ انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، رفتار مبدل‌ها در شرایط خاص موردبررسی قرار گرفته است. در این راستا، دامنه ولتاژ منبع ورودی کاهش داده شده و به‌محض رسیدن ولتاژ ورودی به کمتر از ۱۵.۵ ولت، عملکرد قفل ولتاژ پایین مبدل‌ها فعال شده و ولتاژ خروجی به مقدار نزدیک صفر افت پیدا می‌نماید. در شکل ۱۶ این موضوع قابل مشاهده است. (مقادیر ولتاژ در این شکل برابر ۰.۶ و ۰.۳ ولت اندازه‌گیری شده است.) همچنین افزایش تدریجی جریان خروجی مبدل‌ها با استفاده از رئوستای توان بالا نشان می‌دهد، برای مبدل ۵ ولتی حفاظت جریانی به ازای مقادیر بالاتر از ۱.۹ آمپر فعال شده و مبدل مربوطه خاموش می‌گردد، درحالی‌که مبدل دیگر به کار خود ادامه می‌دهد. اعمال اتصال کوتاه در خروجی نیز مطابق شکل ۱۷، منجر به خاموش شدن سریع مبدل شده و به‌طور کامل از ایجاد جریان اضافی جلوگیری به عمل می‌آید.

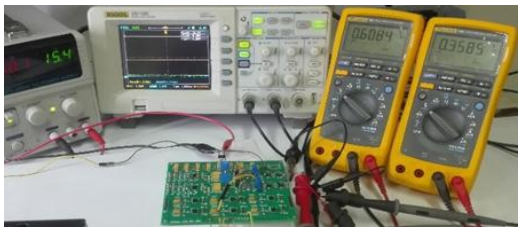


شکل ۱۴. اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقدار و شکل موج خروجی مبدل‌ها

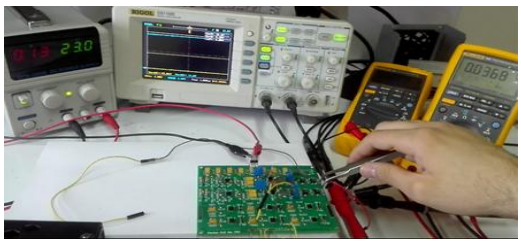
جدول ۲. نتایج آزمایشگاهی خروجی مبدل‌ها در شرایط مختلف کاری

مبدل ۵ ولتی			مبدل ۱۲ ولتی		
ولتاژ ورودی [v]	جریان بار [A]	ولتاژ خروجی [v]	ولتاژ ورودی [v]	جریان بار [A]	ولتاژ خروجی [v]
۱۷	۰	۵.۲۱۶	۱۷	۰	۱۲.۲۴
۲۰	۰	۵.۲۲۴	۲۰	۰	۱۲.۲۵
۲۳	۰	۵.۲۳۲	۲۳	۰	۱۲.۲۵
۲۶	۰	۵.۲۴	۲۶	۰	۱۲.۲۶
۲۳	۰.۶۹	۵.۲۲۴	۲۳	۰.۸	۱۲.۲۱
۲۳	۱	۵.۲۱۸	۲۳	۱	۱۲.۲۱
۲۳	۱.۵	۵.۲۱۵	-	-	-

شکل ۱۵. شکل موج‌های ریپل ولتاژ خروجی مبدل‌ها



شکل ۱۶. عملکرد قفل ولتاژ پایین مبدل



شکل ۱۷. حفاظت اتصال کوتاه مبدل

۱۲. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم حلقه‌بسته برای طراحی مبدل‌های واحد توان نانوماهواره پیشنهاد

شده است که در آن از منابع مختلف طراحی استفاده شده است. در مراحل مختلف طراحی، بازخوردهایی برای افزایش قابلت اطمینان و دقت طراحی اخذ می‌شود. اجرای این الگوریتم موجب دست‌یابی به یک طرح دقیق و مطمئن شده است. با استفاده از نرم‌افزار تخصصی SwitcherPro انواع آنالیزهای مداری و کنترلی، راندمان، حد بهره و فاز و با استفاده از نرم‌افزار Tina TI، شکل‌موج‌ها و رفتار حالت گذرا و دائم در شرایط مختلف کاری برای مبدل به دست آمده است. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی در شرایط مختلف کاری نرمال، غیرنرمال و انطباق مناسب آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده دقت و قابلیت اطمینان بالای طرح و نیز کارآمدی الگوریتم پیشنهادی است.

۱۳. مراجع

[1] H.T. El-madany, … Spacecraft Power System Controller Based on Neural Network, *14th International Middle East Power Systems Conference*, Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.

[2] P. Fortescue, J. Stark, G. Swinerd, *Spacecraft Systems Engineering*, fourth Edition pp. 325-349, England: Wiley, 2003.

[3] Sangtak Park: *Design and Implementation of the Electrical Power System for CanX-1*, Master thesis, Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Toronto, 2003.

[4] B.L. Molton: *Kysat-2 Electrical Power System Design and Analysis*, Master thesis, The College of Science & Technology, Morehead State University, Kentucky, 2013.

[5] GN (گزارش نهایی-امکان سنجی، طراحی مفهومی و مقدماتی زیرسیستم تأمین توان نانوماهواره)

[6] Maxim integrated, *Building a DC-DC Power Supply that Works*,Tutorial-1897, 2010, Accessed on 10 March 2017;

[7]A. Bolandraftar, *Practical design and fabrication of DC/DC converter for Persian Gulf nanosatellite*, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)

[8] *TPS40055-EP Datasheet*, Texas Instruments, Dallas Texas, 2012.

[9] M.L. Buschbom M. Peterson..., PowerPAD- A Method To Create Thermally Enhanced Plastic Package Solutions for Semiconductors, Texas Instruments, Dallas Texas, 1998.

[10] *Introduction to MATLAB/Simulink for switched-mode power*, ECEN5807 Supplementary Notes, University of Colorado.

[11] C. Basso, *SwitchMode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs*, McGrawHill.

[12] *Offline Circuit Simulation & PCB Design with TINA Design Suite*, Accessed on 15 February 2017;http://www.designsoftware.com

[13] *The Power IC Model Library for PSpice*, Accessed on 26 February 2017;

[14] *SwitcherPro Switching Power Supply Design Tool*, Accessed on 13 October 2017; http://www.ti.com/tool/SWITCHERPRO

پی‌نوشت

1- Buck
2- Boost
3- Load Switches
4- Flat Model
5- Feed-Back
6- Feed-Forward
7- PowerPad
8- Simulink
9- ESR
10- Ripple