



Original Research Paper

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

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

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 traveling-wave-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 open-circuit 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), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440>.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





مقاله پژوهشی

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

پیمان محمدی^{۱*} و مهدی عالمی رستمی^۲

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

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

چکیده

از مهم‌ترین مسائل مربوط به تامین توان لامپ‌های TWTA در ماهواره‌ها داشتن ریبیل پایین، بازده بالا، قابلیت اطمینان بالا، حجم و وزن بهینه می‌باشد. در این مقاله راندمان و قابلیت اطمینان مبدل الکترونیک-قدرت DC/DC ولتاژ بالا برای کاربرد در سامانه‌های ماهواره و فرستنده آن بهینه می‌شود. هدف بهینه‌سازی، حداقل‌سازی تابع هدف که شامل راندمان و قابلیت اطمینان است به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) می‌باشد. به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده می‌شود که در آن خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز برای کلیدها و دیودهای مدار و خطای اتصال کوتاه برای المان‌های پسیو مدار در نظر گرفته شده است. برای بهینه‌سازی ابتدا متغیرهای ورودی الگوریتم به عنوان ورودی تابع هدف تعیین می‌شوند تا به کمک آنالیز حساسیت پارامترهایی که دارای حساسیت پایینی هستند و تغییراتشان بر تابع هدف تاثیر عمده ندارد، حذف شوند. هم‌چنین پارامترهای الگوریتم NSGA-II شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق متغیرهای مدار، تعیین شده‌اند. همان‌گونه که در بخش نتایج آورده شده است در این روش علاوه بر حفظ راندمان بالا با انتخاب بهینه المان‌ها می‌توان به قابلیت اطمینان بالا برای این مبدل دست یافت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۲

بازنگری ۲۵ خرداد ۱۴۰۲

پذیرش ۲۹ خرداد ۱۴۰۲

اولین انتشار ۲۹ خرداد ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

مبدل ولتاژ بالای DC

قابلیت اطمینان

بازده

الگوریتم ژنتیک

مدل مارکوف

لامپ توان بالا در ماهواره

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: 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), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1440>.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



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 می‌کند 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] پیش‌بینی 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 در مقایسه با کلیدزنی سخت می‌باشد. در [۱۱]، بر اساس ایده مدولاسیون تک قطبی، یک استراتژی مدولاسیون برای مبدل AC/DC ارائه شده است که به‌طور کامل افزایش ولتاژ را حذف می‌کند و عملیات کلیدزنی نرم را تحقق می‌بخشد. این استراتژی مدولاسیون پیشنهاد شده، عملکرد ایمن و قابل اطمینانی را برای مبدل فراهم می‌کند. براساس مطالعات انجام شده ادوات نیمه‌هادی مانند دیود و ترانزیستورهای IGBT و MOSFET در مبدل‌های سوئیچینگ آسیب‌پذیرترین اجزای مبدل هستند که تهدیدی بالقوه برای قابلیت اطمینان می‌باشند. از آنجایی که کلیدها نقش 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 [۱۲].

روش‌های مختلفی به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های قدرت [۱۳-۱۴] ارائه شده‌اند. مدل مارکوف به‌عنوان یک راه‌حل برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک - قدرت و ارزیابی سیستم‌هایی با قابلیت تحمل‌پذیری خطا، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. با استفاده از این مدل می‌توان بسیاری از ویژگی‌های سیستم با قابلیت افزونگی مانند تعداد خرابی‌ها، ناحیه‌ای که خرابی را پوشش می‌دهد و نرخ خرابی که وابسته به حالت‌ها می‌باشد را در آن لحاظ کرد. در [۱۶] قابلیت اطمینان مبدل بوست Interleaved DC-DC با استفاده از مدل مارکوف ارزیابی و نتایج با مبدل بوست معمولی مقایسه شده است. هم‌چنین یک الگوریتم کنترل تطبیقی به‌منظور افزایش طول عمر مبدل DC-DC با حفظ راندمان بالا و کاهش هزینه طراحی شده است. نتایج به‌دست آمده، عملکرد بهینه این روش کنترلی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که افزایش MTTF موجب کاهش

علائم و اختصارات

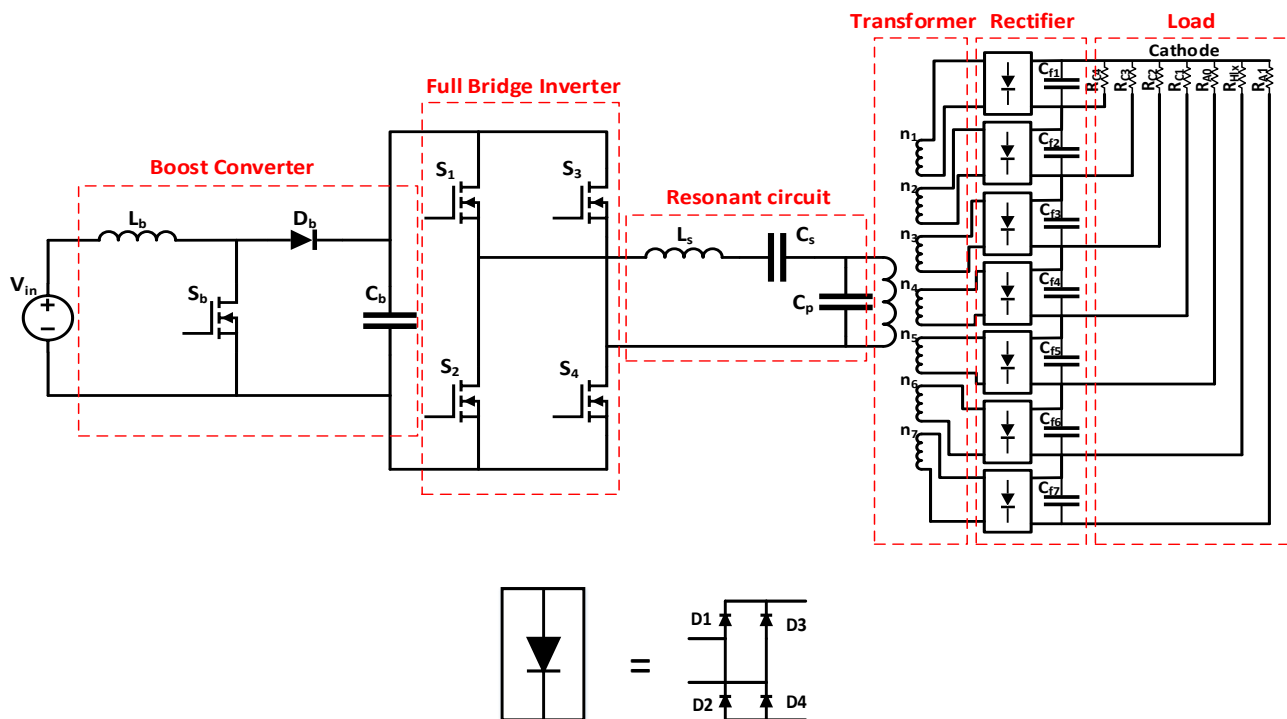
C_b	خازن خروجی مبدل Boost
$C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}, C_{f4}, C_{f5}, C_{f6}, C_{f7}$	خازن فیلتر خروجی
C_p, C_s	خازن‌های مبدل رزونانسی
D	دوره کاری (Duty Cycle)
D_b	دیود Boost
f_{sb}	فرکانس کلیدزنی Boost
f_s	فرکانس کلیدزنی Full Bridge
$I_{C4}, I_{C3}, I_{C2}, I_{C1}, I_{A0}, I_{Hlx}, I_{A1}$	جریان‌های بار خروجی
I_{Ls}	جریان خروجی اینورتر
L_b	سلف Boost
L_m	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی
L_s	سلف مبدل رزونانسی
$n, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$	نسبت ترانسفورماتور
P_{con}	توان تلفاتی هدایتی مسیر
P_D, P_{Db}, P_{Dr}	توان‌های تلفاتی دیودهای مبدل
P_{loss}	توان تلفاتی کل
$P_S, P_{Sb}, P_{S-con}, P_{S-sw}$	توان‌های تلفاتی کلیدهای مبدل
$P_T, P_{T-h}, P_{T-e}, P_{T-con}$	توان‌های تلفاتی ترانسفورماتور
P_{out}	توان خروجی
$R_{C4}, R_{C3}, R_{C2}, R_{C1}, R_{A0}, R_{Hlx}, R_{A1}$	مقاومت‌های بار خروجی مبدل
S_b	کلید مبدل Boost
S_1, S_2, S_3, S_4	کلیدهای اینورتر
V_b	ولتاژ خروجی Boost
$V_{C4}, V_{C3}, V_{C2}, V_{C1}, V_{A0}, V_{Hlx}, V_{A1}$	ولتاژهای خروجی مبدل
V_{in}	ولتاژ ورودی
V_{inv}	ولتاژ خروجی اینورتر
V_{out}	ولتاژ خروجی
V_{ref}	ولتاژ مرجع
η	بازده مبدل

مقدمه

امروزه کاربرد منابع تغذیه ولتاژ بالا در صنایع مختلف بسیار گسترده شده است. از جمله این کاربردها می‌توان به آرایه‌های فوتولتائیک [۱]، رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک [۲]، منابع تغذیه اشعه X و لیزر [۳]، مدولاتورهای لامپ‌های خالاً [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

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 می‌باشد. شکل ۱ نمای 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 به‌عنوان ورودی تابع هدف تعیین می‌شوند تا به کمک آنالیز حساسیت پارامترهایی که دارای حساسیت پایینی هستند و تغییراتشان روی تابع هدف تأثیر عمده ندارد، حذف شوند. همچنین پارامترهای الگوریتم NSGA-II شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق متغیرهای مدار، مشخص می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم NSGA-II، مقادیر بهینه (در بخش نتایج آورده شده است) المان‌های مدار جهت بهبود دو کمیت راندمان و قابلیت اطمینان، به‌دست می‌آیند.

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 تأثیر خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز المان‌های مدار در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی تأثیرات 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 ریزشیکه هیبریدی AC/DC معرفی و توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) بهینه شده است.



شکل ۱ - مدار مبدل ولتاژ بالای مورد استفاده در ماهواره

Figure 1- High voltage converter circuit used in the satellite

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 کلیدها شامل تلفات هدایتی و کلیدزنی
- تلفات ترانسفورماتور شامل تلفات هیستریزس 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 کلیدها:

تلفات هدایتی کلیدها از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$P_{S-con} = R_{on} I_{rms}^2 \quad (1)$$

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

تلفات کلیدزنی از انتگرال‌گیری از حاصل ضرب جریان و ولتاژ کلید در طول زمان انجام سوئیچینگ به دست می‌آید. رابطه زیر یک رابطه تقریبی برای محاسبه این تلفات است:

$$P_{S-sw} = \frac{1}{6} V_{on} I_{on} t_{on} f_s + \frac{1}{6} V_{off} I_{off} t_{off} f_s \quad (2)$$

در رابطه فوق V_{off} و I_{off} به ترتیب ولتاژ کلید بعد از خاموش شدن و جریان کلید قبل از خاموش شدن هستند. V_{on} و I_{on} به ترتیب ولتاژ کلید قبل از روشن شدن و جریان کلید بعد از روشن شدن هستند. t_{on} و t_{off} طول زمان روشن و خاموش شدن کلید و f_s فرکانس کلیدزنی کلیدها هستند.

تلفات کل هر کلید از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_S = P_{S-con} + P_{S-sw} \quad (3)$$

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

تشریح ساختار مبدل مورد بررسی

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 جمع می‌کند 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].

شکل ۱ ساختار ارائه شده در این مقاله به عنوان منبع تغذیه TWTA استفاده شده در فرستنده ماهواره را نشان می‌دهد. 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 جمع عناصر پراکندگی برای کاهش تلفات کلیدزنی توسط کلیدزنی نرم و افزایش بازده و یک ترانسفورماتور و یکسوساز خروجی می‌باشد (شکل ۱). مدار این شکل از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

منبع تغذیه ورودی: از آنجایی که منبع ورودی مبدل، پل‌های

خورشیدی و باتری می‌باشد، منبع تغذیه ورودی یک منبع تغذیه DC متغیر است.

مبدل Boost: ولتاژ منبع تغذیه ورودی مبدل از ۲۲ تا ۴۴ ولت

متغیر است. بنابراین برای تثبیت ولتاژ از یک مبدل Boost استفاده شده است. کنترل این مبدل به روش PWM که ولتاژ خروجی مبدل را تنظیم می‌کند و همچنین استفاده از این مبدل باعث کاهش ریپل جریان ورودی می‌شود.

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 می‌شود. کلیدهای اینورتر تمام پل به نحوی کنترل می‌شوند که ولتاژ خروجی مبدل را ثابت و در یک مقدار مشخص تثبیت کند. این کنترل بر اساس شیفت فاز انجام می‌شود.

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

تلفات ترانسفورماتور:

تلفات هیستریزیس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{T-h} = K_h f_s B_m^{1.6} \quad (۴)$$

که در این رابطه K_h ثابت هیستریزیس، f فرکانس و B_m چگالی شار بیشینه هسته است.

تلفات جریان گردابی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{T-e} = K_e f_s^2 B_m^2 \quad (۵)$$

تلفات هدایتی ترانسفورماتور نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{T-con} = R_T I_{rms}^2 \quad (۶)$$

در نتیجه تلفات کل ترانسفورماتور را میتوان این گونه بیان کرد:

$$P_T = P_{T-h} + P_{T-e} + P_{T-con} \quad (۷)$$

تلفات دیود:

رابطه زیر میزان تلفات دیود را به دست می‌دهد:

$$P_D = V_{on} I_{avg} + R_{on} I_{rms}^2 \quad (۸)$$

از تلفات Reverse Recovery دیودها صرف نظر می‌کنیم.

تلفات هدایتی مسیرها و سلفها:

تلفات هدایتی برای سلف، مسیر هدایت جریان و بقیه المان‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{con} = R I_{rms}^2 \quad (۹)$$

تلفات کل مبدل از جمع تلفات قسمت‌های مختلف محاسبه می‌شود:

$$P_{loss} = 4P_S + P_{Sb} + P_T + P_{Db} + P_{Dr} \quad (۱۰)$$

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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (۱۱)$$

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک-قدرت را می‌توان به صورت احتمال عملکرد رضایت‌بخش 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 می‌شود. 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 می‌کند.

(ب) حالت کاهش یافته: در این حالت، یک یا چند المان در مبدل با خطاهای OC یا SC مواجه هستند و مبدل می‌تواند با ظرفیت عملیاتی کاهش یافته به کار خود ادامه دهد، توان خروجی کاهش می‌یابد و تنش‌های وارده بر روی المان‌های مبدل در مقایسه با حالت سالم افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، مبدل با قطع کامل توان خروجی مواجه نمی‌شود، بلکه توان خروجی کاهش می‌یابد.

(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 می‌دهد.

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 می‌شود. در این مدل، وضعیت فعلی مبدل فقط به حالت قبلی مربوط می‌شود و هیچ ارتباطی با حالت‌های قبل تر ندارد. حالت اول و آخر به عنوان حالت‌های سالم و جاذب تعیین می‌شود و حالت‌های ۲-۴ حالت‌های کاهش یافته هستند.

در شکل ۲، λ_{ij} نرخ خرابی مبدل از وضعیت i به j است که در جدول ۱ مشخص شده است. در این جدول، λ_{S1} ، λ_{Co} ، λ_{Ci} ، λ_{Lo} ، λ_{Li} ، λ_{D} و λ_{T} به ترتیب نرخ خرابی اندوکتانس ورودی، اندوکتانس خروجی، خازن لینک DC، خازن فیلتر خروجی، کلید ماسفت مبدل اول، کلید ماسفت مبدل دوم، ترانسفورمر و دیود است که معادلات آن از راهنمای استاندارد نظامی (MIL-HDBK-217) استخراج شده است. همچنین ضرایب عددی در هر رابطه نشان دهنده تعداد المان‌های درگیر در خطا است. در این مقاله احتمال خطای اتصال کوتاه کلید و دیود به ترتیب α_D و α_S فرض شده است. به همین ترتیب، احتمال خطای مدار باز کلید و دیود به ترتیب $1 - \alpha_D$ و $1 - \alpha_S$ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به مشخصه ذاتی المان‌های پسیو مدار، فقط خطای اتصال کوتاه برای آنها در نظر گرفته شده است. طبق آمار و ارقام تجربی، احتمال خطای اتصال کوتاه در ادوات نیمه هادی الکترونیک-قدرت بیشتر از خطای مدار باز است. در نتیجه، احتمال خطای اتصال کوتاه

جدول ۱- 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}	$\lambda_{45} = \lambda_{Lb} + \alpha_s\lambda_{sb} + (1 + \alpha_D)\lambda_D$ $+ \lambda_{cb}$ $+ (2 + 2\alpha_s)\lambda_s$ $+ (2 + \alpha_D)\lambda_D$ $+ \lambda_{LS} + \lambda_{CS} + \lambda_T$ $+ 7\lambda_{c out}$

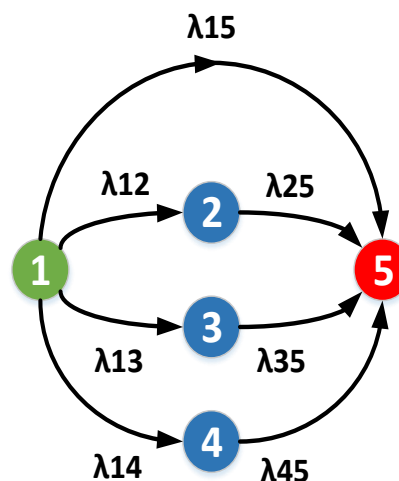
$$R(t) = e^{\lambda_{11}t} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11} - \lambda_{22}}(e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{22}t}) + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{11} - \lambda_{33}}(e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{33}t}) + \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{11} - \lambda_{44}}(e^{\lambda_{11}t} - e^{\lambda_{44}t}) \quad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

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 می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

برابر $0.7/19$ در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل مارکوف پیشنهادی در شکل ۲، قابلیت اطمینان طبق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$R(t) = \sum_{i=1}^s P_i(t) \quad (12)$$

که $P_i(t)$ احتمال حالت عملیاتی i ام و s تعداد کل حالات عملیاتی سالم و کاهش یافته است که در این مقاله برابر با ۴ می‌باشد.



شکل ۲- گراف قابلیت اطمینان اجزا مختلف مدار.

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

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

$$\frac{d}{dt}[P_1(t) \dots P_{4+1}(t)] = [P_1(t) \dots P_{4+1}(t)] \times \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & 0 & \lambda_{25} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در ماتریس فوق، λ_{ij} 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 به عنوان حالت اولیه، $P(t=0) = [1, 0, 0, 0, 0]$ ، تابع قابلیت اطمینان به صورت زیر بیان می‌شود.

قابلیت اطمینان و راندمان مبدل، عددی بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود. ضرایب وزنی بیانگر این هستند که کدام متغیر تابع هدف از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجایی که کاربرد منبع تغذیه مورد نظر در سامانه‌های 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 ۰/۶ و ۰/۴ انتخاب شدند. در ادامه روند بهینه‌سازی، الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا بتواند پارامترهای بهینه مدار را پیدا کند.

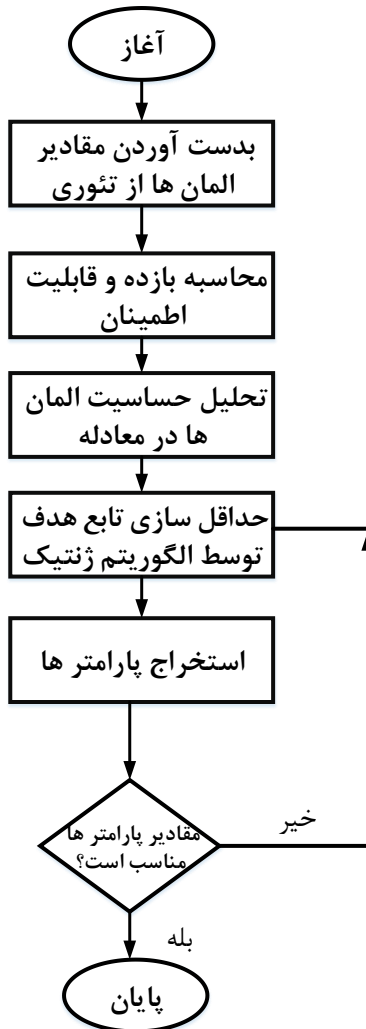
$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{-1}{\lambda_{11}} + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11} - \lambda_{22}} \left(\frac{1}{\lambda_{22}} - \frac{1}{\lambda_{11}} \right) + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{11} - \lambda_{33}} \left(\frac{1}{\lambda_{33}} - \frac{1}{\lambda_{11}} \right) + \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{11} - \lambda_{44}} \left(\frac{1}{\lambda_{44}} - \frac{1}{\lambda_{11}} \right) \quad (14)$$

بهینه‌سازی مبدل با الگوریتم پیشنهادی

طراحی مبدل الکترونیک-قدرت بر اساس انتخاب خازن‌ها، اندوکتانس‌ها، 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 می‌شود، 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 می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از طراحی اولیه مبدل و محاسبه مقدار المان‌های 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 می‌شود 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 می‌شود. الگوریتم NSGA-II برای حل توابع هزینه چند هدفه طراحی شده است. اصول عملکردی NSGA-II بر اساس تغییر متغیرهای بهینه‌سازی با عملگرهای تقاطع و جهش و انتخاب جمعیت نسل بعدی است. در واقع پارامترهایی مثل تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق المان‌های مدار، قابل تغییر است. متغیرهای مبدل نظیر مقدار اندوکتانس و خازن‌ها، فرکانس سوئیچینگ مبدل اول و دوم، ولتاژ لینک DC و نسبت تبدیل ترانسفورمر با کمینه کردن تابع هدف زیر بهینه می‌شوند:

$$OF = w_1(MTTF_d - MTTF_c) + w_2(1 - \eta) \quad (15)$$

در رابطه ۱۵ مقدار $MTTF_d$ مدت زمان مورد انتظار عملکرد بدون خرابی مبدل است که ۴۰۰۰۰ ساعت انتخاب شده است و $MTTF_c$ 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 w_1 و w_2 به‌ترتیب تابع وزنی $MTTF$ و راندمان هستند و بسته به توازن بین



شکل ۳- فلوچارت طراحی و بهینه‌سازی الگوریتم

Figure 3- The flowchart of design and optimization algorithm

نتایج شبیه‌سازی

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

شکل‌های ۵ تا ۸ منحنی قابلیت اطمینان را برای پارامترهای مختلف مبدل نشان می‌دهد. این منحنی‌ها برای پارامترهای دوره‌کاری (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، ۱۱۰ و ۱۲۰ کیلوهرتز رسم شده است. همان‌گونه 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 پارامترها به‌دست آمده از الگوریتم برابر مقادیر به‌دست آمده در جدول ۲ می‌باشند. همان‌گونه که از شکل‌های ۵ تا ۸ مشخص است دوره کاری و توان خروجی تأثیر بیشتری را بر تغییر عملکرد قابلیت اطمینان می‌گذارند.

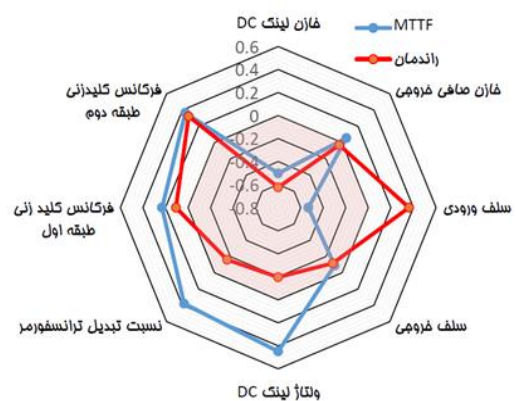
جدول ۲ - مقدار پارامترهای بهینه شده

Table 2- The values of optimized parameters

پارامتر	علامت	مقدار
ولتاژ ورودی	V _{in}	۲۶-۴۴ V
سلف Boost	L _b	۱۴۰ μH
ولتاژ خروجی Boost	V _b	۵۰ V
فرکانس کلیدزنی Boost	f _{sb}	۱۱۵ kHz
خازن خروجی مبدل Boost	C _b	۹۵ μF
فرکانس کلیدزنی Full Bridge	f _s	۹۰ kHz
سلف مبدل رزونانسی	L _s	۴۶ μH
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی	L _m	۹۰۰ μH
خازن سری مبدل رزونانسی	C _s	۶۷ nF
خازن موازی مبدل رزونانسی	C _p	۱۰ nF
نسبت ترانسفورماتور	n ₁ , n ₂ , n ₃ , n ₄ , n ₅ , n ₆ , n ₇	۱۸, ۳۸/۹, ۱۰, ۱۴/۹, ۳۲/۱, ۱۶/۲, ۳/۳
خازن فیلتر خروجی	C _{f1} , C _{f2} , C _{f3} , C _{f4} , C _{f5} , C _{f6} , C _{f7}	۹۵ nF
ولتاژهای خروجی (نسبت به Cathode)	V _{C4} , V _{C3} , V _{C2} , V _{C1} , V _{A0} , V _{Hlx} , V _{A1}	۸۸۰, ۳۷۸۰, ۳۳۷۰, ۴۰۰۰, ۵۵۷۰, ۶۲۶۰, ۶۴۳۰ V
جریان‌های بار خروجی	I _{C4} , I _{C3} , I _{C2} , I _{C1} , I _{A0} , I _{Hlx} , I _{A1}	۳ m, ۷ m, ۱۶ m, ۱۵ m, ۲۵μ, ۳m, ۴۸μA
توان خروجی	P _{out}	۱۵۰ W

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 تأثیر را روی تابع هدف دارند. همچنین افزایش مقدار خازن لینک DC و اندوکتانس ورودی، بیشترین تأثیر را بر مولفه MTTF تابع هدف دارند. تحلیل بیانگر آن است که فیلتر خازنی و اندوکتانس ترانسفورمر مبدل تأثیر چندانی روی تابع هدف ندارد. لذا از این دو المان در الگوریتم بهینه‌سازی صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه پارامترهای اندوکتانس ورودی، خازن لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورمر، ولتاژ لینک DC و فرکانس کلید زنی مبدل اول و دوم به‌عنوان 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 متغیرهای ورودی تابع هدف تعیین می‌شود. سپس با انتخاب ضرایب وزنی برای راندمان و MTTF، الگوریتم NSGA-II اجرا شده و مقادیر بهینه مدار استخراج می‌شوند.

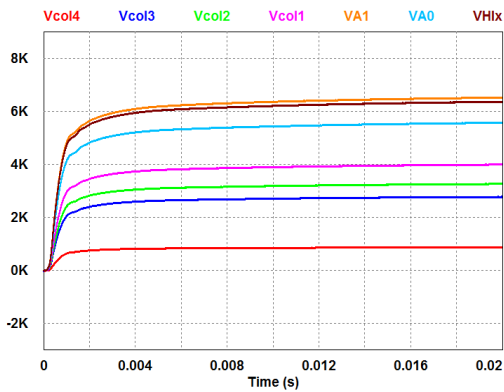
جدول ۲ مقدار پارامترهای بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این طراحی مقادیر بهینه‌سازی شده، MTTF ۲۰۰۰۰ ساعت و راندمان ۹۱٪ در حالت نامی برای مبدل به‌دست می‌آید که نشان دهنده افزایش قابلیت اطمینان با حفظ راندمان بالا است. از آنجا که تابع هدف شامل دو مولفه راندمان و قابلیت اطمینان می‌باشد بنابراین شکل ۴ آنالیز حساسیت این دو پارامتر را با توجه به تغییرات المان‌های 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)

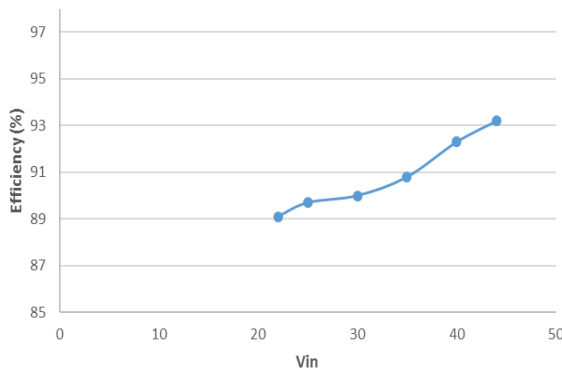
لازم به‌ذکر است که احتمال خطای اتصال کوتاه برای کلید ماسفت و دیود برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی و روند بهینه‌سازی مبدل توسط نرم افزار Matlab انجام شده است.



شکل ۹ - شکل موج ولتاژهای خروجی مبدل

Figure 9- Output voltage waveforms of converter

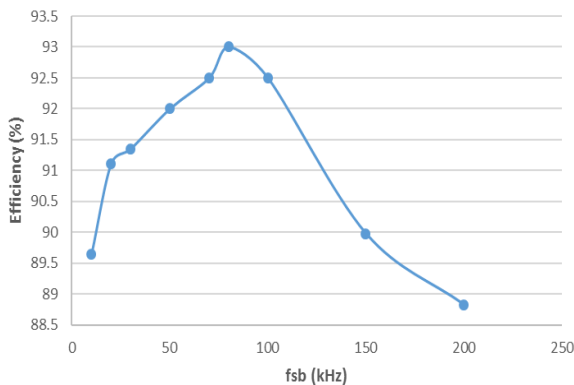
نمودار بازده مبدل نسبت به ولتاژ ورودی و فرکانس کاری در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۰ - نمودار بازده مبدل نسبت به ولتاژ ورودی

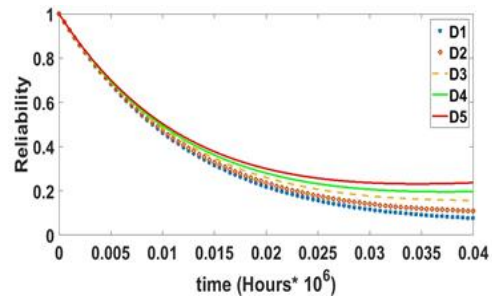
Figure 10- Converter efficiency vs. input voltage

همان طور که در شکل ۱۰ مشخص است هرچه اختلاف ولتاژ بین ورودی و خروجی مبدل Boost بیشتر باشد، تلفات در مبدل نیز بیشتر است. در نتیجه بازده بیشینه در بیشترین ولتاژ ورودی حاصل می گردد.



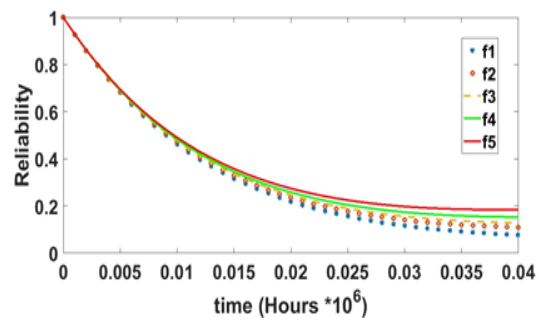
شکل ۱۱ - نمودار بازده مبدل نسبت به فرکانس کلیدزنی

Figure 11- Converter efficiency vs. switching frequency



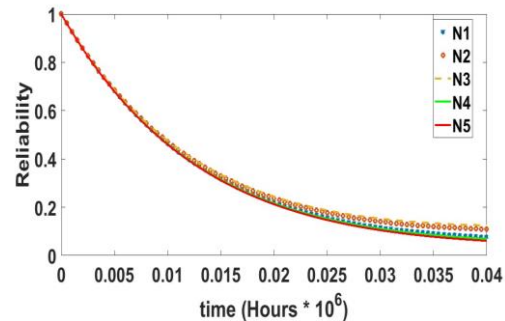
شکل ۵ - نمودار قابلیت اطمینان برای دوره کاری های مختلف

Figure 5- The reliability curves of different duty cycles



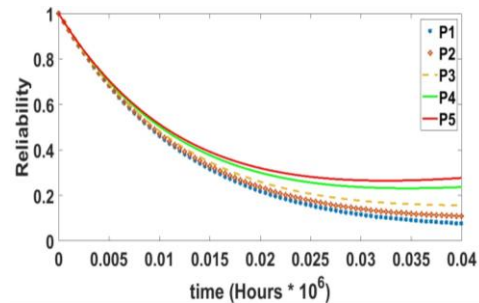
شکل ۶ - نمودار قابلیت اطمینان برای فرکانس کلید زنی مختلف

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 ۸ - نمودار قابلیت اطمینان برای توان های مختلف.

Figure 8- The reliability curves of different powers

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

- [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, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2286832>.
- [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, <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101865>.
- [11] S. A. Q. Mohammed and J. W. Jung, "A state-of-the-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, <https://doi.org/10.1109/24.877336>.
- [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, <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.921388>.
- [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*

نتیجه گیری

هدف این مقاله بهینه‌سازی 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 می‌باشد. در این مقاله تابع هزینه شامل دو بخش بازدهی و قابلیت اطمینان می‌باشد که دو پارامتر مهم در منابع تغذیه سازه‌های فضایی به حساب می‌آیند. مقدار امان‌های مبدل در بازه‌هایی متناسب با مقدار به دست آمده در تئوری در نظر گرفته می‌شوند سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تابع هدف معادله ۱۵ مورد تحلیل قرار می‌گیرد و هدف مینیمم کردن این تابع می‌باشد. مقادیر متناظر با تابع هدف مینیمم برای مدت زمان اولین خرابی MTTF در حدود ۲۰۰۰۰ ساعت و مقدار بازدهی ۹۱ درصد می‌باشد، همچنین مقادیر به دست آمده برای امان‌های 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, <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2208438>.
- [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, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2405471>.
- [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, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.813762>.
- [5] S. H. Ahn, H. J. Ryoo, J. W. Gong and S. R. Jang, "Low-ripple 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, <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2333813>.
- [6] X. Wang, W. Yang, and D. Liang, "Multi-objective robust optimization of hybrid AC/DC distribution networks considering flexible interconnection devices," *IEEE*

- [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, <https://doi.org/10.1049/joe.2018.5043>.
- [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>.
- [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, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971837>.
- [18] H. Tarzamani, 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, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060950>.
- and Expo (ITEC)*, 2018, pp. 280-285, <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450102>.