

P-ISSN: 2008-4560 E-ISSN: 2423-4516

Original Research Paper

Journal of Space Science and Technology

Vol. 17, No. 1, pp. 37-48, 2024 https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440 Journal Homepage: https://jsst.ias.ir



Archive of SID.ir

Increasing the Efficiency and Reliability of the High-Power Supply with the Application of TWTA Lamps

Payman Mohammadi^{1*}⁽⁰⁾, and Mehdi Alemi Rostami²⁽⁰⁾

1. Ph.D. Student, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 05 May 2023 Revised 15 June 2023 Accepted 19 June 2023 Available Online 19 June 2023

Keywords:

High Voltage DC Converter Reliability Efficiency Genetic Algorithm Markov Model Klystron Lamps

ABSTRACT

Achieving low ripple, high efficiency, high reliability, and optimal volume and weight are crucial in the power supply of travelingwave-tube amplifier (TWTA) lamps in satellites. This article focuses on optimizing the efficiency and reliability of high-voltage DC/DC electronic power converters for use in satellite and TWTA systems. The optimization goal, using the multi-objective genetic algorithm NSGA-II, is to minimize the objective function, encompassing both efficiency and reliability. Reliability is assessed through a Markov model, which considers short-circuit and opencircuit failures in circuit switches and diodes, as well as short-circuit failures in passive circuit elements. The optimization process begins with defining the input variables for the algorithm. Sensitivity analysis is utilized to eliminate parameters with low sensitivity whose variations do not significantly impact the objective function. Parameters for the NSGA-II algorithm, including the number of iterations, population size, and probabilities of crossover and mutation, are precisely determined to ensure accurate computation of circuit variables. The results demonstrate that this method achieves high reliability alongside high efficiency through the optimal selection of circuit components, ensuring the converter's effectiveness for application in satellite systems.

*Corresponding Author's E-mail: pa.mohammadee@gmail.com

How to Cite this Article:

P. Mohammadi and M. Alemi Rostami, "Increasing the Efficiency and Reliability of the High-Power Supply with the Application of TWTA Lamps," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 37-48, 2024, (in Persian), <u>https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440</u>.



© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article open conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).



علوم و فناوری فضایی

۳۸–۳۷ موره ۱۷، شماره ۱، صفحه ۳۷–۴۸ https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440 Journal Homepage: <u>https://jsst.ias.ir</u>

شاپای چاپی: ۴۵۶۰-۲۰۰۸ شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳

مقاله پژوهشی

افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

پیمان محمدی'*©و مهدی عالمیرستمی'©

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

| اطلاعات مقاله | چکیدہ |
|--|--|
| تاريخچه مقاله: | از مهم ترین مسائل مربوط به تامین توان لامپهای TWTA در ماهوارهها داشتن ریپل |
| دریافت ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۲ بازنگری ۲۵ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش ۲۹ خرداد ۱۴۰۲ اولین انتشار ۲۹ خرداد ۱۴۰۲ | پایین ،بازده بالا، قابلیت اطمینان بالا، حجم و وزن بهینه می باشد. در این مقاله راندمان و قابلیت اطمینان مبدل الکترونیک-قدرت DC/DC ولتاژ بالا برای کاربرد در سامانههای ماهواره و فرستنده آن بهینه می شود. هدف بهینه سازی، حداقل سازی تابع هدف که شامل راندمان و قابلیت اطمینان است به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) |
| واژههای کلیدی: مبدل ولتاژ بالای DC قابلیت اطمینان بازده الگوریتم ژنتیک مدل مارکوف لامپ توان بالا در ماهواره | میباشد. به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده می شود که در آن خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز برای کلیدها و دیودهای مدار و خطای اتصال کوتاه برای المانهای پسیو مدار درنظرگرفته شده است. برای بهینه سازی ابتدا متغیرهای ورودی الگوریتم به عنوان ورودی تابع هدف تعیین می شوند تا به کمک آنالیز حساسیت پارامترهایی که دارای حساسیت پایینی هستند و تغییراتشان بر تابع هدف تاثیر عمده ندارد، حذف شوند. هم چنین پارامترهای الگوریتم II-NSGA شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق متغیرهای مدار، تعیین شدهاند. همان گونه که در بخش نتایج آورده شده است در این روش علاوه بر حفظ راندمان بالا با انتخاب بهینه المانها می توان به قابلیت اطمینان بالا برای این مبدل دست یافت. |

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: <u>pa.mohammadee@gmail.com</u>

Archive of SID.ir

How to Cite this Article:

P. Mohammadi and M. Alemi Rostami, "Increasing the Efficiency and Reliability of the High-Power Supply with the Application of TWTA Lamps," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 37-48, 2024, (in Persian), <u>https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440</u>.



© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

علوم و فناوری فضایی / ۲۹ سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

بهبود کارایی کل سیستم پیشنهاد شده است [۶] در برخی از مقالات توپولوژیهای سختافزاری جدید بهمنظور بهبود راندمان مبدل ارائه شده است [۷].

یکی دیگر از شاخصهای مهم در طراحی مبدلها، افزایش قابلیت اطمینان یا طول عمر موثر است. در برخی از کاربردها مانند سیستمهای مخابراتی یا سامانههای فضایی، استفاده از منبع تغذیه با قابلیت اطمینان بالا بسیار حائز اهمیت است. زیرا منابع تغذیه توان الکتریکی مورد نیاز کل سیستم را تامین می کند و در صورت خرابی، باعث از کار افتادن کل سیستم میشود [۸]. بنابراین، همواره تلاشهایی بهمنظور بهبود قابلیت اطمینان این مبدلها صورت گرفته است. در [۹] پیش بینی قابلیت اطمینان و مدلسازی ترانزیستورهای IGBT و MOSFET توان بالا مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

در [۱۰] یک مدل قابلیت اطمینان برای مبدل AC/DC ایزوله فرکانس بالا بهمنظور استفاده در ایستگاههای شارژ EV ارائه شده است. در [۱۱] مقایسهای بین مبدل صنعتی AC/DC با کلیدزنی سخت و کلیدزنی نرم LLC انجام شده است که نشان دهنده افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان درمقایسه با کلیدزنی سخت میباشد. در [۱۱]، بر اساس ایده مدولاسیون تک قطبی، یک استراتژی مدولاسیون برای مبدل AC/DC کلیدزنی نرم را تحقق میبخشد. این استراتژی مدولاسیون پیشنهاد شده، کلیدزنی نرم را تحقق میبخشد. این استراتژی مدولاسیون پیشنهاد شده، مطلاعات انجام شده ادوات نیمههادی مانند دیود و ترانزیستورهای IGBT مطالعات انجام شده ادوات نیمههادی مانند دیود و ترانزیستورهای IGBT که تهدیدی بالقوه برای قابلیت اطمینان میباشند. از آنجایی که کلیدها نقش مهمی در مبدلهای الکترونیک– قدرت دارند، میتوان با افزایش قابلیت مهمی در مبدلهای الکترونیک– قدرت دارند، میتوان با افزایش قابلیت اطمینان کلیدهای قدرت با استفاده از انتخاب بهینه اجزا و عملیات کلیدزنی نرم و غیره، قابلیت اطمینان کل مبدل را افزایش داد [۱]

روش های مختلفی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل های قدرت [۳-۱۴] ارائه شدهاند. مدل مار کوف به عنوان یک راه حل برای پیش بینی قابلیت اطمینان مبدل های الکترونیک – قدرت و ارزیابی سیستم هایی با مدل میتوان بسیاری از ویژگی های سیستم با قابلیت افزونگی مانند تعداد خرابی ها، ناحیه ای که خرابی را پوشش می دهد و نرخ خرابی که وابسته به حالت ها می باشد را در آن لحاظ کرد. در [۱۶] قابلیت اطمینان مبدل بوست Interleaved DC-DC با حفظ راندمان بالا و با مبدل بوست معمولی مقایسه شده است. همچنین یک الگوریتم کنترل تطبیقی به منظور افزایش طول عمر مبدل DC-DC با حفظ راندمان بالا و کاهش هزینه طراحی شده است. نتایج به دست آمده، عملکرد بهینه این روش کنترلی را نشان می دهد، به طوری که افزایش MTTF موجب کاهش افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

علائم و اختصارات

| C _b | خازن خروجي مبدل Boost |
|--|--|
| $C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}, C_{f4} C_{f5}, C_{f6}, C_{f7}$ | خازن فيلتر خروجي |
| C_p, C_s | خازن های مبدل رزونانسی |
| D | دورہ کاری (Duty Cycle) |
| D _b | ديود Boost |
| \mathbf{f}_{sb} | فرکانس کلیدزنی Boost |
| f | فرکانس کلیدزنی Full |
| 15 | Bridge |
| $I_{C4}, I_{C3}, I_{C2}, I_{C1}, I_{A0}, I_{H1x}, I_{A1}$ | جریانهای بار خروجی |
| I _{Ls} | جريان خروجي اينورتر |
| L _b | سلف Boost |
| L_m | اندوكتانس مغناطيس كنندكي |
| Ls | سلف مبدل رزونانسي |
| $n, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ | نسبت ترانسفورماتور |
| P _{con} | توان تلفاتی هدایتی مسیر |
| P_D, P_{Db}, P_{Dr} | توان های تلفاتی دیودهای مبدل |
| P _{loss} | توان تلفاتی کل |
| P _S , P _{Sb} , P _{S-con} , P _{S-sw} | توان های تلفاتی کلیدهای مبدل |
| P _T , P _{T-h} , P _{T-e} , P _{T-con} | توانهاى تلفاتى ترانسفورماتور |
| Pout | توان خروجي |
| $R_{C4}, R_{C3}, R_{C2}, R_{C1}, R_{A0}, R_{H1x},$ | مقاومتھای بار خروجی میدل |
| R _{A1} | Boost I |
| S _b | کلید مبدل DOOSt |
| S_1, S_2, S_3, S_4 | کلیدهای اینورنز ایاله : B oost |
| | ولتاز حروجي DOOSL |
| V_{C4} , V_{C3} , V_{C2} , V_{C1} , V_{A0} , V_{Hlx} , V_{A1} | ولتاژهای خروجی مبدل |
| Vin | ولتاژ ورودى |
| Vinv | ولتاژ خروجي اينورتر |
| V _{out} | ولتاژ خروجي |
| V _{ref} | ولتاژ مرجع |
| η | بازدہ مبدل |
| | |

مقدمه

امروزه کاربرد منابع تغذیه ولتاژ بالا در صنایع مختلف بسیار گسترده شده است. از جمله این کاربردها میتوان به آرایههای فوتوولتائیک [۱]، رسوبدهندههای الکترواستاتیک [۲]، منابع تغذیه اشعه X و لیزر [۳]، مدولاتورهای لامپهای خلاً [۴] و کاربردهای پالسی [۵] و غیره اشاره کرد.

در سالهای اخیر، بهینهسازی و راندمان مبدلهای سوئیچینگ DC/DC بهطور گسترده مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است و استراتژیهای کنترلی مختلفی برای افزایش راندمان مبدل و در نتیجه

♦ ۲ / علوم و فناوری فضایی
♦ ۲ / سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷ ، شمارهٔ ۱

راندمان نشده است. در [۱۷] ساختار DC-DC جدید برای کاربردهای با قابلیت اطمینان بالا و ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از زنجیره مارکوف انجام شده است که بهبود شاخص قابلیت اطمینان و قابلیت تحمل خطا برای مبدل پیشنهادی در پاسخ به خرابی سوئیچها را نشان میدهد.

در [۱۸] یک مدل مارکوف جامع بهمنظور مطالعه عملکرد قابلیت اطمینان مبدلهای DC-DC ایزوله با مدولاسیون عرض پالس شامل ساختار DC-DC پل کامل، نیم پل و پوش-پول پیشنهاد شده است که در آن تاثیر خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز المانهای مدار در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی تاثیرات دوره کاری، توان خروجی، نسبت تبدیل ترانسفورمر و بهره ولتاژ برای مبدل در مد گسسته و پیوسته ارزیابی شده است. نتایج نشان میدهد که افزایش توان خروجی باعث کاهش قابلیت اطمینان شده است.

همچنین تحقیقات محدودی در زمینه بهینهسازی چند هدفه مبدلهای الکترونیک قدرت صورت گرفته است. در [۱۹] راندمان، کیفیت توان، ابعاد و هزینه ساخت بهعنوان پارامترهای تابع هدف برای مبدل AC/DC لحاظ و بهینهسازی به کمک الگوریتم مدرن چند هدفه انجام شده است. در [۲۰] یک ساختار ریزشبکه هیبریدی AC/DC معرفی و توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه (INSGA-II) بهینه شده است.

پیمان محمدی و مهدی عالمی رستمی

در مراجع مطالعه شده بهطور همزمان بهینهسازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک و ارزیابی قابلیت اطمینان به کمک مدل مارکوف برای مبدلهای ولتاژ بالا با کاربرد لامپ توان بالای فرستنده ماهواره انجام نشده است. نوآوری این مقاله بهینهسازی پارامترهای مبدل ولتاژ بالا مورد استفاده در بخش فرستنده سازههای فضایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تابع هزینه چند هدفه و افزایش قابلیت اطمینان آن توسط مدل مارکوف می باشد.

شکل ۱ نمایی کلی از مبدل مورد بررسی را نشان میدهد. پس از طراحی اولیه، دو کمیت راندمان و قابلیت اطمینان بهعنوان متغیرهای تابع هدف در نظر گرفته میشوند. سپس، پارامترهای مدار نظیر فرکانس سوئیچینگ هر مبدل، نسبت تبدیل ترانسفورمر، ظرفیت خازنهای مبدل اول و دوم، مقدار اندوکتانس مبدل اول و دوم به عنوان ورودی تابع هدف تعیین میشوند تا به کمک آنالیز حساسیت پارامترهایی که دارای حساسیت پایینی هستند و تغییراتشان روی تابع هدف تاثیر عمده ندارد، حذف شوند. همچنین پارامترهای الگوریتم II-NSGA شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق متغیرهای مدار، مشخص میشوند. سپس با استفاده از الگوریتم II-NSGA، مقادیر بهینه (در بخش میشوند. سپس با استفاده از الگوریتم II-NSGA، مقادیر بهینه (در بخش قابلیت اطمینان، بهدست میآیند.



شکل 1 – مدار مبدل ولتاژ بالای مورد استفاده در ماهواره

Figure 1- High voltage converter circuit used in the satellite

افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

مراحل مختلف مقاله بدین شرح است: بخش دوم ساختار مدار بررسی و تحلیل، بخش سوم محاسبات راندمان، بخش چهارم تحلیل و بهدست آوردن معادلات قابلیت اطمینان، بخش پنجم بهدست آوردن مقادیر بهینه المانهای مدار توسط الگوریتم ژنتیک و در نهایت در بخش ششم نتایج حاصل از شبیهسازی آورده شده است.

تشريح ساختار مبدل مورد بررسى

در مراجع مختلف ساختارهای گوناگونی برای منابع تغذیه ولتاژ بالا ارائه شده است. استفاده از یک مبدل مدار رزونانسی در ساختار مدار قدرت این مبدل علاوه بر اینکه عناصر پراکندگی ترانسفورماتور ولتاژ بالا (که مقادیر قابل توجهی است) را در خود تجمیع می کند امکان کلیدزنی نرم برای مبدل و در نتیجه کاهش تلفات کلیدزنی و افزایش قابلیت اطمینان را فراهم میسازد. در میان ساختارهای رزونانسی، مدار رزونانسی سری– موازی (LCC) رفتار بهتری نسبت به سایر ساختارها از خود نشان میدهد[۲۲].

TWTA شکل ۱ ساختار ارائه شده در این مقاله بهعنوان منبع تغذیه TWTA استفاده شده در فرستنده ماهواره را نشان می دهد. اجزا مبدل مورد بررسی شامل یک مبدل Boost، یک اینورتر تمام پل کنترل شده به روش شیفت فاز، یک مبدل رزونانسی سری– موازی (LCC) بعد از اینورتر به منظور تجمیع عناصر پراکندگی برای کاهش تلفات کلیدزنی توسط کلیدزنی نرم و افزایش بازده و یک ترانسفورماتور و یکسوساز خروجی می باشد (شکل ۱). مدار این شکل از قسمتهای زیر تشکیل شده است:

منبع تغذیه ورودی: از آنجایی که منبع ورودی مبدل، پنلهای خورشیدی و باتری میباشد، منبع تغذیه ورودی یک منبع تغذیه DC متغیر است.

مبدل از ۲۲ تا ۴۴ ولت متغیر است. بنابراین برای تثبیت ولتاژ از یک مبدل از ۲۲ تا ۴۴ ولت متغیر است. بنابراین برای تثبیت ولتاژ از یک مبدل Boost استفاده شده است. کنترل این مبدل بهروش PWM که ولتاژ خروجی مبدل را تنظیم میکند و همچنین استفاده از این مبدل باعث کاهش ریپل جریان ورودی می شود.

بعد از اینکه ولتاژ توسط مبدل Boost در مقدار مشخص تثبیت شد، از یک ساختار تمام پل برای تبدیل ولتاژ DC به ولتاژ AC فرکانس بالا استفاده می شود. کلیدهای اینورتر تمام پل بهنحوی کنترل می شوند که ولتاژ خروجی مبدل را ثابت و در یک مقدار مشخص تثبیت کند. این کنترل بر اساس شیفت فاز انجام می شود.

در ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا بهدلیل فواصل عایقی زیاد، مقدار اندوکتانس نشتی قابل ملاحظه خواهد بود. همچنین بهدلیل نسبت دور بالای آن، خازن پراکندگی که از سمت ولتاژ پایین دیده می شود مقدار قابل توجهی دارد. مقادیر این سلف و خازن به گونهای است که فرکانس رزونانس

علوم و فناوری فضایی / ۲۹ سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

آنها در محدوده فرکانس سوئیچینگ مبدل قرار گیرد. در نتیجه میتوانند بر روی رفتار مبدل تاثیرگذار باشند و بازده و قابلیت اطمینان مبدل را افزایش دهند.

یک روش مناسب برای حذف مشکل عناصر پراکندگی ترانسفورماتور، استفاده از آنها در یک مبدل رزونانسی قبل از ترانسفورماتور است. مبدل رزونانسی سری نمیتواند خازن پراکندگی ترانسفورماتور را مدل کند. مبدل رزونانسی موازی هم رفتار مناسبی از نظر بازده در بار کم ندارد. گزینه بهتر مبدل LCC است که ضمن مدل کردن عناصر ترانسفورماتور، رفتار مناسبتری در بین مبدلهای رزونانسی از خود نشان میدهد

محاسبات بازده مبدل

تلفات مبدل شامل موارد زیر است:

- تلفات كليدها شامل تلفات هدايتي و كليدزني
- تلفات ترانسفورماتور شامل تلفات هیسترزیس و جریان فوکو در هسته و تلفات هدایتی سیم پیچها
- تلفات دیودهای موازی با کلیدها، دیود مبدل Boost و دیودهای یکسوکننده خروجی مبدل
 - تلفات هدایتی سلف مبدل Boost
 - تلفات هدایتی مسیر جریان

تلفات كليدها:

(١)

تلفات هدایتی کلیدها از این رابطه محاسبه می شود:

 $P_{S-con} = R_{on} I_{rms}^2$

در رابطه فوق R_{on} مقاومت هدایتی کلید و I_{rms} مقدار موثر جریان عبوری از کلید است.

تلفات کلیدزنی از انتگرال گیری از حاصلضرب جریان و ولتاژ کلید در طول زمان انجام سوئیچینگ بهدست میآید. رابطه زیر یک رابطه تقریبی برای محاسبه این تلفات است:

$$P_{S-sw} = \frac{1}{6} V_{on} I_{on} t_{on} f_{s} + \frac{1}{6} V_{off} I_{off} t_{off} f_{s}$$

$$(7)$$

در رابطه فوق V_{off} و I_{off} بهترتیب ولتاژ کلید بعد از خاموش شدن و جریان کلید قبل از خاموش شدن هستند. Von و Ion بهترتیب ولتاژ کلید قبل از روشن شدن و جریان کلید بعد از روشن شدن هستند. ton و toff طول زمان روشن و خاموش شدن کلید و f_s فرکانس کلیدزنی کلیدها هستند.

تلفات کل هر کلید از رابطه زیر محاسبه می شود: $P_{S}=P_{s-con}+P_{s-sw}$ (۳)

پیمان محمدی و مهدی عالمی رستمی

علوم و فناوری فضایی ۴۲ / سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

تلفات ترانسفورماتور:

تلفات هیسترزیس از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_{T-h}=K_h f_s B_m^{1.6}$$
 (۴)
که در این رابطه M ثابت هیسترزیس، f فرکانس و K_a چگالی شار
بیشینه هسته است.
 $P_{T-u}=K_e f_s^2 B_m^2$ (۵)
 $P_{T-e}=K_e f_s^2 B_m^2$ (۵)
 $P_{T-e}=R_T I_{rms}^2$ (۶)
 $P_{T-con}=R_T I_{rms}^2$ (۶)
 $P_{T-con}=R_T I_{rms}^2$ (۶)
 $P_{T-con}=P_{T-h} + P_{T-con}$ (۷)

تلفات ديود:

رابطه زیر میزان تلفات دیود را به دست میدهد:

$$P_{D} = V_{on}I_{avg} + R_{on}I_{rms}^{2} \qquad (A)$$

از تلفات Reverse Recovery ديودها صرفنظر ميكنيم.

تلفات هدایتی مسیرها و سلفها:

$$P_{con} = RI_{rms}^2$$
 (9)

تلفات کل مبدل از جمع تلفات قسمتهای مختلف محاسبه می شود:

$$P_{loss} = 4P_S + P_{Sb} + P_T + P_{Db} + P_{Dr}$$
(\.)

و در نهایت بازده مبدل را میتوان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \tag{11}$$

قابليت اطمينان

قابلیت اطمینان مبدلهای الکترونیک-قدرت را میتوان بهصورت احتمال عملکرد رضایت بخش مبدل برای یک دوره زمانی معین (افزایش طول عمر) و در شرایط مشخص شده، تعریف کرد. برای تحلیل و ارزیابی قابلیت اطمینان هر قسمت از مدار و در نظر گرفتن اثر خطاهای مختلف بر قابلیت اطمینان مبدل، از مدل مارکوف استفاده می شود. با توجه به

قابلیت تحمل خطای ذاتی در مبدل مورد نظر، سه حالت عملکردی . به شرح زیر قابل تحقق است:

الف) حالت سالم: در این حالت، تمام اجزای مبدل در شرایط کارکرد سالم خود هستند و مبدل با ظرفیت کامل خود کار می*ک*ند.

ب) حالت کاهش یافته: در این حالت، یک یا چند المان در مبدل با خطاهای OC یا SC مواجه هستند و مبدل می تواند با ظرفیت عملیاتی کاهش یافته به کار خود ادامه دهد، توان خروجی کاهش می یابد و تنش های وارده بر روی المان های مبدل در مقایسه با حالت سالم افزایش می یابد. در چنین شرایطی، مبدل با قطع کامل توان خروجی مواجه نمی شود، بلکه توان خروجی کاهش می یابد.

ج) حالت جذب کننده: این حالت عملیاتی منعکس کننده خرابی کامل مبدل بدون توانایی انتقال توان به بار خروجی است. مثل خطای SC هر المان مدار، خطاهای OC اجزای یک پایه مانند D1-D2 [۱۹] یا خطاهای OC کلیدهای مکمل و یا دیودها مانند S1-S3 یا S1-D3 مبدل رخ می دهد.

با در نظر گرفتن اصول عملکرد مبدل مورد مطالعه در برابر خطاهای مختلف، مدل مارکوف آن در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن پنج حالت برای المانهای مبدل مشخص می شود. در این مدل، وضعیت فعلی مبدل فقط به حالت قبلی مربوط می شود و هیچ ارتباطی وضعیت فعلی قبل تر ندارد. حالت اول و آخر به عنوان حالتهای سالم و جاذب تعیین می شود و حالتهای ۴–۲ حالتهای کاهش یافته هستند.

در شکل ۲، _iنه نرخ خرابی مبدل از وضعیت i به j است که در جدول ۱ مشخص شده است. در این جدول، λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{Ci} λ_{Co} λ_{Ci} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{T} λ_{Co} λ_{Ci} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{T} λ_{Co} λ_{Ci} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{T} λ_{S2} λ_{T} δ_{C} λ_{L} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{T} λ_{S2} λ_{T} λ_{C} λ_{L} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{S2} λ_{T} λ_{C} λ_{C} λ_{Ci} λ_{Lo} λ_{S2} λ_{S2} λ_{T} λ_{C} λ_{C} λ_{Ci} λ_{S2} λ_{S2} λ_{T} λ_{S2} λ_{S2}

علوم و فناوری فضایی / ۲۲ سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

جدول 1- معادلات نرخ خرابی مبدل ولتاژ بالا در این مقاله

Table 1- The equations of high voltage failure rates of this paper

| نرخ خرابی | معادله |
|----------------|---|
| λ_{12} | $(1-\alpha_s)\lambda_{sb}$ |
| λ_{13} | $4(1-\alpha_s)\lambda_s$ |
| λ_{14} | $(1-\alpha_D)\lambda_D$ |
| λ_{15} | $\lambda_{Lb} + \alpha_s \lambda_{sb} + \alpha_D \lambda_D + \lambda_{cb} + 4\alpha_s \lambda_s + 4\alpha_D \lambda_D + \lambda_{Ls} + \lambda_{cs} + \lambda_T + 7\lambda_{c out}$ |
| λ_{25} | $\lambda_{25} = \lambda_{Lb} + (1 + \alpha_D)\lambda_D + \lambda_{cb} + 4\alpha_s\lambda_s + 4\alpha_D\lambda_D + \lambda_{Ls} + \lambda_{cs} + \lambda_T + 7\lambda_{c out}$ |
| λ_{35} | $\lambda_{35} = \lambda_{Lb} + \alpha_s \lambda_{sb} + (1 + \alpha_D) \lambda_D + \lambda_{cb} + (2 + \alpha_s) \lambda_s + (2 + 2\alpha_D) \lambda_D + \lambda_{Ls} + \lambda_{cs} + \lambda_T + 7\lambda_c out$ |
| λ_{45} | $\lambda_{45} = \lambda_{Lb} + \alpha_s \lambda_{sb} + (1 + \alpha_D) \lambda_D + \lambda_{cb} + (2 + 2\alpha_s) \lambda_s + (2 + \alpha_D) \lambda_D + \lambda_{Ls} + \lambda_{cs} + \lambda_T + 7\lambda_c out$ |

$$R(t) = e^{\lambda_{11}t} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11} - \lambda_{22}} (e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{22}t}) + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{11} - \lambda_{33}} (e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{33}t}) + \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{11} - \lambda_{44}} (e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{44}t})$$
(17)

باید توجه داشت که قابلیت اطمینان تنها معیار کارآمد برای ارزیابی مبدلهای الکترونیک-قدرت نیست. در نتیجه، از پارامتری با عنوان میانگین زمان خرابی (MTTF) در مبدلهای الکترونیک-قدرت با قابلیت تحمل خطا نیز استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می شود [۱۸]: افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

برابر ۰/۷ [۱۹] در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل مارکوف پیشنهادی در شکل ۲، قابلیت اطمینان طبق رابطه ۱۲ محاسبه می شود:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} P_i(t) \tag{11}$$

که (P_i(t) احتمال حالت عملیاتی iام و s تعداد کل حالات عملیاتی سالم و P_i(t) می الم و کاهش یافته است که در این مقاله برابر با ۴ می باشد.



شکل ۲- گراف قابلیت اطمینان اجزا مختلف مدار.

Figure 2- The reliability graph of different parts of the circuit

P_i(t) بەصورت معادله فضای حالت به فرم ماتریسی زیر محاسبه میشود[۱۹].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P_{1}(t) \dots P_{4+1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1}(t) \dots P_{4+1}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & 0 & \lambda_{25} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(17)

در ماتریس فوق، _آ λ نرخ خرابی مبدل از حالت عملیاتی i به j است که نشان دهنده وقوع خطا در آن انتقال است. λ_{ii} در قطر اصلی ماتریس نیز برابر منفی مجموع نرخ خرابیها در ردیف i ماتریس است، زیرا جمع همه درایهها در هر ردیف از این ماتریس باید برابر با صفر باشد. با فرض حالت سالم بهعنوان حالت اولیه، P(t0)] =(P(t0) ،تابع قابلیت اطمینان بهصورت زیر بیان می شود.

علوم و فناوری فضایی ۴۴ / سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

$$\begin{split} MTTF &= \int_{0}^{\infty} R(t)dt = \\ &\frac{-1}{\lambda_{11}} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11} - \lambda_{22}} (\frac{1}{\lambda_{22}} - \frac{1}{\lambda_{11}}) + \\ &\frac{\lambda_{13}}{\lambda_{11} - \lambda_{33}} (\frac{1}{\lambda_{33}} - \frac{1}{\lambda_{11}}) + \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{11} - \lambda_{44}} (\frac{1}{\lambda_{44}} - \frac{1}{\lambda_{11}}) \end{split}$$
(14)

بهینهسازی مبدل با الگوریتم پیشنهادی

طراحى مبدل الكترونيك-قدرت بر اساس انتخاب خازنها، اندوكتانسها، دیودها، کلیدهای قدرت، مشخصات و ابعاد ترانسفورمر، فرکانس کلیدزنی و مقدار ولتاژ لینک DC بهمنظور فراهم کردن شرایط کاری مطلوب است. اگرچه در مقالات روشهای مختلفی برای طراحی مبدلهای قدرت استفاده می شود، اما تحقیقات محدودی وجود دارد که راندمان و قابلیت اطمینان را بهطور همزمان در روند طراحی در نظر گرفته باشند. در این مقاله، الگوریتمی برای طراحی این مبدل با بهینهسازی راندمان و قابلیت اطمینان آن ارائه می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از طراحی اولیه مبدل و محاسبه مقدار المان های مدار و سایر مشخصات عملکردی مبدل، آنالیز حساسیت برای بررسی اثر تغییرات پارامترهایی نظیر مقدار اندوکتانس و خازنها، ولتاژ لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورمر، و فرکانس کلید زنی مبدل اول و دوم بر روی راندمان و قابلیت اطمینان انجام می شود تا در نهایت پارامترهایی با حساسیت بالاتر انتخاب شوند. راندمان و MTTF نیز بهترتیب با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۴) قابل محاسبه است. در مرحله بعد از الگوریتم ژنتیک برای بهینهسازی استفاده می شود. الگوریتم -NSGA II برای حل توابع هزینه چند هدفه طراحی شده است. اصول عملکردی NSGA-II بر اساس تغییر متغیرهای بهینهسازی با عملگرهای متقاطع و جهش و انتخاب جمعیت نسل بعدی است. در واقع پارامترهایی مثل تعداد تكرار، تعداد جمعيت و احتمال تقاطع و جهش براي محاسبه دقيق المان هاي مدار، قابل تغییر است. متغیرهای مبدل نظیر مقدار اندوکتانس و خازن ها، فرکانس سوئیچینگ مبدل اول و دوم، ولتاژ لینک DC و نسبت تبدیل ترانسفورمر با کمینه کردن تابع هدف زیر بهینه می شوند:

$$OF = w_1(MTTF_d - MTTF_c) + w_2(1 - \eta)$$
 (14)

در رابطه ۱۵ مقدار MTTF_d مدت زمان مورد انتظار عملکرد بدون خرابی مبدل است که ۴۰۰۰۰ ساعت انتخاب شده است و MTTFc مقدار عملکرد بدون خرابی که در هر تکرار الگوریتم محاسبه میشود. قسمت دوم رابطه (۱۵) η بازدهی مبدل که این بخش بهمنظور ماکزیمم شدن مقدار راندمان، همواره باید مینیمم گردد. همچنین ۱۷ و 2۷ بهترتیب تابع وزنی MTTF و راندمان هستند و بسته به توازن بین

پیمان محمدی و مهدی عالمی رستمی

قابلیت اطمینان و راندمان مبدل، عددی بین ۰ و ۱ انتخاب می شود. ضرایب وزنی بیانگر این هستند که کدام متغیر تابع هدف از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجایی که کاربرد منبع تغذیه مورد نظر در سامانه های ماهواره و فضایی است، لذا قابلیت اطمینان اهمیت بالاتری نسبت به راندمان مبدل دارد. در این مقاله ضرایب وزنی قابلیت اطمینان و راندمان به ترتیب ۶/۰ و ۲/۰ انتخاب شدند. در ادامه روند بهینه سازی، الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می کند تا بتواند پارامترهای بهینه مدار را پیدا کند.



شکل ۳- فلوچارت طراحی و بهینهسازی الگوریتم

Figure 3- The flowchart of design and optimization algorithm

نتايج شبيهسازى

بهمنظور بررسی اثر تغییر پارامترهایی نظیر مقدار اندوکتانس و خازن مبدل اول و دوم، ولتاژ لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورمر، فرکانس کلید زنی

افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

مبدل اول و دوم، تحلیل حساسیت برای مولفههای تابع هدف انجام میشود (در شکل ۳ آورده شده است) تا در نهایت پارامترهایی با حساسیت بالاتر انتخاب شوند. نمودار راداری آنالیز حساسیت در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل، تغییرات ولتاژ لینک DC و دوره کاری بیشترین تاثیر را روی تابع هدف دارند. همچنین افزایش مقدار خازن لینک DC و اندوکتانس ورودی، بیشترین تاثیر را بر مولفه MTTF تابع هدف دارند. تحلیل بیانگر آن است که فیلتر خازنی و اندوکتانس ترانسفورمر مبدل تاثیر چندانی روی تابع هدف ندارد. لذا از این دو المان در الگوریتم بهینهسازی مرفنظر میشود. در نتیجه پارامترهای اندوکتانس ورودی، خازن لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورمر، ولتاژ لینک DC و فرکانس کلید زنی مبدل موان و دوم به عنوان پارامترهای مورد نظر در روند بهینهسازی در نظر گرفته شدهاند. بعد از آنالیز حساسیت و مطابق با روند الگوریتم در شکل ۳، ابتدا بازه تغییرات منغیرهای ورودی تابع هدف تعیین میشود. سپس با انتخاب ضرایب وزنی برای راندمان و MTTF، الگوریتم II-NSGA اجرا شده و مقادیر بهینه مدار استخراج میشوند.

جدول ۲ مقدار پارامترهای بهینهسازی شده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان میدهد. در این طراحی مقادیر بهینهسازی شده، MTTF ساعت و راندمان ۹۱٪ در حالت نامی برای مبدل بهدست می آید که نشان دهنده افزایش قابلیت اطمینان با حفظ راندمان بالا است.

از آنجاکه تابع هدف شامل دو مولفه راندمان و قابلیت اطمینان میباشد بنابراین شکل ۴ آنالیز حساسیت این دو پارامتر را با توجه به تغییرات المان های مبدل نشان میدهد.



شکل ۴- نمایش راداری تحلیل حساسیت برای مولفههای تابع هدف(راندمان و قابلیت اطمینان

Figure 4- The radar chart representation of sensitivity analysis for objective function components (efficiency and reliability)

لازم بهذکر است که احتمال خطای اتصال کوتاه برای کلید ماسفت و دیود برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد. شبیهسازی و روند بهینهسازی مبدل توسط نرم افزار Matlab انجام شده است.

علوم و فناوری فضایی / **۴۵** سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

شکلهای ۵ تا ۸ منحنی قابلیت اطمینان را برای پارامترهای مختلف مبدل نشان میدهد. این منحنیها برای پارامترهای دوره کاری (D) فرکانس کلید زنی (f) توان خروجی (P) و نسبت تبدیل ترانسفورمر (N) برای مدت زمان ۴۰۰۰۰ ساعت رسم شدهاند. این نمودارها برای ۵ مقدار مختلف در هر حالت رسم شدهاند. بهعنوان مثال برای فرکانس کلید زنی ۱۰۰ کیلوهرتز نمودار برای پنج حالت ۸۰ ، ۹۰ ، ۱۰۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز رسم شده است. همان گونه که در شکلهای ۵ تا ۸ مشخص است قابلیت اطمینان با افزایش توان خروجی ، نسبت تبدیل ترانسفورمر ، فرکانس کاری و کاهش مییابد و از آنجا که لازم است بین قابلیت اطمینان و بازدهی یک مصالحه صورت گیرد بنابراین مقادیر بهینه شده پارامتر ها بهدست آمده از الگوریتم برابر مقادیر بهدست آمده در جدول ۲ میباشند. همان گونه که از شکلهای ۵ تا ۸ مشخص است در مدول ۲ میباشند. همان گونه که از شکلهای ۵ تا ۸ مشخص است اطمینان میگذارند.

جدول ۲ – مقدار پارامترهای بهینه شده

| مقدار | علامت | پارامتر |
|--|---|-------------------------------------|
| 78-44 V | Vin | ولتاژ ورودى |
| ۱۴۰ μΗ | L _b | سلف Boost |
| ۵۰ V | Vb | ولتاژ خروجي Boost |
| ۱۱۵ kHz | \mathbf{f}_{sb} | فرکانس کلیدزنی Boost |
| ۹۵ µF | C _b | خازن خروجی مبدل Boost |
| ۹۰ kHz | f_s | فرکانس کلیدزنی Full Bridge |
| 48 µH | Ls | سلف مبدل رزونانسی |
| ٩٠٠ μH | Lm | اندوکتانس مغناطیس کنندگی |
| ۶۷ nF | Cs | خازن سری مبدل رزونانسی |
| ۱۰ nF | Cp | خازن موازی مبدل رزونانسی |
| 11, 81/9, 10, 18/9, 87/1, 18/7, 8/8 | n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7 | نسبت ترانسفورماتور |
| ۹۵ nF | $\begin{array}{c} C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}, C_{f4} \\ C_{f5}, C_{f6}, C_{f7} \end{array}$ | خازن فيلتر خروجي |
| лл., түл., түү., 4, 224., 878., 847. V | Vc4, Vc3, Vc2, Vc1, Va0,Vhix, Va1 | ولتاژهای خروجی (نسبت به Cathode) |
| " m, v m, 18 m, 1δ m , τδμ, "m, τλμΑ | Ic4, Ic3, Ic2, Ic1, IA0, IH1x, IA1 | جریانهای بار خروجی |
| NAC W | Pout | توان خروجي |

Table 2- The values of optimized parameters

پیمان محمدی و مهدی عالمی رستمی



شکل ۹ – شکل موج ولتاژهای خروجی مبدل

Figure 9- Output voltage waveforms of converter



Figure 10- Converter efficiency vs. input voltage



Figure 11- Converter efficiency vs. switching frequency



علوم و فناوری فضایی ۲۶ / سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

شکل ۵ – نمودار قابلیت اطمینان برای دوره کاریهای مختلف

Figure 5- The reliability curves of different duty cycles



شکل ۶ – نمودار قابلیت اطمینان برای فرکانس کلید زنی مختلف

Figure 6- The reliability curves of different switching frequency



شکل ۷ – نمودار قابلیت اطمینان برای نسبت تبدیل مختلف ترانسفورمر.

Figure 7 - The reliability curves of different transformer conversation ratio



شکل ٨ – نمودار قابلیت اطمینان برای توانهای مختلف.

Figure 8- The reliability curves of different powers

علوم و فناوری فضایی / **۴۷** سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

Access, vol. 9, pp. 166048-166057, 2021, <u>https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135609</u>.

- [7] Y.W. Cho, J. M. Kwon, and B.H. Kwon, "Single power-conversion AC--DC converter with high power factor and high efficiency," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4797-4806, 2013, <u>https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2286832</u>.
- [8] G. Li, D. Yang, B. Zhou, Y. F. Liu, and H. Zhang, "A topology-reconfigurable fault-tolerant two-and-single stage AC-DC converter for high reliability applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3174236.
- [9] S. Raj, V. Singh, N. K. Rajalwal, and D. Ghosh, "Reliability prediction of a distribution protection scheme using markov model," in 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO), pp. 868-87, 2020, https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9197804.
- [10]M. Ghavami and C. Singh, "Reliability evaluation of electric vehicle charging systems including the impact of repair," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-9, 2017, <u>https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101865</u>.
- [11]S. A. Q. Mohammed and J. W. Jung, "A state-ofthe-art review on soft-switching techniques for DC-DC, DC-AC, AC-DC, and AC-AC power converters," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 10, pp. 6569-6582, 2021, https://doi.org/10.1109/TII.2021.3058218.
- [12]W. Kuo and V. R. Prasad, "An annotated overview of system-reliability optimization," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 49, no. 2, pp. 176-187, 2000, <u>https://doi.org/10.1109/24.877336</u>.
- [13]A. T. Bryant, P. A. Mawby, P. R. Palmer, E. Santi, and J. L. Hudgins, "Exploration of power device reliability using compact device models and fast electrothermal simulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 894-903, 2008, <u>https://doi.org/10.1109/TIA.2008.921388</u>.
- [14]A. H. Ranjbar, M. Kiani, and B. Fahimi, "Dynamic markov model for reliability evaluation of power electronic systems," in *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1-6, 2011, https://doi.org/10.1109/PowerEng.2011.6036439.
- [15]P. Babcock and S. Philip, "An introduction to reliability modeling of fault-tolerant systems," The Charles Stark Draper Laboratory, Cambridge, MA, Tech. Rep. CSDL, 1986.
- [16] V. Mulpuri, M. Haque, M. N. Shaheed, and S. Choi, "Multistate markov analysis in reliability evaluation and life time extension of DC-DC power converter for electric vehicle applications," in *IEEE Transportation Electrification Conference*

افزایش راندمان و قابلیت اطمینان منبع تغذیه توان بالا با کاربرد لامپهای TWTA

نتيجه گيرى

هدف این مقاله بهینه سازی پارامترهای مبدل ولتاژ بالا مورد استفاده در بخش TWTA سازههای فضایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تابع هزینه چند هدفه و افزایش قابلیت اطمینان آن توسط مدل مارکوف می باشد . در این مقاله تابع هزینه شامل دو بخش بازدهی و قابلیت اطمینان می باشد که دو پارامتر مهم در منابع تغذیه سازههای فضایی به حساب می آیند. مقدار المانهای مبدل در بازههایی متناسب با مقدار به دست آمده در تئوری در نظر گرفته می شوند سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تابع هدف معادله ۱۵ مورد تحلیل قرار می گیرد و هدف مینیمم کردن این تابع می باشد. مقادیر متناظر با تابع هدف مینیمم برای مدت زمان اولین خرابی MTTF در حدود ۲۰۰۰۰ ساعت و مقدار بازدهی ۹۱ درصد می باشد، همچنین مقادیر به دست آمده برای المانهای مدار در این حالت در جدول ۲ آورده شده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] C. Zhang, S. Du and Q. Chen, "A novel scheme suitable for high-voltage and large-capacity photovoltaic power stations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3775-3783, 2013, <u>https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2208438</u>.
- [2] S. N. Vukosavić, L. S. Perić and S. D. Sušić, "A novel power converter topology for electrostatic precipitators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 152-164, 2016, <u>https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2405471</u>.
- [3] J. F. Chen, R.Y. Chen, and T. J. Liang, "Study and implementation of a single-stage current-fed boost pfc converter with zcs for high voltage applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 379-386, 2008, https://doi.org/ 10.1109/TPEL.2007.909283.
- [4] I. Barbi, and R. Gules, "Isolated DC-DC converters with high-output voltage for twt a telecommunication satellite applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 975-984, 2003, <u>https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.813762</u>.
- [5] S. H. Ahn, H. J. Ryoo, J. W. Gong and S. R. Jang, "Lowripple and high-precision high-voltage dc power supply for pulsed power applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 10, pp. 3023-3033, 2014, <u>https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2333813</u>.
- [6] X. Wang, W. Yang, and D. Liang, "Multi-objective robust optimization of hybrid AC/DC distribution networks considering flexible interconnection devices," *IEEE*

پیمان محمدی و مهدی عالمی رستمی

علوم و فناوری فضایی ۲۸ / سال ۱۴۰۳، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۱

- [19]B. Ye, X. Shi, X. Wang, and H. Wu, "Optimisation configuration of hybrid AC/DC microgrid containing electric vehicles based on the NSGA-II algorithm," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 10, pp. 7229-7236, 2019, <u>https://doi.org/10.1049/joe.2018.5043</u>.
- [20]T. B. Soeiro, J. Mühlethaler, J. Linnér, P. Ranstad and J. W. Kolar, "Automated design of a high-power high-frequency LCC resonant converter for electrostatic precipitators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 4805-4819, 2013, https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2227897.

and Expo (ITEC), 2018, pp. 280-285, <u>https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450102</u>.

- [17]J. L. Soon, D. D.C. Lu, J. C.H. Peng, and W. Xiao, "Reconfigurable nonisolated DC–DC converter with fault-tolerant capability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 9, pp. 8934-8943, 2020, <u>https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971837</u>.
- [18]H. Tarzamni, F. Tahami, M. Fotuhi-Firuzabad and F. Blaabjerg, "Improved markov model for reliability assessment of isolated multiple-switch PWM DC-DC converters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 33666-33674, 2021, <u>https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060950</u>.

