



طراحی و بهینه‌سازی منبع تغذیه AC/DC دو طبقه مبتنی بر افزایش قابلیت اطمینان برای تغذیه هواپیما

سیدمهدی نوری^۱، مهدی عالمی رستمی^{۲*}، قاسم کاچه^۳

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

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

۳- استادیار، پژوهشگاه سیستم‌های هوایی پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

* نویسنده مخاطب: alami@ari.ac.ir

در این مقاله بازده و قابلیت اطمینان مبدل الکترونیکی قدرت AC/DC دو طبقه با بکارگیری الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II)، به منظور کمینه‌سازی تابع هدف انجام می‌شود. متغیرهای تابع هدف، بازدهی و قابلیت اطمینان می‌باشند. برای ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده می‌شود و در آن خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز برای المان‌های مدار در نظر گرفته می‌شود. همچنین نرخ خرابی المان‌های مدار به کمک معادلات موجود در استاندارد نظامی (MIL-HDBK-217)، محاسبه می‌گردد. برای بهینه‌سازی ابتدا متغیرهای ورودی الگوریتم ژنتیک شامل مقدار اندوکتانس‌ها و خازن‌ها، فرکانس سوئیچینگ هر طبقه، نسبت تبدیل ترانسفورماتور و ولتاژ لینک DC به عنوان ورودی تابع هدف تعیین می‌شوند تا به کمک آنالیز حساسیت پارامترهایی که تغییراتشان روی تابع هدف تاثیر عمده ندارد، حذف شوند. سپس پارامترهای الگوریتم NSGA-II شامل تعداد تکرار، جمعیت و احتمال تقاطع و جهش برای محاسبه دقیق متغیرهای مدار، تعیین شده و ارزیابی قابلیت اطمینان در قالب میانگین زمان تا خرابی (MTTF) با در نظر گرفتن پارامتر بازدهی صورت می‌پذیرد. نتایج بیانگر افزایش قابلیت اطمینان با حفظ بازدهی بالا برای مبدل است.

واژه‌های کلیدی: مبدل AC-DC، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چند هدفه، قابلیت اطمینان، مدل مارکوف

Design and Optimization of Two-stage AC/DC Power Supply Based on Increasing Reliability for Aircraft Power Supply

S. M. Nori¹, M. Alami Rostami^{2*}, Gh. Kahe³

1 PhD. 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

3 Assistant Professor, Air Systems Research Institute, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author: alami@ari.ac.ir

In this paper, the efficiency and reliability of the two-stage AC/DC power electronic converter has been optimized for use in aircraft systems. The optimization is done using multi-objective genetic algorithm (NSGA-II), in order to minimize the objective function. The objective function variables are efficiency and reliability. Markov model is used to evaluate reliability, in which short circuit and open circuit faults are considered for circuit elements. Also, the failure rate of circuit elements using the equations of the military standard (MIL-HDBK-217), has been calculated. For optimization, The value of inductances and capacitors, the switching frequency of each stage, the transformer turn ratio and the DC link voltage are determined as the input of the objective function, and then sensitivity analysis is performed to eliminate any parameters that are not sensitive to the objective function. Then NSGA-II algorithm parameters including iteration count, population, mutation and crossover probabilities are defined to calculate circuit parameters and reliability evaluation is done in form of mean time to failure (MTTF) considering efficiency parameter. The results indicate that the converter has improved reliability while maintaining high efficiency.

Keywords: AC-DC converter, Genetic Algorithm, Multi-Objective Optimization, Reliability, Markov model

علائم اختصاری

C_o	خازن فیلتر خروجی طبقه دوم
C_i	خازن لینک DC
D	دوره کاری (Duty Cycle)
D	دیود
f_1	فرکانس کلیدزنی طبقه اول
f_2	فرکانس کلیدزنی طبقه دوم
L_i	اندوکتانس Boost طبقه اول
L_m	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی
L_o	اندوکتانس طبقه دوم
N_p/N_s	نسبت ترانسفورماتور
P_{con}	توان تلفاتی هدایتی مسیر
P_D	توان‌های تلفاتی دیود مبدل
P_{loss}	توان تلفاتی کل
P_S, 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_o	مقاومت‌های بار خروجی مبدل
V_{in}	ولتاژ ورودی
V_{out}	ولتاژ خروجی
V_{ref}	ولتاژ مرجع
η	بازدهی مبدل

۱ مقدمه

مبدل‌های سوئیچینگ AC/DC به طور گسترده در کاربردهای مختلفی نظیر منابع تغذیه بدون وقفه، سیستم‌های با انرژی تجدیدپذیر، درایور ماشین‌های الکتریکی، سیستم‌های مخابراتی و هواپیماها بکار می‌روند. شاخص‌های اصلی برای ارزیابی عملکرد این مبدل‌ها، بازدهی و قابلیت اطمینان است [۱].

در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی بازدهی مبدل‌های سوئیچینگ AC/DC به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته است و استراتژی‌های مختلفی برای افزایش بازدهی مبدل و در نتیجه بهبود کارایی کل سیستم پیشنهاد کرده‌اند [۲، ۴]. در برخی از مقالات روی توپولوژی‌های سخت افزاری جدید برای بهبود بازدهی مبدل تمرکز شده است. هدف بیشتر این تحقیقات، کاهش تلفات المان‌های مدار به منظور بهبود بازدهی مبدل می‌باشد [۵، ۶].

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 هواپیما، استفاده از منبع تغذیه با قابلیت اطمینان بالا بسیار حیاتی است. زیرا منابع تغذیه وظیفه تامین توان الکتریکی مصرفی مورد نیاز کل سیستم را بر عهده دارند و در صورت خرابی، باعث از کار افتادن کل سیستم می‌شود [۷]. بنابراین، همواره تلاش‌هایی برای بهبود قابلیت اطمینان این مبدل‌ها صورت گرفته است. در [۸، 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 به منظور استفاده در ایستگاه‌های شارژ EV ارائه شده است. در [۱۱] مقایسه‌ای بین مبدل صنعتی AC/DC با کلیدزنی سخت و کلیدزنی نرم در یک LLC انجام شده است که در آن نشان داده که طول عمر مبدل با کلیدزنی نرم بسیار بیشتر از قابلیت اطمینان مدار با کلیدزنی سخت است. در [۱۲]، بر اساس ایده مدولاسیون تک قطبی، یک استراتژی مدولاسیون برای مبدل AC/DC ارائه شده است که به طور کامل افزایش ولتاژ را حذف می‌کند و عملیات کلیدزنی نرم را تحقق می‌بخشد. این استراتژی مدولاسیون پیشنهادی، عملکرد ایمن و قابل اطمینانی را برای مبدل فراهم می‌کند. همچنین، مقاله [۱۳] نشان داده که ادوات نیمه هادی مانند دیود و ترانزیستورهای IGBT و MOSFET در مبدل‌های سوئیچینگ آسیب پذیرترین 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 عملیات کلیدزنی نرم، قابلیت اطمینان کل مبدل را افزایش داد [۱۴].

روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان از طیف گسترده‌ای برخوردار می‌باشد که در [۱۵، ۱۶] ارائه شده‌اند. مدل مارکوف به عنوان یک راه حل برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت و ارزیابی سیستم‌هایی با قابلیت تحمل پذیری خطا، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. با استفاده از این نگرش 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 لحاظ کرد. در [۱۸] قابلیت اطمینان مبدل بوست Interleaved DC-DC با استفاده از مدل مارکوف چند طبقه ارزیابی شد و نتایج با مبدل بوست معمولی مقایسه شد. همچنین یک الگوریتم کنترل تطبیقی برای افزایش طول عمر مبدل DC-DC با حفظ بازدهی بالا و هزینه کم طراحی شد. نتایج برتری روش کنترلی پیشنهادی را نشان داد، بطوریکه افزایش MTTF موجب کاهش شدید بازدهی نشده است. [۱۹] ساختار DC-DC جدیدی را برای کاربردهای با قابلیت اطمینان بالا را پیشنهاد کرده است. ارزیابی قابلیت اطمینان نیز با استفاده از زنجیره مارکوف انجام شد که بهبود شاخص قابلیت اطمینان و قابلیت تحمل خطا برای مبدل پیشنهادی در پاسخ به خرابی سوئیچ‌ها را نشان داده است.

در مرجع [۲۰] یک مدل مارکوف جامع برای مطالعه عملکرد قابلیت اطمینان مبدل‌های DC-DC ایزوله با مدولاسیون عرض پالس شامل ساختار DC-DC تمام-پل، نیم-پل و پوش-پول پیشنهاد شد که در آن اثر خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز نیز روی اجزای مدار در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی

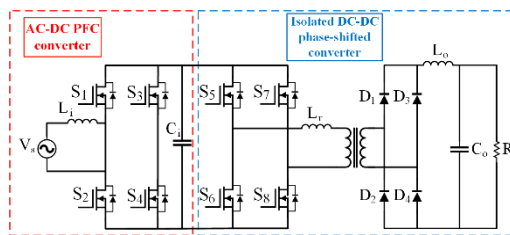
اطمینان تنها معیار کارآمد برای ارزیابی سیستم‌ها نیست. در نتیجه، از پارامتری با عنوان میانگین زمان تا خرابی (MTTF) که در راهنمای استاندارد نظامی (MIL-HDBK-217) بیان شد، استفاده می‌شود [۲۴]. نتایج روش پیشنهادی نشان می‌دهند که افزایش قابلیت اطمینان با حفظ بازدهی بالا برای مبدل AC/DC دو طبقه انجام شده است.

ادامه مقاله به ترتیب ذیل سازماندهی شده است: در بخش دوم طراحی اولیه مبدل انجام می‌شود. در بخش سوم روش محاسبه بازدهی و ارزیابی قابلیت اطمینان و مدل مارکوف مبدل ارائه می‌شود. در بخش چهارم روش بهینه‌سازی و الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش پنجم نیز نتایج شبیه‌سازی مبدل و مقادیر بهینه شده توسط الگوریتم استخراج می‌شود.

۲ طراحی و تعیین پارامترهای مبدل ایزوله

AC/DC دو طبقه

شکل ۱ بلوک دیاگرام مبدل به عنوان منبع تغذیه را در این مقاله نشان می‌دهد. برای طراحی مبدل، باید مشخصات مورد نیاز برای کاربرد مورد نظر را مشخص نمود. مشخصات نامی مبدل مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- بلوک دیاگرام منبع تغذیه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات مبدل دو طبقه AC/DC مورد نیاز

مشخصه	نماد	واحد	مقدار
ولتاژ ورودی نامی	V_s	V	۱۱۵
بازه تغییرات ولتاژ ورودی نامی	-	V	۱۰۵-۱۲۵
فرکانس ورودی	f	Hz	۴۰۰
ضربان جریان ورودی	ΔI_L	A	۳۰٪
توان نامی خروجی	P_o	W	۱۶۰۰
ولتاژ نامی خروجی	V_o	V	۲۸
ضربان ولتاژ خروجی	ΔV_c		۱٪

۱.۲ یکسوساز AC/DC

ساختار یکسوساز کنترل شده طبقه اول در شکل ۲ قابل مشاهده است. طبقه اول یک مبدل AC/DC کنترل شونده از نوع پل کامل بر پایه مبدل بوست است که وظیفه تصحیح ضریب توان را دارد و شامل دو

تاثیرات دوره کاری، توان خروجی، نسبت تبدیل ترانسفورماتور و بهره ولتاژ روی مبدل در مد گسسته و پیوسته ارزیابی شد. نتایج حاصل روی سه مبدل نشان داد توان خروجی رابطه معکوس با عملکرد قابلیت اطمینان دارد.

تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم روی مبدل AC/DC انجام شده است. در [۲۱] بازدهی، کیفیت توان، ابعاد و هزینه ساخت به عنوان پارامترهای تابع هدف برای مبدل AC/DC در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی به کمک الگوریتم مدرن چند هدفه انجام شد. در [۲۲] یک ساختار ریزشبه‌هیبریدی AC/DC معرفی و توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامعولب (NSGA-II) بهینه شد. در [۲۳] یک مبدل AC/DC تک‌فاز پیشنهاد شد و با استفاده از الگوریتم کنترل جدید، بطور همزمان ضریب توان بهبود پیدا کرد و توان خروجی نیز کنترل شد.

در مراجع مطالعه شده بطور همزمان بهینه‌سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک و ارزیابی قابلیت اطمینان به کمک مدل مارکوف روی مبدل AC/DC انجام نشده است. در این مقاله یک مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله طراحی می‌شود و به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه، مقدار امان‌های مدار به منظور افزایش بازدهی و قابلیت اطمینان مبدل، بهینه می‌شود. همچنین برای ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده می‌شود و در آن اثر خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز روی اجزای مدار در نظر گرفته می‌شود.

ساختار منبع تغذیه مورد نظر بدین صورت است که در طبقه اول از یک یکسوساز قدرت کنترل شده AC/DC پل کامل به همراه اندوکتانس بوست ورودی برای دستیابی به ضریب توان بالا استفاده می‌شود. در طبقه دوم نیز یک مبدل DC/DC پل کامل ایزوله به همراه مدولاسیون PWM شیفت فاز و حلقه کنترل ولتاژ استفاده می‌شود. پس از طراحی اولیه، دو کمیت بازدهی و قابلیت اطمینان به عنوان متغیرهای تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. سپس، پارامترهای مدار نظیر فرکانس سوئیچینگ هر طبقه، نسبت تبدیل ترانسفورماتور، ظرفیت خازن‌های طبقه اول و دوم، مقدار اندوکتانس طبقه 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 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، بهترین مقدار امان‌های مدار جهت بهبود دو کمیت بازدهی و قابلیت اطمینان، بدست می‌آیند.

برای ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده می‌شود که در آن خطاهای اتصال کوتاه (SC) و مدار باز (OC) برای کلیدها و دیوهای مدار در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که قابلیت

۲.۲ مبدل DC/DC تمام موج

بلوک DC-DC شامل یک مبدل تمام-پل ایزوله با مدولاسیون Phase Shifted PWM به منظور دستیابی به تقارن بیشتر در مبدل پل کامل و تنظیم دقیق ولتاژ خروجی می‌باشد. ایزولاسیون در این طبقه توسط ترانسفورماتور صورت می‌پذیرد. حلقه کنترلی این بلوک از نوع فیدبک ولتاژ بوده که علاوه بر جلوگیری از فرارجهش ولتاژ، سرعت مورد نیاز سیستم در رسیدن به حالت پایدار را تامین می‌نماید.

برای بدست آوردن مقدار اندوکتانس و خازن فیلتر خروجی مبدل DC/DC، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$L_o = \frac{1}{2f_s \Delta i_L} V_{C_{max}} (1 - D_{max}) \quad (۳)$$

$$C_o = \frac{\Delta i_L}{2f_s \Delta V_C}$$

با فرض $\Delta i_L = 30\%$ ، $\Delta V_C = 1\%$ و $V_{C_{max}} = 30\text{ V}$ و $D_{max} = 0.5$ مقادیری به دست می‌آیند که در جدول ۲ خلاصه شده است. یکی از مهم‌ترین المان‌های موجود در مبدل طراحی شده، ترانسفورماتور در طبقه دوم است که نقش مهمی در میزان ابعاد مبدل و چگالی توان آن ایفا می‌کند. رابطه ولتاژ القایی در هر سمت از ترانسفورماتور، نحوه تاثیر ولتاژ القایی بر ابعاد ترانسفورماتور را مشخص می‌نماید. این رابطه برای سمت اولیه ترانسفورماتور به شکل زیر می‌باشد.

$$E_{pr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_{core} N_{pr} A_{core} B_{core} \quad (۴)$$

ترانسفورماتور در فرکانس هسته (f_{core}) معادل فرکانس کلیدزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به رابطه ارائه شده، افزایش فرکانس کلیدزنی به کاهش سطح مقطع هسته ترانسفورماتور (A_{core}) منتج خواهد شد. چگالی شار هسته (B_{core}) نیز از روی نمودار B-H هسته استخراج می‌گردد. با توجه به مقدار ولتاژ هر سمت، تعداد دور اولیه و ثانویه ترانسفورمر قابل محاسبه است که در جدول ۲ گنجانده شده است. بنابراین مقدار پارامترهای اصلی و مورد نیاز مبدل بدست آمده است.

۳ محاسبه بازدهی و ارزیابی قابلیت اطمینان

مبدل AC/DC

۱.۳ محاسبه بازدهی

بازدهی مبدل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} \quad (۵)$$

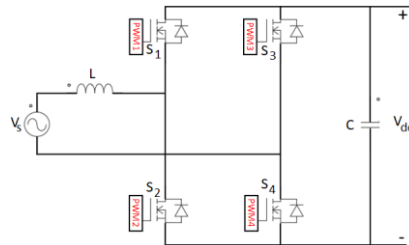
حلقه کنترلی آشناری برای حفظ شکل موج جریان در ورودی است که حلقه داخلی شامل فیدبک جریان است و پاسخ سریعتری نسبت به تغییرات خروجی دارد و حلقه بیرونی فیدبک ولتاژ است که وظیفه تنظیم ولتاژ خروجی این بلوک را به عهده دارد. مقدار اندوکتانس ورودی را می‌توان با استفاده از ریپل جریان اصلی آن به صورت زیر محاسبه کرد [۲۵]:

$$L = \frac{\Delta V_{max} D}{f_s \Delta i_L} \quad (۱)$$

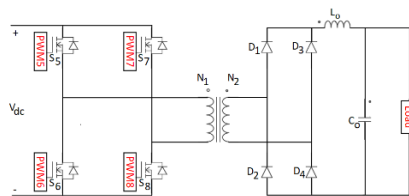
که در آن $\Delta V_{max} = V_{dc} - \sqrt{2}V_s$. همچنین با استفاده از معادله ریپل ولتاژ می‌توان مقدار خازن لینک DC را نیز محاسبه کرد.

$$C = \frac{\sqrt{2}P_{in} D_{max}}{3f_s V_s \Delta V_C} \quad (۲)$$

با فرض $\Delta i_L = 30\%$ ، $\Delta V_C = 2\%$ و $D_{max} = 0.6$ ، مقادیر بدست آمده برای بار اهمی در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۲- ساختار یکسوساز کنترل شده طبقه اول



شکل ۳- ساختار مبدل پل کامل طبقه دوم

جدول ۲- مقادیر محاسبه شده برای مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله

مقدار	واحد	مشخصه
۳۰۰۰	μF	خازن لینک DC
۰/۳۵	mH	اندوکتانس ورودی
۳۰۰	μF	خازن فیلتر خروجی
۶۶	μF	اندوکتانس خروجی
۵۵	kHz	فرکانس کلیدزنی طبقه اول
۶۰	kHz	فرکانس کلیدزنی طبقه دوم
۴	N_p/N_s	نسبت تبدیل ترانسفورمر
۹۰	%	بازدهی طبقه اول
۹۷	%	ضریب توان
۱۵۰۰	hour	MTTF

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 و این امر باعث می‌شود تا همچنان بارهای غیرحساس را تغذیه کند.

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 یا خطاهای OC کلیدهای مکمل و یا دیودها مانند S1-S3 یا D1-D3 مبدل رخ می‌دهد.

با در نظر گرفتن اصول عملکرد مبدل مورد مطالعه در برابر خطاهای مختلف، مدل مارکوف آن در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن پنج حالت برای المان‌های مبدل مشخص می‌شود. حالت اول و آخر به ترتیب عنوان حالت‌های سالم و جاذب تعیین می‌شود و حالت‌های ۲-۴ حالت‌های کاهش یافته هستند. در شکل ۲، λ_{zj} نرخ خرابی مبدل از وضعیت i به j است که در جدول ۳ مشخص شده است. در این جدول، λ_{Li} ، λ_{Lo} ، λ_{Ci} ، λ_{Co} ، λ_{S1} ، λ_{S2} ، λ_{D} و λ_{T} به ترتیب نرخ خرابی اندوکتانس ورودی، اندوکتانس خروجی، خازن لینک DC، خازن فیلتر خروجی، کلید ماسفت طبقه اول، کلید ماسفت طبقه دوم، ترانسفورماتور و دیود است که معادلات آن از راهنمای استاندارد نظامی (MIL-HDBK-217) استخراج شده است.

جدول ۳- معادلات نرخ خرابی برای مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله

نرخ خرابی	معادله
λ_{12}	$4\alpha_s^{oc} \lambda_{S1}$
λ_{13}	$4\alpha_s^{oc} \lambda_{S2}$
λ_{14}	$4\alpha_D^{oc} \lambda_D$
λ_{15}	$\lambda_{Li} + \lambda_{Lo} + \lambda_T + \lambda_{Ci} + \lambda_{Co} + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S1} + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S2} + 4\alpha_D^{sc} \lambda_D$
λ_{25}	$\lambda_{Li} + \lambda_{Lo} + \lambda_T + \lambda_{Ci} + \lambda_{Co} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S1} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S2} + 2\alpha_D^{oc} \lambda_D + 4\alpha_D^{sc} \lambda_D + 3\alpha_s^{sc} \lambda_{S1} + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S2}$
λ_{35}	$\lambda_{Li} + \lambda_{Lo} + \lambda_T + \lambda_{Ci} + \lambda_{Co} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S1} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S2} + 2\alpha_D^{oc} \lambda_D + 4\alpha_D^{sc} \lambda_D + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S1} + 3\alpha_s^{sc} \lambda_{S2}$
λ_{45}	$\lambda_{Li} + \lambda_{Lo} + \lambda_T + \lambda_{Ci} + \lambda_{Co} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S1} + 2\alpha_s^{oc} \lambda_{S2} + 2\alpha_D^{oc} \lambda_D + 3\alpha_D^{sc} \lambda_D + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S1} + 4\alpha_s^{sc} \lambda_{S2}$

برای محاسبه نرخ خرابی قطعات الکترونیکی مبدل، جدول ۴ فاکتورهای مختلفی که روی نرخ خرابی اثر می‌گذارد را نشان می‌دهد که شامل ضریب کیفیت قطعات (π_0)، ضریب محیطی (π_E)، ضریب کاربرد (π_A)، ضریب ساخت (π_E)، ضریب مقاومتی (π_{SR})، ضریب ظرفیت (π_{Cap})، ضریب استرس دیود (π_S)، ضریب

که P_{out} توان خروجی، P_{in} توان ورودی و P_{losses} تلفات مبدل هستند. تلفات در نظر گرفته شده در این مبدل شامل تلفات اهمی سلف ورودی، تلفات اهمی سیم‌پیچی ترانس، تلفات هدایتی و کلیدزنی دیودها و ماسفت‌ها است. تلفات هدایتی کلیدها از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$P_{MOS-con} = R_{on} I_{rms}^2 \quad (6)$$

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

کلید زنی در این مبدل از نوع سخت است و تلفات کلیدزنی از انتگرال گیری حاصل ضرب جریان و ولتاژ کلید در طول زمان انجام سوئیچینگ به دست می‌آید. رابطه زیر یک رابطه تقریبی برای محاسبه این تلفات است:

$$P_{MOS-sw} = \frac{1}{6} V_{on} I_{on} t_{on} f_s + \frac{1}{6} V_{off} I_{off} t_{off} f_s \quad (7)$$

در رابطه فوق V_{on} و V_{off} به ترتیب ولتاژ کلید قبل و بعد از خاموش شدن کلید هستند. I_{on} و I_{off} به ترتیب جریان کلید قبل و بعد از خاموش شدن کلید هستند. t_{on} و t_{off} طول زمان روشن و خاموش شدن کلید و f_s فرکانس کلیدزنی کلیدها هستند. در مورد دیود نیز تلفات هدایت و کلیدزنی آن به ترتیب بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{D-con} = V_f \cdot i_{D,avg} + R_D \cdot i_{D,rms}^2 \quad (8)$$

که V_f ولتاژ هدایت دیود، $i_{D,avg}$ و $i_{D,rms}$ جریان متوسط و موثر دیود و R_D مقاومت دیود در حالت وصل است. V_f و R_D از اطلاعات کارخانه سازنده گرفته می‌شود. از تلفات Reverse Recovery دیودها صرف نظر می‌شود.

۲.۳ ارزیابی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک- قدرت را می‌توان به صورت احتمال عملکرد رضایت‌بخش مبدل برای یک دوره زمانی معین 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 آن، از مدل مارکوف استفاده می‌شود.

با توجه به قابلیت تحمل خطای ذاتی در مبدل مورد نظر، سه حالت عملیاتی اصلی 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 چنین حالتی، 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، به عنوان مثال، توان

T_{HS} ، با تلفات و مساحت هسته رابطه دارد که در جدول ۶ قابل مشاهده است. بنابراین تلفات تقریباً مهمترین عامل تغییر دمای تجهیزات است.

جدول ۴- نرخ خرابی المان‌های مدار

تجهیزات الکترونیکی	نرخ خرابی
کلید قدرت	$\lambda_{MOSFET} = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_Q \pi_E$
دیود	$\lambda_D = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E$
سلف و ترانسفورماتور	$\lambda_{T\&I} = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E$
خازن	$\lambda_C = \lambda_b \pi_T \pi_V \pi_Q \pi_E \pi_{SR} \pi_{Cap}$

استرس ولتاژ خازن (π_V)، مقادیر ضرایب فوق برای مبدل مورد نظر را می‌توان از راهنمای استاندارد نظامی استخراج کرد که در جدول ۵ قابل مشاهده است. یکی از پارامترهای موثر روی نرخ خرابی قطعات الکترونیکی، ضریب دمایی (π_T) است که محاسبه آن به کمک روابط لیست شده در جدول ۶ بدست می‌آید. دمای نقطه اتصال T_J و دمای تجهیز متناسب با توان عبوری از تجهیزات می‌باشد. همچنین T_A دمای محیط، T_C دمای بدنه تجهیز، θ_{JC} مقاومت حرارتی نقطه اتصال تا بدنه و θ_{CA} مقاومت حرارتی نقطه بدنه به محیط است. مقادیر پایه استفاده شده در مقاله مطابق جدول ۵ می‌باشد. در صورت استفاده از هیت سینک، مقاومت حرارتی نقطه تقاطع نسبت به کیس و مقاومت حرارتی کیس نسبت به محیط با مقاومت حرارتی هیت سینک جا به جا خواهد شد. همچنین برای سلف و ترانسفورماتور نیز دمای گرمترین نقطه

جدول ۵- مقادیر پارامتر در نظر گرفته شده برای محاسبات قابلیت اطمینان

تجهیزات الکترونیکی	λ_b	π_A	π_Q	π_E	π_C	π_{SR}	T_A	مقاومت حرارتی نقطه اتصال تا بدنه (C/W)
کلید قدرت	۰/۰۱۲	۱۰	۵/۵	۱	-	-	۲۵	۰/۵
دیود	۰/۰۰۳۸	-	۵/۵	۱	۱	-	۲۵	۱
سلف	۰/۰۰۰۳	-	۱	۱	-	-	۲۵	-
ترانسفورماتور	۰/۰۴۵	-	۱	۱	-	-	۲۵	-
خازن	۰/۰۰۲	-	۱	۱	-	۱	۲۵	-

جدول ۶- ارزیابی ضریب دمایی بر نرخ خرابی اجزای مبدل

تجهیزات الکترونیکی	مدار معادل	تلفات	دمای بدنه تجهیز و نقطه اتصال	ضریب دمایی
کلید قدرت		$P_S^{Loss} = \frac{1}{T_S} \left[\int_0^{T_S} R_{DS(on)} i_s^2(t) dt \right] + [C_0 f_s V_S^2]$	$\begin{cases} T_J = T_C + \theta_{JC} P_S^{Loss} \\ T_C = T_A + \theta_{CA} P_S^{Loss} \end{cases} = \exp \left[-1925 \left(\frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$	
دیود		$P_D^{Loss} = \frac{1}{T_S} \left[\int_0^{T_S} (R_{D,on} i_d^2(t) + V_f i_d(t)) dt \right]$	$\begin{cases} T_J = T_C + \theta_{JC} P_D^{Loss} \\ T_C = T_A + \theta_{CA} P_D^{Loss} \end{cases} \pi_T = \exp \left[-3091 \left(\frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$	
سلف و ترانسفورمر		$P_{Trans}^{Loss} = P_{Ind}^{Loss} = \frac{1}{T_S} \left[\int_0^{T_S} R i^2(t) dt \right]$	$\begin{cases} T_{HS} = T_A + 1.2 \Delta T \\ \Delta T = \frac{125 P_{Trans}^{Loss} \pi_T}{A} \end{cases} = \exp \left[-1276 \left(\frac{1}{T_{HS} + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$	

۲ حالت برای خطای مدار باز کلید قدرت شامل خطای کلیدهای S1- S3 یا S2- S4 می‌باشد. در مدل مارکوف ارائه شده، خطای اتصال کوتاه برای تمام المان‌های مدار در نظر گرفته شد. با توجه به مشخصه ذاتی المان‌های پسیو مدار در برابر خطا، فقط خطای اتصال کوتاه برای آنها در نظر گرفته شد. همچنین، احتمال خطای اتصال کوتاه کلید (α_S^{SC}) و دیود (α_D^{SC}) برابر با ۰٫۵ و احتمال خطای مدار باز کلید (α_S^{OC}) و دیود (α_D^{OC}) برابر با ۰٫۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به

مطابق با جدول ۳، λ_{12} نشان می‌دهد ۴ حالت برای خطای مدار باز کلید قدرت طبقه اول وجود دارد تا مبدل به حالت کاهش یافته (۲) تبدیل شود. در واقع ضریب ۴ همان تعداد المان‌های درگیر در ریسک خطا را نشان می‌دهد. در حالت کاهش یافته (۲)، خطای اتصال کوتاه هر کدام از المان‌های پسیو مدار موجب تغییر حالت مبدل به حالت جاذب (۵) می‌شود. برای کلید قدرت طبقه اول، ۳ حالت برای خطای اتصال کوتاه و ۲ حالت برای خطای مدار باز وجود دارد تا مبدل به حالت کاهش یافته (۵) تبدیل شود.

۴ بهینه‌سازی مبدل با الگوریتم پیشنهادی

طراحی مبدل الکترونیک- قدرت بر اساس انتخاب خازن‌ها، اندوکتانس‌ها، دیودها، کلیدهای قدرت، مشخصات و ابعاد ترانسفورماتور، فرکانس کلیدزنی و مقدار ولتاژ لینک DC طبقه دوم به منظور فراهم کردن شرایط کاری مطلوب است. اگرچه در مقالات روش‌های مختلفی برای طراحی مبدل‌های قدرت استفاده می‌شود، اما تحقیقات محدودی وجود دارد که بازدهی و قابلیت اطمینان را به طور همزمان در روند طراحی در نظر گرفته باشند. در این مقاله، الگوریتمی برای طراحی مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله با بهینه‌سازی بازدهی و قابلیت اطمینان آن ارائه می‌شود که در شکل ۵ به نمایش در آمده 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 خازن طبقه اول و دوم، ولتاژ لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورماتور، و فرکانس کلید زنی طبقه اول و دوم روی بازدهی و قابلیت اطمینان انجام می‌شود تا در نهایت پارامترهایی با حساسیت بالاتر انتخاب شوند. بازدهی و MTTF نیز به ترتیب با استفاده از معادلات (۵) و (۱۲) قابل محاسبه است. در مرحله بعد از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. الگوریتم NSGA-II برای حل تابع هدف‌های چند هدفه پیچیده طراحی شده است. اصل عملکرد NSGA-II بر اساس تغییر متغیرهای بهینه‌سازی با عملگرهای متقاطع 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. متغیر-های مبدل نظیر مقدار اندوکتانس و خازن طبقه اول و دوم، فرکانس سوئیچینگ طبقه اول و دوم، ولتاژ لینک DC و نسبت تبدیل ترانسفورماتور با کمینه کردن تابع هدف زیر بهینه می‌شوند:

$$OF = w_1(MITF_d - MITF_c) + w_2(1 - \eta) \quad (13)$$

که در آن مقدار $MITF_d$ مقدار مورد نظر است که برای ۳۰۰۰۰ ساعت انتخاب شد و $MTBF_c$ که در هر تکرار الگوریتم محاسبه می‌شود. قسمت دوم رابطه (۱۳) نیز به منظور ماکزیمم شدن مقدار بازدهی، همواره باید مینیمم گردد. همچنین W_1 و W_2 به ترتیب تابع وزنی MTTF و بازدهی هستند و بسته به توازن بین قابلیت اطمینان و بازدهی مبدل، بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شوند. ضرایب وزنی بیانگر این هستند که کدام متغیر تابع هدف از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجاییکه کاربرد منبع تغذیه مورد نظر در سامانه‌های هوابیما است، لذا قابلیت اطمینان اهمیت بالاتری نسبت به بازدهی مبدل دارد. در این مقاله ضرایب وزنی قابلیت اطمینان و بازدهی به ترتیب ۰/۴ و ۰/۶ در نظر گرفته شدند. در ادامه روند بهینه‌سازی، الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا بتواند پارامترهای

مدل مارکوف پیشنهادی در شکل ۴، قابلیت اطمینان مبدل ایزوله AC/DC دو طبقه برابر است با:

$$R(t) = \sum_{i=1}^S P_i(t) \quad (9)$$

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

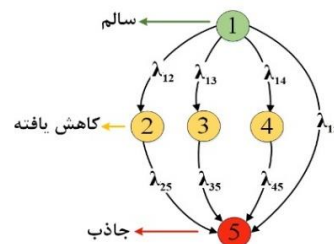
$$\frac{d}{dt} [P_1(t) \dots P_{4+1}(t)] = [P_1(t) \dots P_{4+1}(t)] \times \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & 0 & \lambda_{25} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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، تابع قابلیت اطمینان به صورت زیر بیان می‌شود.

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

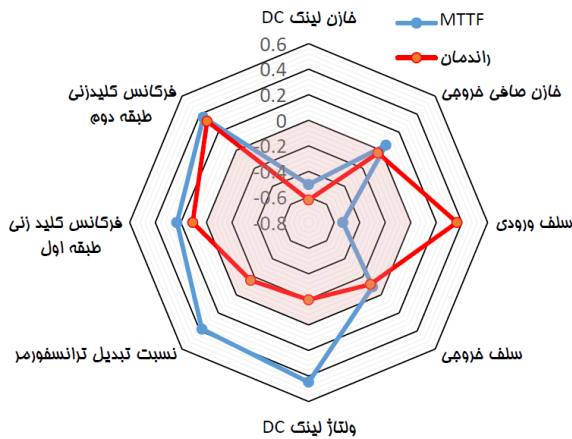
باید توجه داشت که قابلیت اطمینان تنها معیار کارآمد برای ارزیابی مبدل‌های الکترونیک قدرت نیست. در نتیجه، از پارامتری با عنوان میانگین زمان خرابی (MTTF) در مبدل‌های الکترونیک- قدرت با قابلیت تحمل خطا نیز استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

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



شکل ۴- مدل مارکوف برای مبدل ایزوله AC/DC دو طبقه

الگوریتم NSGA-II اجرا شده و مقادیر بهینه مدار استخراج می‌شوند. جدول ۷ پارامترهای بهینه سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این طراحی بهینه سازی شده، MTTF ۳۰۰۰۰ ساعت و بازدهی ۹۱٪ در حالت نامی برای میدل دو طبقه AC/DC ایزوله بدست آمد که نشان دهنده افزایش قابلیت اطمینان با حفظ بازدهی بالا است.



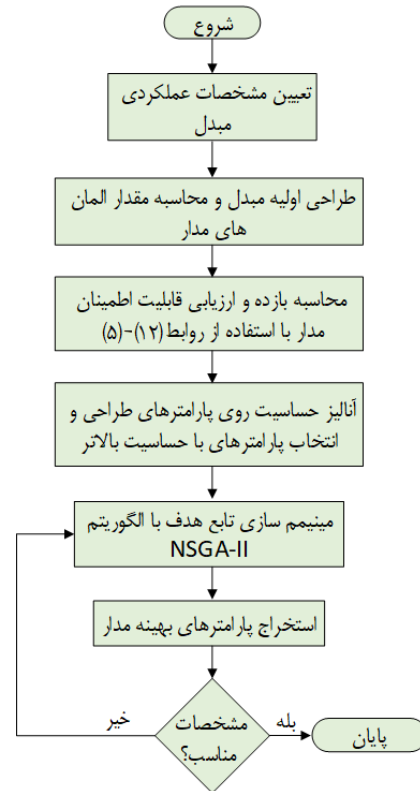
شکل ۶- نمایش راداری آنالیز حساسیت روی مولفه‌های تابع هدف

جدول ۴- پارامترهای بهینه شده برای میدل دو طبقه AC/DC ایزوله

مقدار	واحد	مشخصه
۲۷۴۵	μF	خازن لینک DC
۰/۹۷	mH	اندوکتانس ورودی
۵۰۰	μF	خازن فیلتر خروجی
۵۵/۵	μF	اندوکتانس خروجی
۷۰	kHz	فرکانس کلیدزنی طبقه اول
۵۰	kHz	فرکانس کلیدزنی طبقه دوم
۵	N_p/N_s	نسبت تبدیل ترانسفورمر
۹۱	%	بازدهی در شرایط نامی
۹۹	%	ضریب توان
۳۰۰۰۰	hour	MTTF

شبیه سازی و روند بهینه سازی میدل توسط نرم افزار Matlab انجام شده است. ارزیابی قابلیت اطمینان این میدل در مد DCM انجام شده است. در شکل ۷- الف منحنی قابلیت اطمینان بر حسب توان خروجی برای مدت زمان‌های مختلفی رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان کارکرد میدل، قابلیت اطمینان آن کاهش پیدا می‌کند. قابلیت اطمینان برای میدل با توان نامی ۱۶۰۰ وات و مدت زمان کارکرد ۳۰۰۰۰ ساعت، ۰/۴۲ بدست آمده است. برای بررسی دقیق‌تر، منحنی سه

بهینه مدار را پیدا کند. اگر نتایج رضایت بخش نبود، پارامترهای الگوریتم ژنتیک نظیر تعداد تکرار، تعداد جمعیت و احتمال تقاطع و جهش تغییر داده می‌شود تا در نهایت پاسخ مطلوبی را نتیجه دهد.

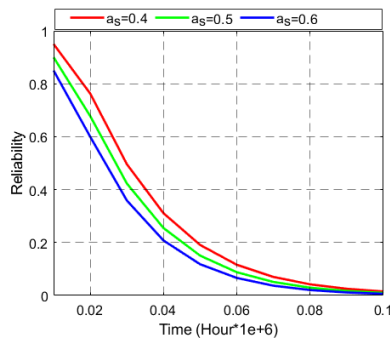


شکل ۵- روند طراحی و بهینه‌سازی میدل

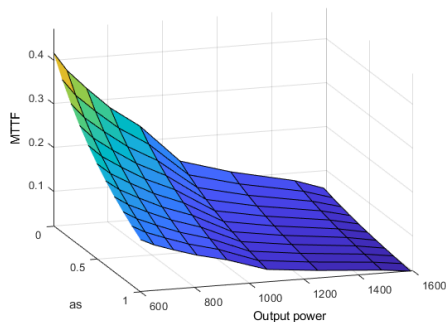
۵ نتایج ارزیابی

برای بررسی اثر تغییرات پارامترهایی نظیر مقدار سلف و خازن طبقه اول و دوم، ولتاژ لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورماتور، و فرکانس کلید زنی طبقه اول و دوم، آنالیز حساسیت روی مولفه‌های تابع هدف انجام می‌شود تا در نهایت پارامترهایی با حساسیت بالاتر انتخاب شوند. نمودار راداری آنالیز حساسیت در شکل ۶ به نمایش در آمده است. مطابق شکل، تغییرات ولتاژ لینک DC و نسبت تبدیل ترانسفورماتور بیشترین تاثیر را روی تابع هدف دارند. همچنین افزایش مقدار خازن لینک DC و اندوکتانس ورودی، بیشترین نسبت معکوس با مولفه MTTF تابع هدف دارند. آنالیز بیانگر آن است که فیلتر خازنی و اندوکتانس در خروجی میدل تاثیر چندانی روی تابع هدف ندارد. لذا از این دو المان در الگوریتم بهینه سازی صرف نظر می‌شود. در نتیجه پارامترهای اندوکتانس ورودی، خازن لینک DC، نسبت تبدیل ترانسفورمر، ولتاژ لینک DC و فرکانس کلید زنی طبقه اول و دوم به عنوان پارامترهای مورد نظر در روند بهینه سازی قرار می‌گیرند. بعد از آنالیز حساسیت و مطابق با روند طراحی در شکل ۵، ابتدا بازه تغییرات برای متغیرهای ورودی تابع هدف تعیین می‌شود. سپس با انتخاب ضرایب وزنی برای بازدهی و MTTF،

شکل ۸- الف منحنی قابلیت اطمینان نسبت به مدت زمان کارکرد مبدل برای مقادیر مختلف احتمال خطای اتصال کوتاه کلید قدرت را نشان می‌دهد. مطابق شکل هر چه احتمال خطای اتصال کوتاه کلید کاهش پیدا کند، قابلیت اطمینان بالاتر خواهد بود. برای بررسی دقیق تر شکل ۸- ب منحنی سه بعدی $MTTF$ بر حسب توان خروجی و احتمال خطای اتصال کوتاه کلید در مبدل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود $MTTF$ با افزایش توان خروجی و افزایش احتمال خطای اتصال کوتاه کلید، کاهش پیدا می‌کند.



(الف)

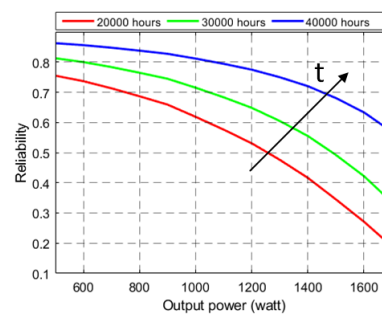


(ب)

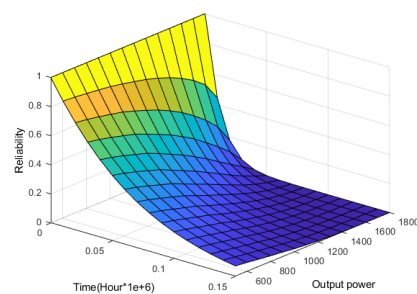
شکل ۸- ب منحنی $MTTF$ بر حسب توان خروجی و احتمال خطای اتصال کوتاه کلید در مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله: الف) منحنی قابلیت اطمینان بر حسب زمان برای مقادیر مختلف احتمال خطای اتصال کوتاه کلید قدرت ب) منحنی سه بعدی $MTTF$ بر حسب توان خروجی و احتمال خطای اتصال کوتاه کلید قدرت

شکل ۹- الف منحنی $MTTF$ بر حسب نسبت تبدیل ترانسفورماتور در حالت نامی را نشان می‌دهد. از شکل می‌توان دریافت که $MTTF$ مبدل با نسبت تبدیل بهینه ترانسفورماتور برابر با ۵، ۳۰۰۰۰ ساعت بدست آمد. شکل ۹- ب نیز منحنی سه بعدی $MTTF$ بر حسب توان خروجی و نسبت تبدیل ترانسفورمر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود $MTTF$ با افزایش توان خروجی و افزایش نسبت تبدیل ترانسفورمر، کاهش پیدا می‌کند. زیرا افزایش توان خروجی باعث افزایش جریان خروجی می‌شود و به دنبال آن موجب افزایش تلفات المان‌های مبدل می‌شود و در نتیجه $MTTF$ مبدل کاهش پیدا می‌کند.

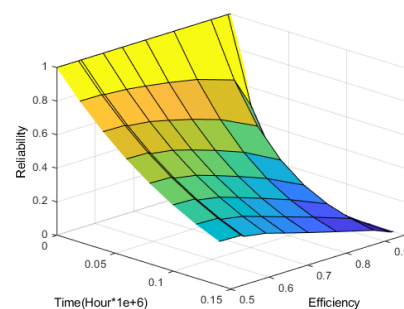
بعدی قابلیت اطمینان بر حسب توان خروجی و زمان عملکرد مبدل نیز در شکل ۷- ب رسم شده است. می‌توان دریافت با افزایش توان خروجی و در نتیجه افزایش نرخ خرابی المان‌های مدار، قابل اطمینان مبدل در مدت زمان مشخص کاهش پیدا می‌کند. همچنین مطابق شکل ۷- ج با افزایش بازدهی، قابلیت اطمینان مبدل روند کاهشی پیدا می‌کند. زیرا با توجه به رابطه مستقیم توان خروجی با بازدهی، افزایش توان خروجی اگر چه تلفات مبدل را افزایش می‌دهد، اما اثر بیشتری روی بازدهی دارد و باعث افزایش آن می‌شود. در نتیجه این امر سبب افزایش نرخ خرابی المان‌های مدار می‌شود و قابل اطمینان مبدل را کاهش می‌دهد.



(الف)

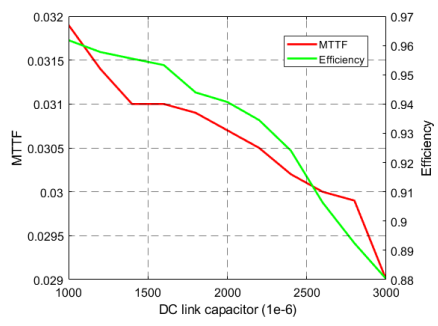


(ب)

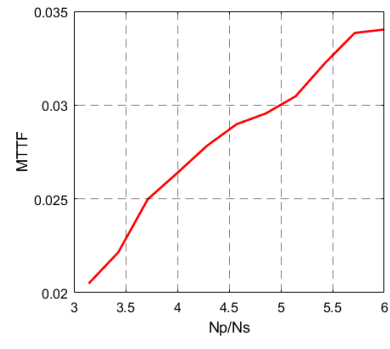


(ج)

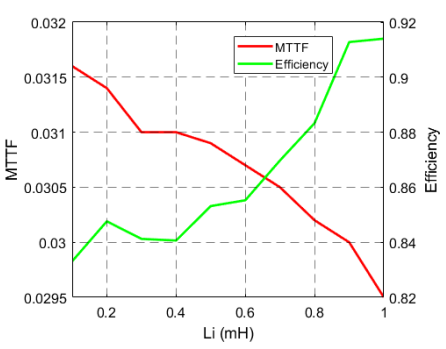
شکل ۷- ب منحنی‌های قابلیت اطمینان بر حسب توان خروجی، مدت زمان عملکرد و بازدهی در مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله: الف) قابلیت اطمینان بر حسب توان خروجی برای مدت زمان‌های مختلف ب) قابلیت اطمینان بر حسب توان خروجی و زمان ج) قابلیت اطمینان بر حسب بازدهی و زمان.



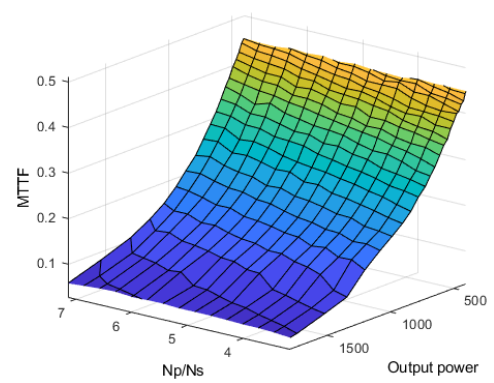
(الف)



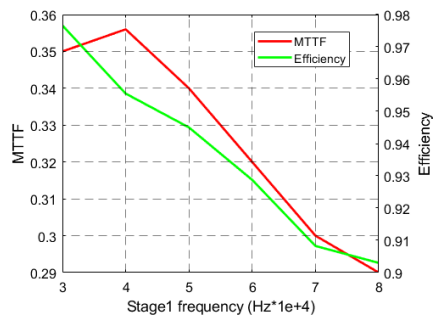
(ب)



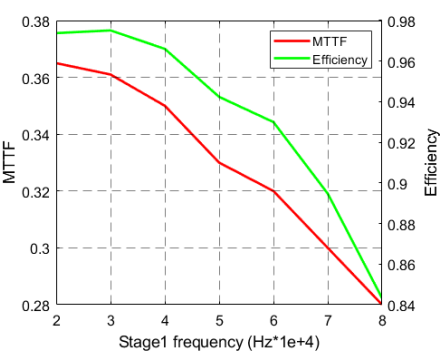
(ب)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- منحنی MTTF بر حسب توان خروجی و نسبت تبدیل ترانسفورمر در مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله؛ (الف) منحنی MTTF بر حسب نسبت تبدیل ترانسفورمر در توان نامی (ب) منحنی سه بعدی MTTF بر حسب نسبت تبدیل ترانسفورمر و توان خروجی

منحنی‌های MTTF و بازدهی بر حسب خازن لینک DC، اندوکتانس ورودی و فرکانس کلید زنی طبقه اول و دوم در شکل ۱۰ رسم شده است. از نتایج بدست آمده می‌توان دریافت افزایش مقدار خازن لینک DC موجب کاهش بازدهی و MTTF می‌شود. همچنین افزایش مقدار اندوکتانس سلف ورودی با بازدهی نسبت مستقیم و با MTTF نسبت معکوس دارد. زیرا با افزایش مقدار اندوکتانس سلف ورودی، نرخ خرابی آن افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه MTTF کاهش پیدا خواهد کرد. در ادامه منحنی‌های بازدهی و MTTF نسبت به فرکانس‌های کلید زنی طبقه اول و دوم به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش فرکانس‌های کلید زنی تاثیر بسزایی روی بازدهی و MTTF مبدل دارند. افزایش فرکانس کلید زنی باعث افزایش تلفات کلیدهای قدرت می‌شود و در نتیجه بازدهی را کاهش می‌دهد. همچنین این افزایش، نرخ خرابی قطعاتی نظیر کلیدهای قدرت را بالا می‌برد که کاهش MTTF را نتیجه خواهد داد.

شکل ۱۰- منحنی‌های MTTF و بازدهی بر حسب متغیرهای ورودی تابع هدف: (الف) خازن لینک DC (ب) اندوکتانس ورودی (ج) فرکانس کلید زنی طبقه اول (د) فرکانس کلید زنی طبقه دوم

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله برای کاربرد در سامانه‌های هوابیما طراحی شده و به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه، مقدار المان‌های مدار به منظور افزایش بازدهی و قابلیت اطمینان مبدل، بهینه شدند. در قدم اول ابتدا طراحی اولیه برای مبدل انجام شد و مقدار المان‌های مدار محاسبه شدند. سپس دو کمیت بازدهی و قابلیت اطمینان به عنوان متغیرهای تابع هدف در نظر گرفته شد. در قدم بعدی، پارامترهای مدار نظیر فرکانس سوئیچینگ هر طبقه، نسبت تبدیل ترانسفورماتور، ظرفیت خازن لینک DC و خازن فیلتر خروجی، مقدار اندوکتانس ورودی و خروجی به عنوان ورودی تابع هدف تعیین شدند و به کمک آنالیز حساسیت، پارامترهایی که دارای حساسیت پایینی بودند و تغییراتشان روی تابع هدف تاثیر عمده نداشت، نادیده گرفته شدند. نتایج نشان داد که فیلتر خازنی و اندوکتانس در خروجی مبدل تاثیر چندانی روی تابع هدف نداشته‌اند. سپس با انتخاب تابع هدف مناسب، تعیین ضرایب وزنی برای متغیرهای تابع هدف و انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II، بهترین مقدار برای المان‌های مدار به منظور بهبود دو کمیت بازدهی و قابلیت اطمینان، بدست آمدند. برای ارزیابی قابلیت اطمینان از مدل مارکوف استفاده شد. نرخ خرابی المان‌های مدار نیز به کمک معادلات موجود در راهنمای استاندارد نظامی (MIL-HDBK-217)، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد MTTF 30000 ساعت و بازدهی ۹۱٪ در حالت نامی برای مبدل دو طبقه AC/DC ایزوله بدست آمده است که بیانگر افزایش قابلیت اطمینان با حفظ بازدهی بالا برای مبدل است.

۶ منابع

- Interconnection Devices," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166048- 166057, 2021.
- [5] F. Wu, X. Li, and S. Luo, "Improved modulation strategy for single- phase single- stage isolated AC-DC converter considering power reversion zone ", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 4157- 4167, 2019.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] F. Feng, J. Fang, U. Manandhar, H. B. Gooi, and L. Wang, "Impedance Modeling and Stability- Oriented Parameter Optimization of Isolated Dual Active Bridge Based Two- Stage AC- DC- DC Converter," *Frontiers in Energy Research*, p. 994.
- [9] S. Raj, V. Singh, N. K. Rajalwal, and D. Ghosh, "Reliability prediction of a distribution protection scheme using Markov model," in *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*, 2020, pp. 868- 87.
- [10] M. Ghavami and C. Singh, "Reliability evaluation of electric vehicle charging systems including the impact of repair," in *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2017, pp. 1- 9.
- [11] H. Valipour, M. F. Firouzabad, G. Rezazadeh, and M. Zolghadri, "Reliability comparison of two industrial AC/DC converters with resonant and non- resonant topologies," in *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*, 2015, pp. 430- 435.
- [12] F. Wu, X. Li and S. Luo, "Improved Modulation Strategy for Single- Phase Single- Stage Isolated AC-DC Converter Considering Power Reversion Zone," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 4157- 4167, 2020.
- [13] B. Wang, J. Cai, X. Du and L. Zhou, "Review of power semiconductor device reliability for power converters," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 101- 117, 2017.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [1] B. Singh, S. Gairola, B. N. Singh, A. Chandra, and K. Al- Haddad, "Multipulse AC-DC converters for improving power quality: A review," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 260- 281, 2008.
- [2] S. Charadi, Y. Chaibi, A. Redouane, A. Allouhi, A. El Hasnaoui, and H. Mahmoudi, "Efficiency and energy-loss analysis for hybrid AC/DC distribution systems and microgrids: A review," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, p. e13203, 2021.
- [3] S. Dwari and L. Parsa, "An efficient AC- DC step- up converter for low- voltage energy harvesting," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 8, pp. 2188- 2199, 2010.
- [4] X. Wang, W. Yang, and D. Liang, "Multi- Objective Robust Optimization of Hybrid AC/DC Distribution Networks Considering Flexible

- [21] H. Visairo, M. A. Medina, and J. M. Ramirez, "Use of evolutionary algorithms for design optimization of power converters," in *CONIELECOMP 2012, 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers*, 2012, pp. 268- 272.
- [22] 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.
- [23] A. Amirahmadi, A. Dastfan, H. Yassami, and S. Rafiei, "Multi- Objective optimum design of controller for PFC rectifier using NSGA- II algorithm," in *2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 2010, pp. 180- 185.
- [24] J. W. Harms, "Revision of MIL- HDBK- 217, reliability prediction of electronic equipment," in *2010 Proceedings- Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010, pp. 1-3.
- [25] R. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics, Springer Science & Business Media, 2001," *Google Scholar Google Scholar Cross Ref Cross Ref*.
- [16] A. H. Ranjbar, M. Kiani, and B. Fahimi, "Dynamic Markov model for reliability evaluation of power electronic systems," in *2011 International conference on power engineering, energy and electrical drives*, 2011, pp. 1- 6: IEEE.
- [17] 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.
- [18] 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," *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018, pp. 280- 285.
- [19] 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.
- [20] H. Tarzamni, F. Tahami, M. Fotuhi- Firuzabad and F. Blaabjerg, "Improved Markov Model for Reliability Assessment of Isolated Multiple-Switch PWM DC- DC Converters," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 33666- 33674, 2021.