

Reliability Analysis of Buck Converter Considering Failure of Composed Components**Amir Ghaedi, *Associate Professor*****Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran**
Amir.ghaedi@iau.ac.ir**Received:** 14 April 2024**Revised:** 05 May 2024**Accepted:** 18 May 2024**Abstract:**

Development in manufacturing of power electronic devices including power diodes, thyristors, switches and transistors such as IGBTs, makes these devices are frequently used in power system. These converters are categorized in four groups including inverters (DC-AC), rectifiers (AC-DC), choppers (DC-DC) and AC-AC converters. The most well-known DC-DC converters are buck, boost, buck-boost and Cuk. Reliability, the ability of a device for performing itself function, is an important topic of power system. In the reliability analysis of a device, different failure modes are taken into account to calculate the failure rate of different components of them for determining its availability. In this paper, reliability of buck converter as a step-down converter is studied. This converter includes inductor, capacitor, diode and transistor. Thus, for evaluating reliability performance of buck converter, the impact of components failure on overall failure of converter is considered. Due to the sensitivity of electronic devices on temperature variation, the impact of temperature variation on the components failure is studied.

Keywords: buck converter, reliability, failure rate, temperature variation, semiconductors**Corresponding Author:** Dr. Amir Ghaedi**Corresponding Author Address:** Department of Electrical Engineering- Dariun Branch -Islamic Azad University- Dariun, Iran

ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل باک با در نظر گرفتن خرابی اجزای تشکیل دهنده

امیر قائدی، دانشیار

دانشکده مهندسی برق - واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران
amir.ghaedi@iaau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

چکیده: پیشرفت تکنولوژی ساخت تجهیزات الکترونیک قدرت شامل دیودهای قدرت، تریتورها، کلیدها و ترانزیستورهای قدرت نظیر IGBT سبب شده است این تجهیزات کاربرد زیادی در سیستم قدرت داشته باشند. این مبدل‌ها در چهار دسته اینورترها (DC-AC)، یکسوسازها (AC-DC)، چارپاها (DC-DC) و مبدل‌های AC-AC قرار می‌گیرند. مهم‌ترین مبدل‌های DC-DC، باک، بوست، باک-بوست و چوک می‌باشد. قابلیت اطمینان به معنای توانایی یک سیستم در تداوم کار محول شده به آن می‌باشد و در سال‌های اخیر اهمیت زیادی به ویژه در سیستم قدرت پیدا کرده است. در بررسی قابلیت اطمینان یک تجهیز، مدهای مختلف خرابی آن مورد توجه قرار گرفته و نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده آن تجهیز به منظور تعیین دسترس‌پذیری آن محاسبه می‌گردد. در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های باک صورت می‌گیرد. مبدل باک یک مبدل کاهنده می‌باشد که ولتاژ DC را کاهش می‌دهد. در ساختار این مبدل از سلف، خازن، دیود و ترانزیستور استفاده می‌شود. بنابراین به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان این مبدل بایستی تاثیر خراب شدن هر کدام از این اجزا بر خرابی کل مبدل مورد مطالعه قرار بگیرد. به علاوه با توجه به اینکه المان‌های الکترونیکی نسبت به تغییرات دما حساس هستند بایستی تاثیر تغییرات دما بر نرخ خرابی این تجهیزات مورد بررسی قرار بگیرد.

کلمات کلیدی: مبدل باک، قابلیت اطمینان، نرخ خرابی، تغییرات دما، نیمه هادی‌ها

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر قائدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: داریون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی ساخت نیمه‌هادی‌ها و تجهیزات الکترونیک قدرت، قیمت تمام شده این تجهیزات کاهش یافته و بنابراین کاربرد آن‌ها در شبکه قدرت افزایش یافته است. مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور تبدیل ولتاژ از حالت AC به DC، DC به AC، AC به DC و DC به AC مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تبدیل ولتاژها معمولاً دامنه ولتاژ نیز تغییر می‌کند. با توجه به اینکه در شبکه قدرت تجهیزات مختلفی وجود دارند که برخی از آن‌ها از برق DC استفاده می‌کنند و برخی دیگر از برق AC، بنابراین هر دو حالت برق بایستی در شبکه قدرت موجود باشد. بر همین اساس یکسوسازها به منظور تبدیل ولتاژ از حالت AC به DC و اینورترها به منظور تبدیل ولتاژ از حالت DC به AC مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این دو مبدل مهم، مبدل‌های الکترونیک قدرت که به چارپاها معروفند به منظور تبدیل سطح ولتاژ از حالت DC به DC مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه تجهیزات مختلفی در شبکه برق وجود دارند که با برق DC کار می‌کنند و دامنه ولتاژ نامی این تجهیزات نیز مختلف می‌باشد، مبدل‌های DC به DC به منظور تولید ولتاژ DC در سطوح مختلف کاربرد زیادی در شبکه قدرت داشته و لذا مطالعه آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

از طرف دیگر عملکرد بدون خرابی تجهیزات مختلف به منظور تداوم سرویس‌دهی در صنعت برق اهمیت پیدا کرده است. این مفهوم در قالب قابلیت اطمینان بیان می‌گردد. قابلیت اطمینان یک تجهیز به عملکرد سالم و بدون خرابی تجهیز اشاره دارد و در مطالعات قابلیت اطمینان سعی می‌گردد تا جایی که امکان دارد و به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است قابلیت اطمینان یک تجهیز بالا باشد تا احتمال خراب شدن آن کمتر شود. بر همین اساس لازم است قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت از جمله مبدل‌های DC به DC مورد بررسی قرار بگیرد. مبدل‌های DC به DC نیز انواع مختلفی دارد که یک نمونه از انواع پرکاربرد آن مبدل‌های باک می‌باشد. مبدل باک یک نمونه مبدل کاهنده ولتاژ است که در این مقاله هدف مطالعه قابلیت اطمینان آن می‌باشد. در مبدل‌های باک از نیمه‌هادی‌ها به مانند دیود و ترانزیستور استفاده می‌شود که این تجهیزات حساسیت بالایی نسبت به دما دارند. با تغییر دما، نرخ خرابی این نیمه‌هادی‌ها و در نتیجه نرخ خرابی مبدل باک تغییر می‌کند که بایستی مورد بررسی قرار بگیرد. بر همین اساس پژوهشگران زیادی به مطالعه قابلیت اطمینان مبدل‌ها پرداخته‌اند.

در [۱] تحلیل آزمایشگاهی دو مبدل باک و بوست به عنوان دو مبدل مهم DC به DC صورت گرفته است. در [۲] یک مبدل باک نیمه درجه دوم که مجهز به سلف کلیدزنی شده می‌باشد، بررسی شده است. این ساختار در واقع ساختار اصلاح شده مبدل باک مرتبه پنجم دارای دو کلید نیمه درجه دوم و از خانواده مینیمم فاز می‌باشد. در این توپولوژی یک سلف کلیدزنی شده با مبدل باک نیمه درجه دوم ترکیب شده تا بتواند نسبت تبدیل ولتاژ بالاتری را انجام دهد. به این منظور انرژی مغناطیسی کمتری در این سلف ذخیره می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استرس جریان در المان‌های کلیدزنی کمتر می‌باشد که سبب کاهش تلفات هدایت در این مبدل‌ها می‌شود. در [۳] تحلیل حوزه زمان برای مبدل باک و همچنین مبدل فلاپیک صورت گرفته است. در این مقاله مبدل باک ایزوله که دارای چندین خروجی می‌باشد و بدون در نظر گرفتن اثر پارازیتی در مود هدایت پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل حالت زمان صورت گرفته در این مطالعه به منظور بررسی رفتار حالت‌های گذرا و پایدار مبدل در مود سریع‌تر و دقیق‌تر انجام گرفته است. در [۴] کنترل مقاوم معکوس به منظور مینیمم نمودن اثرات نوسانی ایجاد شده توسط بار ثابت در مبدل‌های باک مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله سیستم با چندین مبدل که از مبدل‌های سری شده تشکیل شده است مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم مبدل پایه به منظور ایجاد و تنظیم ولتاژ DC صاف استفاده شده و سایر مبدل‌ها که مبدل بار می‌باشند جهت تبدیل نمودن ولتاژ باس واسطه به خروجی تنظیم شده به کار می‌روند. در [۵] شبیه‌سازی و طراحی یک مبدل باک سنکرون به منظور استفاده در سیستم LED صورت گرفته است. در [۶] تاثیر اجزای پارازیتی بر عملکرد دینامیکی مبدل‌های باک و بوست مبتنی بر PWM در مود هدایت پیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله یک تکنیک غیرخطی برای مدل نمودن این گونه مبدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و بر اساس آن مبدل‌ها در نرم‌افزار متلب و در محیط سیمولینک این نرم‌افزار در دو حالت همراه با اجزای پارازیتی (مبدل غیر ایده‌آل) و بدون آن (مبدل ایده‌آل) شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته شده‌اند. روش به کار رفته در این مقاله مبتنی بر محاسبه تحلیلی راه‌حل‌های پرودیک در شرایط کارکرد حالت ماندگار فرکانس بالا بوده که منجر به تحلیل

سیستماتیک رفتار دینامیکی القا شده توسط منابع اغتشاش مختلف می‌شود. در [۷] مبدل‌های الکترونیک قدرت مختلفی که در توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده قرار می‌گیرند در شرایطی که توربین بادی در مود متصل به شبکه کار می‌کند به لحاظ قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در [۸] قابلیت اطمینان مبدل دنبال کننده توان ماکزیمم که در نیروگاه‌های فتوولتاییک به منظور قرار دادن نقطه کار نیروگاه در نقطه توان ماکزیمم به کار می‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹] قابلیت اطمینان مبدل بوست مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله فرض شده است مبدل در دوره عمر مفید خود می‌باشد و در این دوره نرخ خرابی تجهیزات مبدل ثابت می‌باشد. در [۱۰] قابلیت اطمینان مبدل باک بوست مورد بررسی قرار گرفته و اثر تغییرات فاکتورهای بهره‌برداری مختلف بر قابلیت اطمینان این مبدل‌ها بررسی شده است. در [۱۱] روش کلی مطالعه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت بیان شده است. در این مقاله در دو دوره عمر مفید مبدل و زمان فرسودگی آن، مطالعات قابلیت اطمینان انجام شده است. در [۱۲] مدل قابلیت اطمینان مبدل‌های فرکانس که در قطارهای برقی مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۳] ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم تولید توان الکتریکی جزرومدی نوع جریان با در نظر گرفتن تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی صورت گرفته است. در [۱۴] ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید جزرومدی و بادی با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری صورت گرفته است. در [۱۵] ساختارهای مختلف الکتریکی با توجه به مبدل‌های الکترونیک قدرتی که می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد برای مزارع جزرومدی آورده شده است. در [۱۶] مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی مبدل باک سنکرون و تحلیل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده است. در این مقاله مدلسازی ریاضی مبدل بر اساس مدل واقع در سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام شده است. مقاله [۱۷] مقایسه بین مبدل باک dc به dc و مبدل باک کلیدزنی ولتاژ صفر را انجام داده است. در این مقاله توان ورودی و خروجی این دو مبدل با هم مقایسه شده و مبدل باک حلقه باز با ولتاژ ورودی ۲۰ ولت و ولتاژ خروجی ۱۰ ولت بر اساس دو نوع مبدل گفته شده طراحی شده است. در [۱۸] طراحی و تحلیل مبدل باک اینترلیو دو فاز که برای استفاده در خودروهای الکتریکی مناسب است صورت گرفته است. در این مقاله یک مبدل باک dc به dc با بازده بالا برای خودروهای برقی دو چرخه طراحی شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

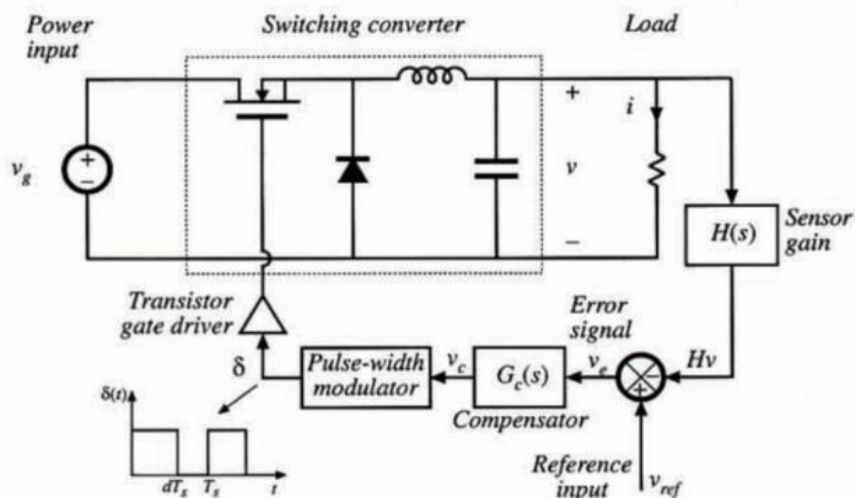
در این مقاله هدف بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌های باک و مطالعه اثر تغییرات جریان الکتریکی بر نرخ خرابی مبدل می‌باشد؛ لذا ساختار این تحقیق به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم مبدل‌های باک، اجزای تشکیل دهنده و روابط مربوطه آورده می‌شود. بخش سوم به مطالعه قابلیت اطمینان مبدل‌های باک و تعیین روابط نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده این مبدل و وابستگی آن‌ها به جریان الکتریکی می‌پردازد. در این بخش مدل قابلیت اطمینان مبدل باک تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نیز در بخش چهارم آورده شده و نتیجه‌گیری نیز در بخش پنجم بیان می‌گردد.

۲- مبدل باک

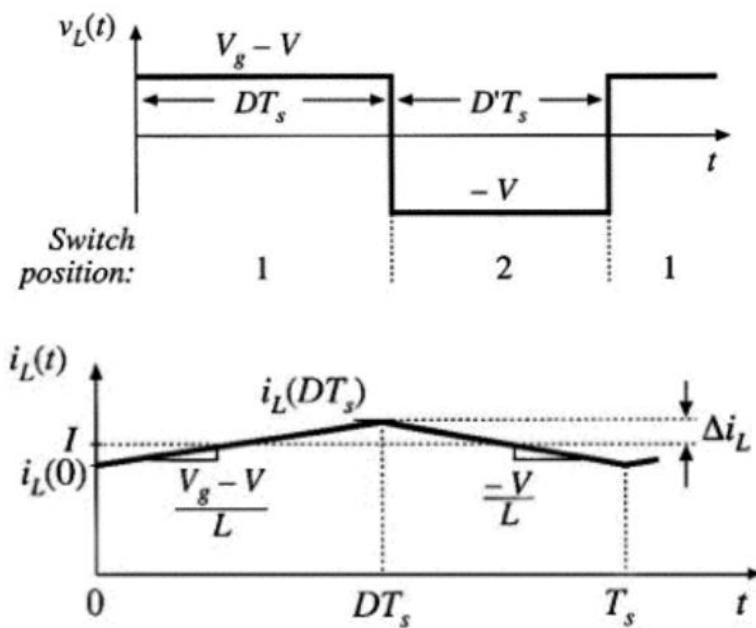
ساختار یک مبدل باک در شکل (۱) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است اجزای اصلی تشکیل دهنده مبدل باک شامل ترانزیستور یا کلید، دیود، سلف، خازن و سیستم کنترل جهت کنترل لحظه باز و بسته شدن کلید جهت دستیابی به سطح ولتاژ مورد نظر می‌باشد. در شکل (۲) نیز شکل موج ولتاژ و جریان سلف در مبدل باک برای شرایطی که مبدل در مود پیوسته کار می‌کند نشان داده شده است. در صورتی که مبدل در مود پیوسته کار کند نسبت ولتاژ خروجی به ورودی مبدل برابر با D می‌باشد که این پارامتر همان دیوتی سایکل است. دیوتی سایکل در واقع درصدی از دوره تناوب کلیدزنی است که ترانزیستور روشن می‌باشد. نمودار جریان ورودی مبدل باک که همان جریانی است که مبدل از شبکه یا منبع تغذیه DC می‌کشد در شکل (۳) آورده شده است [۱۹].

به منظور بیان تفاوت بین مود پیوسته و ناپیوسته شکل موج جریان سلف و دیود در مبدل باک در مدهای پیوسته، مرز بین مود پیوسته و ناپیوسته و مود ناپیوسته رسم شده است. در شکل (۴)، شکل موج جریان سلف و جریان دیود برای مود پیوسته

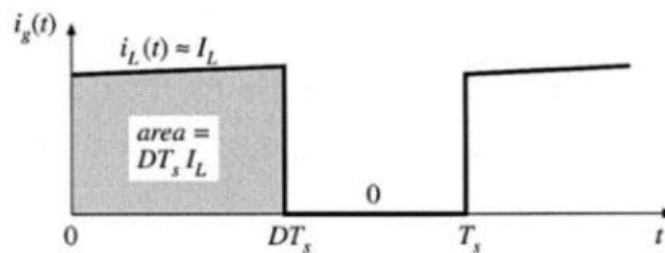
رسم شده است. در این مود میزان ریپل جریان سلف کم بوده و بنابراین جریان به صفر نمی‌رسد. در شکل (۵) شکل موج جریان سلف و دیود در مرز بین مود پیوسته و مود ناپیوسته رسم شده است.



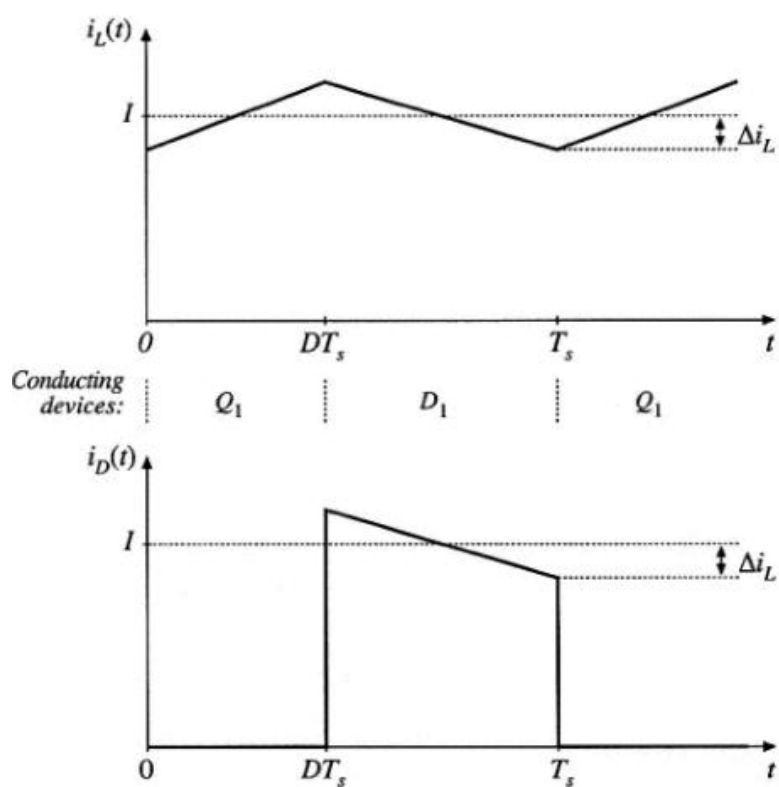
شکل (۱): ساختار مبدل باک [۱۹]



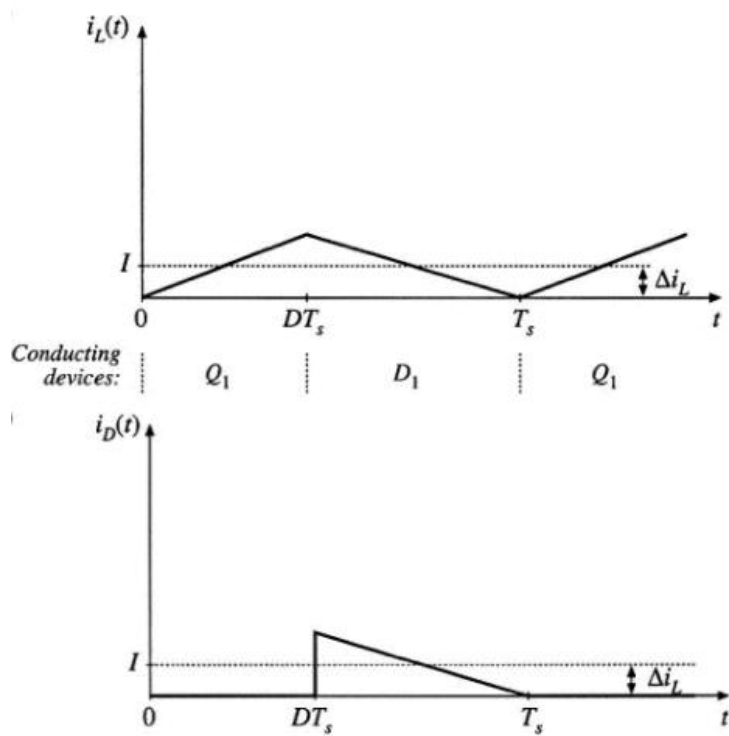
شکل (۲): شکل موج ولتاژ و جریان سلف [۱۹]



شکل (۳): نمودار جریان ورودی مبدل باک [۱۹]



شکل (۴): شکل موج جریان سلف و جریان دیود [۱۹]

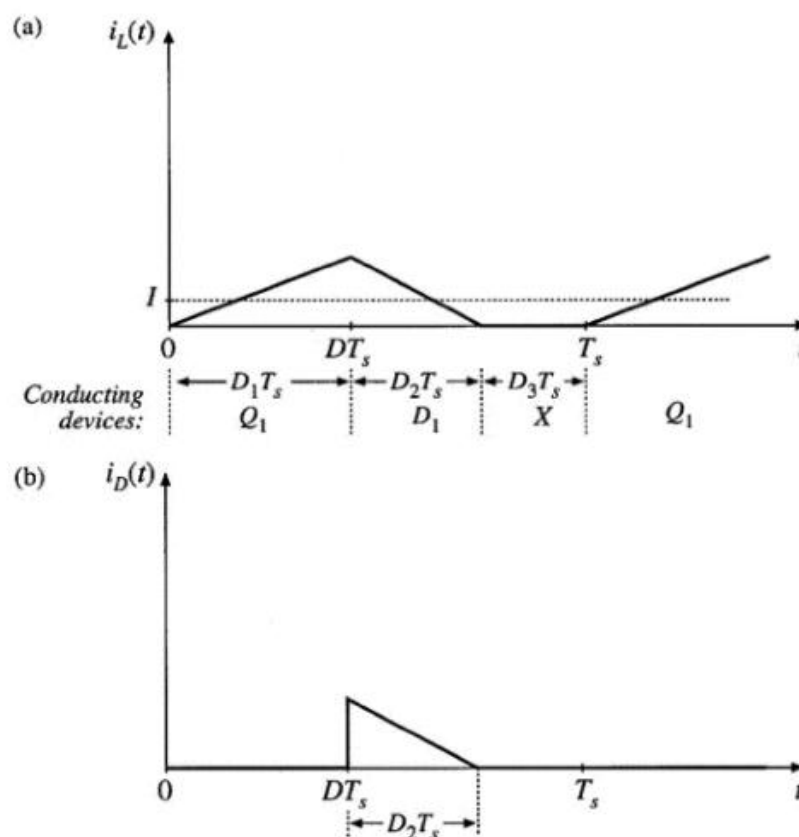


شکل (۵): جریان سلف و جریان دیود در مرز بین مود پیوسته و ناپیوسته

همانگونه که در این شکل مشخص است جریان سلف به صفر می‌رسد اما در مقدار صفر تداوم ندارد. در این شرایط میزان ریپل جریان سلف با مقدار DC آن برابر می‌باشد. بنابراین در تعیین مود پیوسته و مود ناپیوسته مبدل باک بایستی میزان ریپل جریان سلف تعیین گردد. میزان ریپل جریان سلف در مبدل باک عبارت است از [۱۹]:

$$\Delta i_L = \frac{V_g D(1-D)T_s}{2L} \quad (۱)$$

در رابطه فوق V_g ولتاژ ورودی، T_s دوره تناوب کلیدزنی و L اندوکتانس سلف مورد استفاده در مبدل می‌باشد. شکل موج جریان سلف و جریان دیود در مود ناپیوسته نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است ریپل جریان سلف از مقدار DC آن بزرگتر است و لذا جریان سلف و دیود صفر می‌شود و می‌خواهد تغییر پلاریته دهد و منفی شود. با توجه به اینکه دیود فقط جریان‌های مثبت را عبور می‌دهد جریان صفر می‌ماند و تغییر پلاریته نمی‌دهد.



شکل (۶): جریان سلف و دیود در مود ناپیوسته [19]

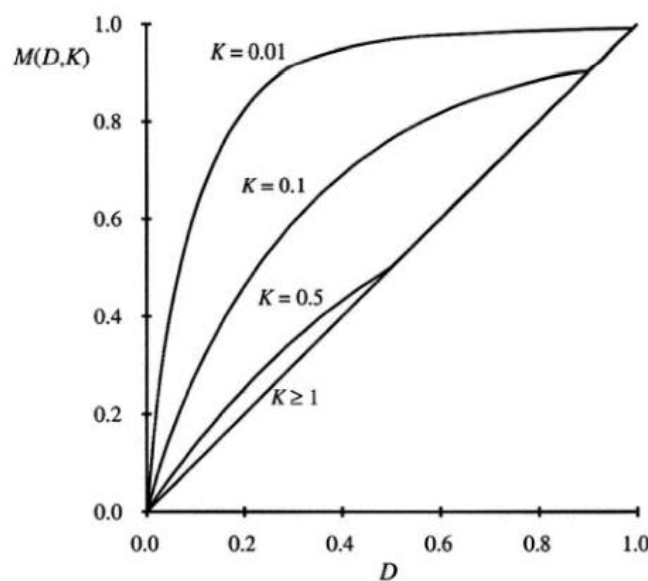
در صورتی که مبدل باک بخواهد در مود پیوسته کار کند بایستی رابطه زیر برقرار باشد [۱۹]:

$$K > K_{crit}(D), K = \frac{2L}{RT_s}, K_{crit}(D) = 1 - D \quad (۲)$$

در رابطه فوق R مقاومت بار می‌باشد. با تغییر دیوتی سایکل و مقاومت بار مبدل باک می‌تواند در مود پیوسته یا ناپیوسته کار کند. البته بیشترین مقدار K_{crit} در مبدل باک ۱ است و در صورتی که مقدار K از ۱ بیشتر باشد می‌توان گفت که مبدل همواره در مود پیوسته کار می‌کند زیرا در این صورت به ازای دیوتی سایکل‌های مختلف همواره شرایط مود پیوسته برقرار می‌باشد. در

حالت کارکرد مبدل در مود ناپیوسته، در هر دوره تناوب سه حالت وجود دارد. حالت اول ترانزیستور روشن است و ولتاژ دو سر سلف برابر با اختلاف ولتاژ ورودی و خروجی است. حالت دوم ترانزیستور خاموش بوده و دیود هدایت می‌کند و ولتاژ دو سر سلف منفی ولتاژ خروجی است. در حالت سوم جریان دیود می‌خواهد منفی شود که امکان پذیر نیست لذا هم ترانزیستور و هم دیود خاموش است و ولتاژ دو سر سلف در این حالت صفر خواهد بود. رابطه بین ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی به صورت زیر می‌باشد. این رابطه در دو مود پیوسته و ناپیوسته آورده شده است. در شکل زیر نیز نمودار نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی برای مبدل باک در مدهای پیوسته و ناپیوسته به ازای مقادیر مختلف K و D رسم شده است [۱۹].

$$M = \frac{V}{V_g} = \begin{cases} D & K \geq K_{crit} \\ \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D^2}}} & K < K_{crit} \end{cases} \quad (3)$$

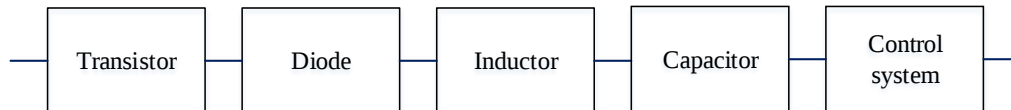


شکل (۷): نمودار نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی برای مبدل باک

۳- مدل قابلیت اطمینان مبدل باک

قابلیت اطمینان یک سیستم به این معناست که آن سیستم بتواند کارکرد خود را به درستی انجام دهد. بنابراین قابلیت اطمینان مبدل باک نیز به معنای این است که مبدل باک بتواند بدون خراب شدن در انتقال توان الکتریکی سطح ولتاژ را کاهش دهد. مدل مارکوف، حالت‌های مختلفی را که یک المان در طول عملکرد خود دارد می‌باشد در نظر گرفته و نرخ رفتن این المان از یک حالت به حالت دیگر را نشان می‌دهد. یک مدل مارکوف دو حالتی برای یک المان، دو وضعیت سالم بودن و خرابی را در نظر می‌گیرد، المان با نرخ خرابی λ از وضعیت سالم به وضعیت خراب و با نرخ تعمیر μ از وضعیت خراب به وضعیت سالم می‌رود [۲۰].

تجهیزات اساسی تشکیل دهنده یک مدل باک عبارتند از: ترانزیستور یا کلید، دیود، خازن، سلف و سیستم کنترل. در صورتی که هر کدام از این تجهیزات خراب شوند عملکرد مبدل باک دچار اختلال شده و لذا به لحاظ قابلیت اطمینان تجهیزات تشکیل دهنده مبدل باک با هم سری هستند. به این معنا که خرابی هر کدام از این تجهیزات منجر به خرابی کل مبدل می‌گردد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان مبدل باک به صورت نشان داده شده در شکل (۸) خواهد بود.



شکل (۸): مدل قابلیت اطمینان مبدل باک

نرخ خرابی و نرخ تعمیر مبدل باک در مدل قابلیت اطمینان معادل آن بر اساس مدل قابلیت اطمینان تجهیزات سری محاسبه می‌گردد. بنابراین نرخ خرابی و تعمیر معادل مبدل باک به صورت زیر خواهد بود:

$$\lambda_{eq} = \lambda_t + \lambda_d + \lambda_i + \lambda_c + \lambda_{cs}$$

$$\mu_{eq} = \frac{\lambda_{eq}}{\frac{\lambda_t}{\mu_t} + \frac{\lambda_d}{\mu_d} + \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \frac{\lambda_c}{\mu_c} + \frac{\lambda_{cs}}{\mu_{cs}}} \quad (4)$$

در رابطه فوق λ و μ نرخ خرابی و نرخ تعمیر بوده و اندیس‌های t, d, i, c و cs مربوط به معادل مبدل باک، ترانزیستور، دیود، سلف، خازن و سیستم کنترل می‌باشند. در این بخش از تحقیق وابستگی نرخ خرابی هر کدام از تجهیزات تشکیل دهنده مبدل باک به جریان تعیین می‌گردد و سپس بر اساس رابطه فوق، نرخ خرابی معادل مبدل باک از جمع نمودن نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده به دست می‌آید. بنابراین می‌توان وابستگی نرخ خرابی معادل مبدل باک را نیز به جریان تعیین نمود. در ادامه رابطه بین نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل باک به جریان الکتریکی عبوری از مبدل تعیین می‌گردد. کلیدی که در مبدل‌های باک مورد استفاده قرار می‌گیرد یک ترانزیستور می‌باشد. نرخ خرابی این کلیدها بر اساس استاندارد MIL-HDBK-217F به صورت زیر خواهد بود [۲۱]:

$$\lambda_S = \lambda_{Sb} \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad (5)$$

در رابطه فوق λ و π نشان‌دهنده نرخ خرابی و فاکتورهای شتاب بوده و اندیس‌های S, Sb, T, A, Q, E و مربوط به کلید، مقدار پایه کلید، فاکتور دما، فاکتور کاربرد، فاکتور کیفیت و فاکتور محیط می‌باشند. فاکتور دما نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\pi_T = e^{-1925 \left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right)} \quad (6)$$

در رابطه فوق T_j دمای پیوند ترانزیستور می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_j = T_c + r_{jc} P_{loss} \quad (7)$$

در این رابطه T_c دمای سینک حرارتی، r_{jc} مقاومت حرارتی ترانزیستور و P_{loss} نیز تلفات کلید می‌باشد. البته این رابطه برای دیود نیز صادق می‌باشد. میزان تلفات کلید به جریان عبوری از کلید وابسته است. توان تلف شده در یک نیمه‌هادی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$P_{loss} = V_{av} I_{av} t f_s \quad (8)$$

که در این رابطه V_{av} ، I_{av} و t به ترتیب ولتاژ و جریان متوسط بر روی نیمه‌هادی، مدت زمان روشن بودن نیمه‌هادی و فرکانس کلیدزنی مبدل می‌باشد. در مبدل باک کلید به اندازه دیوتی سایکل روشن و سپس بقیه دوره تناوب خاموش می‌باشد.

دیود نیز در مود پیوسته به اندازه دوره تناوب منهای دیوتی سایکل روشن می‌باشد. اما در مود ناپیوسته دیود به اندازه D_2 روشن می‌باشد که مقدار D_2 را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد [۲۱]:

$$D_2 = \frac{V}{R} \cdot \frac{2L}{DT_S(V_g - V)} - D \quad (9)$$

در این رابطه R مقاومت بار خروجی متصل به مبدل می‌باشد. با توجه به اینکه جریان سلف به صورت خطی تغییر می‌کند مقدار متوسط جریان عبوری از دیود و کلید در مدت زمانی که هدایت می‌کنند نصف جریان پیک می‌باشد. نرخ خرابی دیود نیز که یک نیمه‌هادی می‌باشد بر اساس استاندارد MIL-HDBK-217F به صورت زیر خواهد بود [۲۱]:

$$\lambda_S = \lambda_{Sb} \cdot \pi_T \cdot \pi_C \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad (10)$$

در رابطه فوق همه موارد به مانند ترانزیستور می‌باشد و تنها فاکتورهای با اندیس C و S به ترتیب فاکتور تماس و فاکتور استرس می‌باشند. فاکتور تماس معمولاً برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود و فاکتور استرس دیود نیز از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\pi_S = V_S^{2.43} \quad (11)$$

در این رابطه V_S نسبت ولتاژ بهره‌برداری به ولتاژ نامی دیود می‌باشد. نرخ خرابی سلف نیز به صورت نشان داده شده در رابطه زیر محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه نرخ خرابی سلف در مقایسه با نرخ خرابی سایر تجهیزات تشکیل دهنده مبدل بسیار کوچک می‌باشد می‌توان در محاسبات از آن صرف نظر نمود [۲۲].

$$\lambda_L = \lambda_{Lb} \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad (12)$$

نرخ خرابی خازن نیز از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه λ_{bC} نرخ خرابی پایه خازن در شرایط از پیش تعیین شده مشخص بوده و فاکتورهای π با اندیس‌های CV ، Q و E مربوط به فاکتورهای خازنی، کیفیت و محیط می‌باشند.

$$\lambda_C = \lambda_{bC} \cdot \pi_{CV} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \quad (13)$$

مقدار نرخ خرابی پایه خازن نیز از رابطه زیر به دست می‌آید که در این رابطه s نسبت ولتاژ بهره‌برداری به ولتاژ نامی و T_a دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشد.

$$\lambda_{bC} = 0.00254 \cdot \left[\left(\frac{s}{0.5} \right)^3 + 1 \right] \cdot e^{\left(5.09 \cdot \left(\frac{T_a + 273}{378} \right)^5 \right)} \quad (14)$$

فاکتور خازن نیز از رابطه زیر به دست می‌آید که در این رابطه C مقدار ظرفیت خازن بر حسب میکروفاراد می‌باشد.

$$\pi_{CV} = 0.34C^{0.12} \quad (15)$$

سیستم کنترل دارای دو بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری می‌باشد و لذا نرخ خرابی این سیستم از مجموع نرخ خرابی مربوط به بخش‌های نرم‌افزاری و نرخ خرابی مربوط به بخش‌های سخت‌افزاری تعیین می‌گردد. معمولاً نرخ خرابی بخش نرم‌افزاری در صورتی که در ابتدای طراحی و پیاده‌سازی درست کار کند نرخ خرابی آن ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشد. اما نرخ خرابی بخش سخت‌افزاری که شامل سنسورها، جبران‌ساز، مدولاسیون پهنای پالس و درایور گیت ترانزیستور می‌باشد بایستی در محاسبات وارد شود. نرخ خرابی سیستم کنترل به نرخ خرابی این تجهیزات وابسته بوده و بنابراین به میزان جریان خروجی وابسته نمی‌باشد. به منظور تعیین نرخ خرابی کل مبدل بایستی نرخ خرابی سیستم کنترل، ترانزیستور، دیود، سلف و خازن را با هم جمع نمود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

مشخصات مبدل باک مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. در جدول (۲) نیز پارامترهای قابلیت اطمینان تجهیزات تشکیل دهنده مبدل شامل کلید یا ترانزیستور، دیود، سلف و خازن آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات مبدل باک مورد مطالعه [۲۱]

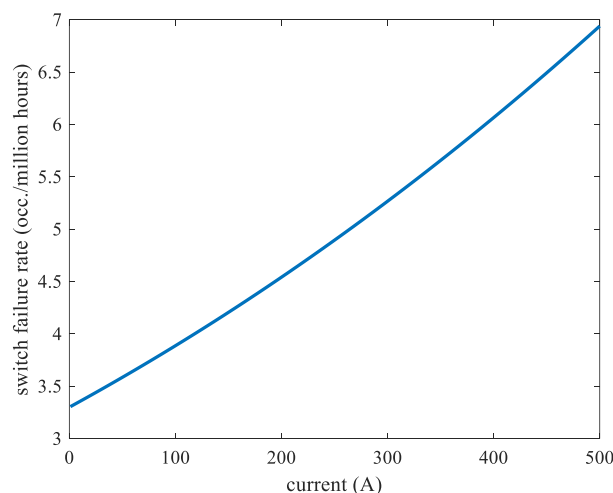
پارامترها	مقدار
توان نامی	۱۲ کیلووات
ولتاژ ورودی	۳۰۰ ولت جریان مستقیم
ولتاژ خروجی نامی	۱۲۵ ولت جریان مستقیم
فرکانس کلیدزنی	۱۰ کیلوهرتز
اندوکتانس سلف	۳ میلی هانری
ظرفیت خازن	۱ میکروفاراد

جدول (۲): پارامترهای قابلیت اطمینان تجهیزات [۲۱]

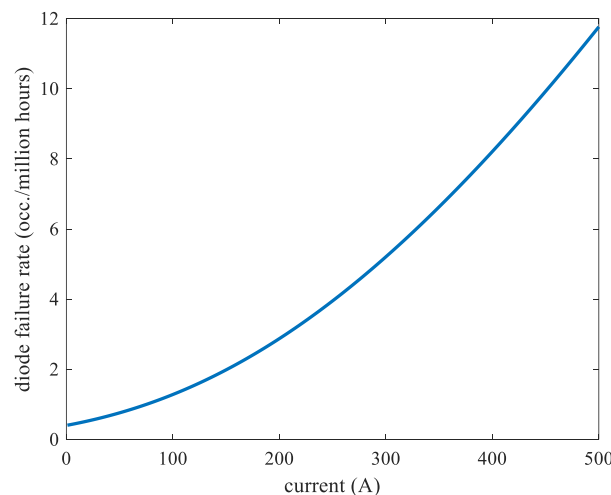
نرخ خرابی پایه کلید	۰/۰۱۲ خرابی در هر میلیون ساعت
نرخ خرابی پایه دیود	۰/۰۶۴ خرابی در هر میلیون ساعت
فاکتور کیفیت کلید	۵/۵
فاکتور محیطی کلید	6
فاکتور کاربرد کلید	10
فاکتور کنتاکت دیود	1
فاکتور استرس دیود	۰/۱۹
فاکتور محیطی دیود	6
فاکتور کیفیت دیود	۵/۵
فاکتور خازن	۰/۳۴
فاکتور محیطی خازن	2
فاکتور کیفیت خازن	10
نرخ خرابی پایه خازن	۰/۰۲۹ خرابی در هر میلیون ساعت
نرخ خرابی پایه سلف	۰/۰۰۶۲۲ خرابی در هر میلیون ساعت
فاکتور محیطی سلف	4
فاکتور کیفیت سلف	20
مقاومت حرارتی کلید	۰/۳۱ درجه سانتیگراد در هر وات
مقاومت حرارتی دیود	۱/۶ درجه سانتیگراد در هر وات
افت ولتاژ کلید	۰/۶ ولت
افت ولتاژ دیود	۰/۷ ولت
نرخ خرابی سیستم کنترل	۰/۰۰۲ خرابی در هر میلیون ساعت

در این بخش از تحقیق تغییر جریان خروجی که در نتیجه تغییر مقاومت خروجی اتفاق می‌افتد بر نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با عنایت به اینکه نرخ خرابی سلف نسبت به نرخ خرابی سایر تجهیزات بسیار کوچک می‌باشد، در محاسبات از نرخ خرابی سلف صرف‌نظر می‌گردد. با توجه به مقادیر پارامترهای قابلیت اطمینان خازن، نرخ خرابی این المان مستقل از جریان عبوری از آن بوده و برابر با ۰/۱۹۷۲ خرابی در یک میلیون ساعت تعیین می‌گردد. نرخ خرابی کلید و دیود با تغییر جریان عبوری از مبدل تغییر می‌کنند؛ چرا که تلفات توان این نیمه‌هادی‌ها و در نتیجه دمای پیوند آن‌ها با تغییر جریان عبوری از آن‌ها تغییر خواهد کرد. در این تحقیق فرض می‌گردد ولتاژ ورودی و خروجی ثابت بوده و تنها مقاومت بار تغییر می‌کند. با تغییر مقاومت بار، جریان خروجی نیز تغییر می‌کند و بنابراین در این قسمت تاثیر تغییر جریان خروجی بر نرخ خرابی کلید و دیود و در نتیجه نرخ خرابی کل مبدل بررسی می‌گردد. البته با تغییر مقاومت بار، به منظور ثابت ماندن ولتاژ خروجی بایستی مقدار دیوتی سایکل تغییر کند. همچنین با تغییر مقاومت بار، مدهای

کارکرد مبدل نیز ممکن است تغییر کند. به این معنا که مبدل ممکن است در مدهای پیوسته یا ناپیوسته کار کند. در شکل (۹) نرخ خرابی کلید بر حسب جریان خروجی مبدل رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن جریان خروجی مبدل نرخ خرابی کلید نیز افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با زیاد شدن جریان خروجی مبدل، گرمای ایجاد شده در کلید نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه تلفات حرارتی کلید زیاد می‌شود. با زیاد شدن تلفات حرارتی کلید، دمای پیوند آن نیز افزایش یافته و در نتیجه طبق قانون آرسنیوس نرخ خرابی آن زیاد خواهد شد. در شکل (۱۰) نیز نرخ خرابی دیود بر حسب جریان خروجی مبدل نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن جریان عبوری از مبدل، جریان عبوری از دیود و در نتیجه تلفات حرارتی آن افزایش می‌یابد. با زیاد شدن تلفات حرارتی دیود، دمای پیوند آن نیز افزایش یافته و در اینجا نیز بر طبق قانون آرسنیوس نرخ خرابی دیود افزایش می‌یابد.

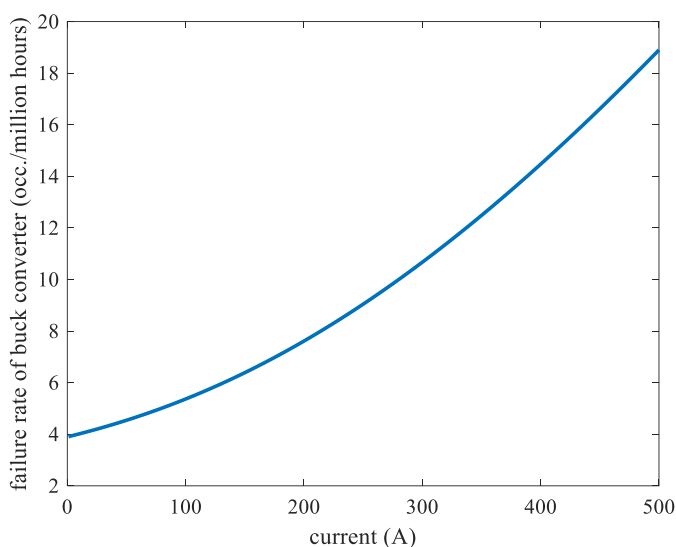


شکل (۹): نرخ خرابی کلید بر حسب جریان خروجی مبدل



شکل (۱۰): نرخ خرابی دیود بر حسب جریان خروجی مبدل

نرخ خرابی مبدل از جمع نمودن نرخ خرابی دیود، کلید، سلف و خازن تعیین می‌شود. در شکل (۱۱) نرخ خرابی مبدل بر حسب جریان خروجی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن جریان خروجی مبدل، نرخ خرابی مبدل نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۱۱): نرخ خرابی مبدل باک بر حسب جریان خروجی مبدل

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله قابلیت اطمینان مبدل باک که یک مبدل کاهنده ولتاژ می‌باشد را مورد مطالعه قرار داده است. به منظور تعیین قابلیت اطمینان این مبدل تجهیزات تشکیل دهنده آن شامل کلید، دیود، سلف، خازن و سیستم کنترل مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه قابلیت اطمینان مبدل، مدهای مختلف کارکرد مبدل که شامل مود پیوسته و مود ناپیوسته می‌باشند در نظر گرفته شده است. سپس مدل قابلیت اطمینان مبدل باک به دست آورده شده است. با توجه به اینکه خراب شدن تجهیزات تشکیل دهنده مبدل باک منجر به خرابی کل مبدل می‌گردد، نرخ خرابی معادل مبدل باک از مجموع نرخ خرابی این تجهیزات به دست می‌آید. این امر به خاطر این است که این تجهیزات در مدل قابلیت اطمینان مبدل باک با هم سری می‌باشند. در ادامه تاثیر تغییر جریان بر نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده مبدل باک تعیین شده است. به منظور انجام این کار نرخ خرابی هر کدام از تجهیزات بر حسب فاکتورهای موثر به دست آمده است. با توجه به اینکه کلید (ترانزیستور) و دیود از جنس نیمه‌هادی هستند تغییر دما تاثیر زیادی بر نرخ خرابی آن‌ها خواهد داشت. بر همین اساس با توجه به روابط به دست آمده برای مبدل باک، نرخ خرابی این تجهیزات به ازای جریان‌های مختلف به دست آورده شده است. در تعیین نرخ خرابی این نیمه‌هادی‌ها ابتدا میزان تلفات نیمه‌هادی به ازای جریان‌های مختلف به دست می‌آید. سپس بر اساس مدل حرارتی نیمه‌هادی‌ها دمای پیوند آن‌ها محاسبه شده و بر اساس قانون آرسنیوس نرخ خرابی آن‌ها محاسبه می‌گردد.

در این مقاله در محیط نرم‌افزار متلب یک شبیه‌سازی انجام شده و تاثیر تغییر جریان خروجی بر نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده آن به دست آمده است. همانگونه که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است با زیاد شدن جریان خروجی نرخ خرابی نیمه‌هادی‌ها که شامل ترانزیستور و دیود می‌باشد نیز افزایش می‌یابد اما نرخ خرابی خازن، سلف و سیستم کنترل تقریباً وابسته از جریان بار خواهد بود. به همین صورت نرخ خرابی مبدل باک که مجموع نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده آن می‌باشد نیز با زیاد شدن جریان بار افزایش می‌یابد.

References

مراجع

- [1] S. Palanidoss and T. V. S. Vishnu, "Experimental analysis of conventional buck and boost converter with integrated dual output converter," *International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 2017.

- [2] P. V. Anushka, N. Mani, and K. Issac, "Switched-inductor semi-quadratic buck converter," *International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*, Dec. 2017.
- [3] S. B. Myneni and S. Samanta, "Time Domain Analysis of Isolated Buck (Fly-Buck) Converter," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2018.
- [4] K. Eduardo et al., "Interval Robust Controller to Minimize Oscillations Effects Caused by Constant Power Load in a DC Multi-Converter Buck-Buck System," vol. 7, pp. 26324–26342, Feb. 2019.
- [5] C. Deekshitha and K. Latha Shenoy, "Design and simulation of synchronous buck converter for LED application," *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017.
- [6] A. Reatti, F. Corti, A. Tesi, A. Torlai, and M. K. Kazimierzczuk, "Effect of Parasitic Components on Dynamic Performance of Power Stages of DC-DC PWM Buck and Boost Converters in CCM," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2019.
- [7] A. Sadeghfam, S. Tohidi, and M. Abapour, "Reliability comparison of different power electronic converters for grid-connected PMSG wind turbines," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 9, p. e2359, Mar. 2017.
- [8] B. Abdi, S. M. M. Mirtalaei, and R. Ghasemi, "Reliability of MPPT Converter in Different Operating Modes," *International Journal of Machine Learning and Computing*, pp. 274–278, 2013.
- [9] M. K. Alam and F. H. Khan, "Reliability Analysis and Performance Degradation of a Boost Converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3986–3994, 2014.
- [10] H. Tarzamni, F. Tahami, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Panahandeh Esmaelnia, "Reliability Analysis of Buck-Boost Converter Considering the Effects of Operational Factors," *10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2019.
- [11] S. Peyghami, P. Palensky, and F. Blaabjerg, "An Overview on the Reliability of Modern Power Electronic Based Power Systems," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 1, pp. 34–50, 2020.
- [12] Y. A. Mahmood, A. H. S. Garmabaki, Alireza. Ahmadi, and A. K. Verma, "Reliability model for frequency converter in electrified railway," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 94, pp. 385–392, Jan. 2018.
- [13] M. Liu, W. Li, C. Wang, R. Billinton, and J. Yu, "Reliability Evaluation of a Tidal Power Generation System Considering Tidal Current Speeds," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3179–3188, Jul. 2016.
- [14] M. LIU, W. LI, J. YU, Z. REN, and R. XU, "Reliability evaluation of tidal and wind power generation system with battery energy storage," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 636–647, Sep. 2016.
- [15] S. Bala, None Jiuping Pan, G. Barlow, G. Brown, and S. Ebner, "Power conversion systems for tidal power arrays," *5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)* (pp. 1-7). 2014.
- [16] Zhou, L. Wang, Y. Gan, H. Luo, Y.-F. Liu, and P. C. Sen, "Accurate Analysis and Design of the Circuit Parameters of LLC DC-DC Converter With Synchronous Rectification," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 12, pp. 15051–15065, Dec. 2022.
- [17] P. Alavi, E. Babaei, P. Mohseni, and V. Marzang, "Study and analysis of a DC-DC soft-switched buck converter," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 7, pp. 1456–1465, May 2020.
- [18] J.-P. Lee, H. Cha, D. Shin, K.-J. Lee, D.-W. Yoo, and J.-Y. Yoo, "Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters," *Journal of Power Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 339–348, May 2013.
- [19] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [20] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems," Plenum Press, Newyork and London, 2nd Edition, 1994.
- [21] J. W. Harms, "Revision of MIL-HDBK-217, Reliability Prediction of Electronic Equipment," *Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2010.
- [22] H. Tarzamni et al., "Thermal analysis of non-isolated conventional PWM-based DC-DC converters with reliability consideration," *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 337–351, Dec. 2020.