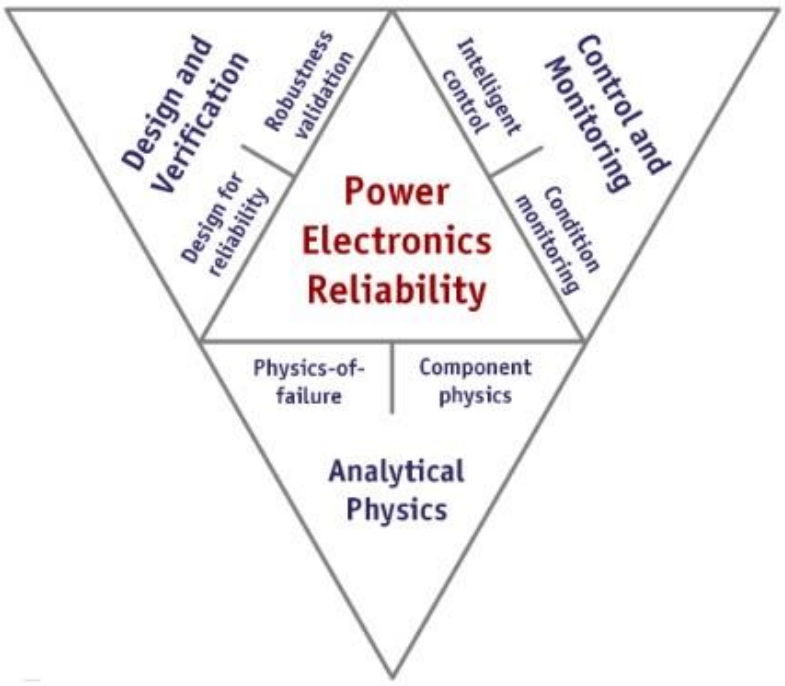
پژوهشگاه نیرو

Niroo Research Institute

NRI-ER-879-PIEPN23-00-F

ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت



مدیر پروژه: سعید حاتمی

مجری: محمد مرامی ساران

DOI: 10.30503/nripress.2020.329


بسم الله الرحمن الرحيم

ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت

مدیر پروژه: سعید حاتمی

همکاران پروژه:

فائزه کاردان حلوایی

حسن ابراهیمی راد

بهاره زارعی

مجری:

محمد مرامی ساران

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۱

کد گزارش: NRI-ER-879-PIEPN23-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی الکترونیک قدرت

ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت/ مدیر پروژه: سعید حاتمی. ویراستار: سیما حسینی ماکان. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۱۲۱ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. کاردان حلوایی،فائزه، همکار پروژه. ۲. ابراهیمی راد، حسن، همکار پروژه. ۳. زارعی، بهاره، همکار پروژه. ۴. مرامی ساران، محمد، مجری. ۵. توزیع / انتقال / کیفیت توان ۵. تولید

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی الکترونیک قدرت

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب، انتهای‌بلوارشهیددادمان، پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه:www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات:publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب سعید حاتمی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. فائزه کاردان حلوایی
۲. حسن ابراهیمی‌راد
۳. بهاره زارعی

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

پیشگفتار

در دهه‌های اخیر، به دلیل پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های نیمه هادی قدرت، الکترونیک قدرت بیشتر و بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و در طیف گسترده‌تری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سیستم‌های توزیع نیرو، تولید انرژی تجدیدپذیر تا درایو موتور، الکترونیک قدرت بخش مهمی از اکثر سیستم-های الکتریکی است، که نقشی اساسی در کارآیی و قابلیت اطمینان کلی آن‌ها دارد. علی رغم تقاضای روزافزون برای سیستم‌های الکترونیکی قابل اعتماد و مستحکم‌تر، رویکردهای متداول برای ارزیابی و طراحی قابلیت اطمینان هنوز هم عمدتاً بر اساس "طراحی سریع" اجزای حیاتی و/یا، اطلاعات و آمار خرابی تجارب میدانی است. با این حال، به تنهایی، این روش‌ها کافی نیستند و می‌توانند نسبتاً ناکارآمد، گران و وقت گیر شوند.

به منظور پرداختن به این موضوعات، روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل‌سازی در سال‌های اخیر محبوبیت یافته‌اند. با استفاده از مدل‌های الکتریکی گرمایی اجزای الکترونیک قدرت (به عنوان مثال، ادوات نیمه هادی قدرت، خازن‌ها و غیره)، همراه با مدل‌های مبتنی بر آزمایش، می‌توان در مقایسه با آمار مبتنی بر برآورد، سریع‌تر و واقعی‌تر طول عمر را به دست آورد. با این حال، با توجه به این واقعیت که این روش فیزیک-های مختلف را در نظر می‌گیرد (به عنوان مثال، الکتریکی، حرارتی، مکانیکی)، پیاده سازی و/یا انطباق با کاربردهای مختلف نسبتاً دشوار است. بنابراین، نیاز به رویکرد پیاده‌سازی مدولارتر و استانداردتر بوجود می‌آید. علاوه بر این، معیارهای قابلیت اطمینان حاصل نسبت به عدم قطعیت‌های ارائه شده توسط مدل‌های مختلف مورد استفاده در روش ارزیابی قابلیت اطمینان، حساس هستند. عواملی مانند پروفایل‌های مأموریت، دینامیک سیستم، مدل‌های حرارتی، روش‌های شمارش یا مدل‌های طول عمر، عدم قطعیت در برآورد طول عمر قطعات الکترونیکی قدرت را ایجاد می‌کنند. بنابراین، برای داشتن درک صحیح از عدم اطمینان و فرضیات اساسی مدل-های به کار رفته، حساسیت پارامترها و تجزیه و تحلیل ریسک بسیار ضروری است.

امروزه، از ابزارهای نرم‌افزاری به طور گسترده‌ای در روند طراحی الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. با این وجود، علی رغم نیاز به ارزیابی سریع قابلیت اطمینان در مراحل اولیه تولید محصولات الکترونیکی قدرت، هنوز کمبود ابزار نرم افزاری مبتنی بر قابلیت اطمینان پروفایل ماموریت وجود دارد. بنابراین، یک ابزار نرم‌افزاری که بتواند رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان را تسهیل کند و یک ارزیابی کارآمد محاسباتی از سیستم الکترونیک قدرت را ارائه دهد، بسیار مورد نیاز است. در این پروژه، یک نرم‌افزار با رابط کاربری آسان را پیاده سازی خواهد کرد تا با استفاده از آن بتوان حداقل شاخص‌های اجزای الکترونیک قدرت در جهت افزایش قابلیت اطمینان را استخراج نمود.

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های الکترونیک قدرت شدیدا وابسته به زمینه کاری سیستم، نوع مبدل استفاده شده و ادوات به کار برده شده در مبدل می باشد. به طور مثال، نحوه تنش گرمایی که در سیستم های تبدیل انرژی خورشیدی بر روی کلیدهای قدرت وارد می شود با سیستم های تبدیل انرژی بادی متفاوت است. از این رو جهت ارزیابی قابلیت اطمینان نیازمند شناخت توپولوژی مبدل، روش کنترل مبدل و کلیدهای استفاده شده در آن الزامی است. از سوی دیگر، پارامترهای زیادی در ارزیابی قابلیت اطمینان و محاسبه طول عمر قطعات سیستم الکترونیک قدرت تاثیرگذار هستند. اکثر این پارامترها از تست های عملی و یا بررسی فیزیکی روی قطعات استخراج می شوند. مدل های محاسبه طول عمر بسیاری توسط محققین ارائه شده است که بسته به نوع ادوات استفاده شده و همچنین نوع خرابی ادوات تعداد پارامترهای متفاوتی در این مدل ها مدنظر قرار گرفته شده است. همچنین با توجه به این که سیستم های الکترونیک قدرت در شرایط متفاوت آب و هوایی و بارگذاری های متفاوت به کار برده می شوند، مشخصه های مأموریت سیستم ها باید به دقت شناسایی شده و از الگوریتم های شمارش تعداد چرخه های تنش روی مبدل ها استفاده شود.

رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان (DfR) و رویکرد تخمین طول عمر مبتنی بر مشخصه های مأموریت در سالهای اخیر محبوبیت یافته است. چرا که شرایط متفاوت آب و هوایی و بارگذاری های متفاوت در سیستم های الکترونیک قدرت بر روی قابلیت اطمینان سیستم تاثیر دارد. بنابراین برای بررسی تاثیرات مشخصه های مأموریت بر روی قابلیت اطمینان سیستم باید این مشخصه ها به دقت شناسایی شده و بارگیری حرارتی تجهیزات با در نظر گرفتن این مشخصه ها به عنوان ورودی سیستم، استخراج شود. همچنین به منظور تخمین تعداد چرخه های منتج به خرابی (Nf) که از مدل های طول عمر استفاده میشود از الگوریتم های شمارش مانند الگوریتم Rainflow، برای استخراج داده های حاصل از چرخه های حرارتی استفاده میشود و در نهایت کل تخریب تجمعی تجهیز بر اساس قانون ماینر محاسبه میگردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ۶
مقدمه ۱
۱- بررسی سابقه پژوهش در دنیا و ایران ۲
مقدمه ۳
۱-۱- تاریخچه قابلیت اطمینان ۳
۱-۲- ارزش قابلیت اطمینان ۶
۱-۳- تعریف قابلیت اطمینان ۸
۱-۴- جایگاه تجهیزات نیمه هادی قدرت در قابلیت اطمینان مبدل ها ۱۱
۱-۴-۱- ساختار کلی تجهیزات نیمه هادی قدرت ۱۴
۱-۴-۲- انواع خرابی ها در ساختار ماژول قدرت ۱۶
۱-۴-۳- اثرات فرسودگی تجهیزات نیمه هادی قدرت بر روی پارامترها و ویژگی‌های تجهیز و پارامترهای مشخص‌کننده وضعیت نیمه هادی قدرت ۱۷
۱-۵- فیزیک خرابی قطعات الکترونیک قدرت ۱۹
۱-۶- قابلیت اطمینان در پکیجینگ الکترونیک قدرت ۲۰
۱-۶-۱- مفاهیم قابلیت اطمینان برای پکیج های الکترونیک قدرت ۲۱
۱-۶-۲- آزمایشهای قابلیت اطمینان برای پکیج الکترونیک قدرت ۲۲
۱-۷-قابلیت اطمینان در سیستم های الکترونیک قدرت ۲۵
۱-۷-۱-آزمایش قابلیت اطمینان و اعتبار سنجی ۲۶
۱-۷-۲- قاعده کلی طراحی دست بالای قطعه ۲۶
۱-۷-۳-تجزیه و تحلیل اثر و حالت خرابی (FMEA) ۲۷
۱-۷-۴- طراحی برای قابلیت اطمینان (DfR) ۲۸

۱-۷-۵- عدم قطعیت در تخمین طول عمر ۲۹
۱-۸- روش طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR) مبدل های الکترونیک قدرت ۳۰
۱-۸-۱- چالش ها و فرصت ها در تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت ۳۲
۱-۸-۲- مراکز ارزیابی و پیش بینی قابلیت اطمینان ۳۴
۱-۸-۳- ابزار ارزیابی قابلیت اطمینان برای الکترونیک قدرت ۳۴
۱-۹- سابقه مطالعه قابلیت اطمینان مبدلهای الکترونیک قدرت در ایران ۳۶
۱-۹-۱- سیستم پشتیبان ۳۷
۱-۹-۲- خطاپذیری ۳۹
۱-۹-۳- اصلاح توپولوژی مبدل ۴۲
۱-۹-۴- بررسی عوامل استرسزای تجهیزات الکترونیک قدرت ۴۳
۱-۹-۵- ارزیابی و محاسبه قابلیت اطمینان مبدلهای الکترونیک قدرت ۴۴
۱-۱۰- مدل کارکوف ۴۷
۱-۱۱- جمعبندی ۴۸
۲- استخراج حداقل شاخصهای اجزای الکترونیک قدرت به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدلها ۴۹
۲-۱- مقدمه ای بر اینورتر های فتوولتائیک ۴۹
۲-۱-۱- ساختارهای اینورتر مشتق شده از توپولوژی H-Bridge ۵۱
۲- ۱-۱-۱- اینورتر تمام پل عمومی ۵۱
۲- ۲-۱-۱- اینورتر H5 (SMA) ۵۲
۲-۱-۱-۳- اینورتر HERIC (Sunways) ۵۳
۲-۱-۱-۴- اینورتر REFU ۵۴
۲- ۵-۱-۱- اینورتر تمام پل با بای پس DC (FB-DCBP) ۵۵
۲- ۶-۱-۱- یکسو کننده ولتاژ صفر تمام پل - FB-ZVR ۵۶
۲- ۷-۱-۱- اینوتر PV افزاینده مبتنی بر H-Bridge با ترانسفورماتور فرکانس بالا ۵۷
۲- ۸-۱-۱- اینورتر افزاینده با ترانسفورماتور فرکانس پایین ۵۷

۲- ۹-۱-۱- خلاصه ای از توپولوژی های مشتق شده از H-Bridge ۵۸
۲-۱-۲- ساختارهای اینورتر مشتق شده از توپولوژی NPC ۵۹
۲- ۱-۲-۱- اینورتر نیمه پل نقطه خنثی کلمپ شده (NPC) ۵۹
۲- ۲-۲-۱- اینورتر Conergy NPC ۵۹
۲- ۳-۲-۱- خلاصه ای ازتوپولوژی های اینورترهای مشتق شده از NPC ۶۰
۲-۱-۳- اینورتر PV سه فاز ۶۱
۲-۲- مبدل های پرطرفدار توربین های بادی ۶۲
۱-۲-۲- توپولوژی پشت به پشت دیود کلمپ سه سطح (3L-NPC BTB) ۶۲
۲-۲-۲- توپولوژی پشت به پشت H-Bridge سه سطحه (3L-HB BTB) ۶۳
۲-۳- مبدل های پرطرفدار برای درایو موتورها ۶۳
۲-۴- بررسی و تحلیل شاخصهای مختلف و استخراج حداقل شاخصها جهت ارزیابی قابلیت اطمینان ۶۵
۲-۵- رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان برای الکترونیک قدرت و پیش بینی طول عمر براساس مشخصه های ماموریت ۶۶
۲-۵-۱- مدل سازی مشخصه ماموریت ۶۷
۲-۵-۱-۱- مشخصات ماموریت محیطی و کاری ۶۸
۲-۵-۱-۲- مدل سازی در سطح سیستم ۶۸
۲-۵-۱-۳- مدل سازی در سطح مبدل ۶۹
۲-۵-۲- مدل سازی قابلیت اطمینان در سطح قطعه ۶۹
۲-۵-۲-۱- مدل سازی الکتریکی- حرارتی ۷۰
۲-۵-۲-۲- قابلیت اطمینان در سطح قطعات ۷۱
۲-۵-۳- مدل های طول عمر و استخراج حداقل شاخصها ۷۲
۲-۵-۴- مدل های تخریب ۷۷
۲-۵-۵- الگوریتم شمارش ۷۸

۲-۵-۵-۱- کاربرد الگوریتم Rain flow برای تخمین طول عمر نیمه هادی ها ۷۸

۶-۲-جمع بندی و نتیجه گیری ۸۱

۳- توسعه یک برنامه نرمافزاری به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدلها ۸۲

مقدمه ۸۲

۱-۳- ساختار کلی سیستم PV متصل به شبکه ۸۳

۲-۳- ابزار نرم افزار PLECS ۸۳

۳-۳-- ساختار کلی سیستمPV متصل به شبکه ۸۴

ساختار کلی سیستم PV متصل به شبکه که در این پروژه مدلسازی شده است درشکل ۳-۲ نشان داده شده است و همچنین پارامترهای این سیستم در جدول ۳-۱ آورده شده است. ۸۵

۴-۳- روند ارزیابی قابلیت اطمینان ۸۷

۱-۴-۳-ترجمه پروفایل های ماموریت به بارگیری حرارتی ۸۷

۲-۴-۳- تفسیر چرخه های حرارتی ۹۲

۳-۴-۳- ارزیابی طول عمر ۹۳

۵-۳- جمع بندی و نتیجه گیری ۹۵

مراجع ۹۶

فهرست اشکال

عنوان شماره صفحه

شکل ۱-۱ نمودار نقاط عطف کلیدی در پیشرفت نیمه هادیهای الکترونیک قدرت [۴] ۵
شکل ۲-۱ نقاط عطف کلیدی در پیشرفت مهندسی قابلیت اطمینان [۴] ۵
شکل ۳-۱ ارتباط بین هزینه و قابلیت اطمینان [۲] ۷
شکل ۴-۱- توزیع نرخ خرابی ها برای یک PV در مقیاس مطلوب [۸] ۱۱
شکل ۵-۱- توزیع نرخ خرابی ها برای یک درایو سرعت قابل تنظیم [۹] ۱۲
شکل ۶-۱- توزیع نرخ خرابی های اجزای مبدل های الکترونیک قدرت [۹] ۱۲
شکل ۷-۱- توزیع استرس در تجهیزات الکترونیک قدرت [10] و[۱۱] ۱۳
شکل ۸-۱- ساختار نوعی ماژول الکترونیک قدرت [۱۸] ۱۵
شکل ۹-۱- الف) فرسودگی و آسیب لایه لحیم، ب) فرسودگی سیم های پیوندی و ج) آسیب لایه متالیزاسیون امیتر [۲۰] ۱۷
شکل ۱۰-۱- حالت‌های خرابی برای یک ماژول الکترونیک قدرت [۲۰] ۱۷
شکل ۱۱-۱-(الف)، حوزه های تعریف شده درالکترونیک قدرت توسط نیول در دهه ۱۹۷۰ و (ب) تحقیقات قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت از چشم انداز امروزه ۲۰
شکل ۱۲-۱- نمودارچرخه قدرت برای یک پکیج یا ماژول قدرت [۲۸] ۲۵
شکل ۱۳-۱- رویکرد بهبود قابلیت اطمینان مبتنی بر آنالیز داده های پس از خرابی [۴۳] ۲۸
شکل ۱۴-۱- نمودار کلی رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان مبتنی بر فیزیک خرابی PoF ۲۹
شکل ۱۵-۱- منابع عدم قطعیت احتمالی در روش ارزیابی قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت مبتنی بر مدل و تأثیر آنها در برآورد طول عمر قطعه های سیستم. ۳۰
شکل ۱۶-۱- پیشرفته ترین روش طراحی قابلیت اطمینان برای سیستم های الکترونیک قدرت. HALT - تست سرعت یافته محدود شده ؛ CALT ۳۱
شکل ۱۷-۱- جعبه ابزار پیش بینی قابلیت اطمینان برای سیستم های الکترونیک قدرت ۳۲
شکل ۱۸-۱ نمای کلی مبدل باک-بوست DC-DC دوطرفه با M شاخه موازی اصلی و N شاخه موازی اضافی [۶۵] ۳۸
شکل ۱۹-۱ نمایی از ساختار مازاد پیشنهادی برای کلیدهای قدرت [۶۶] ۳۹
شکل ۲۰-۱ نمایی از مبدل DC-AC خطاپذیر پیشنهادی برای تغذیه درایو موتور القایی [۶۷] ۳۹
شکل ۲۱-۱ نمایی از اینورتر ۷ سطحی H-Bridge آبشاری پیشنهادی [۶۸] ۴۰
شکل ۲۲-۱ نمایی از مبدل DC-DC شبه Z- Source پیشنهادی [۶۹] ۴۱
شکل ۲۳-۱ نمایی از مبدل آبشاری H-bridge پیشنهادی [۷۰] ۴۱
شکل ۲۴-۱ نمایی از مبدل چندسطحی ترانسفورماتوری آبشاری پیشنهادی [۷۳] ۴۲

شکل ۲۵-۱ نمایی از مبدل DC-DC پیشنهادی [۷۵] ۴۳
شکل ۲۶-۱ ساختار پیشنهادی برای متعادلسازی ولتاژ IGBT [۷۸] ۴۴
شکل ۲۷-۱ مبدلهای الف) دومرحله‌ای ب) سه مرحله ای رابط DC/DC متصل به پنل خورشیدی ۴۵
شکل ۲۸-۱ نمودار انتقال حالت مارکوف دو حالته [۶] ۴۷
شکل ۱-۲- اینورتر تمام پل (FB) ۵۲
شکل ۲-۲- اینورتر H5 ۵۳
شکل ۳-۲- اینورتر HERIC (Sunways) ۵۴
شکل ۴-۲- ساختار اینورتر REFU ۵۵
شکل ۵-۲- ساختار اینورتر تمام پل با بای پس DC – (FB-DCBP) ۵۶
شکل ۶-۲- ساختار یکسو کننده ولتاژ صفر تمام پل - FB-ZVR ۵۷
شکل ۷-۲- اینورتر افزاینده مبتنی بر تمام پل با یک ترانسفورماتور فرکانس بالا ۵۷
شکل ۸-۲- اینورتر افزاینده مبتنی بر مبدل DC-DC افزاینده با ترانسفورماتور فرکانس پایین ۵۸
شکل ۹-۲- اینورتر نیمه پل نقطه خنثی کلمپ شده (NPC) ۵۹
شکل ۱۰-۲- ساختار اینورتر Conergy NPC ۶۰
شکل ۱۱-۲- اینورتر سه فاز PV تمام پل ۶۲
شکل ۱۲-۲- اینورتر PV مبتنی بر سه اینورتر NPC تک فاز ۶۲
شکل ۱۳-۲- توپولوژی پشت به پشت دیود کلمپ سه سطح (3L-NPC BTB) ۶۳
شکل ۱۴-۲- توپولوژی پشت به پشت H-Bridge سه سطحه ۶۳
شکل ۱۵-۲- ساختار مبدل 3L-NPC برای درایو موتور ۶۴
شکل ۱۶-۲- رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل برای سیستم های الکترونیک قدرت ۶۷
شکل ۱۷-۲- نمودار مرحله مدل سازی مشخصات ماموریت وابسته به هر برنامه ۶۸
شکل ۱۸-۲- نمودار بلوک مدل سازی الکتریکی- حرارتی در سطح تجهیزات نیمه هادی قدرت ۷۱
شکل ۱۹-۲- نمودار بلوک قابلیت اطمینان در سطح قطعه، مدل سازی قابلیت اطمینان تجهیزات نیمه هادی قدرت ۷۲
شکل ۲۰-۲-"Rainflow"، (الف) توالی بار و (ب) طرح استرس-کرنش آن ۷۹
شکل ۲۱-۲- الگوریتم Rain flow یک سیگنال با اطلاعات چرخه از کد موجود در MATLAB ۸۰
شکل ۲۲-۲- پروفایل تغییرات دمای یک IGBT ۸۰
شکل ۲۳-۲- پروفایل تعداد چرخه ها بر اساس نوسانات دما و دمای متوسط بدست آمده از الگوریتم Rain flow ۸۱
شکل ۲۴-۲-نمودار روند تخمین طول عمر تجهیز قدرت ۸۱
شکل ۳-۱: ساختار کلی یک سیستم PV رایج متصل به شبکه ۸۳
شکل ۳-۲: اینورتر PV متصل به شبکه ۸۵
شکل ۳-۳: ساختار سیستم PV ۸۶

شکل۳- ۴: کنترل کننده اینورتر ۸۶
شکل ۳-۵: روند ارزیابی قابلیت اطمینان ۸۸
شکل ۳-۶: پروفایل اول تابش سالانه ۸۹
شکل۳-۷: پروفایل اول دمای محیط سالانه ۸۹
شکل۳- ۸: پروفایل دوم تابش سالانه ۹۰
شکل۳- ۹: پروفایل دوم دمای محیط سالانه ۹۰
شکل۳- ۱۰: دمای پیوند سالانه کلید IGBT در اینورتر بر اساس پروفایل های اول ۹۱
شکل۳- ۱۱: دمای پیوند سالانه کلید IGBT در اینورتر بر اساس پروفایل های دوم ۹۲
شکل۳- ۱۲: نتایج حاصل از الگوریتم Rainflow برای پروفایل ماموریت اول ۹۳
شکل۳- ۱۳ : نتایج حاصل از الگوریتم Rainflow برای پروفایل ماموریت دوم ۹۳

فهرست جداول

عنوان شماره صفحه

جدول ۱-۱: شاخص خرابی کلیدهای قدرت IGBT [۲۲] ۱۸
جدول ۳-۱: مشخصات طراحی سیستم PV ۸۵
جدول۳- ۲: امپدانس حرارتی تجهیز ۹۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

مقدمه

امروزه قابلیت اطمینان از مهم‌ترین چالش‌های صنایع الکترونیک قدرت می‌باشد. تاکنون در کشور به این موضوع توجه آنچنان صورت نگرفته است. با توجه به طراحی و ساخت روزافزون مدارات الکترونیک قدرت خصوصاً در درایو موتور و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، لزوم توجه بیشتر به موضوع قابلیت اطمینان بیشتر احساس می‌شود. طراحی‌های جدید با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و طول عمر قطعات منجر به صرفه جویی بسیاری در زمان و هزینه خواهد شد. همچنین می‌توان با توجه به کاربرد سیستم الکترونیک قدرت مربوطه، بارگذاری و شرایط محیطی سیستم، طراحی بهینه تری برای سیستم در نظر گرفت تا نه تنها هزینه تعمیرات و نگهداری کاهش یابد بلکه هزینه طراحی دست بالا برای کاربری سیستم در همه شرایط از میان برود.

با توجه به اهمیت توپولوژی مدارات الکترونیک قدرت در قابلیت اطمینان آن ها، در این کتاب ابتدا مبدل های پرطرفدار در کاربردهای فتوولتائیک، بادی و درایو موتور معرفی می شوند. مشخصات مدارها و نحوه کارکرد و مزایای هریک به تفصیل ارائه می شوند. سپس به معرفی شاخص های مؤثر در ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل های الکترونیک قدرت و پیش بینی طول عمر براساس مشخصه های ماموریت پرداخته می شود. مدل سازی از سطح مشخصه مأموریت آغاز و در ادامه به سطوح سیستم، مبدل و قطعه ادامه می یابد. درادامه نیز مدل های مختلف تخمین طول عمر قطعات و شاخص های به کار رفته در آنها معرفی شده و به چگونی محاسبه تخریب و الگوریتم های شمارش تعداد چرخه کاری منجر به تخریب و پایان طول عمر قطعه پرداخته می شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۱- بررسی سابقه پژوهش در دنیا و ایران

مقدمه

امروزه در تجهیزات الکترونیک قدرت از فناوری و ادوات نیمه‌هادی برای تبدیل و کنترل توان الکتریکی استفاده می‌کنند. کاربرد این تجهیزات در زمینه‌های گوناگون منجر به رشد قابل‌توجهی در استفاده از قطعات الکترونیک قدرت مانند ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق‌شده (IGBT[1]) ، ترانزیستور اثر میدان نیمه‌هادی فلزی اکسید (MOSFET)[2] و دیودها شده است. این تجهیزات به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای کشش الکتریکی مانند لوکوموتیو، آسانسور، مترو و اتومبیل مورداستفاده قرار می‌گیرند [۱]. با توجه به افزایش پیچیدگی تجهیزات الکترونیک قدرت و همچنین استفاده وسیع آن‌ها در بسیاری از کاربردها طی بیست سال اخیر، قابلیت اطمینان این تجهیزات و همچنین مبدل‌های الکترونیک قدرت موردتوجه قرارگرفته است [۲]. یکی از چالش‌های مرتبط با قابلیت اطمینان مبدل‌ها به تجهیزات نیمه‌هادی قدرت و خازن‌های الکترولیت برمی‌گردد زیرا این تجهیزات از آسیب-پذیرترین اجزا می‌باشند. اغلب مبدل‌های الکترونیک قدرت مجهز به سیستم پشتیبان[3] (سیستمی که در صورت وجود خطا در سیستم اصلی وارد عمل می‌شود) نمی‌باشند. بنابراین وقوع هرگونه خطا در قطعات و تجهیزات منجر به ازکارافتادن کل سیستم خواهد شد. این وقفه‌های برنامه‌ریزی نشده نه‌تنها ایمنی سیستم را کاهش می‌دهند بلکه هزینه عملکرد سیستم را نیز افزایش داده و تا حدودی مزایای استفاده از سیستم‌های الکترونیک قدرت را کم‌رنگ می‌کنند [۳]. ازاین‌رو ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت و به‌ویژه تجهیزات نیمه‌هادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۱-۱- تاریخچه قابلیت اطمینان

با پیشرفت و پیچیدگی در ادوات الکترونیک قدرت، قابلیت اطمینان این تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است، لذا دراین بخش به تاریخچه آن پرداخته می‌شود. می‌توان یکی از اولین کاربردهای قابلیت اطمینان را مربوط به دستگاه تلگراف دانست. تلگراف توسط باطری شارژ شده و دارای فرستنده و گیرنده‌های ساده بوده که با کابل به هم متصل شده‌اند. در گذشته مهم‌ترین حالت خرابی ممکن برای این سیستم پارگی کابل یا ولتاژ ناکافی بود.

در سال ۱۹۱۵، رادیو در جامعه به‌تدریج ظاهر شد. اتومبیل‌ها در سال ۱۹۲۰ بیشتر مورداستفاده عمومی قرار گرفتند و کاربردهای قابلیت اطمینان مکانیکی را به نمایش گذاشتند. در دهه ۱۹۲۰ بهبود در محصولات با استفاده از کنترل کیفیت آماری که توسط دکتر والتر شوارت در آزمایشگاه بل توسعه پیدا کرد حاصل شد. در مسیری موازی با قابلیت اطمینان محصولات، توسعه‌ای در آمارها نیز در قرن ۲۰ صورت گرفت. آمارها به‌عنوان ابزاری برای سنجش به‌عنوان جزئی لاینفک همراه با توسعه مفاهیم قابلیت اطمینان همراه شد.

[1] Insulated-gate bipolar transistor
[2] Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor
[3] Redundant

در این مقطع، طراحان همچنان در برابر قابلیت اطمینان و تعمیر خرابی‌ها مسئول بودند و توجیه اقتصادی برای انجام برنامه‌های پیشگیرانه وجود نداشت. در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰، آقای تیلور تحقیقاتی پیرامون دستیابی به راه‌کارهایی جهت افزایش استحکام محصولات و افزایش بازده خط تولید انجام داد. او اولین کسی بود که مهندسی را از مدیریت و کنترل جدا کرد.

تا دهه ۱۹۴۰ قابلیت اطمینان و مهندسی قابلیت اطمینان وجود نداشت. قبل از جنگ جهانی دوم (سال ۱۳۴۵-۱۳۳۹) توجه نسبتاً کمی به قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی می‌گردید. بیشتر دستگاه‌ها ساده بودند و از اجزای کمی در آن‌ها استفاده می‌شد که در نتیجه دارای سطح قابل‌قبولی از قابلیت اطمینان بودند. علاوه بر این، تجهیزات فقط در یک محیط مطلوب و بدون گرما، لرزش یا رطوبت بیش‌ازحد مورداستفاده قرار می‌گرفتند. اما در طول جنگ شرایط به‌شدت تغییر کرد. تجهیزاتی با قابلیت تحمل گرمای صحرا، سرمای شدید و رطوبت بالا موردنیاز بودند که ازنظر فنی بسیار پیشرفته‌تر و پیچیده‌تر می‌شدند. ازآنجاکه همه این عوامل سبب افزایش احتمال خرابی تجهیزات می‌شوند، مطالعه و بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات ضروری گردید تا از عملکرد مطلوب تجهیزات ساخته‌شده برای خدمات نظامی برای مدت طولانی اطمینان حاصل گردد. برخی از نتایج یک تحقیق آمریکایی در مورد تجهیزات زمان جنگ، اهمیت این مسئله را آشکار نمود. این نتایج نشان دادند که اکثر تجهیزات الکترونیکی فقط در حدود یک سوم زمان کار می‌کنند و به‌طور متوسط هزینه تعمیر و نگه‌داری این تجهیزات ده برابر قیمت خرید اصلی آن‌ها است [۲].

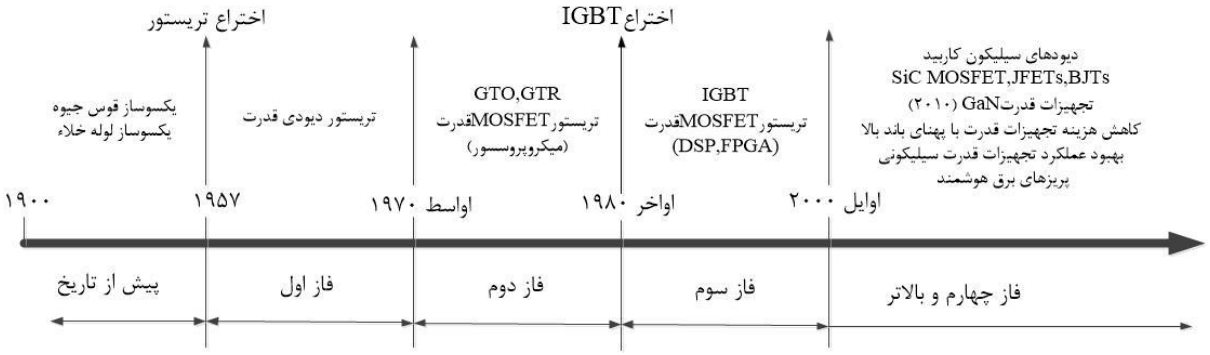
یکی از ضعف‌های اصلی در تجهیزات الکترونیکی، لوله‌های خلاء[1] بود، بنابراین در سال ۱۹۴۶ توسط شرکت-های هواپیمایی آمریکایی، یک گروه تحقیقاتی برای بررسی قابلیت اطمینان تأسیس گردید. به دنبال آن کار بر روی سایر قطعات الکترونیکی انجام شد و در سال ۱۹۵۲ یک گروه مشاوره‌ای در مورد قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی (AGREE2) توسط دولت آمریکا تأسیس شد.

پنج سال بعد در سال ۱۹۵۷، گزارش گروه مشاوره (AGREE) در مورد قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی منتشر شد. این زمانی بود که مهندسی قابلیت اطمینان به یک رشته متمایز تبدیل شد این گروه گزارشی درباره مشخصات و آزمایش قابلیت اطمینان تجهیزات منتشر کرد و دولت آن را تصویب نمود. پس‌ازآن اکثر تجهیزات خریداری‌شده برای استفاده نظامی داری بند قابلیت اطمینان در مشخصات خود شدند و بعداً همین روش توسط شرکت‌های هواپیمایی غیرنظامی نیز استفاده شد.

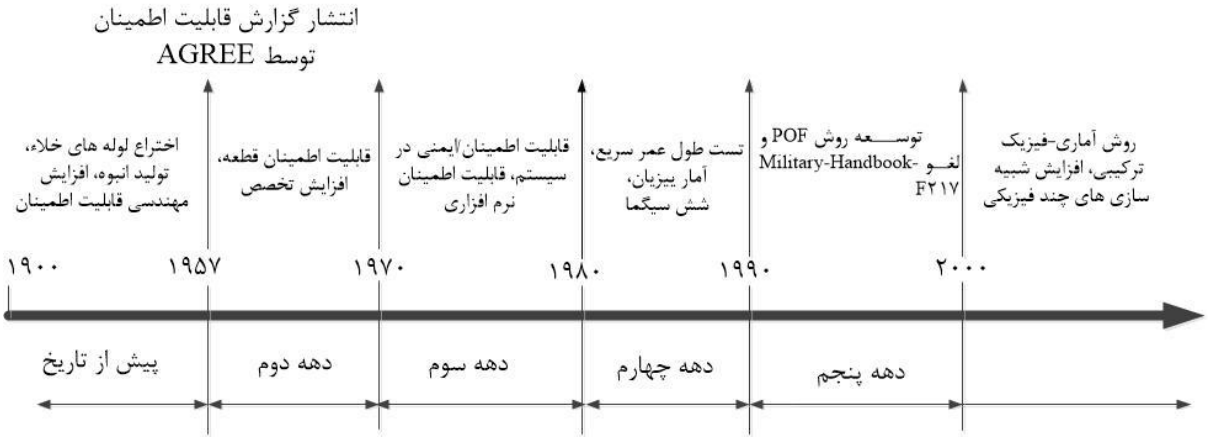
در ادامه، توسعه و پیشرفت فناوری به خصوص در زمینه ماهواره‌ها و سایر وسایل نقلیه فضایی تقاضای فزاینده-ای برای قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی ایجاد کرد و تحقیقات و هزینه‌های بیشتری را در این زمینه در پی داشت.

[1] Thermionic Valve
[2] Advisory Group on the Reliability Electronic Equipment

از سوی دیگر، در کنار این روند و تحقیقات، تریستور در سال ۱۹۵۷ به‌عنوان آغاز الکترونیک قدرت مدرن معرفی شد. در شکل ۱-۱ توسعه تاریخی ادوات الکترونیک قدرت نشان داده‌شده است. پیشرفت تجهیزات نیمه‌هادی قدرت سبب بالا رفتن سرعت کلید زنی، دامنه توان و رنج دمایی شده و کارایی و قابلیت اطمینان بهتر سیستم‌های الکترونیک قدرت را امکان‌پذیر می‌کند[۴].



شکل ۱-۱ نمودار نقاط عطف کلیدی در پیشرفت نیمه‌هادی‌های الکترونیک قدرت [۴]



شکل ۲-۱ نقاط عطف کلیدی در پیشرفت مهندسی قابلیت اطمینان [۴]

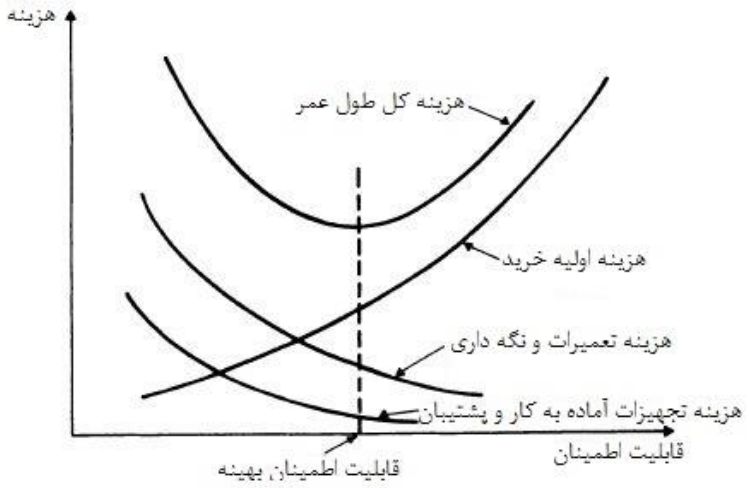
روند توسعه و پیشرفت مهندسی قابلیت اطمینان در شکل ۲-۱ نشان داده‌شده است. از زمان ظهور مهندسی قابلیت اطمینان (۱۹۵۷) تاکنون فعالیت های پیشگامانه زیادی به مباحث مختلف قابلیت اطمینان اختصاص‌یافته است. در سال‌های ۱۹۵۷-۱۹۷۰ قابلیت اطمینان قطعات الکترونیکی و در سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۸۰ قابلیت اطمینان سیستم‌ها مورد توجه محققین قرار گرفت. یکی از جریان های اصلی پیش‌بینی قابلیت اطمینان بررسی‌های کمی بر

اساس داده‌های تجربی و کتاب‌های راهنمای مختلف منتشرشده توسط ارتش و صنعت است. جریان دیگری از این رشته بر شناسایی و مدل‌سازی علل فیزیکی خرابی قطعات متمرکز است، که مفهوم اولیه فیزیک خرابی (PoF[1]) است که در سال ۱۹۶۲ ارائه شد. رویکرد PoF یک روش مبتنی بر تجزیه‌وتحلیل مکانیسم خرابی علت ریشه‌ای و تأثیر مواد، نقص‌ها و تنش‌ها بر قابلیت اطمینان محصول است . بااین‌حال، تا دهه ۱۹۸۰، مدل‌های نرخ خرابی ثابت بر اساس کتاب‌های راهنما (به‌عنوان‌مثال ، سری Military-Handbook-۲۱۷) عمدتاً برای توصیف عمر مفید قطعات الکترونیکی مورداستفاده قرار می‌گرفت. از دهه ۱۹۹۰، با افزایش پیچیدگی سیستم‌های الکترونیکی و به‌ویژه استفاده از مدارهای مجتمع، شواهد بیشتری نشان می‌دهد که مدل‌های نرخ خرابی ثابت برای این منظور ناکافی هستند. ازاین‌رو ، Military-Handbook-217F رسماً در سال ۱۹۹۵ لغو شد. در عوض، رویکرد PoF نقش مهمی در مهندسی قابلیت اطمینان پیداکرد [۴].

۱-۲- ارزش قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان تنها ویژگی یک دستگاه یا سیستم الکترونیکی است که باید هنگام انتخاب یک طرح از بین چندین طرح جایگزین موردتوجه قرار گیرد. از نظر کاربران، منطقی‌ترین معیار برای تصمیم‌گیری در مورد بهترین طراحی، حداقل هزینه کل عمر است. این روش شامل برآورد هزینه خرید تجهیزات و واحدهای جایگزین (پشتیبان) اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری معمول و قطعات یدکی برای تعویض و در برخی موارد هزینه عدم توانایی کار در صورت خرابی تجهیزات بدون اخطار و خروج از خدمات برای تعمیر است. سپس از کل هزینه برآورد شده برای کلیه این فعالیت‌ها در طول کل عمر تجهیزات به‌عنوان معیار ارزش استفاده شده و به‌این‌ترتیب کمترین هزینه طول عمر اتخاذ می‌شود. ازاین‌رو قابلیت اطمینان تجهیزات به‌عنوان یک پارامتر مهم در طراحی در نظر گرفته می‌شود. در واقع، با افزایش قابلیت اطمینان، هزینه خرید تجهیزات ذخیره‌شده در صورت خرابی، هزینه تعویض قطعات یدکی و هزینه تعمیر و نگهداری توسط کارکنان کاهش می‌یابد. بااین‌حال، هم‌زمان با افزایش قابلیت اطمینان، هزینه طراحی و توسعه، و قیمت خرید اولیه هم با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. بنابراین مقطعی وجود دارد که فراتر از آن هیچ‌گونه منفعت اقتصادی با افزایش قابلیت اطمینان حاصل نمی‌شود. این مقطع، قابلیت اطمینان بهینه نام دارد. شکل ۳-۱ نحوه کلی تغییر هزینه‌ها را با قابلیت اطمینان نشان می‌دهد.

[1] Physics-Of-Failure



شکل ۳-۱ ارتباط بین هزینه و قابلیت اطمینان [۲]

قیمت خرید اولیه نشان‌دهنده هزینه‌های اضافی طراحی و توسعه بوده که شامل هزینه خرید قطعاتی با قابلیت اطمینان بالاتر به منظور افزایش قابلیت اطمینان کلی سیستم است. شیب منحنی نیز به مقیاس تولید بستگی دارد. همان‌طور که واحدهای بیشتری ساخته می‌شوند ، هزینه‌های طراحی می‌تواند به تعداد بیشتری تقسیم شود و هزینه کل برای نصب کاهش می‌یابد [۲].

در تجهیزاتی که از چندین واحد تشکیل‌شده است، برخی از واحدهای اضافی باید ذخیره شوند تا جایگزین واحدهای معیوب یا تحت تعمیر شوند. با افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، واحدهای به حالت آماده‌به‌کار کمتری نیاز است. خریدار هر سیستم الکترونیکی پیچیده و گران‌قیمت در حالت ایده‌آل باید تعداد زیادی از طرح‌های مختلف با آنالیز هزینه‌های هر طرح (مطابق با شکل ۳-۱)، را برای انتخاب داشته باشد. درنتیجه می‌توان هزینه کل عمر را برای هر طرح تخمین زد و کم‌هزینه‌ترین طرح را انتخاب نمود. اما، متأسفانه چنین اطلاعات مفصلی به‌ندرت در دسترس است و انتخاب طرح باید بر اساس چند نکته مجزا و مشخص، نه منحنی‌های کامل شکل ۳-۱ باشد [۲].

یکی از مشکلاتی که در جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز برای تخمین هزینه کل عمر وجود دارد، پیش‌بینی دقیق هزینه‌های نگهداری است. اگرچه سایر کاربران این تجهیزات و سازنده آن باید آمار دقیقی از نرخ خرابی و احتمال بروز انواع خطاها داشته باشند ، اما مدت‌زمان لازم برای تعمیر و هزینه آن تا حد زیادی به سازمانی که وظیفه تعمیرات را برعهده دارد، بستگی خواهد داشت. بنابراین کاربر هنگام تلاش برای پیش‌بینی هزینه نگهداری باید تمام این موارد را در نظر بگیرد و این هزینه را برای سال‌های آینده پیش‌بینی کند. صرف‌نظر از تعداد موارد درگیر، ممکن است برای اطمینان از در دسترس بودن قطعات یدکی در طول عمر تجهیزات ، تدابیر خاصی لازم باشد. بااین‌وجود، شرایطی وجود دارد که اطلاعات دقیق موردنیاز برای نمودار شکل ۳-۱ را می‌توان به‌راحتی و با دقت کافی برای انتخاب بین گزینه‌های جایگزین به دست آورد. اولین شرط برای دستیابی به اطلاعات دقیق، زمانی اتفاق می‌افتد که بیشتر طرح‌های تحت پوشش منحنی‌ها، سیستم‌های پشتیبانی[1] هستند که با استفاده از تجهیزات اضافی یا

[1] Redundant Systems

آماده‌به‌کار، دارای قابلیت اطمینان بالاتری می‌باشند [۲].

چنین شرطی ممکن است در مواردی استفاده شود که سیستم اصلی، یا به عبارت دیگر حداقل دستگاه موردنیاز برای انجام‌وظیفه اختصاص‌یافته، از قابلیت اطمینان کمتر از حد مطلوب برخوردار باشد. سپس سیستم‌های با قابلیت اطمینان بیشتری می‌توانند با استفاده از نسخه‌های دوم، سوم و... سیستم اصلی حاصل شوند. در هر حالت هزینه و قابلیت اطمینان آن‌ها به‌سادگی با سیستم اصلی مرتبط است و منحنی‌های پیوسته شکل ۳-۱ به یک سری نقاط گسسته تبدیل می‌شوند، هر نقطه برای هر تکرار. وضعیتی که در آن می‌توان جزئیات بیشتری راجع به قسمت‌های اولیه منحنی‌ها به دست آورد، هنگامی به وجود می‌آید که تجهیزات دارای مرحله توسعه طولانی می‌باشند. منحنی‌های شکل ۳-۱ را می‌توان به‌جای استفاده از مجموعه‌ای از طراحی‌های مختلف برای تجهیزات مشابه، برای هر مرحله پی‌درپی در روند توسعه همان طرح اصلی ترسیم کرد. مرحله توسعه به‌طورمعمول وقتی به پایان می‌رسد که به‌طور مشخص قابلیت اطمینان مطلوب به‌دست‌آمده است. اما اگر زمان و هزینه کم باشد ، ممکن است لازم باشد که طرح خیلی زودتر نهایی شود [۲].

معیار حداقل هزینه کل عمر برای انتخاب سطح بهینه قابلیت اطمینان باعث تقاضای قابلیت اطمینان بسیار بالا برای تجهیزات با طول عمر بالا می‌شود که در آن خرابی قطعات در هزینه تعمیر یا درآمد ازدست‌رفته گران تموم می شود. نمونه‌هایی از این تجهیزات مبدل الکترونیکی تلفن، تکرارکننده‌های تلفن زیر آب[1] و ماهواره‌های ارتباطی هستند [۲].

باوجوداین، سیستم‌های دیگری وجود دارد که الزامات قانونی سطح بالایی از قابلیت اطمینان را برای آن‌ها تعیین می‌کنند، زیرا خرابی این سیستم‌ها ممکن است زندگی انسان را به خطر بیندازد. نمونه این سیستم‌ها در تجهیزات فرود اضطراری هواپیما یا خاموش کردن راکتورهای هسته‌ای در صورت خرابی است. در این شرایط حداقل قابلیت اطمینان قابل‌قبول توسط مقررات تعیین می‌شود و سپس طراح ممکن است سعی کند هزینه طول عمر را با در نظر گرفتن این محدودیت به حداقل برساند. با گسترش دامنه استفاده از تجهیزات و وسایل الکترونیکی در کاربردهایی که قابلیت اطمینان بالا یکی از نیازهای اصلی آن‌ها است، تولید تجهیزات و طراحی سیستم‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر مورد توجه محققین و مهندسین قرار گرفته است [۲].

۱-۳- تعریف قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان مفهومی عمومی بوده که سال‌ها به‌عنوان یک ویژگی مثبت برای یک فرد یا یک محصول شناخته‌شده است. شروع آن در سال ۱۸۱۶ بسیار سریع‌تر ازآنچه خیلی‌ها تصور می‌کردند، بود. کلمه "۱ قابلیت اطمینان۱" برای اولین بار توسط شاعری بنام ساموئل تیلور کالریج ابداع شد.

از نظر آماری قابلیت اطمینان، سازگاری مجموعه‌ای از ابعاد یا ابزارهای اندازه‌گیری است که اغلب به‌منظور

[1] Underwater Telephone Repeaters

تشریح یک آزمایش استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان با خطاهای تصادفی رابطه عکس دارد [۵].

در روانشناسی، قابلیت اطمینان به سازگاری یک آزمایش مربوط می‌شود. یک آزمایش زمانی قابل‌اطمینان است که بعد از چندین بار اجرای آن، نتایج یکسانی حاصل شود. به‌عنوان‌مثال، اگر آزمایشی برای اندازه‌گیری یک ویژگی (مثلاً درون‌گرایی) طراحی شده باشد، هر بار که این آزمایش در مورد موضوعی اجرا می‌شود، نتایج باید تقریباً یکسان باشد [۵].

علاوه بر معنای عمومی کیفی، اصطلاح "قابلیت اطمینان" هنگامی‌که در تجهیزات یا سیستم‌های مهندسی استفاده می‌شود، دارای معنایی کمی است. قابلیت اطمینان به‌عنوان "احتمال عملکرد سیستم بدون خطا برای یک دوره مشخص، مطابق با شرایط محیطی مشخص، تا سطح توافق شده عملکرد" تعریف می‌شود. بنابراین برای مثال قابلیت اطمینان یک کامپیوتر کوچک باید با درنظر گرفتن شرایط کارکرد (برای مثال در شرایط کاری ۸۰ درصد عملکرد از طول ۲۰۰ ساعت، با دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بدون لرزش) ارائه شود. بنابراین شرایط محیطی که تجهیز یا سیستم موردنظر باید در آن قرار گیرد، به طور کامل مشخص می‌شود. شرایط محیطی شامل وضعیت الکتریکی و الکترومغناطیسی، دما و تغییرات آن، شرایط آب و هوایی مانند گردوغبار، رطوبت و شرایط مکانیکی مانند فرکانس و دامنه ارتعاش است. شرایط محیط الکتریکی شامل طیف وسیعی از سیگنال‌های ورودی و تداخل، تغییر ولتاژ تغذیه، اندازه ولتاژ گذرای کلیدزنی و تغییر بار خروجی است. شرایط الکترومغناطیسی محیط نیز باید زمانی که تجهیزات در مجاورت واحدهایی که میدان‌های بزرگ الکترومغناطیسی تولید می‌کنند، قرار می‌گیرند، درنظر گرفته شود.

تعریف کلی ارائه‌شده فوق از قابلیت اطمینان به این معنی است که هر مقدار ذکرشده برای تجهیزات فقط مربوط به دوره کار مربوطه و سطح عملکرد وشرایط کاری مشخص شده است. در بسیاری از موارد، ممکن است کاربر بخواهد از تجهیزات در شرایط متفاوتی بهره‌برداری کند. بنابراین لازم است عملکرد احتمالی تحت این شرایط متفاوت از داده‌های موجود تخمین زده شود.

بنابراین، اگر قابلیت اطمینان یک نوع ترانزیستور داده‌شده در دمای محیط ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و اتلاف کلکتور ۱۵۰ میلی وات و ۳۰۰ میلی وات تعیین شده باشد، می‌توان قابلیت اطمینان را در دوره‌ی کارکرد مشابه برای تلفات ۲۰۰ میلی وات تخمین زد. بااین‌حال ، برآورد قابلیت اطمینان برای اتلاف ۴۵۰میلی وات بسیار بیشتر در معرض خطا خواهد بود، زیرا این مقدار تلفات بسیار بیشتر از بالاترین مقدار تلفات (۳۰۰) است که اطلاعات آن در دسترس می‌باشد.

اگرچه تعریف ارائه‌شده‌ی فوق از قابلیت اطمینان موردقبول است، اما در این تعریف از یک عامل مهم که ممکن است در قابلیت اطمینان تأثیرگذار باشد، یعنی طول عمر تجهیزات، صرف‌نظر می‌شود. برای کار کردن بدون خرابی برای یک دوره مشخص، تجهیزات باید در شروع دوره عملکرد به‌درستی کار کنند، اما این تعریف ارائه‌شده تفکیکی بین تجهیزات جدیدی که عمر خود را شروع می‌کنند و تجهیزاتی که طولانی‌مدت کار می‌کنند و در صورت خرابی

تعمیر می‌شود، قائل نمی‌شود. تجهیزات جدید به‌طورکلی از تجمع نقص‌های کوچک رنج می‌برد که مکان‌یابی و تعمیر این نقص‌ها مدتی طول می‌کشد، به‌طوری‌که میزان خرابی تجهیزات در طول دوره اولیه کار به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته و پس‌ازآن با گذشت زمان فقط به‌آرامی تغییر می‌کند. کاربران معمولاً نسبت به عملکرد تجهیزات در طول عمر اصلی آن‌ها نسبت به عملکرد تجهیز در چند صد ساعت اولیه کار دارای نگرانی بیشتری می‌باشند. در این شرایط ممکن است قابلیت اطمینان پس از یک دوره اولیه "دست‌انداز[1]" مشخص شود. این نشان‌دهنده عملکردی است که ممکن است پس از سپری شدن دوره اولیه settling-down انتظار می‌رود [۲].

قابلیت اطمینان همچنین می‌تواند به عنوان تعداد خرابی‌ها در طول دوره عملکرد تعریف شود. پایداری و بقا یک جنبه خاص از قابلیت اطمینان است که به توانایی استقامت سیستم در مقابل اثراتی مانند خستگی، ساییدگی، خوردگی، تغییر پارامترهای الکتریکی و غیره مربوط می‌باشد. پایداری معمولاً به عنوان حداقل زمان قبل از وقوع خرابی توصیف شده و در سیستم‌های قابل تعمیر نیز اغلب به عنوان توانایی عملکرد سیستم پس از تعمیرات تعریف خواهد شد. اهداف مهندسی قابلیت اطمینان به ترتیب اولویت عبارتند از [۶]:

به‌کارگیری دانش مهندسی و تکنیک‌های تخصصی برای جلوگیری و یا کاهش احتمال بروز یا کاهش دفعات بروز خرابی‌ها

شناسایی علل بروز خرابی‌ها و اصلاح آن‌ها علارغم تلاش برای جلوگیری از بروز آن‌ها

تعیین راه‌های مقابله با خرابی‌هایی که رخ می‌دهند در صورتی که علل آن‌ها شناسایی نشده‌اند.

استفاده از روش‌هایی برای تخمین قابلیت اطمینان احتمالی طرح‌های جدید و تجزیه و تحلیل داده‌های قابلیت اطمینان

موثرترین روش برای به حداقل رساندن هزینه ها و تولید محصولات قابل اطمینان، تأکید بر اولویت‌بندی فوق است. بنابراین توانایی درک و پیش بینی علل احتمالی شکست‌ها و دانش نحوه جلوگیری از آن‌ها ازاهمیت زیادی برخوردار است. همچنین بررسی روش‌هایی برای تجزیه و تحلیل طرح‌ها و داده‌ها ضروری است. از روش‌های ریاضی و آماری می‌توان برای کمی‌سازی قابلیت اطمینان (پیش بینی، اندازه گیری) و تجزیه و تحلیل داده‌های قابلیت اطمینان استفاده کرد [۶].

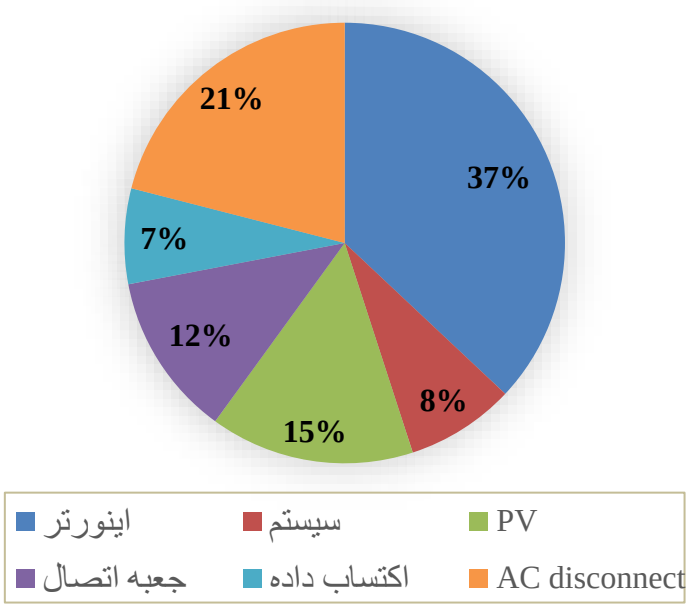
همان‌طور که بیان شد قابلیت اطمینان در تمامی زمینه‌ها و کاربردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر در دهه‌های اخیر پیشرفت تجهیزات الکترونیک قدرت سبب کاربرد وسیع این تجهیزات و مبدل‌های الکترونیک قدرت در زمینه‌های گوناگون شده است. از این‌رو قابلیت اطمینان این تجهیزات و مبدل‌ها و همچنین روش‌های ارزیابی آن مورد توجه محققین قرار گرفته و هدف اصلی این پروژه نیز می‌باشد. بنابراین در ادامه مباحث مختلف در مورد قابلیت اطمینان مبدل‌ها و تجهیزات الکترونیک قدرت بیان خواهد شد.

[1] Burn-in

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

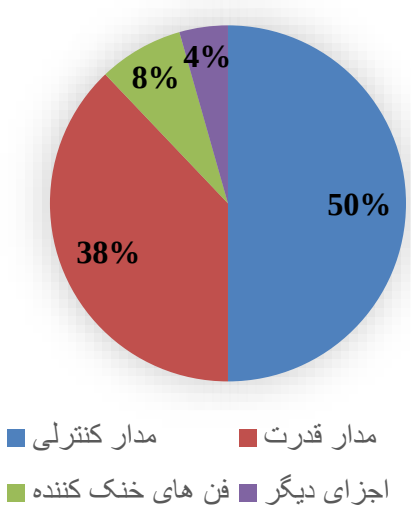
۱-٤- جایگاه تجهیزات نیمه هادی قدرت در قابلیت اطمینان مبدل ها

طبق یک بررسی ارائه شده در [۷]، بر اساس اطلاعات خرابی و آمارهای میدانی از یک سیستم فتوولتائیک (PV) که در طول پنج سال کار می کند، نتیجه گرفته شده است که اینورتر مهمترین زیر مجموعه سیستم PV است که حدود ۳۷ درصد از خرابی ها، مربوط به این قسمت می باشد که در شکل ۴-۱، نشان داده شده است. علاوه بر این، نتیجه مشابهی نیز در [۸] مشاهده شده است که مبدل فرکانسی یکی از شکننده ترین زیر مجموعه های سیستم توربین بادی است، که حدود ۱۴ درصد از کل خرابی های سیستم مربوط به این قسمت می باشد. همچنین مورد مشابهی در یک درایو سرعت مشاهده شده است که تقریباً ۳۸ درصد از کل خرابی های رخ داده در سیستم درایو مربوط به تجهیزات نیمه هادی قدرت است که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود[۹]. همچنین باید توجه شود که این آمارها به دلیل شرایط محیطی و عملکردی، معماری سیستم و غیره، مستعد تغییرات هستند و بنابراین نمی توان آنها را قطعی دانست. با این وجود، یک مرور کلی از مقیاس مسائل قابلیت اطمینان مربوط به الکترونیک قدرت در سیستم های الکتریکی را ارائه می دهند.



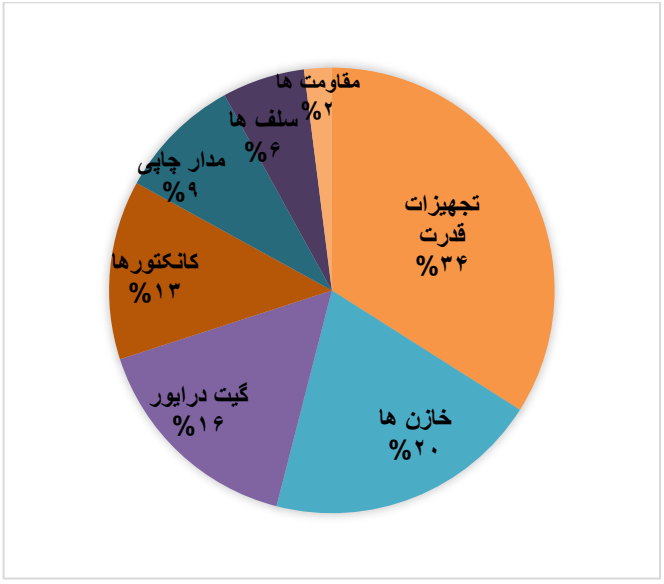
شکل ۴-۱- توزیع نرخ خرابی ها برای یک PV در مقیاس مطلوب [۸]

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۵-۱- توزیع نرخ خرابی ها برای یک درایو سرعت قابل تنظیم [۹]

همچین بررسی هایی در رابطه با نرخ خرابی های اجزای الکترونیک قدرت در [۱۰] انجام شده است که طبق نتایج بررسی ها، که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است، ۳۱ درصد از خرابی ها مربوط به تجهیزات نیمه هادی قدرت می باشند و پس از آنها خازن ها حدود ۱۸درصد از کل خرابی های سیستم الکترونیک قدرت را به خود اختصاص داده اند. بنابراین برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم الکترونیک قدرت، تخمین قابلیت اطمینان تجهیزات نیمه هادی قدرت و خازن ها امر بسیار مهمی می باشد.

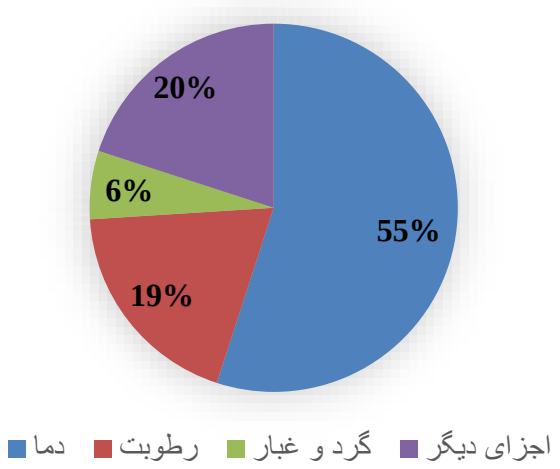


شکل ۶-۱- توزیع نرخ خرابی های اجزای مبدل های الکترونیک قدرت [۹]

اولین قدم برای بهبود تخمین طول عمر در تجهیزات نیمه هادی قدرت و خازن ها، شناسایی صحیح استرس

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

ها، ریشه اصلی خرابی ها و مکانیسم های خرابی آن ها است. منابع غالب استرس کـه بـر روی تجهیـزات الکترونیـک قدرت تاثیر دارند، دمای حالت پایدار بالا و چرخه های دمایی هستند کـه حـدود ۵۵ درصـد از عوامـل اسـترس زا را تشکیل می دهد، همچنین لرزش و رطوبت به ترتیب حدود۲۰ درصد و ۱۹ درصد از عوامل اسـترس زا در تجهیـزات الکترونیک قدرت هستند که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است [10] و[۱۱]. بنابراین طبق این نتایج بدست آمـده، دما را به عنوان عامل اصلی خرابی در مبدل های قدرت شناسایی کرده اند[۱۱].



شکل ۷-۱- توزیع استرس در تجهیزات الکترونیک قدرت [10] و[۱۱]

در رابطه با تجهیزات نیمه هادی قدرت، تغییرات ناگهانی شرایط محیطی و عملکردی منجر به نوسـانات دمـایی نامطلوب می شود که می تواند منجر به تخریب آن ها شود. به این صـورت کـه نوسـانات دمـایی بـالا و عـدم تطـابق ضریب انبساط حرارتی بین سیم های پیوندی۱ و تراشه، باعث ایجاد استرس های حرارتی -مکانیکی در تجهیزات می شود که منجر به خرابی سیم های پیوندی (بلند شدن سیم پیوندی از زیر خود یا ترک خوردن سـیم پیونـدی) مـی شود[۱۲]. همچنین همین عوامل می توانند منجـر بـه فرسـودگی لایـه لحـیم (تـرک یـا لایـه لایـه شـدن لحـیم) شوند[۱۲]، [۱۳].

برای خازن های الکترولیتی آلومینیـومی لینـک DC، دمـا و اسـترس ولتـاژ اصـلی تـرین دلیـل خرابـی هـا و فرسودگی هستند که تخریب طولانی مدت خازن ها در نهایت می توانـد بـه مکانیسـم هـای تخریبـی ماننـد تبخیـر الکترولیت و واکنش الکتروشیمیایی منجر شود[۱۴]،[۱۵]،[۱۶]. به طور معمول، معیارهـای پایـان عمـر خـازن هـای آلومینیومی شامل کاهش ظرفیت تا ۸۰ درصد مقدار اولیه آن و یا افزایش مقاومت سری معادل (ESR) به دو یا سـه برابر مقدار اولیه آن است[۱۴].

همانطور که ذکر شد، خرابی های تجهیزات الکترونیک قدرت و خازن ها منجر به خرابی مبدل های قدرت و در بعضی موارد باعث کاهش دسترسی به سیستم می شود. بنابراین، این امر تا حد زیادی بر هزینـه چرخـه عمـر ماننـد تعویض قطعات، تعمیر و نگهداری و هزینه تبدیل انرژی تأثیر می گذارد. از این رو، به منظور دستیابی به تعادل بهتـر

[1] Bond-Wire

بین طول عمر، در دسترس بودن و هزینه، لازم است که در مرحله طراحی اولیه سیستم الکترونیک قدرت، یک بررسی و ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان انجام شود.

بخش قابل‌توجهی از خطاهای سیستم‌های الکترونیک قدرت را خرابی‌های مربوط به ماژول‌های قدرت و پکیج تشکیل میدهد [۱۷]. ازاین‌رو فناوری‌های پکیجینگ و طراحی ماژول‌های الکترونیک قدرت به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان سیستم از اهمیت خاصی برخوردار هستند. همچنین همانطور که در شکل ۶-۱ در بخش قبل نشان داده شده است، می‌توان مشاهده نمود که، تجهیزات نیمه هادی قدرت یا سوئیچ‌ها بیشترین سهم خرابی ها در بین اجزای مختلف الکترونیک قدرت به خود اختصاص داده‌اند. از این رو بنظر می رسد اگر تمرکز ویژه‌ای بر روی این تجهیزات صورت پذیرد، می توان تا حدود زیادی از وقوع اتفاقات و خرابی های احتمالی جلوگیری نمود و در نتیجه به ارتقاء قابلیت اطمینان سیستم کمک نمود.

نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که موضوعاتی همچون اهمیت عملکرد، هزینه‌های اقتصادی و تلفات سیستمی و جانی در سطوح بالای توان از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و خسارت‌های حاصله می‌تواند به شدت بزرگ‌تر باشند. از این رو در تحقیقات، توجه را به سمت سطوح توانی بالا در کلیدهای قدرت معطوف می‌کنند. انواع متعددی از کلیدهای قدرت نظیر IGBT، MOSFET، BJT1، (Thyristor) SCR2، GTO3 و شماری دیگر، در دهه‌های گذشته در کاربردهای متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این میان هر کدام دارای مزایا و معایب ساختاری و عملکردی خود می‌باشند که استفاده یا عدم استفاده از آن‌ها را توجیه می‌کند. از این رو لازم است عملکرد این کلیدها از طریق یک سیستم مانیتورینگ دقیق مورد بررسی قرار گیرد و از طریق مدلسازی نرم‌افزاری آن و استخراج پارامترهای عملکردی، به تخمین طول عمر، عیب‌یابی، پیش‌بینی خطا و دیگر شاخص‌های عملکردی آن پرداخته شود.

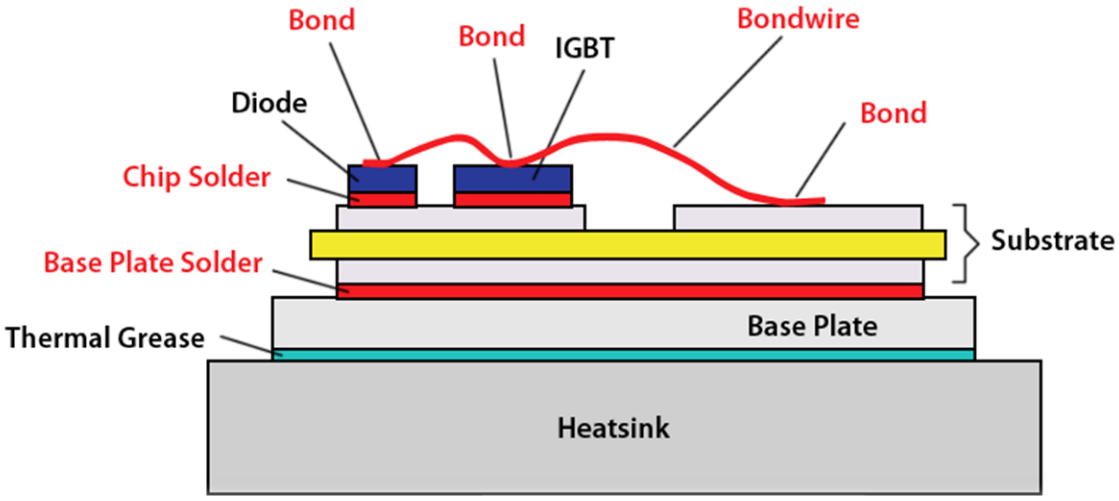
۱-٤-۱- ساختار کلی تجهیزات نیمه هادی قدرت

- ✓ ساختار مبتنی بر سیم های پیوندی[4]
- ✓ ساختار مبتنی بر پَک یکپارچه[5]

فن‌آوری‌های پکیجینگ تجهیزات الکترونیک قدرت برای چندین نسل توسعه یافته‌اند که شامل ارتقاء مواد، بهبود ساختار و نوآوری‌هایی در روش‌های اتصالی می‌باشند. که در بیشتر ماژول‌های تجاری، ساختارهای مبتنی بر سیم های پیوندی همچنان اصلی‌ترین انتخاب در پکیجینک به دلیل قابلیت اطمینان بالا و چگالی توان بالاتر است. ساختار نوعی این ماژول‌ها در شکل ۸-۱، ارائه شده است [۱۸].

[1] Bipolar Junction Transistor (BJT)
[2] Silicon Controlled Rectifier (SCR)
[3] Gate Turn-off Thyristor (GTO)
[4] Bond Wire
[5] Press-pack packaging

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۸-۱- ساختار نوعی ماژول الکترونیک قدرت [۱۸]

همان‌طور که در شکل ۸-۱، نشان داده شده است، ماژول قدرت از لایه‌های مختلف تشکیل‌شده است. لایه اصلی پایه[1] است، که یک‌لایه ضخیم از فلز است که برای ثابت سازی مکانیکی و انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. قسمت بستر[2] یا DBC[3]، که شامل دو لایه مس و یک‌لایه سرامیک می‌باشد که روی پایه، لحیم می‌شود. سپس تراشه نیمه‌هادی قدرت و ترمینال‌ها به لایه بالای DBC لحیم می‌گردند. علاوه بر این، سیم‌های پیوندی برای اتصال تراشه‌ها و ترمینال‌ها استفاده می‌شوند. سرانجام، محصورکننده‌هایی مانند ژل سیلیکونی برای محافظت و عایق کردن در داخل پکیج پر شده است. در حقیقت، ساخت ماژول قدرت شامل بسیاری از فرایندها و روش‌های مختلف است. مواد استفاده شده در طراحی ماژول قدرت طیف گسترده‌ای از عایق‌ها، هادی‌ها و نیمه‌هادی‌ها تا مواد آلی می‌باشند. ازآنجاکه این مواد در شرایط مختلف محیطی، الکتریکی و حرارتی رفتارهای متفاوتی دارند، انتخاب صحیح و مناسب این مواد در فرآیندهای طراحی و مونتاژ بسیار مهم است[۱۸].

همچنین این ساختار سطح به سطح ماژول قدرت باعث می‌شود تا انواع متعددی از عیوب و خرابی در ساختار آن احتمال وقوع داشته باشد که ازنظر علت و منشاء ایجاد، روند شناسایی و نهایتاً ساختار، پیشگیری از آن متفاوت هستند. همچنین، مواد موجود در ساختار ماژول های قدرت دارای ضریب انبساط دمایی[4] متفاوتی هستند که یکی از علل اصلی خرابی این تجهیزات به شمار می‌آید[۱۹].

[1] Baseplate
[2] Substrate
[3] Direct Bonded copper
[4] Thermal expansion coefficient

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

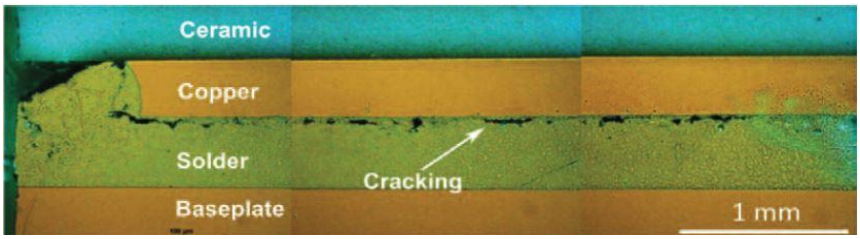
۲-۴-۱- انواع خرابی ها در ساختار ماژول قدرت

در شرایط عملکردی خطرناک برای ماژول‌های الکترونیک قدرت به‌عنوان‌مثال دمای بالا، چرخه‌های تکراری دما و ارتعاشات شدید، که باعث ایجاد استرس‌های تکراری می‌شود، فرسودگی و خرابی‌هایی در ماژول ایجاد می‌شود. حساس‌ترین قسمت‌های این ماژول‌ها در مقابل استرس‌های متوالی حرارتی و توانی، سیم‌های پیوندی متصل‌کننده تراشه‌ها، قسمت فلزی امیتر و لایه‌های لحیم مربوط به تراشه و قسمت DBC می‌باشد. درنتیجه بیشترین مکانیسم‌های فرسودگی مربوط به این قسمت‌ها خواهد بود. برخی از مکانیسم‌های فرسودگی در ماژول‌های قدرت به شرح زیر می‌باشد[۲۰].

- **فرسودگی [1]سیم های پیوندی:** در این نوع فرسودگی سیم های پیوندی دچار شکستگی و یا ترک و شکاف‌های متعدد می‌شوند و یا از سطح زیر خود جدا می‌شود[2].
- **فرسودگی [3]متالیزاسیون:** برای ایجاد اتصال خارجی به کلید از یک‌لایه متالیزاسیون استفاده می‌شود که استرس‌های دمایی می‌تواند سبب فرسودگی و کاهش ماهیت فلزی این لایه شود.
- **فرسودگی لایه لحیم‌کاری[4]:** برای اتصال تراشه به سطح زیر آن و همچنین اتصال DBC به لایه زیرین از یک‌لایه لحیم استفاده شده است که تفاوت در ضریب انبساط دمایی بین مواد لحیم‌کاری با این مواد و رفتار غیرخطی این مواد، به مرور زمان عملکرد کلید قدرت را تحت تأثیرات منفی قرار میدهد.

هر کدام از این فرسودگی های ذکر شده در شکل ۱-۹ نشان داده شده اند.

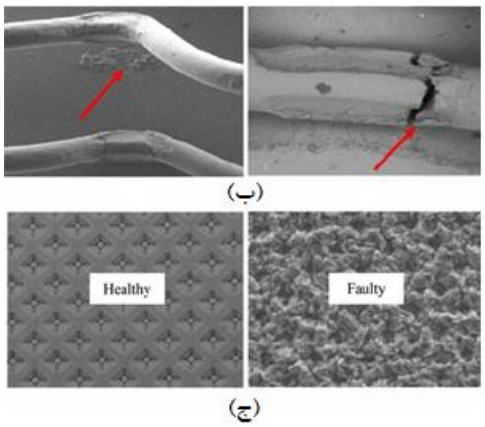
در این میان، خرابی سیم‌های پیوندی بزرگ‌ترین حالت خرابی برای یک ماژول الکترونیک قدرت است. که در شکل ۱-۱۰، نشان داده شده است. چراکه گاهی اوقات خرابی یک سیم پیوندی در نقاط حساس مانند اتصالات گیت می‌تواند باعث خرابی کل ماژول الکترونیک قدرت شود. ازاین‌رو مطالعه خرابی سیم پیوندی برای ارزیابی قابلیت اطمینان ماژول‌های الکترونیک قدرت بسیار مهم است[۲۱].



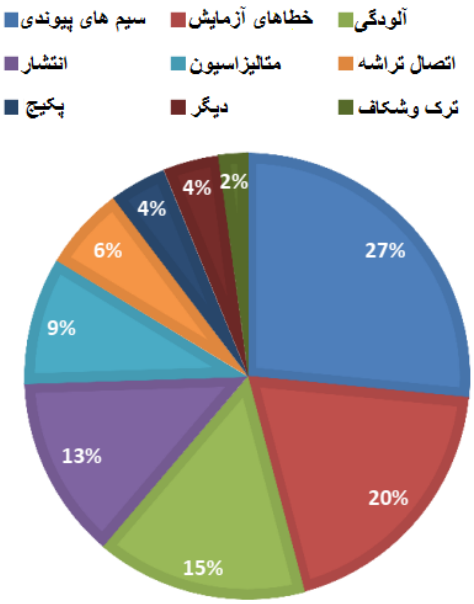
[1] Bond-Wire Fatigue
[2] Bond wire lift-off
[3] Metallization Fatigue
[4] Solder Fatigue

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

(الف)



شکل ۹-۱- الف) فرسودگی و آسیب لایه لحیم، ب) فرسودگی سیم های پیوندی و ج) آسیب لایهمتالیزاسیون امیتر [۲۰]



شکل ۱۰-۱- حالت‌های خرابی برای یک ماژول الکترونیک قدرت [۲۰]

۱-٤-۳- اثرات فرسودگی تجهیزات نیمه هادی قدرت بر روی پارامترها و ویژگی‌های تجهیز و پارامترهای مشخص‌کننده وضعیت نیمه هادی قدرت

در ماژول‌های IGBT، فرسودگی سیم های پیوندی و بخش متالیزاسیون امیتر موجب افزایش ولتاژ کلکتور-امیتر در حالت روشن (V_{CEon}) و به تبع آن افزایش دمای پیوند و افزایش تلفات می‌شود. همچنین فرسودگی لایه لحیم نیز که در پی ایجاد ترک‌هایی در سطح آن ایجاد می‌شود (شروع ترک‌ها از لبه بوده و با گذشت زمان به سمت مرکز لایه لحیم گسترش می‌یابند)، موجب عدم توزیع یکنواخت دما در پایین‌ترین سطح لایه پایه و افزایش مقاومت حرارتی از پیوند تا پایه (R_{th-JC}) می‌شود. بنابراین برای بررسی وضعیت عملکردی نیمه هادی های قدرت و

پیش‌بینی روند فرسودگی این کلیدها، لازم است پارامترهایی که تغییرات آن‌ها حاکی از احتمال وقوع خرابی در ساختار کلید است را به‌صورت آنلاین مانیتور کنیم و بر اساس نوسانات آن‌ها تصمیمات کنترلی لازم را اخذ نماییم. بر اساس مطالعات گسترده‌ای که در سال‌های اخیر انجام شده است، پارامترهای متعددی نظیر موارد ذکر شده در ادامه می‌تواند در رصد وضعیت کلیدهای قدرت IGBT و پیش‌بینی وقوع عیب مؤثر باشند. برخی از این پارامترها عبارت‌اند از[۲۲]:

- ولتاژ مستقیم کلکتور-امیتر (v_{ce})
- مقاومت حرارتی ماژول (R_{th})
- ولتاژ آستانه گیت ($v_{g,th}$)
- ولتاژ گیت-امیتر (v_{ge})
- مقاومت حالت وصل کلید (R_{DS}^{on})
- جریان کلکتور (I_c)
- زمان روشن و خاموش شدن کلید (t_{on} و t_{off})

بر اساس اهدافی که برای آزمایش‌های خود در نظر گرفته‌ایم، می‌توان از هر کدام از این پارامترها جهت تحلیل‌های آماری و ریاضیاتی خود استفاده کنیم. نکته مهم آن است که هر کدام از این پارامترها که انتخاب شوند، لازم است مدارات کنترلی، مانیتورینگ و بستر آزمون اختصاصی آن نیز به‌طور متناسب طراحی شود. همچنین، یکی از نکات مهم در این زمینه، پارامترهای وابسته به دمای پیوند است که با افزایش فرکانس سوئیچینگ، دقت تخمین دمای پیوند به‌شدت کاهش می‌یابد[۲۳]. همچنین مشاهده و اندازه‌گیری V_{CEon} به مدارات پیچیده و گران‌قیمتی نیاز داشته و از طرف دیگر اندازه‌گیری دمای پیوند نیز به مدارات با دقت بسیار بالایی نیاز داشته و بسیار پیچیده است. به‌منظور استخراج دمای نقاط مختلف از مدار معادل حرارتی المان موردنظر، که بر اساس ابعاد و مواد ماژول طراحی می‌شوند، استفاده می‌شود. در این روش‌ها تلفات مبدل به‌عنوان ورودی به مدار معادل داده می‌شود. تلفات توان واردشده از مجموع تلفات توان در حالت سوئیچینگ ($P_{SW\text{-}loss}$) و هدایت ($P_{Con\text{-}loss}$) به دست می‌آید[۱۹].

در جدول ۱-۱ تغییراتی که بر اساس آنها می توان خرابی کلید را تعیین کرد، ارائه شده است [۲۲].

جدول ۱-۱: شاخص خرابی کلیدهای قدرت IGBT [۲۲]

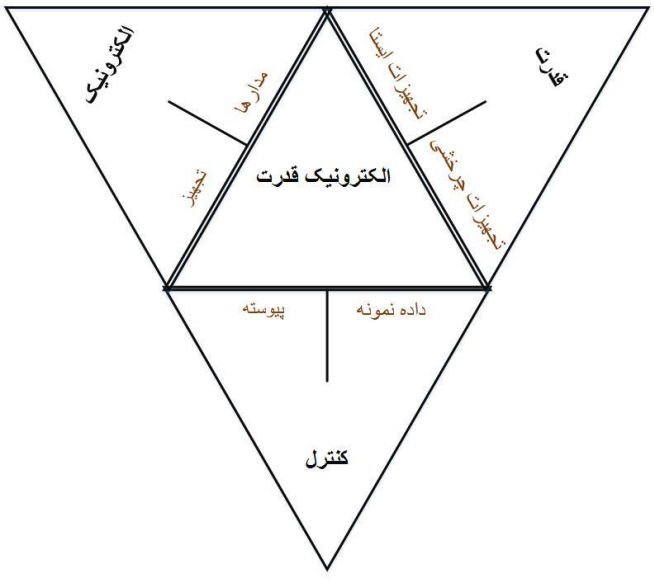
پارامتر	آستانه
R_{th}	۲۰ درصد افزایش مقدار اولیه
VCE,on	۵ درصد افزایش مقدار اولیه ۱۰ درصد افزایش مقدار اولیه

	۱۵ درصد انحراف از مقدار اسمی **۲۰ درصد افزایش مقدار اولیه**
$I_{GE,leakage}$	**افزایش "ناگهانی"**

۱-۵- فیزیک خرابی قطعات الکترونیک قدرت

تقریباً چهار دهه پیش، الکترونیک قدرت توسط نیوول به صورت سه حوزه اصلی در مهندسی برق تعریف شد، که در شکل ۱-۱۱(الف) نشان داده شده است[۲۴]. به همین ترتیب تحقیقات مربوط به قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت که شامل دانش های چند حوزه ای است، در شکل ۱-۱۱(ب) تعریف شده است. این تعریف سه جنبه عمده تجزیه و تحلیل برای درک ماهیت چرایی و چگونگی خرابی محصولات الکترونیک قدرت، طراحی برای قابلیت اطمینان و اعتبار سنجی استحکام کافی در محصولات الکترونیک قدرت، کنترل هوشمند و نظارت بر شرایط، برای اطمینان از عملکرد قابل اعتماد تحت مشخصه های ماموریت خاص، را شامل می شود. که هدف ما در این پروژه طراحی برای قابلیت اطمینان می باشد.

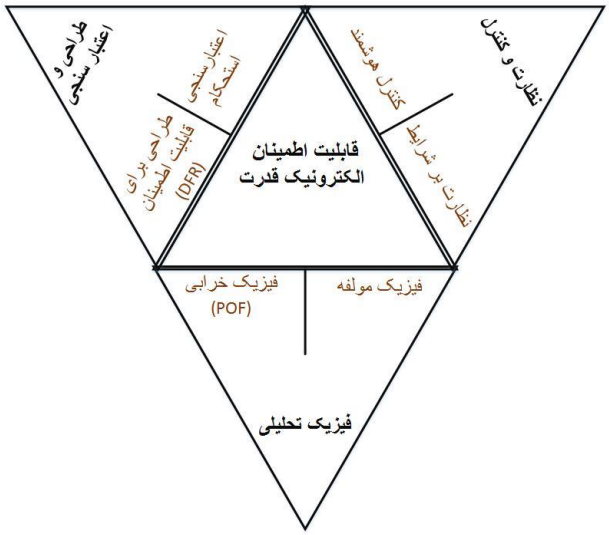
همانطور که در شکل ۱-۱۱ (ب) نشان داده شده است، درک فیزیک قابلیت اطمینان قطعات الکترونیک قدرت اساسی ترین جنبه است. در سیستم های مبدل های الکترونیک قدرت، تجهیزات نیمه هادی قدرت مانند Si، SiC ،GaN، خازن ها، کانکتورها و فن ها به عنوان آسیب پذیرترین قطعه ها محسوب می شوند که آنها به عنوان قطعه های مهم و بحرانی قابلیت اطمینان در مبدل های الکترونیک قدرت، به ویژه در ماژول های IGBT و خازن ها در نظر گرفته می شوند. مروری بر فیزیک خرابی (PoF)[1] ماژول های IGBT و خازن ها به ترتیب در منابع [۲۵] و [۱۴] آورده شده است.



(الف)

[1] Physics of Failure

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



(ب)

شکل ۱۱-۱-(الف)، حوزه های تعریف شده درالکترونیک قدرت توسط نیول در دهه ۱۹۷۰ و (ب) تحقیقات قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت از چشم انداز امروزه

۱-۶- قابلیت اطمینان در پکیجینگ الکترونیک قدرت

ماژول های الکترونیک قدرت نه تنها به عملکرد الکتریکی بهبود یافته از نظر کاهش عناصر پارازیتی در مدار نیاز دارند بلکه باعث بهبود عملکرد مکانیکی-حرارتی نیز می شوند. نیمه هادی های قدرت [1]با شکاف باند عریض از نظر سوئیچینگ سریعتر و همچنین به خاطر دمای عملیاتی بالا، عملکرد بهتری را ارائه می دهند. تحقیقات مربوط به پکیجینگ نیمه هادی های قدرت در حال حاضر بر روی بهینه سازی عملکرد حرارتی-مکانیکی ماژول های الکترونیک قدرت به منظور به حداقل رساندن فشارها و استرس های حرارتی-مکانیکی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان در حالی که عملکرد الکتریکی بهبود یافته توسط نیمه هادی های قدرت با شکاف باند عریض را ارائه می دهد، متمرکز است. نانو کامپوزیت ها و مواد جدید برای کاربردهای پکیجینگ ماژول های الکترونیک قدرت در حال بررسی هستند تا بازده انتقال حرارت را بهینه کرده و توزیع دما را بهبود بخشند تا تنش های مکانیکی-حرارتی که منجر به حالت های خرابی پکیجینگ تجهیزات قدرت متداول می شود را کاهش دهد. این پکیج ها یا ماژول های الکترونیک قدرت به دلیل نیاز به چگالی توان بالا، در مقایسه با پکیج های مدار مجتمع سیگنال کوچک متعارف، تحت چرخه های دمایی زیاد و چرخه قدرت قرار می گیرند. علاوه بر این، این پکیج ها یا ماژول های قدرت باید دمای عملکردی بالایی را نیز تحمل کنند.

[1] Wide Band Gap Devices (WBG)

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۱-۶-۱- مفاهیم قابلیت اطمینان برای پکیج های الکترونیک قدرت

برخی از پکیج ها و ماژول ها با کارایی بالا به یک عمر عملیاتی ۳۰ ساله نیاز دارند که نیاز به ۱۰۰ خرابی در زمان (FIT)[1] است[۲۶]. که FIT با دماهای پیوند بیش از ۱۲۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد. روند فعلی فناوری در پکیج ها و ماژول های الکترونیک قدرت به سمت تجهیزات نیمه هادی قدرت با دماهای پیوند بالاتر و حتی بیش از ۲۰۰ درجه سانتیگراد است که نشان می دهد رقم FIT افزایش می یابد. به همین ترتیب، باید بیشتر بر قابلیت اطمینان مکانیکی- حرارتی پکیج ها یا ماژول های الکترونیک قدرت تأکید شود.

در داده های طول عمر یا تجزیه و تحلیل Weibull، توزیع آماری داده های طول عمر از یک نمونه پکیج قدرت تولید می شود. در این مجموعه، داده های آماری پارامتر شده برای تخمین قابلیت اطمینان، احتمال خرابی در یک زمان خاص، متوسط عمر و میزان خرابی استفاده می شود.

احتمال خرابی در یک زمان مشخص، احتمالی است که یک تجهیز در یک زمان خاص تخریب می شود. میانگین عمر، متوسط زمانی است که انتظار می رود پکیج های قدرت در جمعیت قبل از خرابی کار کنند و اغلب به صورت "میانگین زمان برای خرابی" (MTTF)[2] یا "میانگین زمان قبل از خرابی" (MTBF)[3] بیان می شود. میزان خرابی، تعداد خرابی در واحد زمان است که از نظر آماری، میزان تغییر احتمال خرابی تجمعی تقسیم بر احتمالی که تجهیز هنوز در زمان t تخریب نشده است، می باشد. همانطور که در زیر نشان داده شده است، MTBF و نرخ خرابی به صورت زیر هستند[۲۶]:

MTBF=تعداد کل خرابی ها / کل ساعات عملکردی تجهیزات (۱)

که نرخ خرابی α، عکس MTBF است:

$$\alpha = \frac{1}{MTBF} \quad (۲)$$

که یک تابع توزیع نمایی معمولاً برای توصیف خرابی های الکتریکی تصادفی استفاده می شود،

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t} \quad (۳)$$

که در این جا نرخ تخریب α را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\alpha = \frac{f}{n.t} \quad (۴)$$

که در اینجا f تعداد خرابی ها، n تعداد تجهیزات و t زمان آزمایش است.

در آزمایش قابلیت اطمینان، معمولاً افزایش دمای آزمایشی که تجهیزات نیمه هادی قدرت در آن قرار دارند،

[1] Failures in Time
[2] Mean time to failure
[3] Mean time before failure

باعث تسریع در بروز مکانیسم های خرابی می شود. فرض کنید تجهیزی تحت استرس دمای پیوند بالا قرار گرفته است، که T_{j2}، برای زمان t_2 است. برای برآورد همان سطح استرس اعمال شده در دمای پیوند پایین تر، T_{j1}، برای زمان t_1، می توان یک ضریب تسریع شده را به عنوان نسبت زمان T_{j1} به T_{j2} تعریف کرد. از آنجا که ضریب تسریع شده یک نسبت بدون بعد است، می تواند به عنوان نسبت نرخ خرابی نیز بیان شود که با زمان استرس رابطه عکس دارد. اغلب از معادله آرهنیوس (Arrhenius) برای تخمین میزان خرابی استفاده می شود. که ضریب تسریع شده به صورت زیر تعریف می شود:

$$a_f = e^{\{E_a (T_{j2} - T_{j1}/(T_{j2}.T_{j1})/k\}} \quad (۵)$$

که در اینجا E_a انرژی فعال سازی، k ثابت بولتزمن[1]، T_{j1} دمای پیوند عملیاتی و T_{j2} دمای پیوند در طول آزمایش سرعت یافته است. که انرژی فعال سازی E_a، به صورت تجربی یافت می شود و به مکانیسم تخریبی غالب که در طول آزمایش سرعت یافته رخ می دهد بستگی دارد.

خرابی های مکانیکی-حرارتی بر میزان خرابی پکیج ها و ماژول های الکترونیک قدرت تسلط دارند. رابطه Manson–Coffin که مرتبط با تعداد چرخه های دما برای خرابی اتصالات لحیم کاری است، به صورت زیر ارائه می شود[۲۷]:

$$N_f = \frac{K_M}{(\Delta T)^a} \quad (۶)$$

که در اینجا Nf تعداد چرخه های منجر به خرابی، KM یک ثابت وابسته به مواد و ΔT اختلاف دما در حین چرخه و a یک ثابت تجربی است. همانطور که در رابطه قبل مشاهده می شود، زمان خرابی به ویژگی های ماده و به طور معکوس به گردش دما (ΔT) بستگی دارد. تعداد چرخه های خرابی با دو گردش مختلف دما، $\Delta T1$ و $\Delta T2$ ، به صورت زیر است:

$$\frac{N_1}{N_2} = (\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})^a \quad (۷)$$

با این حال، رابطه Manson–Coffin ممکن است طول عمر فرسودگی حرارتی لحیم کاری را به اندازه کافی تخمین نزند، زیرا برای دمای زیر ۵۰ درصد نقطه ذوب لحیم کاری، ایجاد شده است که در بسیاری از موارد، برخی از لحیم کاری ها در دماهای بالاتر از ۵۰ درصد در پکیج قدرت کار می کنند. بنابراین باید روابط اصلاح شده Manson–Coffin برای این موارد ایجاد شود.

۱-۶-۲- آزمایش‌های قابلیت اطمینان برای پکیج الکترونیک قدرت

آزمایش قابلیت اطمینان برای پکیج ها و ماژول های الکترونیک قدرت را می توان به عنوان آزمایش زیست محیطی یا آزمایش استقامت طبقه بندی کرد که معمولاً تحت استانداردهای بین المللی مانند JEDEC [۲۸] و

[1] Boltzmann’s constant

MIL-STD-883 [۲۹] قرار می گیرند . این آزمایش ها شامل آزمایش محیطی مانند شوک حرارتی[۱] [۳۰]، چرخه های دمایی[۲][۳۱]، ارتعاش[۳]، یکپارچگی سرب[۴]، قابلیت لحیم کاری[۵]، اتوکلاو[۶] و گشتاور نصب[۷] هستند. آزمایش استقامت شامل چرخه های قدرت[۸]، ذخیره سازی دمای بالا[۹]، ذخیره سازی دمای پایین[۱۰]، مقاومت در برابر رطوبت[۱۱]، بایاس معکوس دمای بالا[۱۲] و بایاس گیت در دمای بالا[۱۳] است. در ادامه برخی از این آزمایشات شرح داده شده اند.

۱-۲-۶-۱- آزمایش شوک حرارتی[۱۴]

آزمایش شوک حرارتی، معمولاً برای اعمال استرس گرمایی تکراری برای پکیج و ماژول های الکترونیک قدرت استفاده می شود. شوک حرارتی برای پیش بینی توانایی ماژول های الکترونیک قدرت برای مقاومت در برابر تغییرات اندازه، ناشی از حرارت و ارزیابی یکپارچگی پکیج، مقاومت در برابر ترک و تغییر در خصوصیات الکتریکی استفاده می شود. استانداردهای شوک حرارتی را می توان در روش .MIL-STD-883 1011.9 یافت. شوک های حرارتی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه و در دمای ۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه در پنج دوره انجام می شوند. این آزمایش معمولاً در محفظه شوک حرارتی با پکیج ها یا ماژول های قدرت، انجام می شود[۳۰].

۲-۲-۶-۱- آزمایش چرخه های دمایی[۱۵]

آزمایش چرخه دما برای بررسی تغییر در مشخصات الکتریکی و ساختار فیزیکی پکیج ها یا ماژول های قدرت انجام می شود که آن ها را به طور متناوب در معرض دماهای بالا و پایین قرار می دهد. اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی (CTE) لایه های مختلف در پکیج ها یا ماژول ها می تواند باعث ایجاد ترک خوردگی و لایه لایه شدن پکیج ها و ساختارهای داخلی و تغییرات در مشخصات الکتریکی ناشی از آسیب مکانیکی-حرارتی شود. مطابق با روش MIL-STD-883،1010، پکیج ها یا ماژول باید در محفظه آزمایش تحت چرخه های دمایی قرار گیرند. این پکیج ها یا ماژول ها در معرض دمای شدید، معمولاً از ۴۰ درجه سانتیگراد تا ۱۲۵ درجه سانتی گراد برای تعداد چرخه مورد نیاز، قرار می گیرند. زمان ساکن در هر درجه حرارت شدید باید بیشتر از ۱۰ دقیقه باشد و تجهیزات تحت

[1] Thermal shock
[2] Temperature cycling
[3] Vibration
[4] Lead integrity
[5] Solderability
[6] Autoclave
[7] Mounting torque
[8] Power cycling
[9] High-temperature storage
[10] Low-temperature storage
[11] Moisture resistance
[12] High-temperature reverse bias
[13] High-temperature gate bias
[14] Thermal shock testing
[15] Temperature cycling testing

آزمایش باید در کمتر از ۱۵ دقیقه به دمای مورد نظر برسند. زمان انتقال حرارت از گرم به سرد یا از سرد به گرم نباید بیش از ۱ دقیقه باشد. روش های مختلفی برای پیش بینی طول عمر، طبق آزمایش های حرارتی وجود دارد[۳۲]. از روابط Manson–Coffin می توان برای پیش بینی طول عمر از آزمایش های چرخه های دمایی استفاده کرد. که ضریب تسریع شده، a_T را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$a_T = (\frac{N_1}{N_2}) = (\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})^K \quad (۸)$$

که در اینجا N_1 و N_2 تعداد چرخه های تخریبی ، ΔT_1 و ΔT_2 به ترتیب رنج دمای عملکرد و آزمون و K یک فاکتور تجربی است. طول عمر پکیج یا ماژول در سال ها به صورت زیر بدست می آید [۳۲]:

$$(N \times a_T) / 360 \quad (۹)$$

که N تعداد روزهای خرابی است.

۳-۲-۶-۱- آزمون چرخه های قدرت[1]

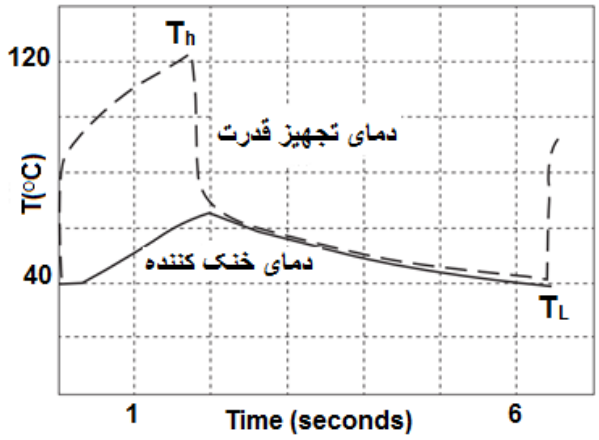
در طول آزمایش چرخه قدرت، تجهیز یا ماژول قدرت تحت آزمایش، بر روی یک سیستم خنک کننده نصب می شود و تجهیز یا ماژول قدرت با تلفات هدایتی به صورت الکتریکی گرم می شود. هنگامی که حداکثر دمای پیوند هدف، در تجهیز یا ماژول قدرت به دست آمد، گرمایش فعال تجهیز متوقف می شود و تجهیز یا ماژول قدرت تا دمای مشخص شده خنک می شود، بنابراین آزمایش چرخه های قدرت به پایان می رسد. به همین ترتیب، گرادیان دمای پیوند قابل توجهی در داخل تجهیز یا ماژول قدرت تولید می شود. شکل ۱۲-۱، تکامل دما را در طول آزمون چرخه قدرت نشان می دهد. که درجه حرارت سیستم خنک کننده معمولاً برای کنترل آزمون چرخه قدرت استفاده می شود[۳۳].

با رسیدن به حد بالای T_h، گرمایش فعال دستگاه متوقف شده و خنک سازی بلافاصله شروع می شود. به همین ترتیب، دمای پیوند تجهیز کاهش می یابد و با رسیدن به حد پایین تر T_L، جریان بار روشن می شود تا دوباره گرمایش فعال آغاز شود و چرخه تکرار شود. پارامتر مشخصه برای آزمایش های چرخه قدرت به شرح زیر است:

$$\Delta T_j = T_h - T_L \quad (۱۰)$$

[1] Power cycling test

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱۲-۱- نمودارچرخه قدرت برای یک پکیج یا ماژول قدرت [۲۸]

دمای متوسط برای آزمون چرخه قدرت به شرح زیر است:

$$T_m = T_L + \frac{T_h - T_L}{2} \qquad (۱۱)$$

تنش حرارتی-مکانیکی ناشی از تکرار گرما یا چرخه های خنک کننده می تواند منجر به ترک ها در پکیج یا ماژول قدرت شود. معمولاً مطابق JESD22-A122، برای پکیج ها یا ماژول های قدرت بزرگ به ۶۰۰۰ چرخه برای ΔT_j=100 C و ۳۰۰۰ چرخه برای ΔT_j=125 C نیاز است. در چرخه خاموش و روشن، معمولا ۵ دقیقه زمان روشن و ۵ دقیقه زمان خاموش است. مدت زمان طولانی چرخه قدرت معمولاً تنش بالاتری را در تجهیزات ایجاد می کند. تفاوت در ضریب انبساط حرارتی لایه های مختلف در پکیج یا ماژول های قدرت در حین چرخش دما، تنش های حرارتی-مکانیکی بین لایه ها ایجاد می کند[۳۳].

ازشکل ۱۲-۱، مشاهده می شود که دمای کیس ماژول قدرت نسبتاً اندک تغییر می کند، در حالی که چرخش دمای زیادی در محل پیوند تجهیزات نیمه هادی قدرت اتفاق می افتد. هنگامی که این تنش در آزمایش چرخه قدرت تکرار می شود، ممکن است ترک هایی در اتصال لحیم بین تجهیزات و بستر ماژول قدرت ایجاد شود. وقتی این ترک ها به قسمت پایین تراشه قدرت می رسند، باعث افزایش مقاومت حرارتی و افزایش دمای پیوند تجهیزات نیمه هادی قدرت می شوند. این تنش حرارتی-مکانیکی اغلب منجر به فرسودگی مواد و اتصالات متقابل می شود. به دلیل وابستگی متقابل بسیاری از حالت های خرابی، تحلیل خرابی پکیج ها یا ماژول های قدرت چالش برانگیز است. همچنین چالش دیگر در آزمایش چرخه قدرت اندازه گیری T_j به دلیل طبیعت گذرا و کوتاه آن است، بنابراین، باید از یک روش اندازه گیری نسبتاً سریع استفاده شود[۳۳].

۱-۷- قابلیت اطمینان در سیستم های الکترونیک قدرت

متداول ترین روشهای ارزیابی قابلیت اطمینان در ادامه آمده است.

۱-۷-۱- آزمایش قابلیت اطمینان و اعتبار سنجی

به منظور انجام اعتبار سنجی قابلیت اطمینان و استحکام تجهیزات الکترونیک قدرت، از دو نوع آزمون اصلی استفاده می شود: آزمون سرعت یافته کیفی[۱] و آزمون سرعت یافته کمی[۲].

برای شناسایی نقاط ضعف بالقوه در طراحی محصول و کمک به بهبود مقاومت آن، از آزمون های سرعت یافته کیفی استفاده می شود. آزمون حد سرعت یافته بالا (HALT)[۳] یک روش آزمایش کیفی معمول است که استرس های مختلفی به منظور یافتن محدودیت های عملکردی بالا و پایین و حد تخریب آن استفاده می شود به عنوان مثال دما، چرخه های حرارتی، ارتعاش، ولتاژ و غیره را بر روی تجهیز اعمال می کند[۳۴]،[۳۵]. پس از آن، با در نظر گرفتن محدودیت های به دست آمده از HALT، می توان آزمایش استرس سرعت یافته بالا (HASS)[۴] را به منظور یافتن نقطه ای از نقص فرآیند تولید انجام داد[۳۵]،[۳۶].

از طرف دیگر، آزمایشات سرعت یافته کمی، برای تعیین قابلیت اطمینان محصول استفاده می شود. به منظور کاهش زمان آزمایش و به دست آوردن اطلاعات با قابلیت اطمینان سریع، معمولاً از آزمونهای سرعت یافته عمر (ALT)[۵] استفاده می شود. ALT محصول را در معرض عوامل استرس زای بالاتر از حد معمول مانند دما، ولتاژ و غیره قرار می دهد و با استفاده از مدل ها و فاکتورهای خاص حالت خرابی، می توان یک مدل پایه طول عمر را بدست آورد[۳۷]،[۳۸]. درنتیجه با استفاده از معیارهای قابلیت اطمینان حاصل شده در سطح استرس سرعت یافته می توان طول عمر محصول در شرایط عملکردی را تخمین زد.

علاوه بر این، قبل از عرضه محصول، برای اطمینان از سطح مشخصی از کیفیت محصول، باید آزمون های صلاحیت استاندارد[۶] انجام شده و تایید گردند. به همین ترتیب، ماژول های قدرت باید قبل از عرضه به بازار، آزمونهایی از قبیل ذخیره سازی دمای بالا یا پایین، چرخه توانی، چرخه حرارتی، ارتعاش و غیره را پشت سر بگذارند[۳۹]. اگرچه روش های آزمایش های فوق الذکر می توانند فهم مناسبی در عملکرد قابلیت اطمینان و مقاومت طراحی قطعات الکترونیک قدرت ارائه دهند، اما آنها به زمان و تلاش قابل توجهی برای آزمایش نیاز دارند به عنوان مثال، آزمایش های چرخه های توانی بسته به سطح تنش انتخاب شده و تعداد نمونه ها ممکن است تا چند ماه طول بکشد[۴۰]. علاوه بر این، تجهیزات آزمایش ها نسبتاً گران است.

۱-۷-۲- قاعده کلی طراحی دست بالای[۷] قطعه

یک روش معمول در بین کاربران الکترونیک قدرت، طراحی دست بالای قطعه های ضعیف سیستم است. در این روش، ابتدا خصوصیات الکتریکی-حرارتی قطعه های مورد نظر تحت پارامترهای کاربردی حالت پایدار در نظر

[1] Qualitative accelerated test
[2] Quantitative accelerated test
[3] Highly Accelerated Limit Test
[4] Highly Accelerated Stress Screening
[5] Accelerated Life Test
[6] Standard qualification tests
[7] Overdesign

گرفته می شود و از عوامل استرس زای الکتریکی یا حرارتی به منظور تخمین طول عمر، طبق برخی از مدل های تخریب اساسی یا طبق دستورالعمل های ارائه شده استفاده می شود که در سری کتاب های Military-Handbook-217 ارائه شده است[۴۱]. بر اساس تخمین قابلیت اطمینان حاصل شده، ریتینگ قطعات تا رسیدن به یک حاشیه ایمنی قابل قبول که معمولا ۲۰ تا ۴۰ درصد است، افزایش می یابد. همچنین گزینه دیگری که معمولاً مورد استفاده قرار می گیرد، افزایش اندازه سیستم خنک کننده است [۵]. از آنجا که دما عامل اصلی و موثر در خرابی الکترونیک قدرت است، یک سیستم خنک کننده بزرگتر باعث بهتر خنک شدن سیستم و در نتیجه بهبود طول عمر مبدل قدرت و اجزای آن می شود.

اگرچه طراحی دست بالای قطعات ضعیف سیستم الکترونیک قدرت یک روش بسیار سریع و نسبتاً قوی برای بهبود عملکرد قابلیت اطمینان است، اما این روش هزینه های اضافی را به همراه دارد. با توجه به اینکه بازار الکترونیک قدرت بسیار رقابتی است، کاربران الکترونیک قدرت برای صرفه جویی در هزینه ها مجبور به کاهش حاشیه ایمنی هستند. علاوه بر این، طراحی دست بالای برخی از قطعات مانند خازن لینک DC یا سیستم خنک کننده، می تواند وزن و حجم سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

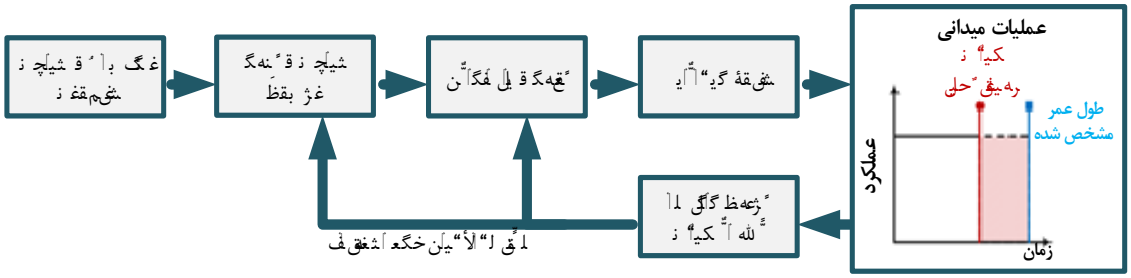
۱-۷-۳- تجزیه و تحلیل اثر و حالت خرابی (FMEA)[1]

تجزیه و تحلیل حالت و اثر خرابی (FMEA) با هدف شناسایی مکانیسم های احتمالی تخریبی یک سیستم معین و اولویت بندی منابع موجود برای رفع آنها است. آنالیزFMEA معمولاً در مراحل طراحی و توسعه سیستم الکترونیک قدرت انجام می شود و برای ارتباط صحیح حالت های احتمالی خرابی و تأثیرات آن ها بر روی قطعه های بحرانی، به داده های تاریخی متکی است[۴۲].

با این حال، در مورد محصولات جدید به طور معمول کمبود اطلاعات موجود راجع به مشخصات ماموریت، طراحی یا غیره وجود دارد. بنابراین، اگر هیچ اطلاعات تاریخی در دسترس نباشد، FMEA صرفاً به تجربه و دانش مهندسان متکی است. در نتیجه، یک FMEA حدسی در مراحل اولیه طراحی و توسعه محصول انجام می شود. پس از عرضه محصول در بازار، بر اساس اطلاعات خرابی و آمار حاصل از این زمینه، آنالیز داده های پس از خرابی انجام می شود و به منظور به روزرسانی نقاط ضعف طراحی محصول، استفاده می شود. شکل ۱۳-۱، رویکرد بهبود قابلیت اطمینان مبتنی بر داده های پس از خرابی را نشان می دهد. بنابراین، این روش می تواند بسیار گران باشد، به خصوص هنگامی که نیاز به انجام تغییرات مهمی در طراحی باشد، که ممکن است ذاتاً بر سایر مراحل توسعه محصول مانند تولید، زنجیره تأمین و غیره تأثیر بگذارد[۴۳].

[1] Failure mode and effect analysis

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱۳-۱- رویکرد بهبود قابلیت اطمینان مبتنی بر آنالیز داده های پس از خرابی [۴۳]

۱-۷-٤- طراحی برای قابلیت اطمینان (DfR)[1]

روش های قابلیت اطمینان ارائه شده، هنوز هم نسبتاً گران، وقت گیر و یا بی اثر هستند و بنابراین، این روش ها چالش برانگیز می باشند. در نتیجه، یک تغییر الگوی قوی به سمت تلفیق رویکردهای طراحی برای قابلیت اطمینان و فیزیک خرابی، از اوایل دهه ۱۹۵۰ صورت گرفته است. ایده اساسی در پشت مفهوم فیزیک خرابی (PoF)[2] متکی بر شناسایی دلایل اصلی خرابی و مدل سازی مکانیسم خرابی مربوطه تحت مشخصه های ماموریت محیطی و عملیاتی قطعه های مربوطه مانند تجهیزات قدرت، خازن ها و غیره است[۴۴]،[۴۵]،[۴۶]. از سوی دیگر، مفهوم DfR می تواند به عنوان فرایندی که در مراحل اولیه طراحی و توسعه محصول یا سیستم انجام می شود، به منظور اطمینان از تحقق برخی از الزامات قابلیت اطمینان یا کیفیت، تعریف شود[۴۷].

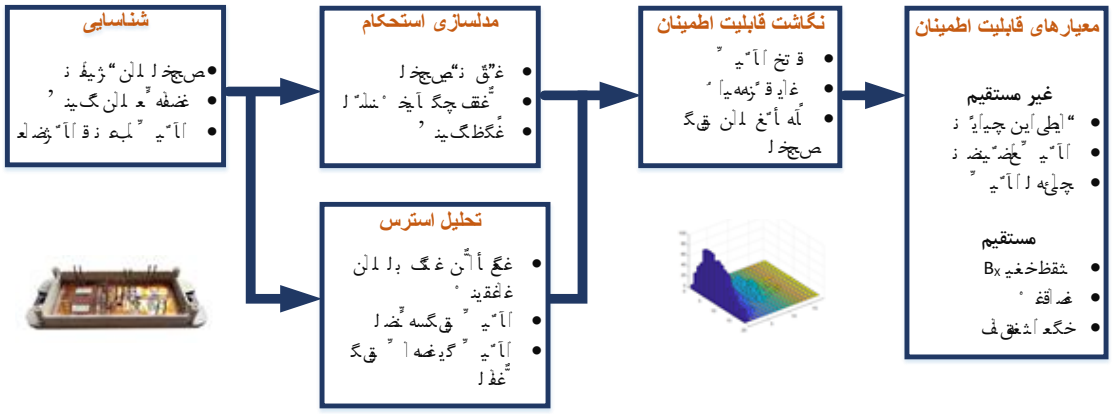
یک روش اساسی برای رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان در شکل ۱۴-۱ ارائه شده است[۴۵]. به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد قابلیت اطمینان سیستم الکترونیک قدرت با استفاده از روش DfR، سه مرحله اصلی باید انجام شود. به این صورت که در ابتدا، در مرحله شناسایی، از FMEA و تجزیه و تحلیل PoF به منظور شناسایی اجزای حیاتی مانند تجهیزات قدرت و خازن ها و مکانیسم های خرابی متناظر و عوامل استرس زا مانند دما و ولتاژ استفاده می شود. پس از آن، در فاز مدل سازی مقاومت و تحلیل استرس از فرآیند DfR، مشخصه های ماموریت محیطی یا عملیاتی سیستم به عوامل استرس زای الکتریکی-حرارتی تعریف شده، ترجمه می شود و مدل طول عمر قطعات مبتنی بر تجربه براساس ALT انتخاب و تعیین می شوند. سرانجام، در مرحله نگاشت قابلیت اطمینان، می توان از عوامل استرس زای الکتریکی و حرارتی برای ارزیابی عملکرد قابلیت اطمینان هر یک از قطعات استفاده کرد. اطلاعات قابلیت اطمینان هر یک از قطعات را می توان با استفاده از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان با یکدیگر ادغام کرد تا قابلیت اطمینان سیستم الکترونیک قدرت را تعیین کند[۴۸].

بنابراین، با استفاده از فرآیند طراحی برای قابلیت اطمینان (DfR) در مرحله طراحی سیستم الکترونیک قدرت، می توان زمان ارزیابی قابلیت اطمینان را در مقایسه با روشهای ساده آماری، بهبود داد. بر اساس معیارهای قابلیت اطمینان حاصل، می توان نقص و ضعف عمده در طراحی را در اسرع وقت در چرخه توسعه محصول شناسایی

[1] Design for Reliability
[2] Physics-of-Failure

کرد. در نتیجه، بر اساس این رویکرد، روشهای کلی ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مشخصات مأموریت برای الکترونیک قدرت در طیف وسیعی از کاربردها مانند اینورترهای قدرت راه آهن [۴۹]، اینورترهای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی [۵۰]، مبدل های قدرت برای کاربردهای هواپیما [۵۱]، اینورترهای PV متصل به شبکه [۵۲]، مبدل های قدرت توربین بادی [۵۳] یا خازن های لینک DC در درایو های با سرعت قابل تنظیم [۵۴] پیشنهاد شده است.

با این حال، اجرای فرایند تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، از یک کاربرد به کاربرد دیگر بسیار متفاوت است. علاوه بر این، این روش، حوزه های مختلف فیزیکی مانند حوزه الکتریکی، حرارتی و مکانیکی و همچنین وابستگی متقابل آنها را ادغام می کند. بنابراین، یک رویه پیاده سازی مدولار "بلوک ساختمان"[1] برای ارزیابی قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت مبتنی بر مدل، هنوز در دسترس نیست و به شدت مورد تقاضا است.



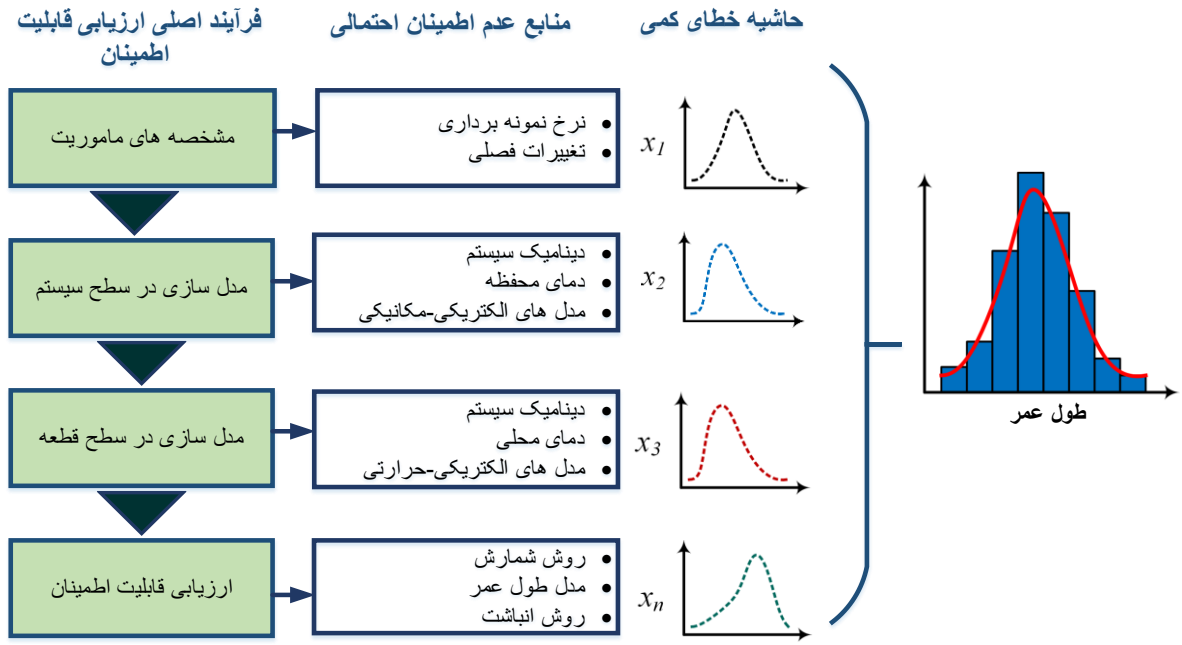
شکل ۱۴-۱- نمودار کلی رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان مبتنی بر فیزیک خرابی PoF

۱-۷-۵- عدم قطعیت در تخمین طول عمر[2]

علاوه بر عدم مدولار بودن، دقت رویکرد تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل نیز بسیار نگران کننده است. چراکه معیارهای قابلیت اطمینان خروجی در معرض بسیاری از منابع عدم قطعیت احتمالی مانند مشخصه های ماموریت محیطی یا عملیاتی [۵۵]،[۵۶]،[۵۷]، مدل سازی الکتریکی- حرارتی، دینامیک سیستم یا مدل طول عمر انتخاب شده اند[۵۸]. همه این عوامل، درجه مشخصی از عدم قطعیت و یک حاشیه خطا را در پیش بینی طول عمر سیستم های الکترونیک قدرت معرفی می کنند. یک نمای کلی از منابع عدم قطعیت احتمالی و تأثیر احتمالی آن ها در طول عمر قطعات و سیستم های الکترونیک قدرت در شکل ۱۵-۱آورده شده است. بنابراین، برای دستیابی به تخمین طول عمر دقیق و واقعی تر، فرضیات و عدم قطعیت های اساسی ارائه شده توسط مدل های مختلف مورد استفاده در فرایند تخمین طول عمر، باید به روشنی مشخص شوند و حاشیه خطای مربوطه باید به درستی تعیین شود.

[1] Building block
[2] Uncertainties in the Lifetime Prediction

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



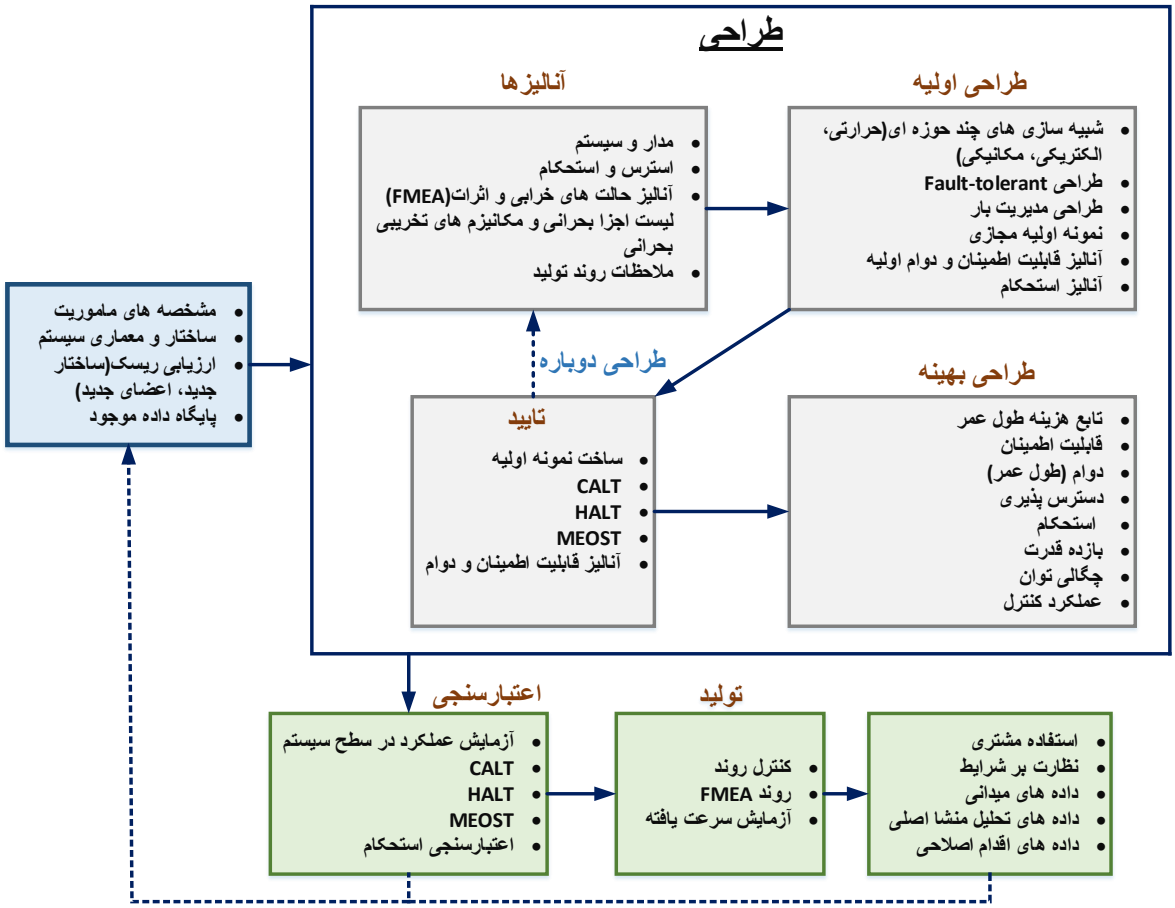
شکل ۱۵-۱- منابع عدم قطعیت احتمالی در روش ارزیابی قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت مبتنی بر مدل و تأثیر آنها در برآورد طول عمر قطعه های سیستم.

۱-۸- روش طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR) مبدل های الکترونیک قدرت

جنبه دوم قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت، ایجاد قابلیت اطمینان و استحکام کافی در طراحی سیستم از طریق فرایند طراحی برای قابلیت اطمینان (DFR) است. DFR فرآیندی است که در مرحله طراحی یک تجهیز یا سیستم انجام می شود تا اطمینان حاصل کند که سیستم قادر به دستیابی به سطح مورد نیاز قابلیت اطمینان هست. هدف آن درک و برطرف کردن مشکلات قابلیت اطمینان در مراحل اولیه طراحی است[۶].

با توجه به تفاوت در انتخاب ابزارهای قابلیت اطمینان و نیازهای خاص محصولات، روند DFR در بخشهای صنعت متفاوت است. با این حال، فرم عمومی آن، معمولاً فرآیندهای شناسایی، طراحی، تجزیه و تحلیل، تأیید، اعتبار سنجی و کنترل را پوشش می دهد[۶]. یک روش سیستماتیک DFR که به طور خاص برای طراحی سیستم های مبدل الکترونیک قدرت اعمال می شود، در شکل ۱۶-۱ نشان داده شده است[۳۳]. با اجرای این روش، قابلیت اطمینان به خوبی در هر مرحله از توسعه، به ویژه در مرحله طراحی، مورد توجه قرار می گیرد. طراحی مبدل های الکترونیک قدرت مبتنی بر مشخصه های ماموریت با در نظر گرفتن تغییرات پارامترها مانند نوسانات دما، تغییرات سطح تابش خورشید، نوسانات سرعت باد، تغییرات بار، روند تولید و غیره انجام می شود[۳۳].

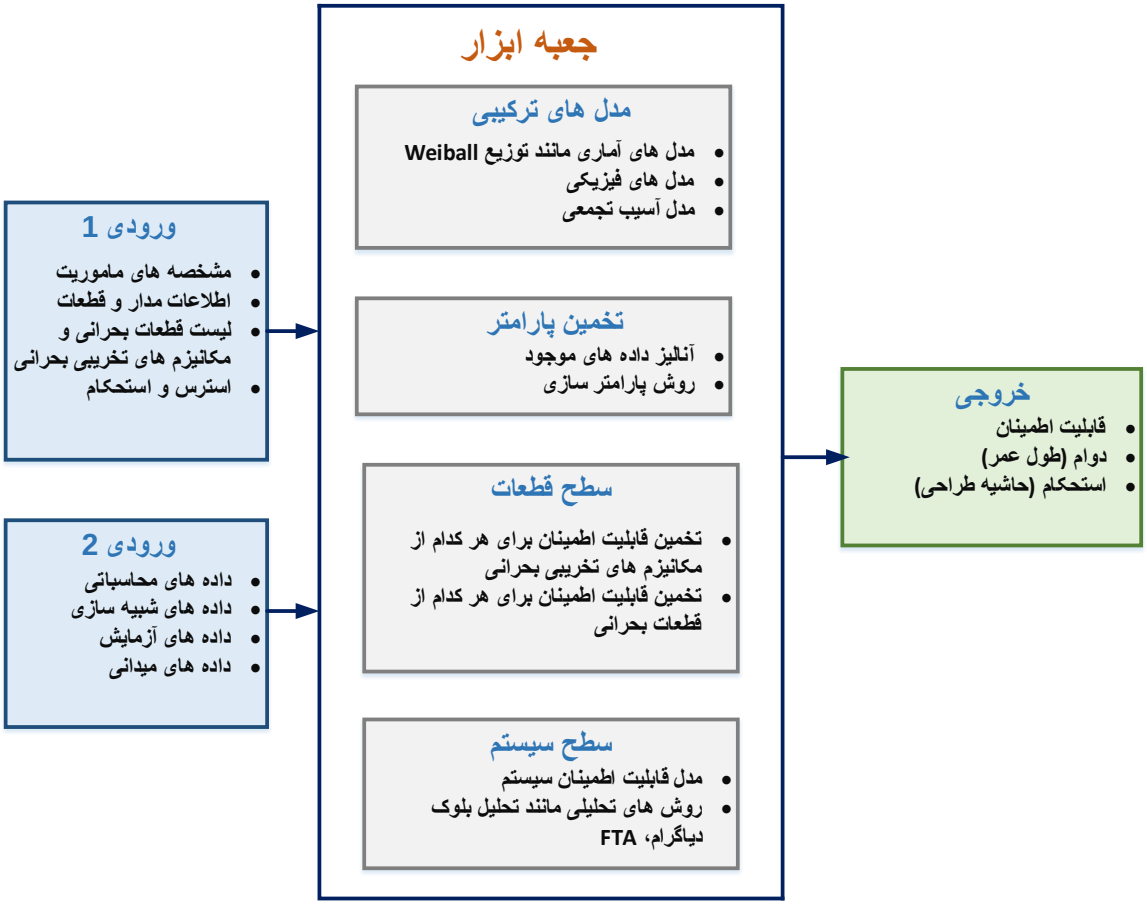
DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱۶-۱- پیشرفته ترین روش طراحی قابلیت اطمینان برای سیستم های الکترونیک قدرت. HALT – تست سرعت یافته محدود شده ؛ CALT – تست تسریع شده طول عمر، MEOST – آزمایش های استرس بیش از حد محیطی متعدد

پیش بینی قابلیت اطمینان ابزاری مهم برای تعیین کمی طول عمر، سطح خرابی و استحکام طراحی بر اساس منابع مختلف داده و مدل های پیش بینی است. شکل ۱۷-۱، یک جعبه ابزار پیش بینی عمومی را نشان می دهد که شامل مدل های آماری و مدل های طول عمر و منابع مختلف داده های موجود مانند داده های آزمایش سازنده، داده های شبیه سازی و داده های میدانی برای پیش بینی قابلیت اطمینان هر کدام از اجزا و سیستم کلی است. مدلهای آماری به خوبی در مرجع [۶] ارائه شده است، در حالی که تعداد مدل های طول عمر مبتنی بر فیزیک موجود برای قطعات الکترونیک قدرت هنوز محدود است. بنابراین تلاش های تحقیقاتی در مورد آزمایش سرعت یافته و شبیه سازی پیشرفته چند حوزه ای، برای به دست آوردن مدل های طول عمر مفید خواهد بود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱۷-۱- جعبه ابزار پیش بینی قابلیت اطمینان برای سیستم های الکترونیک قدرت

۱-۸-۱- چالش ها و فرصت ها در تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان در الکترونیک قدرت

قابلیت اطمینان یک شاخص عملکردی بسیار مهم در سیستم های الکترونیک قدرت است. که چالش ها و فرصت های عمده در تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان برای سیستم های الکترونیک قدرت به شرح زیر است[۳۳].

چالش ها در تحقیقات قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت

- به کارگیری فراگیر و سریع الکترونیک قدرت در طیف گسترده ای از کاربردها در معرض انواع مختلفی از شرایط محیطی.
- الگوهای قدیمی و عدم درک روند DFR در الکترونیک قدرت.
- عدم قطعیت ها در مشخصه های ماموریت و تغییرات در استحکام قطعات.
- افزایش حجم و پیچیدگی قطعه های الکتریکی یا الکترونیکی.
- عدم درک مکانیسم های خرابی و حالت های تخریبی.

- روش های سنتی پیش بینی قابلیت اطمینان در سطح سیستم براساس نرخ خرابی ثابت است. با این حال، پیش بینی قابلیت اطمینان در سطح قطعه ها مبتنی بر PoF منجر به تغییر در میزان خرابی با زمان می شود.
- دمای عملیاتی بالاتر تجهیزاتی مانند WBG ها، قابلیت اطمینان و طول عمر کلی را به چالش می کشند.

فرصت ها در تحقیقات قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت

- تحقیقات در زمینه میکروالکترونیک، بنیان مهمی برای کارهای امروزی و آینده در الکترونیک قدرت، به ویژه از نظر روش شناسی، فراهم می کند.
- مشخصه های مأموریت بیشتر و داده های نظارت آنلاین از این زمینه در دسترس و قابل دسترسی است.
- رویکرد PoF، بینشی را برای جلوگیری از خرابی قطعات الکترونیک قدرت، مدارها و سیستم های قدرت فراهم می کند.
- کنترل حرارت فعال[1] با کنترل جریان برق در مدارهای الکترونیک قدرت.
- نظارت بر شرایط و طراحی مقاوم در برابر خطا، که باعث طول عمر طولانی تر و کاهش میزان خرابی می شود.
- فناوری های نیمه هادی ها و خازن های در حال ظهور، قطعات و سیستم های الکترونیک قدرت با قابلیت اطمینان بالاتری را فراهم می کنند.
- نرم افزار طراحی خودکار با کمک رایانه برای صرفه جویی در وقت و هزینه در روند توسعه.
- روندهای طراحی مدولار مبدل های قدرت و قطعات الکترونیک قدرت استاندارد و فناوری های پکیجینگ.
- با درک بهتر مکانیسم های خرابی در الکترونیک قدرت، می توان آزمایش سرعت یافته مختص مکانیزم خرابی را طراحی کرد که منجر به بهبود پیش بینی های قابلیت اطمینان برای برنامه های هدفمند می شود.
- روش های بهینه سازی چند هدفه را می توان برای طراحی ها با ایجاد مصالحه میان هزینه، زمان

[1] Active Thermal Control

سرویس مورد انتظار و قابلیت اطمینان سیستم های الکترونیک قدرت استفاده کرد.

۱-۸-۲- مراکز ارزیابی و پیش بینی قابلیت اطمینان

در حال حاضر برخی از مراکز تحقیقاتی در جهان همچون مرکز قابلیت اطمینان (CORPE)[1] دانشگاه آلبورگ دانمارک، آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی قابلیت اطمینان و ریسک در دانشگاه ETH زوریخ[2] و مرکز مهندسی قابلیت اطمینان و ریسک دانشگاه ناتینگهام بریتانیا[3] در تحقیقات مرتبط با قابلیت اطمینان پیشرو هستند.

مرکز قابلیت اطمینان (CORPE) دانشگاه آلبورگ دانمارک، به درک بهتری از چگونگی تأثیر قابلیت اطمینان تجهیزات و سیستم های الکترونیک قدرت توسط عوامل استرس زای مختلف مانند دما، اضافه ولتاژ و جریان، اضافه بار و عوامل محیطی میپردازد. علاوه براین، این مرکز در حال توسعه دادن به مدل های قطعه و سیستم است تا امکان شبیه سازی و طراحی سیستم های الکترونیک قدرت با قابلیت اطمینان بالا و کارامد را فراهم کند و همچنین هزینه های نگهداری و بهره برداری را کاهش می دهد. تحقیقات در آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی قابلیت اطمینان و ریسک در دانشگاه ETH زوریخ با هدف ایجاد یک درک اساسی حاصل از ارزیابی ایمنی احتمالی همراه با مدل سازی ریاضی مناسب برای مقابله با چالش های اجتماعی و فنی به منظور بهره بردن ایمن از سیستم های انرژی های تجدیدپذیر و پایدار است. گروه تحقیقاتی مربوط به این موضوع در این آزمایشگاه به طور خاص بر روی درک و مدل سازی رفتار تخریبی سیستم های انرژی پیچیده و زیرساخت های حیاتی انرژی متمرکز است که هدف این گروه تعیین کمی قابلیت اطمینان، ریسک و انعطاف پذیری این سیستم ها با استفاده ترکیبی از مدل سازیهای ریاضی و فیزیکی، شبیه سازی مونت کارلو از عملیات سیستم، روش های بهینه سازی و یادگیری ماشین است. که بسیاری از تحقیقات در مورد خرابی های آبشاری در سیستم های قدرت است که بر روی توسعه و اعتبار سنجی مدل های تجزیه و تحلیل خرابی آبشاری، ارزیابی ریسک و کاهش خرابی های آبشاری متمرکز هستند. همچنین مرکز مهندسی قابلیت اطمینان و ریسک دانشگاه ناتینگهام بریتانیا به انجام تحقیقات در زمینه توسعه روشهای مدل سازی برای پیش بینی راه های بهبود طراحی، نگهداری و بهره برداری از سیستم های مهندسی به منظور کاهش فرکانس ها و عواقب خرابی ها اختصاص یافته است. همچنین این مرکز آموزش در زمینه روش های ریسک و قابلیت اطمینان را ارائه می دهد.

۱-۸-۳- ابزار ارزیابی قابلیت اطمینان برای الکترونیک قدرت

امروزه، در مراحل طراحی سیستم های الکترونیک قدرت، از ابزار طراحی و شبیه سازی مدار به کمک رایانه استفاده می شود. این ابزارهای نرم افزاری می توانند به مهندس طراح کمک کنند تا یک مرور سریع و دقیق از سیستم و رفتار آن در شرایط ورودی تعریف شده داشته باشد. بنابراین، امکان تسهیل بهینه سازی الکترونیک قدرت از نظر طراحی مکانیکی، پاسخ الکتریکی، انتخاب قطعات و یا بارگذاری حرارتی فراهم می کند. با این حال، هنگام در

[1] https://www.corpe.et.aau.dk/
[2] https://rre.ethz.ch/
[3] https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/ntec/associated-centres/resilience-engineering-research group/index.aspx

نظر گرفتن ابزارهای نرم افزاری که ارزیابی قابلیت اطمینان الکترونیک قدرت را انجام می دهند، گزینه ها هنوز محدود هستند. بنابراین، یک ابزار نرم افزاری که بتواند رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان را تسهیل کند و یک ارزیابی کارآمد محاسباتی برای طول عمرسیستم های الکترونیک قدرت ارائه دهد، بسیار مورد نیاز است. برای مقابله با موارد ذکر شده، اخیرا تحقیقات مختلفی برای تخمین سریعتر و مطمئن تر طول عمر مبتنی بر مدل برای کاربردهای مختلف الکترونیک قدرت توسط آزمایشگاه های تحقیقاتی مختلف انجام شده است.

ابزار نرم افزار Sherlock Automated Design Analysis توسط DFR Solutions توسعه داده شده است [۵۹] و براساس مدل های مختلف PoF می تواند قابلیت اطمینان قطعه های مختلف میکروالکترونیکی را ارزیابی کند. به همین ترتیب، نرم افزار ارزیابی قابلیت اطمینان به کمک شبیه سازی SARA در دانشگاه مریلند، با استفاده از اصول مبتنی بر PoF توسعه یافته است که قادر است برخی از الزامات طول عمر را برآورده کند[۶۰]. ابزار دیگر، Reliasoft است که یک نرم افزار قابلیت اطمینان مبتنی بر آمارها است و قادر به ارائه تجزیه و تحلیل داده ها، آزمایش کیفیت،ALT، FMEA و غیره است[۶۱].

با این حال، با توجه به اینکه گزینه های نرم افزاری که از مدل های PoF استفاده می کنند عمدتا بر روی اجزای میکرو الکترونیکی یا سیستم ها متمرکز شده اند، نمی توان از آنها در ارزیابی قابلیت اطمینان برنامه های مبتنی بر الکترونیک قدرت استفاده کرد، زیرا بسیاری از مدل ها و روش های PoF قابل مقیاس نیستند. علاوه بر این، مشخصات ماموریت عملکردی واقعی قطعات یا سیستم در ابزارهای نرم افزاری قبلی ذکر نشده است. بنابراین، نیاز به راه حل های نرم افزاری مبتنی بر مشخصات ماموریت، با تمرکز بر الکترونیک قدرت، که می تواند زمان فرآیند ارزیابی قابلیت اطمینان را کاهش دهد، ایجاد می شود. سرانجام، استحکام و دقت روش مدل سازی الکتریکی-حرارتی به کار رفته، باید تحت شرایط عملیاتی مبتنی بر مشخصات ماموریت واقع بینانه تأیید شود. بنابراین، برای تأیید غیرمستقیم معیارهای قابلیت اطمینان مانند تنش الکتریکی، بارگذاری حرارتی و غیره مبتنی بر مشخصه مأموریت، یک دستگاه آزمایشی با توانایی تقلید از رفتار الکتریکی ودینامیکی قطعه های الکترونیک قدرت تحت مشخصه های ماموریت داده شده، مورد نیاز است.

در مرکز قابلیت اطمینان دانشگاه آلبورگ دانمارک، ابزاری مبتنی برMatlab به منظور تسهیل بیشتر روند آنالیز قابلیت اطمینان کارآمد محاسباتی، ایجاد شده است. پلتفرم ابزار طراحی برای قابلیت اطمینان و استحکام، روش ارزیابی قابلیت اطمینان پیشنهادی را تحت یک رابط کاربری گرافیکی کاربر پسند و آسان برای استفاده ادغام می کند. این ابزار توسعه یافته برای کاربردهایی همچون مبدل سه سطحی برای کاربردهای درایو موتور، اینورتر منبع ولتاژ دو سطح برای سیستم های درایور پمپ و اینورتر تک مرحله ای متصل به شبکه در سیستم فتوولتائیک نشان داده شده است. علاوه بر این، به منظور اعتبار سنجی روش مدلسازی الکتریکی-حرارتی، یک شبیه ساز مشخصه ماموریت برای برنامه های درایو موتور بر اساس مبدل سه سطحه NPC Hbridge[1] توسعه داده شده است و برای

[1] Three-level neutral point clamped converter

ارزیابی بارگذاری حرارتی تجهیزات قدرت استفاده می شود[۴۳].

در بخش‌های قبلی، قابلیت اطمینان در مبدل‌ها و تجهیزات الکترونیک قدرت و مباحث مربوط به آن بررسی و همچنین روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت که در مقالات و مراجع سراسر دنیا معرفی شده، شرح داده شده است. در بخش بعدی مقالات و تحقیقات انجام شده در خصوص قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت در داخل کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۹- سابقه مطالعه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت در ایران

مبحث ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت در ایران موضوعی نوظهور می‌باشد که سابقه‌ی آن به ۱۰ سال اخیر برمی‌گردد. اگرچه موضوع قابلیت اطمینان در سایر شاخه‌های موجود ازجمله قابلیت اطمینان در صنایع هوا و فضا، قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی عمران، بررسی قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع و انتقال برق در کشور موضوع جدیدی نبوده و تحقیقاتی زیادی در این زمینه توسط متخصصین صورت گرفته است.

در سال‌های اخیر به‌منظور بررسی قابلیت اطمینان در مبدل‌های الکترونیک قدرت مقالات و پژوهش‌هایی توسط متخصصین این امر به چاپ رسیده و روش‌های مختلف برای بررسی قابلیت اطمینان در مبدل‌های الکترونیک قدرت در کاربردهای گوناگون بررسی‌شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد. در حال حاضر در داخل کشور در چندین دانشگاه، اساتید و دانشجویان بر روی مبحث قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت مطالعه کرده و پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است. یکی از دانشگاه‌های فعال در این زمینه در کشور *دانشگاه تبریز* است. متخصصین این دانشگاه بر روی روش‌های افزایش قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت به تحقیق و پژوهش پرداخته و مقالاتی نیز در این زمینه به چاپ رسیده است که در ادامه در مورد آن‌ها صحبت خواهد شد.

می‌توان از *دانشگاه شریف* نیز به عنوان یکی دیگر از دانشگاه‌های فعال در زمینه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت نام برد. در این دانشگاه بررسی‌هایی نیز در زمینه افزایش و بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت صورت گرفته است.

یکی دیگر از دانشگاه‌هایی که به بررسی موضوع قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت پرداخته است، *دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی* می‌باشد. متخصصین در این دانشگاه نیز به بررسی موضوعات مرتبط با قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت پرداخته و مقالاتی در این زمینه به چاپ رسانده‌اند.

از دیگر دانشگاه‌های فعال در زمینه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌توان به دانشگاه *فردوسی مشهد* و *دانشگاه تهران* اشاره کرد.

بر اساس مراجع و مقالات موجود یکی از تحقیقات در زمینه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت در کشور در سال ۱۳۹۱ در دانشگاه فردوسی مشهد ارائه‌شده است [۶۲]. در این تحقیق قابلیت اطمینان مبدل‌های

الکترونیک قدرت برای سه تکنولوژی توربین بادی متصل به شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مرجع برای بررسی قابلیت اطمینان مبدل در هر سه تکنولوژی توربین بادی، مراحل زیر انجام‌شده است:

۱- محاسبه تلفات هدایت و تلفات کلید زنی برای هر نیمه‌هادی قدرت با استفاده از داده‌های نیمه‌هادی در شرایط بهره‌برداری

۲- محاسبه دمای پیوند نیمه‌هادی‌ها با استفاده از تلفات توان و مقاومت حرارتی معادل

۳- محاسبه عمر مفید نیمه‌هادی‌ها

۴- محاسبه نرخ خرابی برای هر نیمه‌هادی قدرت

۵- محاسبه تابع میانگین زمان بروز خطا (MTTF) و محاسبه تابع قابلیت اطمینان

به‌طورکلی مراجع و مقالات موجود کشور را در زمینه بررسی و افزایش قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت را می‌توان به چند دسته کلی تقسیم کرد.

۱-۹-۱- سیستم پشتیبان

استفاده از طراحی پشتیبان، یا استفاده از چند سیستم به‌طور هم‌زمان در کنار هم، یک راه‌حل مؤثر برای حفظ عملکرد سیستم پس از وقوع خطا است و تعداد ازکارافتادگی‌های غیرمنتظره سیستم را کاهش می‌دهد.

در مرجع [۶۳] که در دانشگاه تبریز انجام شده، یک تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای قابلیت اطمینان بین طرح‌های مختلف پشتیبان برای محدودکننده جریان خطا مبتنی بر ادوات نیمه هادی (SSFCL[1]) ارائه‌شده است. در این مرجع دو نوع خطای مدار باز و اتصال کوتاه درنظرگرفته شده است و قابلیت اطمینان طرح‌های پشتیبان معرفی‌شده، مقایسه شده‌اند. در این مرجع نشان داده‌شده است که میزان قابلیت اطمینان طرح‌های پیشنهادی به دمای پیوند نیمه‌هادی‌های قدرت در حالت پایدار بستگی دارد. دمای پیوند نیز خود تابع سه عامل: دمای محیط، تلفات توان و مقاومت حرارتی هیت سینک است. ازاین‌رو در این مرجع آنالیز حساسیت هرکدام از پارامترها نیز بررسی شده است. در این مرجع برای بررسی قابلیت اطمینان طرح‌های پیشنهادی روش تجزیه‌وتحلیل مدل مارکوف به کار گرفته شده است.

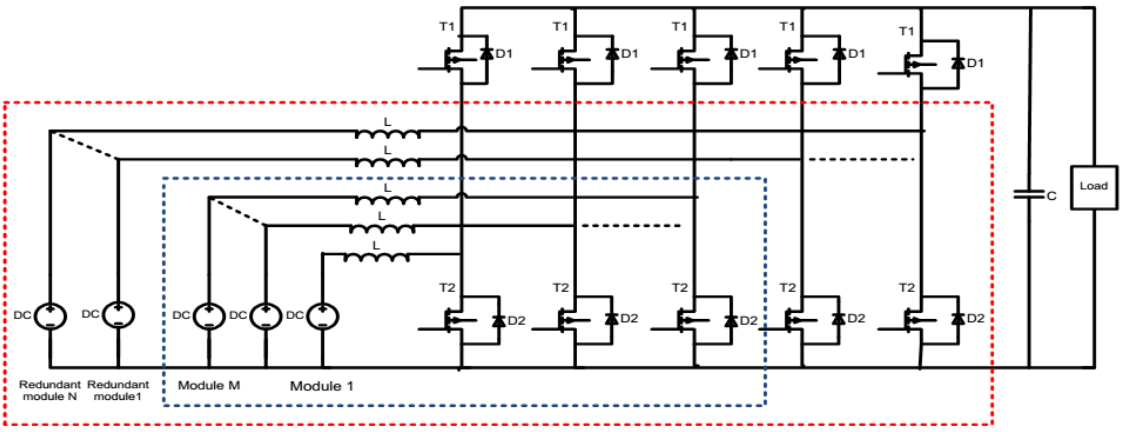
در مرجع [۶۴] در دانشگاه تبریز به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت از سیستم پشتیبان استفاده شده است. در این مرجع نیز قابلیت اطمینان ترکیب‌های موازی و سری در سه ساختار: سیستم پشتیبان مجهز به رله‌های مشابه، و ساختار پشتیبان آماده‌به‌کار با یک رله و ساختار پشتیبان بدون رله برای کلیدهای نیمه‌هادی بررسی شده است. همچنین نرخ خرابی کلیدهای قدرت در دو حالت خطای مدار باز و اتصال

[1] Solid State Fault Current Limiter

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

کوتاه موردمطالعه قرار گرفته است. در این مرجع برای بررسی قابلیت اطمینان روش تجزیه‌وتحلیل مدل مارکوف به کار گرفته‌شده است.

در مرجع [۶۵] در دانشگاه تبریز به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان، شاخه‌های اضافی (پشتیبان) به یک مبدل DC/DC باک- بوست دوطرفه افزوده شده و مبدل در دو حالت موازی و آماده به‌کار عمل می‌کند. همچنین در این پژوهش محاسبات برای مشخص کردن تعداد بهینه شاخه‌ها با هدف رسیدن به بیشترین قابلیت اطمینان انجام شده است. در شکل ۱۸-۱ نمایی از ساختار پیشنهادی مبدل با شاخه‌های پشتیبان نشان داده‌شده است.

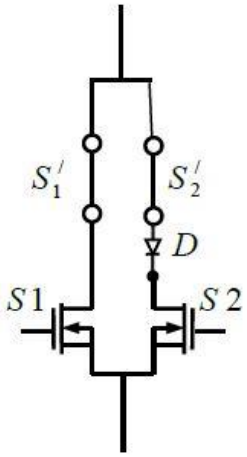


شکل ۱۸-۱ نمای کلی مبدل باک-بوست DC-DC دوطرفه با M شاخه موازی اصلی و N شاخه موازی اضافی [۶۵]

علاوه بر محاسبه قابلیت اطمینان توابع هزینه مربوط به نگه‌داری، نصب، اجرا و تلفات نیز محاسبه‌شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تعداد بهینه شاخه‌ها از دیدگاه قابلیت اطمینان یا عامل هزینه با هم یکسان نبوده و بر اساس برخی پارامترها مانند توان خروجی یا نوع قطعه می‌تواند متفاوت باشد. در این مرجع برای محاسبه قابلیت اطمینان مبدل-های دو و سه مرحله‌ای از مدل مارکوف استفاده شده است.

در مرجع [۶۶] در دانشگاه تبریز تحلیل مقایسه‌ای بین ساختارهای موازی، سری و آماده به‌کار کلیدهای قدرت با نگرشی جدید ارائه شده و به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان ساختارهای اضافی متداول، ساختاری جدید پیشنهاد شده است. تحلیل قابلیت اطمینان انواع ساختارها بر اساس مارکوف صورت گرفته است. در شکل ۱۹-۱ نمایی از ساختار اضافی پیشنهادی برای کلیدهای قدرت نشان داده‌شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

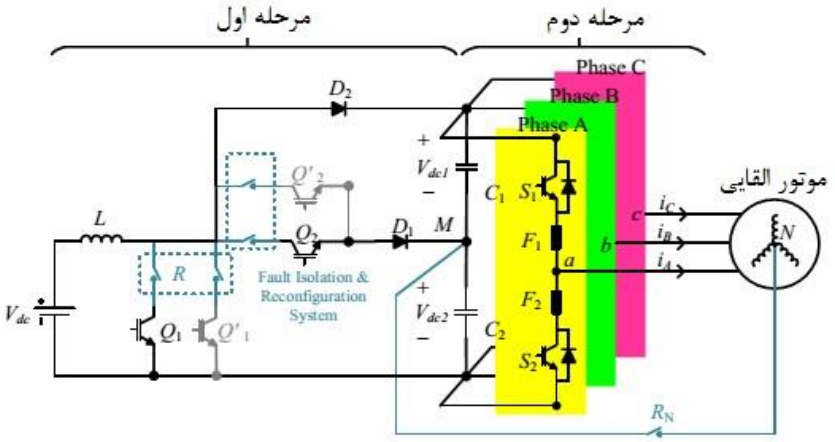


شکل ۱۹-۱ نمایی از ساختار مازاد پیشنهادی برای کلیدهای قدرت [۶۶]

۱-۹-۲- خطاپذیری

یکی از روش‌های بهبود قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده از ساختارهای خطاپذیر برای مبدل‌ها است.

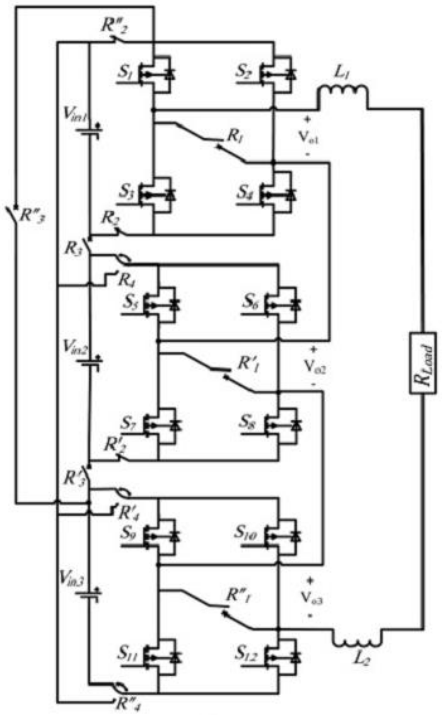
در مرجع [۶۷] در دانشگاه تبریز یک مبدل DC-AC خطاپذیر جدید برای تغذیه درایو موتور القایی پیشنهاد شده است تا بتواند موتور را تحت خطاهای مدار باز و اتصال کوتاه کلیدها تا حد ممکن نزدیک به عملکرد طبیعی موردنظر نگه دارد. در شکل ۲۰-۱ نمایی کلی از ساختار مبدل DC-AC پیشنهادی نشان داده‌شده است.



شکل ۲۰-۱ نمایی از مبدل DC-AC خطاپذیر پیشنهادی برای تغذیه درایو موتور القایی [۶۷]

در این پژوهش با استفاده از روش کنترلی حالت مناسب کلید زنی برای عملکرد پیوسته درایو بعد از خطا، تعیین می‌شود. دو استراتژی کنترل به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش شامل کنترل پیش‌بین و کنترل حالت ولتاژ است که در مرحله اول ولتاژهای خازن‌های لینک DC با استفاده از کنترل حالت ولتاژ توسط کنترل‌کننده انتگرالی مرتبه سوم، تعادل را حفظ می‌کنند.کنترل پیش‌بین در مرحله دوم مبدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل پس از وقوع خطا استفاده می‌شود.

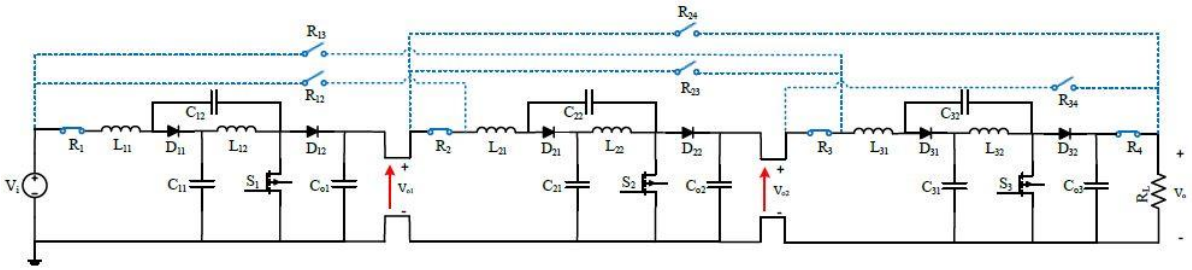
مرجع [۶۸] که در دانشگاه تبریز انجام شده، یک ساختار خطاپذیر برای اینورتر چند سطحی H-bridge آبشاری معرفی کرده است. در این ساختار هنگامی‌که خطا در یک ماژول رخ می‌دهد، مدار پیشنهادی قابلیت ایزوله کردن و حذف ماژول آسیب‌دیده از کل سیستم را دارد. درواقع با این روش با کاهش سطح ولتاژ خروجی ماژول‌های سالم سیستم به عملکرد خود ادامه داده و درنتیجه از خطای کل سیستم جلوگیری شده و قابلیت اطمینان اینورتر بالاتر خواهد بود. در این پژوهش نیز از مدل مارکوف برای بررسی قابلیت اطمینان اینورتر پیشنهادی استفاده شده است. در شکل ۲۱-۱ نمایی از اینورتر پیشنهادی نشان داده‌شده است.



شکل ۲۱-۱ نمایی از اینورتر ۷ سطحی H-Bridge آبشاری پیشنهادی [۶۸]

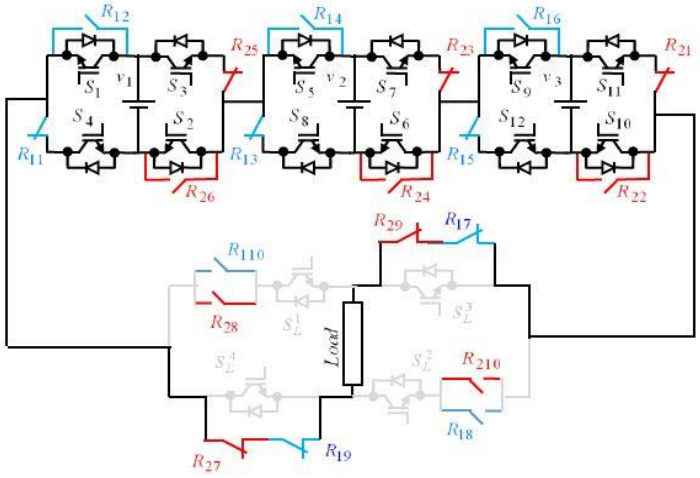
در مرجع [۶۹] که در دانشگاه تبریز انجام شده، یک ساختار مبدل DC-DC شبه Z- Source خطاپذیر معرفی شده و قابلیت اطمینان آن از طریق ارزیابی دقیق ریاضی بررسی شده است. به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان مبدل پیشنهادی، یک روش کنترل قوی نیز در نظر گرفته شده است. طبق روش کنترل استفاده‌شده، در لحظه وقوع خطا، ماژول‌های معیوب با استفاده از برخی از رله‌های در نظر گرفته‌شده از مبدل جدا شده و به کل سیستم اجازه می‌دهند با ماژول‌های باقی‌مانده کار کند. ازآنجایی‌که ماژول‌های معیوب از مدار حذف می‌شوند، چرخه کار کلیدها از طریق سیستم کنترل تغییر می‌یابد. بنابراین ماژول‌های باقی‌مانده مسئولیت حفظ ولتاژ خروجی را در سطح مطلوب بر عهده خواهند گرفت. در این مرجع برای بررسی قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی از روش مارکوف بهره گرفته شده است. در شکل ۲۲-۱ نمایی از ساختار مبدل پیشنهادی نشان داده‌شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۲۲-۱ نمایی از مبدل **DC-DC** شبه **Z- Source** پیشنهادی [۶۹]

مرجع [۷۰] در دانشگاه تبریز یک ساختار خطاپذیر برای اینورترهای چندسطحی آبشاری H-bridge پیشنهاد کرده است. ساختار پیشنهادی از دو رله برای حذف بخش‌های خراب از مبدل استفاده می‌کند. در شکل ۲۳-۱ نمایی از ساختار مبدل پیشنهادی نشان داده‌شده است. در هنگام بروز خطا در مبدل، سلول‌های پل کامل از طریق رله به سلول‌های نیمه پل تبدیل می‌شوند. بنابراین اینورتر بدون اینکه تحت تأثیر خطا قرار بگیرد، به وظیفه خود ادامه می‌دهد. همچنین برای ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل پیشنهادی که از سه سلول H-bridge تشکیل شده، از مدل مارکوف بهره گرفته شده است.



شکل ۲۳-۱ نمایی از مبدل آبشاری **H-bridge** پیشنهادی [۷۰]

تمرکز مرجع [۷۱] بر بهبود قابلیت اطمینان مبدل تقویت‌کننده DC-DC سه فاز است. در این تحقیق که در دانشگاه تبریز انجام شده، یک ساختار تغییر شکل‌یافته جدید و استراتژی کلید زنی پیشنهاد شده است. پایه و اساس استراتژی پیشنهادی بای‌پس کردن کلید معیوب است. در این پژوهش برای کلیدها از سه ساختار پشتیبان: موازی، آماده‌به‌کار و سری استفاده شده است. همچنین از مدل مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان بهره گرفته شده است.

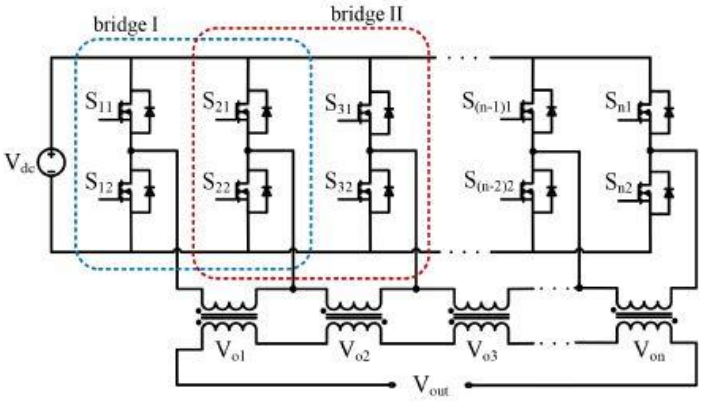
در مرجع [۷۲] که در دانشگاه شریف انجام شده، دو ساختار دیود-فیوز برای ارزیابی عملکرد خطاپذیری یک منبع تغذیه ولتاژ بالا صورت گرفته و قابلیت اطمینان ساختارهای ارائه شده نیز به‌منظور انتخاب ساختار با قابلیت اطمینان بالاتر ارزیابی شده است. در این مرجع نیز از زنجیره مارکوف برای بررسی قابلیت اطمینان ساختارهای پیشنهادی استفاده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۱-۹-۳- اصلاح توپولوژی مبدل

یکی از روش‌های بهبود قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت، اصلاح توپولوژی مبدل‌ها می‌باشد. در این روش تغییری در توپولوژی مبدل‌های موجود در راستای افزایش قابلیت اطمینان صورت می‌گیرد.

در مرجع [۷۳] در دانشگاه تبریز یک مبدل چندسطحی ترانسفورماتور آبشاری جدید ارائه شده است. در مبدل پیشنهادی تنها از یک منبع DC استفاده شده و بنابراین نیاز به چندین منبع DC را از بین می‌برد. در شکل ۲۴-۱ نمایی از مبدل پیشنهادی نشان داده‌شده است. در مقایسه با ساختار معمولی، ساختار پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی از تعداد کم‌تری تجهیزات نیمه‌هادی ازجمله کلیدهای قدرت، مدارهای درایور و دیودها استفاده کرده است. ازاین‌رو علاوه بر مزیت استفاده از اجزای کمتر که منجر به کاهش هزینه، حجم و پیچیدگی مبدل می‌شود، می‌توان با استفاده از توپولوژی پیشنهادی قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشید. در این پژوهش نیز برای ارزیابی قابلیت اطمینان ساختار پیشنهادی از مدل زنجیره مارکوف استفاده شده است.



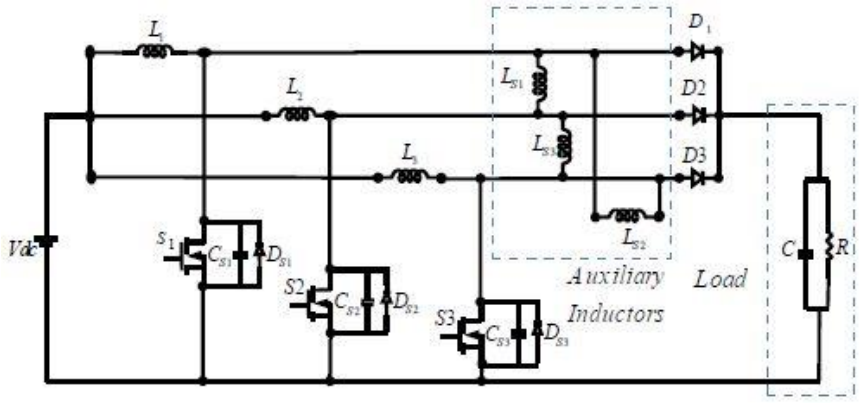
شکل ۲۴-۱ نمایی از مبدل چندسطحی ترانسفورماتوری آبشاری پیشنهادی [۷۳]

هدف مرجع [۷۴] که در دانشگاه شریف انجام شده، معرفی روش جدیدی برای طراحی مدار RCD اسنابر[1] به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش تنش گرمایی روی سیستم کلید زنی است. اگرچه از مدارهای اسنابر برای ولتاژ گذرا و سنسورهای جریان و مسائل مرتبط با EMI[2] استفاده می‌کنند، اما عملکرد آن‌ها با تلفات توان به‌هم‌پیوسته است. در این پژوهش مقدار خازن موجود در مدار RCD اسنابر بر اساس توجهات قابلیت اطمینان بهینه شده است. درواقع در این مقاله طرح پیشنهادی برای دستیابی به بیشترین قابلیت اطمینان برای مجموعه کلیدها و مدار اسنابر ارائه شده است.

استفاده از روش کلید زنی نرم در مبدل‌های DC-DC بدون افزودن کلید فعال اضافی، قابلیت اطمینان مبدل را افزایش می‌دهد. در مرجع [۷۵] در دانشگاه تبریز یک توپولوژی جدید با قابلیت اطمینان بالا با امکان عملکرد کلید زنی نرم برای مبدل سه فاز رابط[3] پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی با افزودن سه سلف به ساختار معمولی

[1] RCD Snubber
[2] Electromagnetic interference
[3] Interleaved

ایجاد می‌شود. درشکل ۲۵-۱ نمایی از مبدل پیشنهادی نشان داده‌شده است. به‌طور خودکار، کلیدهای قدرت استفاده‌شده در توپولوژی پیشنهادی تحت شرایط ولتاژ صفر (ZVC[1]) روشن می‌شوند. علاوه‌براین دیودها در شرایط جریان صفر (ZCC[2]) خاموش می‌شوند. با استفاده از این روش تلفات کلید زنی نیمه‌هادی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین هیچ کلید فعال اضافی در توپولوژی پیشنهادی وجود ندارد. این دو مزیت سبب می‌شود قابلیت اطمینان طرح پیشنهادی بهبود یابد. در این پژوهش برای بررسی قابلیت اطمینان ساختار پیشنهادی از مدل مارکوف استفاده شده است.



شکل ۲۵-۱ نمایی از مبدل DC-DC پیشنهادی [۷۵]

۱-۹-٤- بررسی عوامل استرس‌زای تجهیزات الکترونیک قدرت

یکی دیگر از مباحث موجود در زمینه بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت، بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل استرس‌زا و تأثیر این عوامل بر روی طول عمر تجهیزات الکترونیک قدرت است.

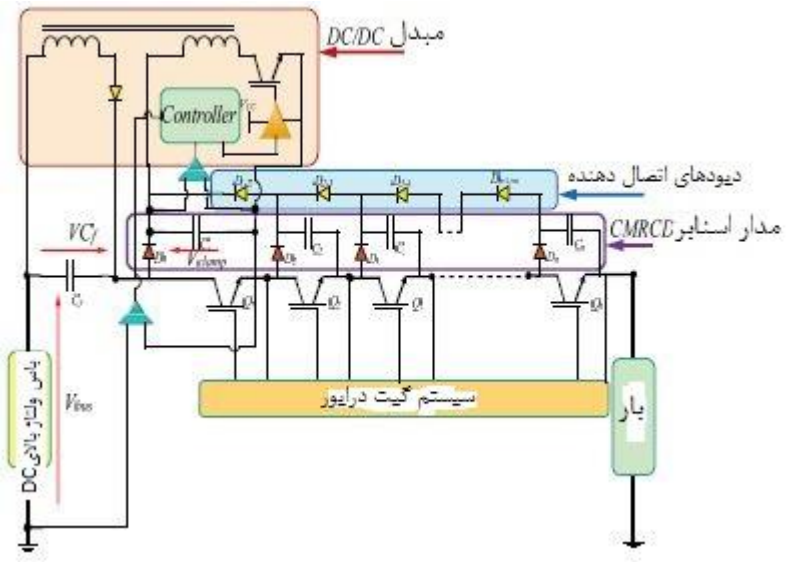
در مرجع [۷۶] در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی آنالیز حرارتی و تلاش برای دستیابی به توزیع دمای دقیق برای دو تجهیز قدرت Si IGBT و SiC MOSFET انجام شده است. از این‌رو مدل‌های حرارتی مختلف به‌منظور بررسی اثرات هدایت الکتریکی وابسته به دما تحلیل و مقایسه شده‌اند.

در مرجع [۷۷] در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی به‌منظور کاهش ناهمگونی دمای سطح تراشه، یک روش توزیع چگالی متعادل و موزون جریان در تراشه‌های IGBT معرفی شده است. این ایده با تغییر ولتاژ آستانه[3] در منطقه فعال تراشه IGBT اجرا می‌شود. در این پژوهش همچنین تجزیه و تحلیل حرارتی-مکانیکی همراه با روش آنالیز المان محدود (FEM[4]) انجام شده است.

در مرجع [۷۸] در دانشگاه شریف یک راه‌حل برای متعادل کردن ولتاژ IGBTهای سری در مدارهای اسنابر

[1] Zero Voltage Condition
[2] Zero Current Condition
[3] threshold
[4] finite element method

در حالت کلمپ (CMRCD[1]) پیشنهاد شده است. فرآیند متعادل‌سازی ولتاژ از طریق اندازه‌گیری ولتاژ کل بلوک IGBT و تنظیم ولتاژ CMRCDها با درنظرگرفتن ولتاژ کل انجام می‌شود. روش تنظیم ولتاژ مدارات اسنابر کلمپی توسط یک مبدل DC-DC ساده و چندین دیود اتصال‌دهنده که در زمان روشن بودن IGBTها، ولتاژ مدارات اسنابر را وصل می‌کنند، انجام می‌شود. با این روش طول عمر موردانتظار برای IGBTها بهبود میابد. در شکل ۲۶-۱ ساختار پیشنهادی برای متعادل‌سازی ولتاژ IGBTهای سری نشان داده شده است.



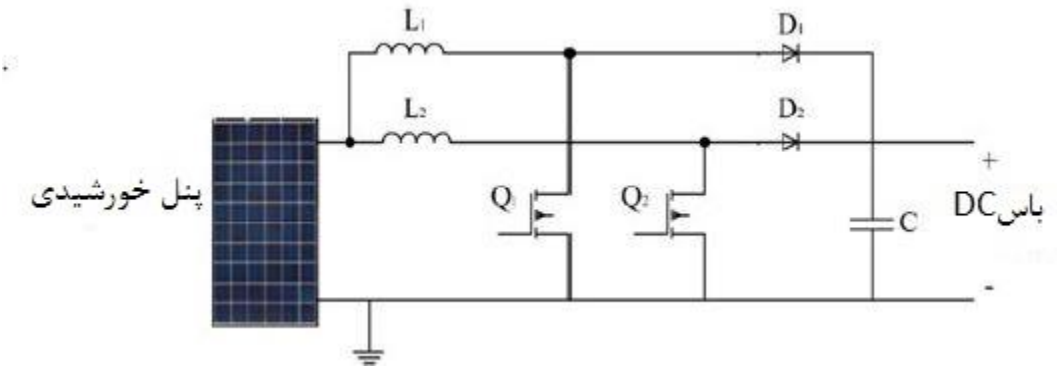
شکل ۲۶-۱ ساختار پیشنهادی برای متعادل‌سازی ولتاژ IGBT [۷۸]

۱-۹-۵- ارزیابی و محاسبه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت

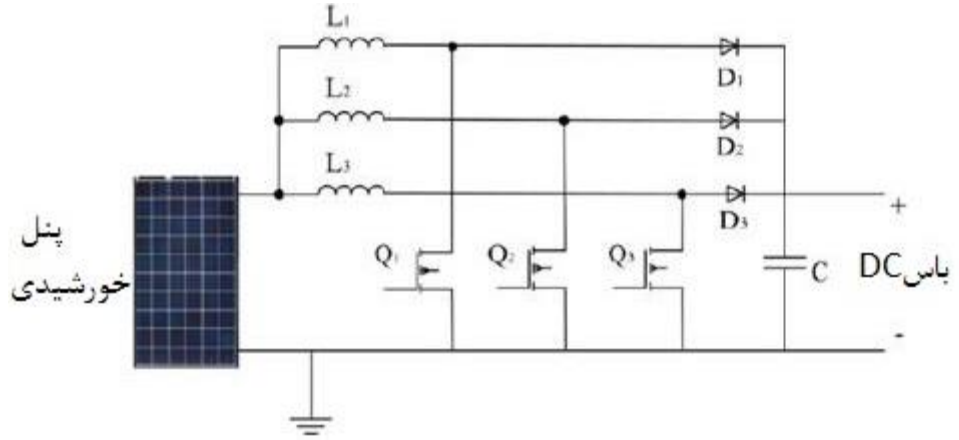
مرجع [۷۹] در دانشگاه تبریز با هدف ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای رابط در سیستم PV[2] با در نظر گرفتن هزینه انجام شده است. در محاسبات انجام شده، تأثیرات تلفات توان و دما بر قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. در این پژوهش مقایسه‌ای بین قابلیت اطمینان مبدل برای عملکرد در حالت‌های مختلف، حالت پشتیبان و حالت موازی، نیز انجام‌شده است. در این مرجع برای محاسبه قابلیت اطمینان مبدل‌های دو و سه مرحله‌ای از مدل مارکوف استفاده شده است. در شکل ۲۷-۱ مبدل‌های دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای رابط DC/DC متصل به پنل خورشیدی نشان داده شده است.

[1] Clamp mode resistor capacitor diode
[2] Photovoltaic

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



(الف)



(ب)

شکل ۲۷-۱ مبدل‌های الف) دومرحله‌ای و ب) سه مرحله‌ای رابط DC/DC متصل به پنل خورشیدی [۷۹]

در مرجع [۸۰] در دانشگاه تبریز سه روش کنترل متداول: روش PWM[1] سینوسی (SPWM[2])، روش تزریق هارمونیک سوم (THIPWM[3]) و روش بردار فضایی (SVPWM[4]) برای تعیین قابل‌اطمینان‌ترین روش مدولاسیون برای اینورتر NPC[5] مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر استراتژی کنترل بر قابلیت اطمینان با تأثیر آن بر دمای پیوند کلیدها تعیین می‌شود. دمای پیوند نیز تابع سه عامل: دمای محیط، تلفات توان نیمه‌هادی‌های قدرت و مقاومت حرارتی هیت سینک است. بنابراین واضح است که اثرات استراتژی کنترل کلید زنی بر روی دمای پیوند فقط از طریق تلفات توان است.

در مرجع [۸۱] در دانشگاه تبریز مقایسه قابلیت اطمینان بین ۳ نوع مبدل الکترونیک قدرت که به‌طور متداول در توربین‌های بادی مبتنی بر مولد آهنربای دائم استفاده می‌شوند، ارائه شده است. نوع اول یک مبدل پشت‌به‌پشت، نوع دوم اینورتر مدولاسیون پهنای پالس با مبدل بوست DC-DC معمولی و یک‌سوساز دیودی و نوع سوم اینورتر

[1] Pulse Width Modulation
[2] Sinusoidal Pulse Width Modulation
[3] Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation
[4] Space Vector Pulse Width Modulation
[5] Neutral Point Clamped

پهنای پالس با مبدل بوست DC-DC تقویت‌شده و یک یک‌سوساز دیودی است. به‌منظور مقایسه قابلیت اطمینان سه نوع مبدل از روش مارکوف استفاده شده است.

در مرجع [۸۲] در دانشگاه شریف قابلیت اطمینان مبدل باک-بوست PWM معمولی که در آن اثرات چرخه کار، ولتاژ ورودی، توان خروجی، افزایش ولتاژ و مدت‌زمان ارزیابی می‌شود، موردبررسی قرارگرفته است. این تجزیه‌وتحلیل در دو حال پیوسته و ناپیوسته انجام شده و از مدل مارکوف برای بررسی قابلیت اطمینان استفاده شده است.

هدف از مرجع [۸۳] که در دانشگاه تبریز انجام شده، ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های بوست رابط بر اساس حالت عملکرد مبدل است که در پنل‌های خورشیدی مورداستفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش یک تحلیل مقایسه‌ای در مورد قابلیت اطمینان یک مبدل بوست رابط دومرحله‌ای در دو حالت مختلف عملکرد: عملکرد اضافی و عملکرد موازی، انجام شده است. در این مرجع همچنین تأثیر پارامترهایی مانند تلفات توان و دما بر نرخ خرابی تجهیزات قدرت نیز بررسی شده است. به‌منظور بررسی قابلیت اطمینان نیز از مدل مارکوف بهره گرفته‌شده است.

در مرجع [۳] در دانشگاه تبریز بررسی جامع در رابطه با ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌های الکترونیک قدرت در سه بخش ارائه می‌شود: ۱- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های موجود، ۲- بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌های موجود به‌وسیله راه‌حل‌های الگوریتمی بدون تغییر در سخت‌افزار، ۳- طراحی بر اساس قابلیت اطمینان به‌طوری‌که کل سیستم قابلیت تحمل خطا را داشته باشد.

در مرجع [۸۴] در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی قابلیت اطمینان یک سیستم هیدروژن بادی مستقل و غیر متصل به شبکه بررسی شده است. در این پژوهش تلفات هدایت و تلفات کلیدزنی اینورتر سه سطحی مورداستفاده محاسبه شده است. در مرحله بعدی افزایش دمای کلیدهای نیمه هادی قدرت با استفاده از تلفات محاسبه شده، تخمین زده می‌شود. در نهایت در این مرجع با استفاده از اطلاعات موجود طول عمر کلیدهای قدرت تخمین زده شده و قابلیت اطمینان آن‌ها بررسی شده است.

در مرجع [۸۵] در دانشگاه شریف قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیک قدرت و مبدل DC-DC باک بررسی شده است. همچنین در این پژوهش مقایسه‌ای بین شبکه‌های کلیدزنی متفاوت برای انتخاب گزینه مطمئن‌تر انجام شده است. شبکه‌های مختلف کلیدزنی متشکل از MOSFETهای کانال P و N و درایورهای مناسب برای کلیدها است. در این مرجع برای بررسی قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیک قدرت از تخمین طول عمر تجهیزات الکترونیک قدرت با استفاده از روابط موجود استفاده شده است.

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مقالات و تحقیقات موجود در کشور به‌منظور بررسی و ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت از روش مارکوف بهره گرفته‌اند که در ادامه به معرفی این روش پرداخته خواهد شد.

۱-۱۰- مدل مارکوف

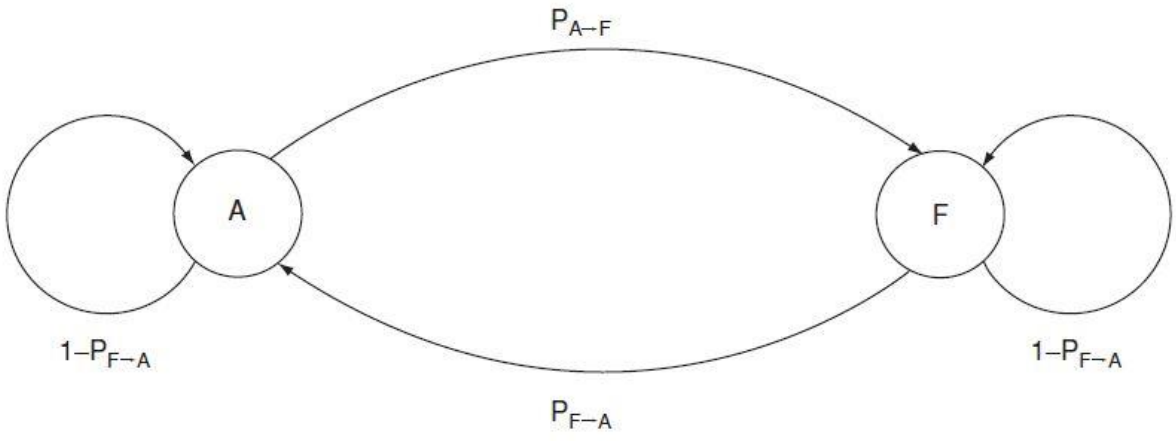
مدل مارکوف برای اولین بار توسط ریاضیدانی به این نام در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی مطرح شد. مارکوف یک مدل ریاضی خاص بنام مدل مرتبه صفر برای سیستم ها پیشنهاد کرد که در آن حالت آینده سیستم تنها به حالت فعلی آن، و نه گذشته سیستم بستگی دارد. این ویژگی "بدون حافظه" که "خاصیت مارکوف" نام دارد، بیان می کند که کلیه گذرها از حالتی به حالت دیگر با "نرخ گذر" ثابت رخ می دهند [۸۶].

یک سیستم یا قطعه می‌تواند در یکی از دو حالت (برای مثال خرابی، عدم خرابی) باشد و احتمال قرارگیری در یک حالت و یا حالت دیگر در زمان آینده با استفاده از تجزیه و تحلیل حالت-فضا (یا حالت-زمان) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، احتمال خرابی و احتمال بازگشت به حالت موجود، میزان خرابی و میزان ترمیم از جمله پارامترهای مهم و تأثیرگذار می‌باشند. یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های تحلیل حالت-فضا، تحلیل مارکوف است. روش مارکوف را می‌توان با درنظر گرفتن محدودیت‌های زیر استفاده کرد [۶]:

۱- احتمال تغییر از یک حالت به حالت دیگر باید ثابت بماند، یعنی فرایند باید همگون (یکنواخت) باشد. بنابراین این روش تنها زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که فرض خطر ثابت یا میزان شکست توجیه‌پذیر باشد.

۲- حالت‌های آینده سیستم، به غیر از وضعیت قبلی، مستقل از همه حالات گذشته باشند. این یک محدودیت مهم در تجزیه و تحلیل سیستم‌های قابل تعمیر است، زیرا این بدان معنی است که تعمیر سیستم را به وضعیت "جدید" بازمی‌گرداند.

روش مارکوف می‌تواند با درنظر گرفتن یک قطعه در دو حالت خرابی (F) و موجود (بدون خطا، A)، ترسیم کرد. احتمال انتقال از A به F برابر با $PA \rightarrow F$ و احتمال انتقال از F به A برابر با $PF \rightarrow A$ است. در شکل ۱-۲۸ وضعیت توصیف شده، به صورت نموداری نشان داده شده است [۶].



شکل ۱-۲۸ نمودار انتقال حالت مارکوف دو حالته [۶]

وسایل و تجهیزات الکترونیکی عمدتاً دارای "نرخ خرابی" ثابتی می‌باشند. ازاین‌رو مدل مارکوف برای تحلیل قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هر چند که مدل مارکوف برای تجهیزاتی که نرخ خرابی متغیر دارند نیز بکار می‌رود ولی بیشترین استفاده آن برای ارزیابی قابلیت اطمینان، دسترس پذیری و ایمنی سیستم هایی با نرخ خرابی ثابت است [۸۶].

۱-۱۱- جمع‌بندی

در این فصل مباحث مختلف مربوط به قابلیت اطمینان در تجهیزات و مبدل‌های الکترونیک قدرت مطرح گردید. همچنین روش‌های ارزیابی و بررسی قابلیت اطمینان مبدل‌ها مطابق با مراجع موجود شرح داده شده است. در ادامه‌ی فصل نیز مقالات و مراجع موجود در این زمینه در دنیا و ایران بررسی گردید. همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، امروزه یکی از روش‌های مهم برای ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده از ابزار طراحی و شبیه سازی مدار به کمک رایانه می‌باشد.از طرفی با بررسی مقالات و مراجع موجود در داخل کشور مشخص شد که نیاز به وجود ابزاری برای ارزیابی و محاسبه قابلیت اطمینان و طول عمر تجهیزات الکترونیک قدرت در کشور برای کاربردهای گوناگون مانند توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و درایوهای الکترونیک قدرت، به شدت احساس می‌شود. از این‌رو این پروژه با هدف اصلی ایجاد ابزاری برای بررسی و ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل-های الکترونیک تعریف شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۲- استخراج حداقل شاخصهای اجزای الکترونیک قدرت به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدلها

۲-۱- مقدمه ای بر اینورتر های فتوولتائیک[1]

اینورتر PV عنصر اصلی سیستم های قدرت PV متصل به شبکه است که وظیفه اصلی آن تبدیل توان DC تولید شده توسط پانل های PV به توان AC شبکه است.

با توجه به ساختار نیروگاه های PV، اینورترهای PV را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- اینورترهای یکپارچه ماژول[2]، که معمولاً در محدوده ۵۰-۴۰۰ وات برای سیستم های PV بسیار کوچک هستند.
- اینورترهای رشته ای[3]، که به طور معمول در محدوده ۰.۴-۲ کیلووات برای سیستم های کوچک بام با پانل های متصل به یک رشته هستند.

[1] Photovoltaics (PV)
[2] Module integrated inverters
[3] String inverters

- اینورترهای چندرشته ای[1]، که به طور معمول در محدوده ۱.۵-۶ کیلووات برای سیستم های بام تقریبا بزرگ با پانل هایی که در یک تا دو رشته پیکربندی شده اند، هستند.
- اینورترهای کوچک مرکزی[2]، که معمولاً بیشتر از ۶ کیلووات با توپولوژی سه فاز و طراحی مدولار برای بام های بزرگتر یا نیروگاه های کوچکتر در محدوده ۱۰۰ کیلووات و اندازه های معمولی ۶، ۸، ۱۰و ۱۵ کیلووات هستند.
- اینورترهای مرکزی[3]، که معمولاً در محدوده ۱۰۰-۱۰۰۰ کیلووات با توپولوژی سه فاز و طراحی مدولار برای نیروگاه های بزرگ تا ده ها مگاوات و اندازه واحد معمول ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلووات هستند.

از لحاظ تاریخی اولین نیروگاه های PV متصل به شبکه در دهه ۱۹۸۰ به عنوان اینورترهای مرکزی مبتنی بر تریستور معرفی شدند. اولین سری اینورتر PV مبتنی بر ترانزیستور PV-WR در سال ۱۹۹۰ توسط شرکت SMA تولید شد[۱]. از اواسط دهه ۱۹۹۰، فناوری IGBT[4] و MOSFET[5] به طور گسترده ای برای انواع اینورترهای PV استفاده می شود.

تنوع بسیار زیادی از ساختارهای اینورتر PV در بازار دیده می شود که در مقایسه با اینورترهای درایو موتور، اینورترهای PV از نظر سخت افزاری و عملکرد پیچیده تر هستند. بنابراین، نیاز به افزایش ولتاژ ورودی، فیلتر اتصال شبکه، رله قطع کننده شبکه و کلید DC مهمترین جنبه های افزایش پیچیدگی سخت افزار هستند. علاوه براین، ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)[6]، سنکرون سازی شبکه و ثبت اطلاعات، برای اینورترهایPV مورد نیاز هستند. اخیراً توپولوژی های ابتکاری جدیدی برای اینورترهای PV توسعه داده شده اند که هدف اصلی آنها افزایش بازده و کاهش هزینه تولید است. همچنین از آنجا که طول عمر پانل های PV معمولاً بیشتر از ۲۰ سال است، تلاش برای افزایش طول عمر اینورترهای PV نیز در حال انجام است.

اولین روش مورد استفاده برای افزایش بازده در اینورترهای PV، حذف جداسازی گالوانیکی بود که معمولاً توسط ترانسفورماتورهای با فرکانس بالا در مبدل بوست DC-DC یا توسط یک ترانسفورماتور فرکانس پایین در خروجی فراهم می شده است . بنابراین می توانستند با این روش بازده را تقریبا ۱ تا ۲ درصد افزایش داد.

امروزه تعداد زیادی از شرکت های تولیدکننده اینورترPV مانند SMA، Sunways، Conergy، Ingeteam، Danfoss Solar و Refu اینوترهایPV بدون ترانسفورماتور با بازده بالای ۹۷ درصد را به بازار ارائه می دهند.

[1] Multistring inverters
[2] Mini central inverters
[3] Central inverters
[4] Insulated-gate bipolar transistor
[5] Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor
[6] Maximum power point tracker

توسعه توپولوژی ها برای اینورترهایPV نقطه شروع را در دو خانواده مبدل کاملاً اثبات شده **"اینورتر پل H[1] و اینورتر کلمپ شده نقطه خنثی (NPC) [۲]"** در نظر گرفته است.

۲-۱-۱- ساختارهای اینورتر مشتق شده از توپولوژی H-Bridge

خانواده مبدل های H-Bridge یا Full-Bridge، که اولین بار توسط W. Mcmurray در سال ۱۹۶۵ معرفی شد[۲]، مرجع مهمی در توسعه فناوری مبدل الکترونیک قدرت بوده است. این اولین ساختاری بود که می توانست از اولین تجهیزات نیمه هادی تریستور موجود استفاده کند. توپولوژی H-Bridge بسیار متنوع است که می تواند برای تبدیل DC-DC و DC-AC استفاده شود و همچنین می تواند به صورت پل کامل (FB)[۳] با دو پایه سوئیچینگ یا به صورت نیمه پل با یک پایه سوئیچینگ پیاده سازی شود.

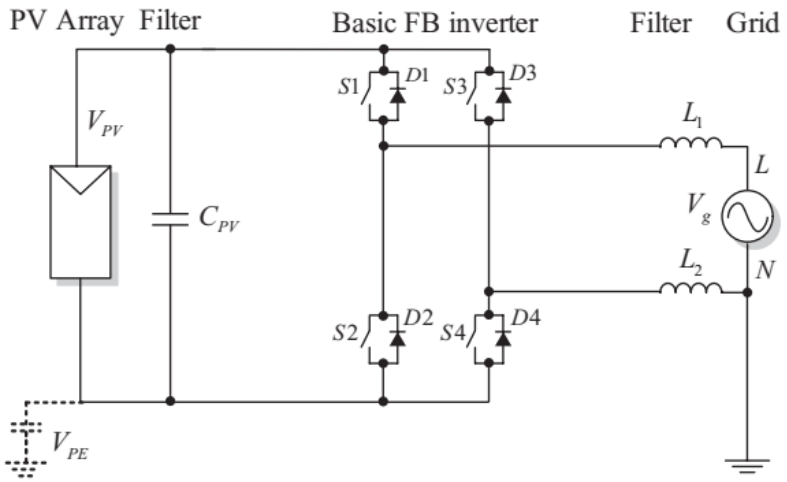
۲-۱-۱-۱- اینورتر تمام پل عمومی[۴]

توپولوژی اینورترPV مبتنی بر اینورتر تمام پل (FB) در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. که می توان از سه استراتژی اصلی مدولاسیون برای این ساختار استفاده کرد:

- مدولاسیون دو قطبی (BP)[۵]
- مدولاسیون تک قطبی (UP)[۶]
- مدولاسیون ترکیبی

[1] H-bridge
[2] Neutral point clamped
[3] Full-Bridg
[4] Full-Bridge Inverter
[5] Bipolar
[6] Unipolar

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱-۲- اینورتر تمام پل **(FB)**

ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

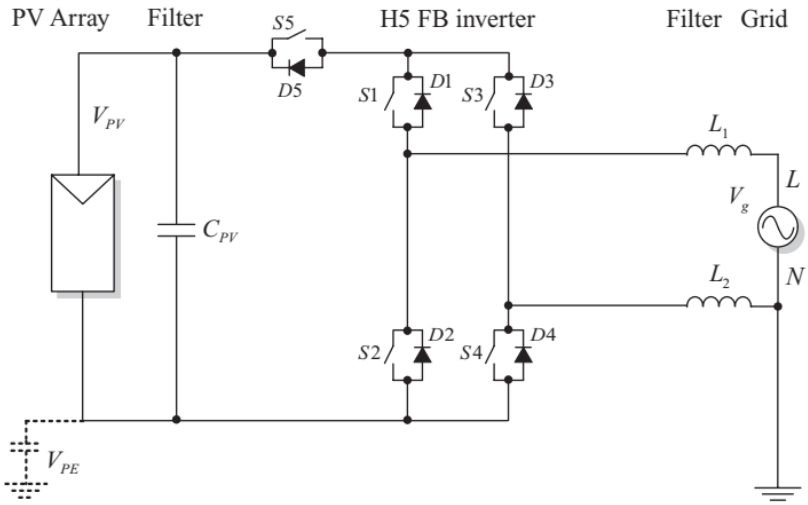
- در این ساختار، سوییچ های S1(S2) و S4(S3) بصورت قطری در فرکانس بالا و در همان مرجع سینوسی سوئیچ زنی می شوند.
- حالت ولتاژ خروجی صفر در این توپولوژی امکان پذیر نیست.

۲-۲-۱-۱- اینورتر H5 (SMA)

در سال ۲۰۰۵، SMA یک توپولوژی اینورتر جدید به نام H5 به ثبت رساند[89]. این توپولوژی در شکل ۲- نشان داده شده است و همانطور که از نام آن مشخص است، این ساختار یک اینورتر کلاسیک پل H با یک سوئیچ پنجم اضافی در باس مثبت لینک DC است که دو عملکرد حیاتی را فراهم می کند:

- از تبادل توان راکتیو بین $L_{1(2)}$ و C_{PV} در هنگام ولتاژ صفر جلوگیری می کند، بنابراین بازده را افزایش می دهد.
- در حالت ولتاژ صفر، ماژول PV را از شبکه جدا می کند، بنابراین مولفه های فرکانس بالا V_{PE} را از بین می برد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۲-۲- اینورتر H5

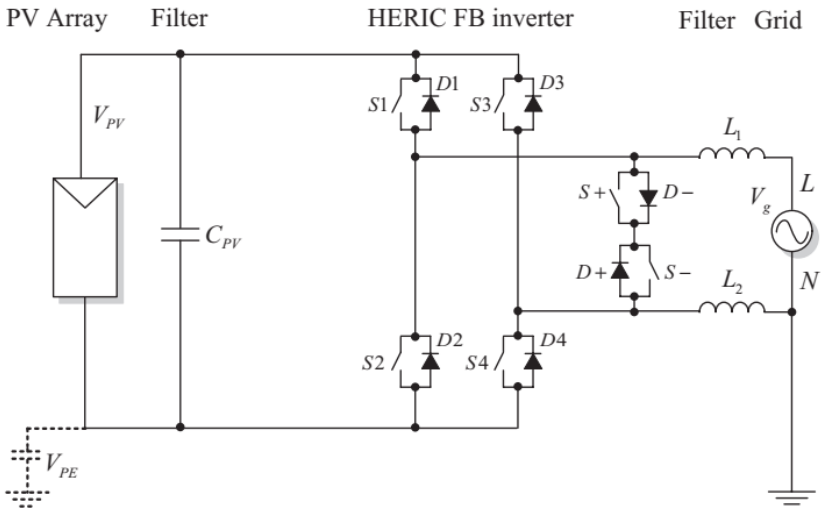
۲- ۳-۱-۱- اینورتر HERIC (Sunways)

در سال ۲۰۰۶، Sunways با اضافه کردن پایه بای پس در سمت AC با استفاده از دو IGBT پشت به پشت، یک توپولوژی جدید را نیز از ساختار کلاسیک پل H به نام HERIC[1] ارائه داد که ساختار این اینورتر در شکل ۲- نشان داده شده است[90].

بای پس AC همان دو عملکرد حیاتی را همانند سوئیچ پنجم در توپولوژی H5 فراهم می کند:

- از تبادل توان راکتیو بین $L1(2)$ و C_{PV} در هنگام ولتاژ صفر جلوگیری می کند، بنابراین بازده را افزایش می دهد.
- در حالت ولتاژ صفر ماژول PV را از شبکه جدا می کند، بنابراین مولفه های فرکانس بالای V_{PE} را از بین می برد.

[1] Highly efficient and reliable inverter concept



شکل ۳-۲- اینورتر HERIC (Sunways)

۲-۴-۱-۱- اینورتر REFU

در سال ۲۰۰۷، Refu Solar یک توپولوژی جدید که از H-Bridge کلاسیک نیز گرفته شده است ارائه داد. این توپولوژی در واقع از یک نیم پل در بای پس کناری AC و از یک مبدل DC-DC قبل بای پس شدن استفاده می کند. ساختار این اینورتر در شکل ۲- نشان داده شده است[91].

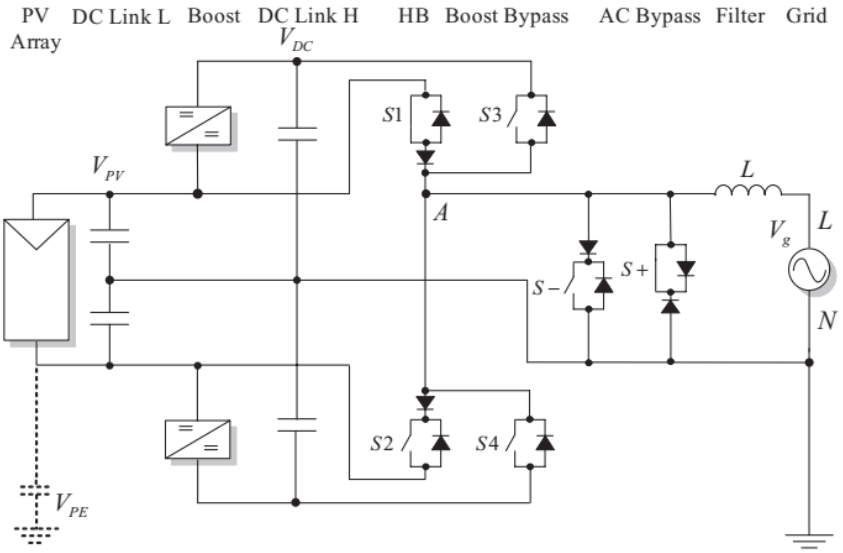
بای پس AC همان دو عملکرد حیاتی را که در مورد توپولوژی HERIC وجود دارد فراهم می کند:

- از تبادل توان راکتیو بین L و C_{PV} در حالت ولتاژ صفر جلوگیری می کند، بنابراین باعث افزایش بازده می شود.
- در حالت ولتاژ صفر ماژول PV را از شبکه جدا می کند، بنابراین مولفه های فرکانس بالای V_{PE} را از حذف می کند.
- بای پس AC در مقایسه با HERIC به روش دیگری انجام می شود، یعنی با استفاده از سوئیچ های یک جهته متشکل از ماژول های استاندارد IGBT با یک دیود سری برای حذف مسیر چرخ آزاد انجام می شود. یکی دیگر از ویژگی های خاص این توپولوژی استفاده از یک مبدل افزاینده است که فقط هنگامی فعال می شود که ولتاژ DC ورودی کمتر از ولتاژ شبکه باشد.

ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

- S1 و S2 در صورت عدم نیاز به افزاینده و در فرکانس بالا سوئیچ زنی می شوند: $V_{PV} > |Vg|$.
- S3 و S4 با فعال شدن افزاینده در فرکانس بالا سوئیچ زنی می شوند: $V_{PV} < |Vg|$.

- +S و -S بسته به قطب ولتاژ در فرکانس شبکه سوئیچ زنی می شوند.



شکل ۴-۲- ساختار اینورتر REFU

۲- ۵-۱-۱- اینورتر تمام پل با بای پس DC[1] (FB-DCBP)

یکی دیگر از توپولوژی های اصلاح شده تمام پل، ساختار تمام پل با بای پس DC است که توسط Ingeteam به ثبت رسیده است[92]. این توپولوژی در شکل ۲- نشان داده شده است. این ساختار از یک پل H کلاسیک با دو کلید اضافی در لینک DC و همچنین دو دیود اضافی که خروجی را به نقطه میانی زمین باس DC متصل می کند، تشکیل شده است. سوئیچ های DC پانل های PV را از شبکه در هنگام ولتاژ صفر جدا می کنند و دیودها اطمینان حاصل می کنند که ولتاژ صفر زمین باشد، در حالیکه در توپولوژی های HERIC یا H5 در ولتاژ صفر شناور هستند.

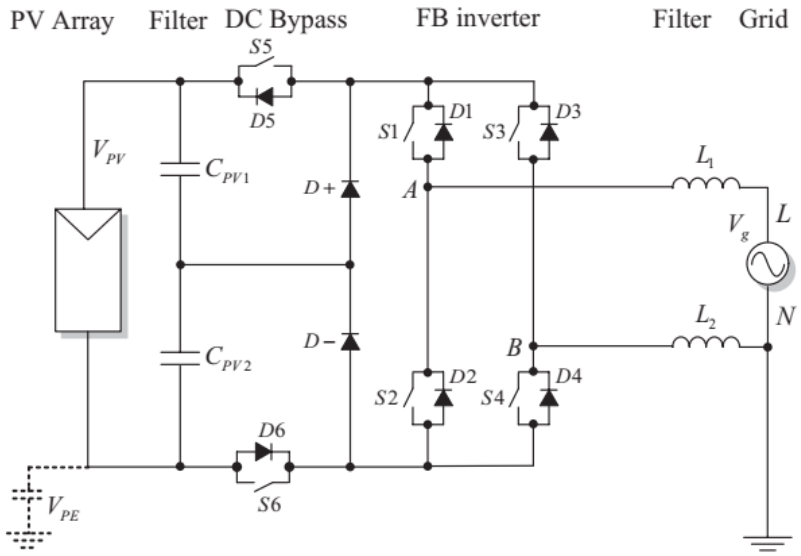
ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

- S5 و S6 در فرکانس بالا و S1(S2) و S4(S3) در فرکانس شبکه سوئیچ زنی می شوند.
- ولتاژ خروجی صفر با خاموش کردن سوئیچ های بای پس S5 و S6 به دست می آید. وقتی S5 و S6 خاموش و S2 و S3 روشن می شوند، جریان به دو مسیر تقسیم می شود:

S1 و دیود چرخ آزاد(S3(D3 و S4 و دیود چرخ آزاد S2(D2). بنابراین، S2 و S3 بدون جریان روشن می شوند و هیچگونه تلفات سوئیچینگ ایجاد نخواهد شد. مسیر جریان در حالت ولتاژ صفر برای جریان مثبت از طریق شبکه S4-D2 یا S1-D3 خواهد بود، در حالی که جریان شبکه منفی از طریق S2-D4 یا S3-D1 جریان می یابد.

[1] Full-Bridge Inverter with DC Bypass

+D و -D فقط برای کلمپ کردن سوئیچ های بای پس به نیمی از ولتاژ لینک DC استفاده می شود[92].



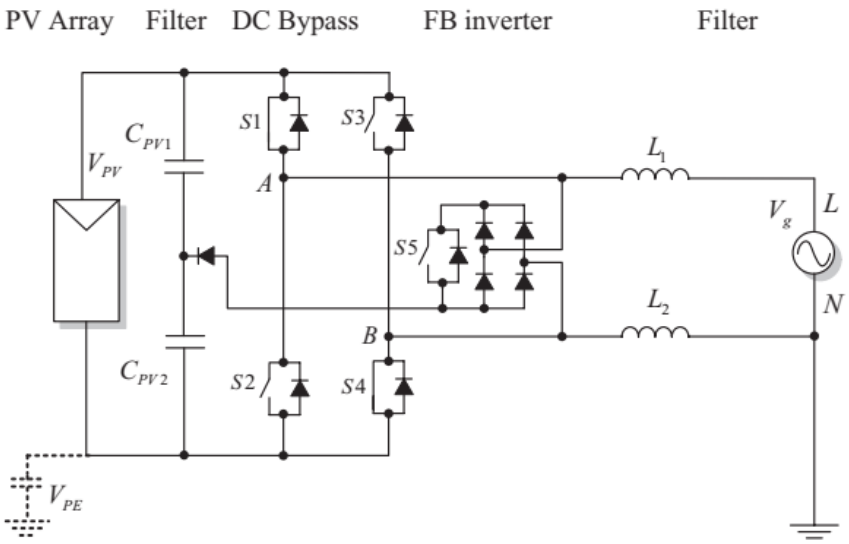
شکل ۵-۲- ساختار اینورتر تمام پل با بای پس DC – (FB-DCBP)

۲- ۶-۱-۱- یکسو کننده ولتاژ صفر تمام پل - FB-ZVR

توپولوژی تمام پل اصلاح شده دیگر، یکسو کننده ولتاژ صفر تمام پل است[93] کـه در شـکل ۶-۲ نشـان داده شده است. این توپولوژی از ساختار HERIC گرفته شده است، که سوئیچ اتصال کوتاه شبکه دو طرفه بـا اسـتفاده از یک پل دیود و یک سوئیچ (S5) و یک دیود کلمپ در نقطه میانی DC پیاده سازی می شود. ولتاژ صفر بـا خـاموش کردن تمام پل و روشن شدن S5 حاصل می شود.

ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

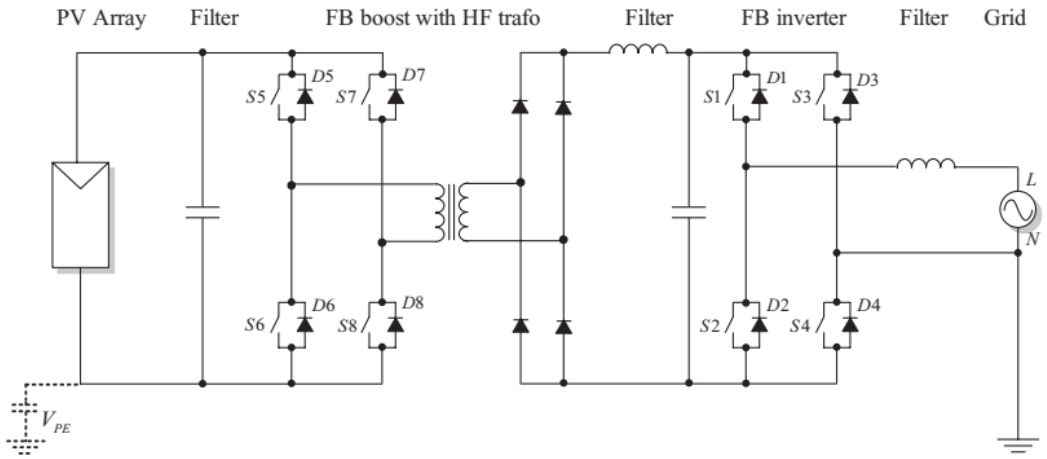
کلیدهای درون تمام پل مانند مدولاسیون دو قطبی به صورت مورب سوئیچ می شوند. حالت صـفر پـس از هـر بار سوئیچینگ با خاموش کردن تمام کلیدهای پل و روشن شدن S5 ایجاد می شود.



شکل ۶-۲- ساختار یکسو کننده ولتاژ صفر تمام پل - FB-ZVR

۲- ۷-۱-۱- اینوتر PV افزاینده مبتنی بر H-Bridge با ترانسفورماتور فرکانس بالا[1]

یک ساختار معمول اینورتر PV افزاینده مبتنی بر پل H در شکل ۲- نشان داده شده است. فاکتور افزاینده مبدل DC-DC تمام پل با تغییر فاز سوئیچینگ بین دو پایه کنترل می شود[94]. اینورتر تمام پل را می توان به راحتی با توپولوژی هایی با بازده بالاتر مانند اینورترهای H5 یا HERIC جایگزین کرد.



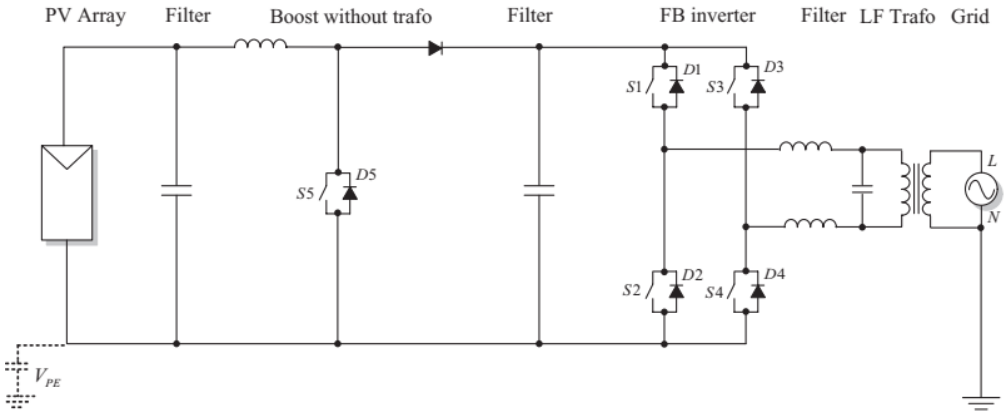
شکل ۷-۲- اینورتر افزاینده مبتنی بر تمام پل با یک ترانسفورماتور فرکانس بالا

۲- ۸-۱-۱- اینورتر افزاینده با ترانسفورماتور فرکانس پایین[2]

یک ساختار معمولی با استفاده از مبدل افزاینده کلاسیک DC-DC در شکل ۲- نشان داده شده است که

[1] H-Bridge Based Boosting PV Inverter with High-Frequency Transformer
[2] Boosting Inverter with Low-Frequency Transformer

ترانسفورماتور در سمت فرکانس پایین قرار می گیرد.



شکل ۸-۲- اینورتر افزاینده مبتنی بر مبدل DC-DC افزاینده با ترانسفورماتور فرکانس پایین

۲- ۹-۱-۱- خلاصه ای از توپولوژی های مشتق شده از H-Bridge

در واقع، توپولوژی های HERIC، H5،REFU و FB-DCBP، اینورتر دو سطح تمام پل یـا H-Bridge را بـه یک اینورتر سه سطح تبدیل می کنند که این باعث افزایش بازده می شود، چراکه سوئیچ ها و سـلف خروجـی تحـت نیمی از استرس ولتاژ ورودی قرار می گیرند. حالت ولتاژ صفر با کوتاه کردن شبکه با استفاده از کلیـدهای بالادسـتی پل H5 یا با استفاده از بای پس AC اضافی HERIC یا REFU یا بای پـس DC مبـدلFB-DCBP، حاصـل مـی شود. مبدل های H5 و HERIC در حین ولتاژ صفر پانل های PV را از شبکه جدا می کنند در حالی کـه REFU و FB-DCBP نقطه خنثی را به نقطـه میـانی لینـک DC متصـل مـی کننـد. REFU و HERIC از بـای پـس AC استفاده می کنند اما REFU از دو سوئیچ به صورت موازی معکوس و HERIC از دو سوئیچ به صورت سری (پشـت به پشت) استفاده می کند. بنابراین تلفات هدایت در بای پس AC بـرای توپولـوژی REFU کمتـر اسـت. REFU و H5 بازده نسبتا بالاتری دارند، چراکه آن ها فقط یک سوئیچ دارند که در فرکانس بالا سوئیچ زنی می شـود در حـالی که HERIC و FB-DCBP دارای دو سوئیچ هستند.

مبدل FB-ZVR از مبدل HERIC مشتق شده است اما از یک پیاده سازی متفاوت سوئیچ دوطرفه با استفاده از یک پل دیود استفاده می کند. در این ساختار V_{PE} ثابت اما بازده تقریبا بالا است که کمتر از مبـدل HERIC امـا بالاتر از مبدل FB-BP می باشد و همچنین می تواند با ضریب توان[1] غیر واحد کار کند.

در ادامه، خانواده دیگری از مبدل ها، به نام نقطه خنثی (NPC)، که کم وبیش همان عملکرد را دارنـد، امـا بـا هزینه سوئیچ های بیشتر، بررسی می شوند.

[1] Power Factor

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۲-۱-۲- ساختارهای اینورتر مشتق شده از توپولوژی NPC[1]

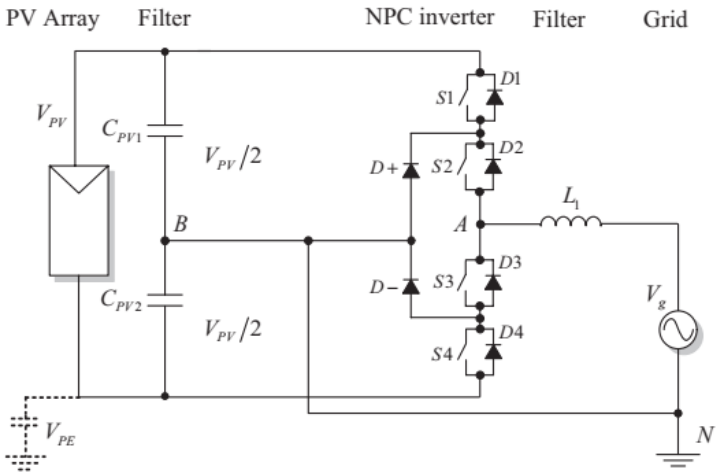
توپولوژی NPC توسط Nabae، Magi و Takahashi در سال ۱۹۸۱ معرفی شده است که از نظر پایین بودن dV/dt و استرس سوئیچ در مقایسه با اینورتر تمام پل دو سطحه کلاسیک پیشرفت های چشمگیری داشته است[۹].

توپولوژی NPC می تواند به صورت اینورتر تک فاز تمام پل یا نیمه پل و سه فاز استفاده شود.

۲-۱-۲-۱- اینورتر نیمه پل نقطه خنثی کلمپ شده (NPC)[2]

مفهوم اصلی این است که ولتاژ صفر را می توان با "کلمپ کردن" خروجی به "نقطه میانی" باس DC زمین شده با استفاده از +D یا -D بسته به علامت جریان بدست آورد. که ساختار این اینورتر در شکل ۲- آورده شده است. ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

- S1(S4) در فرکانس بالا وS2(S3) در فرکانس شبکه سوئیچ می شوند.
- دو حالت ولتاژ صفر امکان پذیر است: S2, D+=ON و S3, D-=ON. برای عملکرد خارج از ضریب توان های واحد، سوئیچ S1 و S3 برای Vg> 0 ،Ig <0 و S2 و S4 برای Vg <0 ،Ig> 0 سوئیچ زنی می شوند.



شکل ۲-۹- اینورتر نیمه پل نقطه خنثی کلمپ شده (NPC)

۲-۱-۲-۱- اینورتر Conergy NPC

یک نوع دیگر از تمام پل NPC کلاسیک، یک نیمه پل با خروجی کلمپ شده به نقطه خنثی با استفاده از یک سوئیچ دو طرفه با استفاده از دو سری IGBT پشت به پشت توسط Conergy ارائه شده است[96] که در شکل

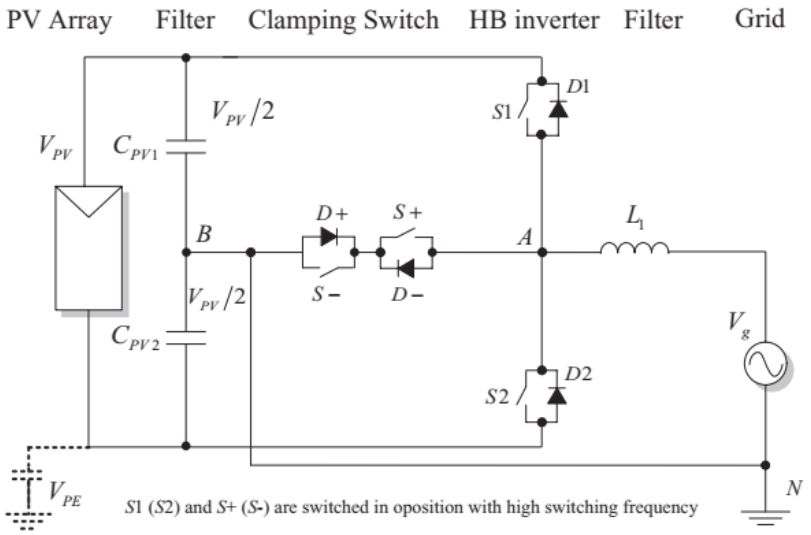
[1] Neutral Point Clamped
[2] Neutral Point Clamped (NPC) Half-Bridge Inverter

۲- نشان داده شده است. یک تحقق جایگزین از همان مفهوم در مرجع[97] ارائه شده است، که کلیدهای کلمپ شده یک جهته به جای اتصال سری به صورت موازی به هم متصل می شوند و به جای نیم پل از یک پل کامل استفاده می شود.

مفهوم اصلی اینورتر Conergy NPC این است که ولتاژ صفر را می توان با کلمپ کردن خروجی به "نقطه میانی" باس DC زمین شده با استفاده از +S یا -S بسته به علامت جریان، به دست آورد.

ویژگی های اصلی این مبدل عبارتند از:

- S1(S2) و S+(S-) در فرکانس بالا سوئیچ می شوند.
- دو حالت ولتاژ صفر امکان پذیر است:S+, D+=ON و S-, D-=ON .



شکل ۱۰-۲- ساختار اینورتر Conergy NPC

۲- ۳-۲-۱- خلاصه ای از توپولوژی های اینورترهای مشتق شده از NPC

NPC کلاسیک و نوع دیگر آن Conergy NPC هر دو توپولوژی سه سطحی هستند که دارای مزایای ولتاژ تک قطبی در طول فیلتر، بازده بالا به دلیل کلمپ کردن پانل های PV در حالت ولتاژ صفرمی باشند.

به دلیل پیچیدگی بالاتر این توپولوژی ها در مقایسه با توپولوژی های مشتق شده از تمام پل، این ساختارها معمولاً در اینورترهای PV سه فاز با ریتینگ بیش از ۱۰ کیلووات (مینی مرکزی)[1] استفاده می شوند. این توپولوژی ها همچنین برای توان های بالا در محدوده صدها کیلووات (اینورترهای مرکزی)[2] که مزایای اینورترهای چند سطحی را دارند بسیار جذاب هستند.

[1] mini-central
[2] Central inverters

۲-۱-۳- اینورتر PV سه فاز

بیشتر اینورترهایPV سه فاز معمولا اینورترهای سه فاز سه سیمه نیستند بلکه ساختار های چهار سیمه سه فاز هستند. در واقع آنها به عنوان سه اینورتر تک فاز مستقل کار می کنند.

این راه حل دارای دو مزیت است:

- این اجازه را می دهد تا از اینورترهای تک فاز موجود استفاده کرد.
- این اجازه را می دهد تا با استفاده از نیازمندی های ضد جزیره از استاندارد VDE-0126-1-1(2016)، زمانی که جریان هر فاز به طور مستقل کنترل می شود، نظارت بر امپدانس را با نظارت ولتاژ خط به خط جایگزین کند.

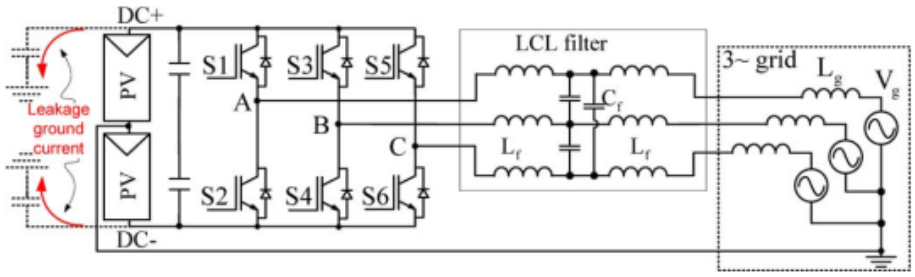
شرکت هایی مانند SMA این مفهوم را توسعه می دهند که می توان با استفاده از یک بلوک ساختاری تک فاز، اینورترهای مینی مرکزی مانند Sunny Mini Central 8000TL، سیستم های سه فاز را ساخت. شرکت های دیگری مانند Conergy، Refusol و Danfoss Solar اینورترهای سه فاز را در محدوده ۱۰-۱۵ کیلووات بر اساس همان مفهوم تولید می کنند اما مانند یک واحد سه فاز ساخته شده اند.

یک مطالعه مقایسه ای اخیر در بین توپولوژی های سه فاز بدون ترانسفورماتور[۱۲] نشان داد که ساختار NPC سه فاز از نظر نشتی کم، بازده و عملکرد، بهترین عملکرد را در مقایسه با ساختار تمام پل دارد. مشکل واقعی استفاده از توپولوژی سه فاز سه سیمه واقعی این است که ولتاژ DC باید نسبتاً زیاد باشد، حداقل در حدود ۶۰۰ ولت برای شبکه سه فاز ۴۰۰ ولت و به دلیل نیازهای ایمنی به ۱۰۰۰ ولت محدود می شود (حداکثر ولتاژ نصب). دامنه تغییرات در مقایسه با تغییرات مورد نیاز MPPT به دلیل تغییرات دما و تغییرات مجاز ولتاژ شبکه، می تواند بسیار محدود باشد. برعکس، اینورترهای تک فاز حداقل به ولتاژ ۴۰۰ ولت DC نیاز دارند تا دامنه تغییر بیشتر و انعطاف پذیری بیشتری داشته باشند.

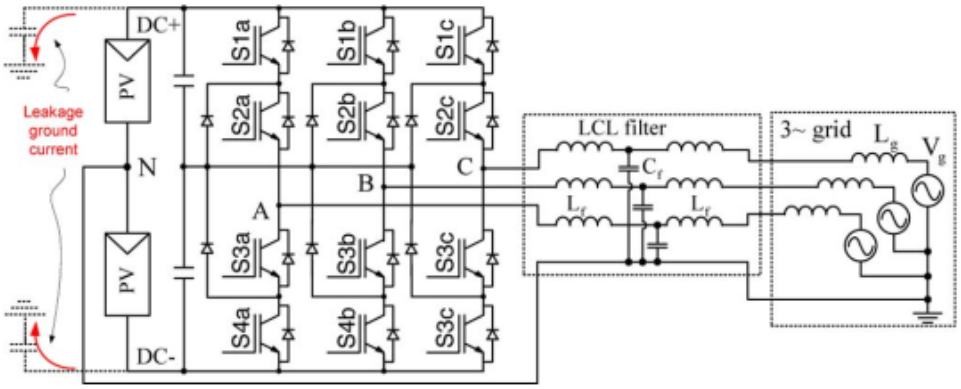
ساختار اینورتر PV سه فاز تمام پل در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است.

همچنین ساختار اینورتر PV مبتنی بر سه اینورتر NPC تک فاز در شکل ۲- نشان داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۱۱-۲- اینورتر سه فاز PV تمام پل



شکل ۱۲-۲- اینورتر PV مبتنی بر سه اینورتر NPC تک فاز

۲-۲- مبدل های پرطرفدار توربین های بادی

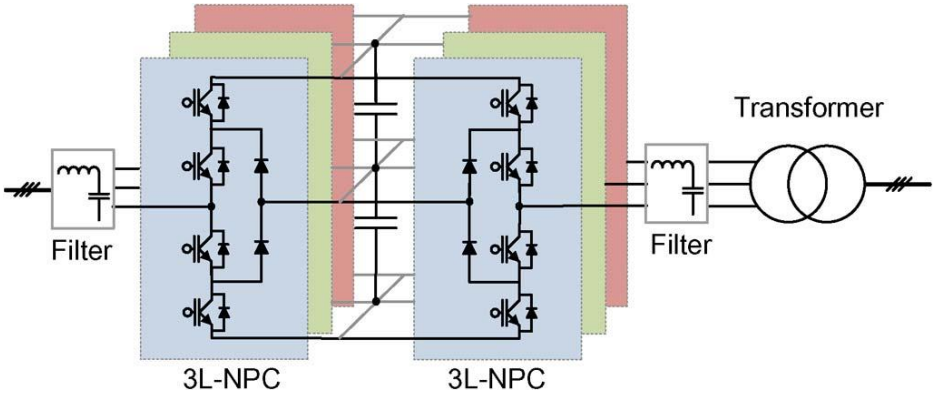
به منظور دستیابی به طراحی مقرون به صرفه، مبدل های چند سطحی عمدتا در توربین های بادی سرعت متغیر برای توان های ۳ مگاوات تا ۷ مگاوات استفاده می شوند. که این توپولوژی ها در ادامه معرفی شده اند.

۱-۲-۲- توپولوژی پشت به پشت دیود کلمپ سه سطح[1] (3L-NPC BTB)

این توپولوژی یکی از تجاری ترین مبدل های چند سطحی در بازار است که همانند 2L-BTB، معمولاً در توربین های بادی به عنوان یک ساختار پشت به پشت تنظیم می شود، که در شکل ۲- نشان داده شده است[99].

[1] Three-level neutral-point clamped back-to-back

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

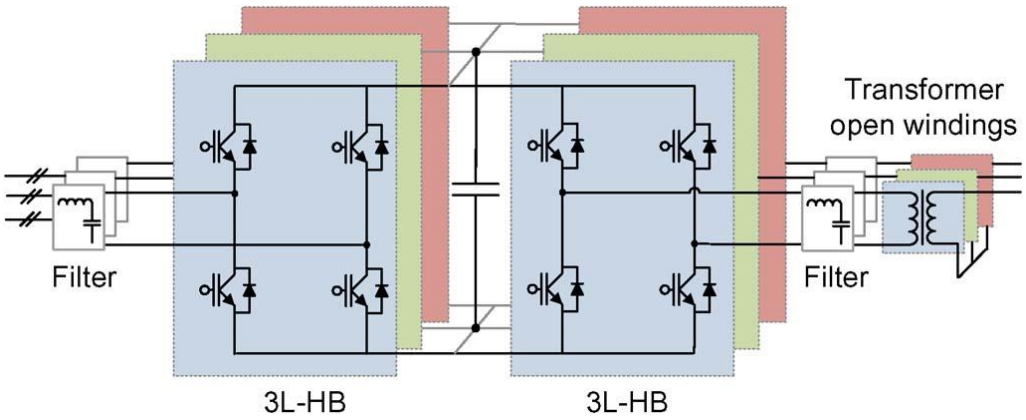


شکل ۱۳-۲- توپولوژی پشت به پشت دیود کلمپ سه سطح (3L-NPC BTB)

۲-۲-۲- توپولوژی پشت به پشت H-Bridge سه سطحه[1] (3L-HB BTB)

این توپولوژی از دو مبدل H-Bridge تشکیل شده است که در یک ساختار پشت به پشت تنظیم شده اند، که درشکل ۲- نشان داده شده است و می تواند عملکرد خروجی مشابه با توپولوژی 3L-NPC BTB را بدست آورد، اما توزیع نابرابر تلفات و دیودهای کلمپ شده در این ساختار حذف شده است.

در این توپولوژی استفاده کارآمدتر از کلید های سوئیچ زنی و همچنین ظرفیت طراحی شده بالاتر ممکن است بدست آید[99]. علاوه بر این، به دلیل اینکه تنها نیمی از ولتاژ باس DC در 3L-HB BTB در مقایسه با 3L-NPC BTB مورد نیاز است، اتصال سری خازن ها کمتر است و نقطه میانی در باس DC وجود ندارد، بنابراین می توان اندازه خازن های لینک DC را بیشتر کاهش داد[99].



شکل ۱۴-۲- توپولوژی پشت به پشت H-Bridge سه سطحه

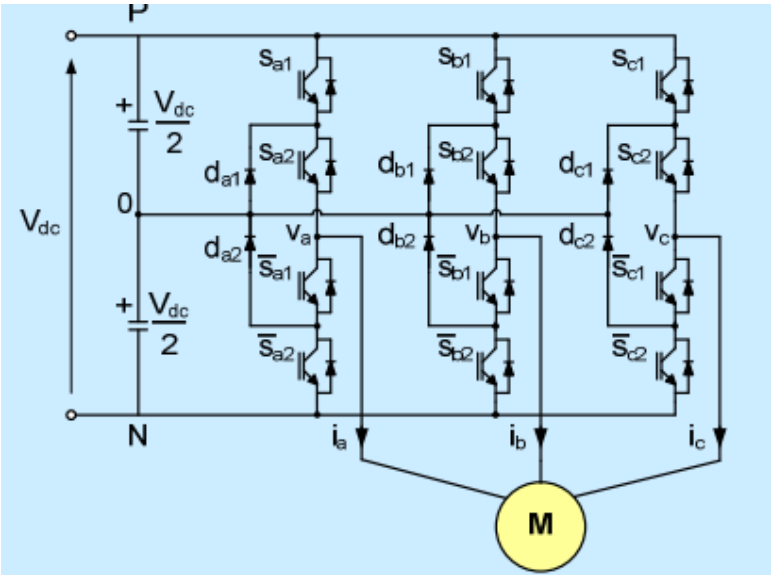
۲-۳- مبدل های پرطرفدار برای درایو موتورها

عموما اینورتر منبع ولتاژ دو سطح یا همان اینورتر تمام پل سه فاز که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است در درایوهای موتور با توان کم استفاده می شود.

[1] Three-level H-bridge back-to-back

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

اما برای درایو موثر بارهای با توان بالا، به ولتاژ لینک DC زیادی نیاز است، اما در عمل، این ولتاژ توسط ولتاژ مسدود کننده نیمه هادی ها محدود می شود. به عنوان مثال، برخی از درایوهای صنعتی از IGBTهای ولتاژ پایین (LV-IGBT) برای تأمین ولتاژ خروجی ۶۹۰ ولت استفاده می کنند. بنابراین، برای جلوگیری از این محدودیت ولتاژ، در دهه های گذشته توپولوژی های مبدل های چند سطحی منبع ولتاژ ارائه شده اند[100]–[103]. که این مبدل ها از نظر توپولوژی، مدولاسیون و کنترل، پیچیده تر از اینورتر منبع ولتاژ دو سطح هستند، اما پیچیدگی اضافی آن ها را می توان فرصتی برای بهبود کیفیت توان، قابلیت اطمینان، چگالی توان، عملکرد و کارایی آن دانست. بنابراین معمولترین مبدل برای درایو موتورها مبدل سه سطحه NPC (3L-NPC) است که ساختار این مبدل برای درایو موتور در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است[95].



شکل ۱۵-۲- ساختار مبدل 3L-NPC برای درایو موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۲-٤- بررسی و تحلیل شاخصهای مختلف و استخراج حداقل شاخصها جهت ارزیابی قابلیت اطمینان

نیاز به افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات با قدرت بالا، یکی از محرکهای قدرتمندی است که مهندسان را مجبور به طراحی محصولات جدید توسعه یافته و استفاده از مواد جدید کرده است. کاربردهای امروزه مانند کاربردهای خودروهای برقی محدودیت های جدیدی را از نظر کاهش فضا، کاهش وزن، دمای عملکردی، افزایش ولتاژ و یکپارچه سازی سیستم اعمال کرده اند. همچنین، جهت بهبود عملکرد برنامه های قابلیت اطمینان عمومی نیازمند آزمایش های تجربی مختلف با میلیون ها داده جمع آوری شده است.. بنابراین، برنامه های قابلیت اطمینان بهبود یافته، پیش از طراحی محصول، برای رفع محدودیت های رویکردهای عمومی معرفی شده اند که در این برنامه ها به جای اینکه فقط مقادیر آماری ارزیابی شود، عملکرد قابلیت اطمینان به طور فعال در محصول قبل از مرحله طراحی و ساخت آغاز می شود و انطباق محصول نهایی با مشخصات آن به طور مداوم نظارت می شود و در صورت انحراف، تجهیزات و فرایندها برای کنار آمدن با مشخصات اولیه دوباره طراحی می شوند. ارکان اصلی این روش، تعاریف منشا اصلی مکانیسم های خرابی مشاهده شده، رابطه بین مشخصات محصول و عناصر سازنده آن، تغییرات در فرآیند تولید و اثرات متقابل مواد محصول با بارها و تأثیر آنها برروی قابلیت اطمینان محصول است.

طبق بهترین روش های ارزیابی قابلیت اطمینان، مدل های مربوط به طول عمر تجهیزات قدرت به صورت همزمان با طراحی محصول یا حتی قبل از مرحله توسعه محصول، با روش های آزمایشی هدفمند تولید می شوند. مدل های طول عمر در مرحله توسعه یا برای مقایسه راه حل های مختلف طراحی و یا تأیید مطابقت محصول نهایی با الزامات قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می گیرند. این مرحله غالباً با آزمایش های سرعت یافته برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل ها تلفیق می شود.

به طور کلی، پیش بینی طول عمر یک سیستم، ابتدا با محاسبه قابلیت اطمینان تک تک اجزا آغاز می شود. سپس طول عمر کل سیستم بر اساس نمودار بلوکی قابلیت اطمینان مربوطه محاسبه می شود. امروزه، ابزارهای پیش بینی در دسترس است، که شامل یک مولد خودکار نمودار بلوکی قابلیت اطمینان، شبیه ساز مدار حرارتی و پایگاه داده مدل های نرخ خرابی برای قطعات مختلف است. در این حالت، محاسبه تقریباً به طور خودکار پس از ویرایش طرح مدار انجام می شود.

با توجه به ارتباط مکانیسم های خرابی حرارتی- مکانیکی، یک روش ساده برای پیش بینی طول عمر تجهیزات قدرت تحت چرخه های حرارتی بر اساس قانون فرسودگی استرس-کم[1] در فلزات و آلیاژها است. این روش که معمولاً به عنوان روش Coffin – Manson مورد استفاده قرار می گیرد، اساساً به این صورت است که در فاز اول،

[1] low-stress fatigue

چرخه های حرارتی رخ داده در حین عملکرد تجهیز با توجه به دامنه و مدت زمان آنها شمرده می شود سپس در مرحله دوم، خرابی تولید شده توسط هر چرخه واحد جمع آوری می شود. که در این روش پایان عمر تجهیز زمانی در نظر گرفته می شود که خرابی تجمعی از آستانه ای که به صورت آزمایشی تعریف شده است، فراتر رود.

اخیراً، روشهای پیش بینی طول عمر براساس راه حلهای عددی معادلات اساسی فیزیکی حاکم بر مکانیسم های تخریبی در طی فرایند پیرشدگی تجهیزات معرفی شده اند. به طور معمول، به دلیل کمبود داده های تجربی دقیق، مدل های دقیق فیزیکی ساده شده و به مدل های رفتاری که توسط معادلات دیفرانسیل ساده بیان می شوند تبدیل شده اند، که به صورت عددی یا با استفاده از شبیه سازهای المان محدود حل می شوند. ورودی های اصلی این محاسبات مقادیر آنی پارامترهای استرس یا همان مشخصات ماموریت هستند، که معمولاً به صورت تابعی از پارامتر مورد نظر مانند دمای پیوند و تلفات بیان می شود.

در گذشته، در [87] ابزاری پیاده سازی شده است که در آن شبیه سازهای مختلف الکتریکی، حرارتی و مکانیکی به یک پکیج واحد برای تخمین طول عمر ترانزیستورهای (IGBT) که از مشخصات ماموریت یک لوکوموتیو شروع می شود، متصل شده اند. از آنجا که در حال حاضر، هیچ ابزار شبیه سازی جامع و منسجمی برای این زمینه در دسترس نیست، بنابراین یک چالش برای سالهای آینده می باشد.

در ادامه یک بررسی اجمالی بر روی تکنیک های اصلی مدل سازی طول عمر و روش های متکی به تجزیه و تحلیل مشخصات مأموریت ارائه شده اند.

۲-۵- رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان برای الکترونیک قدرت و پیش بینی طول عمر براساس مشخصه های ماموریت

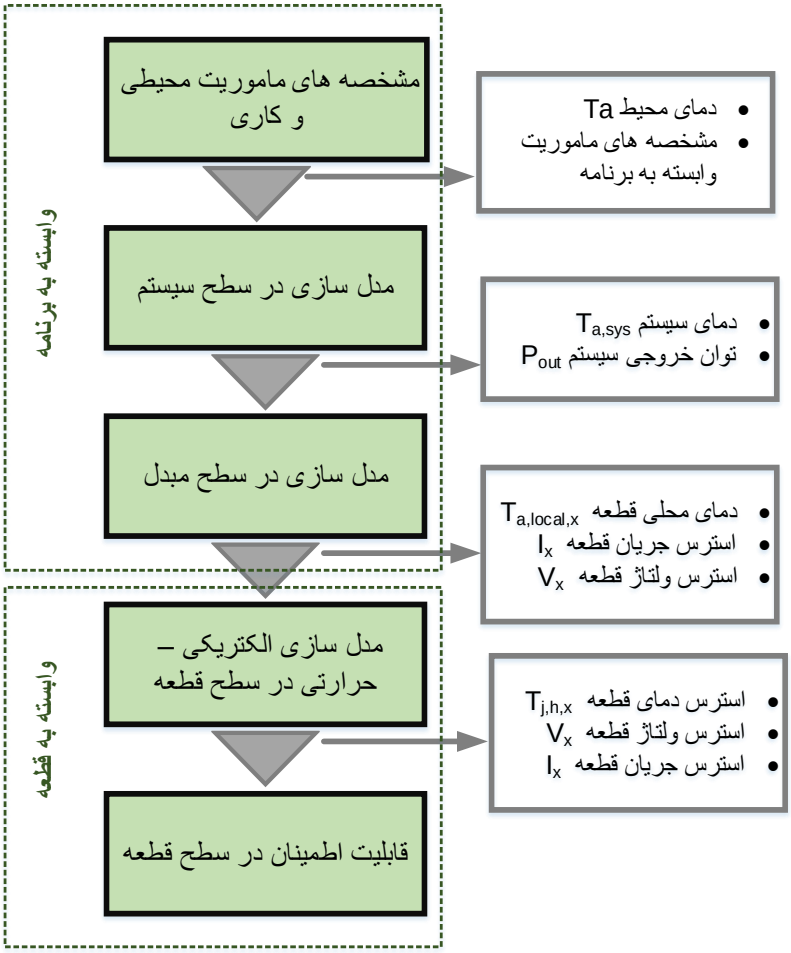
دوره پایان عمر ماژول های چند تراشه ای[1] پیچیده اغلب توسط مکانیسم های خرابی مربوط به استرس های حرارتی- مکانیکی تعریف می شود. طول عمر این مکانیزم های فرسودگی معمولاً بر اساس مدلهای قطعی برآورد می شود، که با آزمایشهای سرعت یافته کالیبره می شوند. در مرحله بعدی، این تخمین ها برای محاسبه شرایط عملیاتی سیستم، برون یابی می شوند.

رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان (DfR)[2] و رویکرد تخمین طول عمر مبتنی بر مشخصه های مأموریت در سالهای اخیر محبوبیت یافته است[104]. در این بخش روش ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل برای سیستم های الکترونیک قدرت مورد مطالعه قرار گرفته شده است که در این پروژه این رویکرد برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک مبدل الکترونیک قدرت PV ارائه خواهد شد.

شکل ۲- ۱۶ فرآیند پیش بینی طول عمر را برای مبدل الکترونیک قدرت بر اساس ورودی ها و خروجی ها

[1] Multi-chip Modules
[2] Design for reliability

نشان می دهد. سه بلوک اول، مرحله مدل سازی مشخصه ماموریت وابسته به برنامه را تنظیم می کنند، در حالی که دو بلوک بعدی مرحله مدل سازی قابلیت اطمینان در سطح اجزای وابسته به قطعه را تشکیل می دهند. علیرغم وجود برخی وابستگی های کاربردی و یا قطعه ای، ورودی ها و خروجی های هر بلوک تعمیم یافته اند و می توانند در اکثر کاربردهای مبتنی بر الکترونیک قدرت اعمال شوند. بنابراین یک رویکرد مدولارتر برای ارزیابی قابلیت اطمینان را امکان پذیر می کند. برای درک بهتر، در ادامه هر بلوک با جزئیات شرح داده خواهد شد.

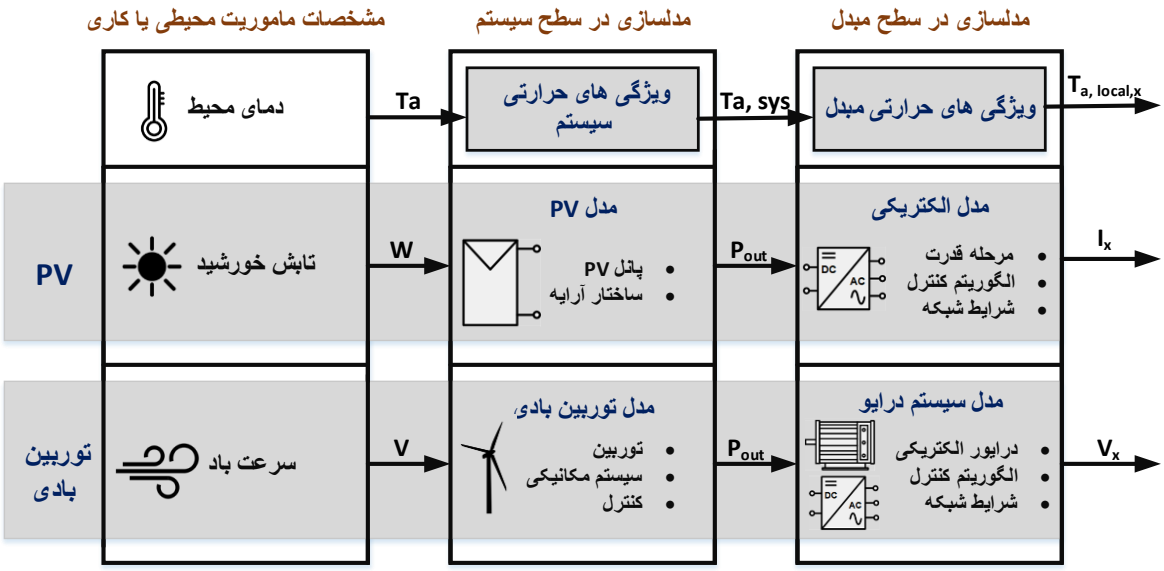


شکل ۱۶-۲- رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل برای سیستم های الکترونیک قدرت

۱-۵-۲- مدل سازی مشخصه ماموریت

استخراج مشخصات ماموریت تجهیز یا سیستم وظیفه خاصی است که باید در مدت زمان مشخص شده و تحت شرایط مشخص انجام شود. بنابراین مرحله اول در روش پیش بینی طول عمر، تبدیل مشخصه های مأموریت موجود به استرس های الکتریکی مانند استرس ولتاژ و استرس جریان قطعه های مورد نظر است[105]. این امر می تواند با استفاده از سه بلوک اصلی رویکرد ارائه شده در شکل ۱۷-۲ به دست آید. به دلیل انبوه بودن کاربرد ها، ساختار های سیستم، توپولوژی ها و غیره، این مرحله همراه با رویکردهای مدل سازی آن از یک کاربرد به کاربرد دیگر بسیار متفاوت خواهد بود. با این حال، ورودی ها و خروجی های خاصی برای هر یک از بلوک های مدل سازی میتوانند

استخراج شوند. نمودار کلی برای مرحله مدل سازی مشخصات مأموریت در شکل ۲- نشان داده شده است[105].



شکل ۱۷-۲- نمودار مرحله مدل سازی مشخصات ماموریت وابسته به هر برنامه

۲-۵-۱-۱- مشخصات ماموریت محیطی و کاری

همانطور که در[106] تعریف شده است، مشخصه ماموریت مجموعه ای از شرایط محیطی و کاری را نشان می دهد که یک جز یا سیستم در چرخه عمر خود در معرض آن قرار میگیرد. علاوه بر دما، که بیشتر برنامه های مبتنی بر الکترونیک قدرت را تحت تأثیر قرار می دهد، سایر شرایط محیطی و کاری، که ممکن است تأثیر قابل توجهی بر روی سیستم داشته باشند، بسته به نوع کاربرد متفاوت هستند. مشخصه های مأموریت را می توان از طریق داده های اندازه گیری شده میدانی و یا با تخمین سناریوهای کلی بدست آورد. بازه زمانی مشخصه های ماموریت نیز کاملاً وابسته به نوع کاربرد است و می تواند از چندین ثانیه (به عنوان مثال در درایوهای صنعتی) تا سال ها (مثلاً در سیستم های PV) متغیر باشد.

۲-۵-۱-۲- مدل سازی در سطح سیستم

به منظور آنالیز مشخصه های مأموریت ورودی، بلوک مدل سازی در سطح سیستم به عنوان یک پیوند بین شرایط محیطی و بلوک مدل سازی در سطح مبدل عمل می کند. مدلهای تحلیلی سیستم مکانیکی مانند توربین بادی[107]–[109]، فتوولتائیک، پمپ[110]، [111] و غیره به طور معمول در این مرحله به منظور تعیین توان خروجی مبتنی بر پارامترهای سیستم مربوطه و مشخصه های مأموریت استفاده می شوند. بنابراین، مستقل از برنامه انتخاب شده، توان خروجی سیستم یکی از نتایج کلی این بلوک را ارائه می دهد.

علاوه بر این، اختلاف دما که ممکن است بین محیط (Ta) و سیستم یا محفظه ($T_{a,sys}$) رخ دهد، باید در نظر

گرفته شود. بنابراین، با انجام شبیه سازی های المان محدود (FEM)[1]، می توان امپدانس حرارتی محفظه تا محیط را تعیین کرد. در نهایت، می توان با استفاده از معادله زیر دمای سیستم را محاسبه کرد:

$$T_{a,sys} = (P_{loss,sys}.R_{th,e-a}(1-e^{\frac{-t}{\tau_{th,e-a}}})) + T_a \quad (۱)$$

که در اینجا، $P_{loss,sys}$ نشان دهنده کل تلفات سیستم، $R_{th,e-a}$ مقاومت حرارتی محفظه تا محیط و $\tau_{th,e-a}$ ثابت زمانی حرارتی از محفظه تا محیط است. با این وجود، به دلیل پیچیدگی فرآیند توصیف حرارتی در سطح سیستم، می توان از یک تابع ثابت یا خطی به منظور تقریب زدن اختلاف دما بین دو محیط استفاده کرد.

۲-۵-۱-۳- مدل سازی در سطح مبدل

در این مرحله، در ابتدا، توان خروجی سیستم مکانیکی (P_{out})، باید به توان الکتریکی ورودی (P_{ele}) یا به توان مکانیکی ورودی (P_{mech}) برای سیستم های مورد استفاده در ماشینهای الکتریکی تبدیل شود. پس از آن، مدل های پیشرفته دینامیکی مانند ژنراتورهای باد[112]، فتوولتائیک[113]، درایو های موتور[114] و غیره در کنار الگوریتم کنترل مربوطه و همچنین روش مدولاسیون مبدل قدرت پیاده سازی می شوند[115]. در نتیجه، مدل سازی استرس الکتریکی هر یک از قطعه های مورد نظر را تضمین خواهد کرد. بنابراین، مستقل از کاربرد انتخاب شده، توپولوژی مبدل، روش کنترل و غیره، جریان عبوری از قطعه (I_x، که x نشان دهنده قطعه انتخاب شده است) و ولتاژ در ترمینال های آن (V_x)، به عنوان خروجی های بلوک مدل سازی در سطح مبدل و مرحله مدل سازی مشخصات ماموریت، در نظر گرفته می شوند.

علاوه بر این، همانند مدلسازی در سطح سیستم، تغییر دما بین محفظه ($T_{a,sys}$) و دمای محیط محلی ($T_{a,local,x}$) هر یک از قطعه ها باید توصیف شود. این اختلافات دمایی محلی بین اجزای مختلف می تواند باعث اثرات دمایی متقابل و خودی شود.

۲-۵-۲- مدل سازی قابلیت اطمینان در سطح قطعه

هنگامی که استرس جریان (I_x)، استرس ولتاژ (V_x) و دمای محیط محلی ($T_{a,local,x}$) هر یک از قطعه های مورد نظر تعیین شد، فاز مدل سازی قابلیت اطمینان در سطح قطعه به کار می رود. در این مرحله، بارگذاری الکتریکی اجزای الکترونیک قدرت استفاده می شود تا استرس حرارتی آنها با استفاده از مدلسازی الکتریکی- حرارتی تعیین شود. پس از آن، نتایج بارگذاری حرارتی برای تخمین عملکرد قابلیت اطمینان هر کدام از قطعه های انتخاب شده (بلوک قابلیت اطمینان در سطح قطعه) استفاده می شود. به دلیل اختلاف بین هندسه قطعات، پکیجینگ، مکانیزم های خرابی و غیره، این مرحله به عنوان مرحله وابسته به قطعه تلقی می شود[105].

[1] Finite element method

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۲-۵-۲-۱- مدل سازی الکتریکی- حرارتی

در این مرحله از روش ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل، مدل سازی الکتریکی- حرارتی تجهیزات قدرت انجام می شود. یک نمودار کلی از محاسبه بارگذاری حرارتی و بلوک مدل سازی الکتریکی- حرارتی در سطح قطعه در شکل ۲- آورده شده است.

ورودی های جریان (I_x) و ولتاژ (V_x) در ابتدا در مدل تلفات توان برای محاسبه کل تلفات تولید شده توسط تجهیز استفاده می شوند[116]–[118]. با توجه به اطلاعات و ویژگی های تلفات که در دیتا شیت مربوط به تجهیز موجود هستند، می توان تلفات هدایتی میانگین طی یک چرخه اساسی را به صورت تحلیلی محاسبه کرد که در[117], [119] آورده شده است، که به صورت زیر می باشد.

$$P_{cond,T_L/T_H} = V_{CE/F,T_L/T_H}(I_X).I_X.d \quad (۲)$$

که در اینجا، I_x نشان دهنده جریان عبوری از تجهیز، d دیوتی سایکل ترانزیستور یا دیود است و $V_{CE/F,TL/TH}$ نشان دهنده ولتاژ کلکتور امیتر تجهیز در یک مقدار دمای مرجع مشخص T_L و T_H است. به همین ترتیب، می توان تلفات سوئیچینگ را بر اساس معادله زیر محاسبه کرد،

$$P_{SW,T_L/T_H} = f_{SW}.E_{SW/rr,T_L/T_H} \quad (۳)$$

که در اینجا، f_{sw} فرکانس سوئیچینگ و $E_{sw\ /\ rr,TL/TH}$ انرژی بازیابی سوئیچینگ یا معکوس تجهیز در همان دمای مرجع مشخص T_L و T_H است.

علاوه بر این، با توجه به وابستگی حرارتی ویژگی های تلفات تجهیز، دمای پیوند ($T_{j,x}$) به عنوان بازخورد از مدل حرارتی گنجانده شده است و تلفات توان وابسته به دما را می توان با توجه به معادله ارائه شده در زیر به روز کرد[120].

$$P_{SW/cond,T_{j,x}} = \frac{P_{SW/cond,T_H} - P_{SW/cond,T_L}}{T_H - T_L}(T_{j,x} - T_L) + P_{SW/cond,T_L} \quad (۴)$$

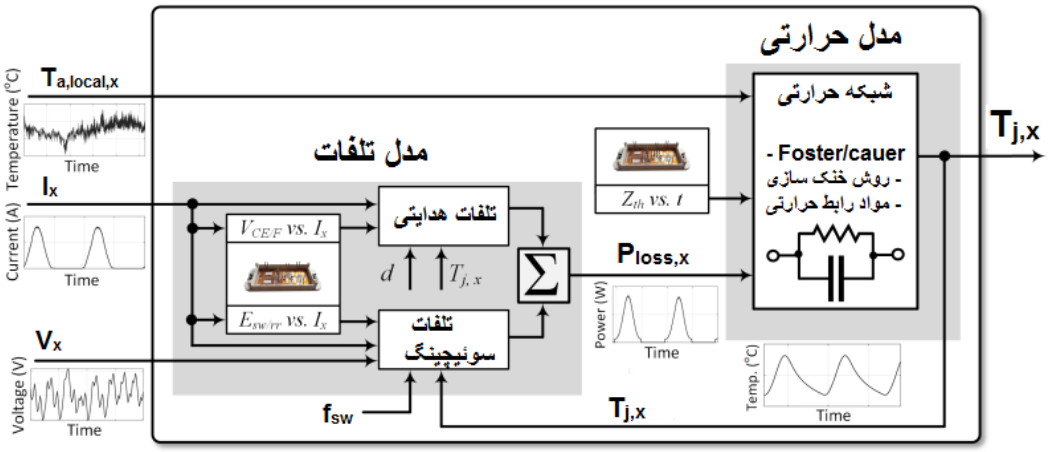
سرانجام، با تلفیق تلفات هدایت و سوئیچینگ، می توان تلفات کلی ترانزیستور یا دیود را تعیین کرد.

$$P_{loss,x} = P_{cond,T_{j,x}} + P_{SW,T_{j,x}} \quad (۵)$$

با استفاده از یک شبکه حرارتی مانند FOSTER یا CAUER، می توان تلفات حاصل را به بارگذاری حرارتی تجهیز ترجمه کرد. پارامترهای حرارتی لازم (مقاومت حرارتی R_{th} و ظرفیت حرارتی C_{th}) معمولاً توسط سازنده در

دیتا شیت ارائه می شوند یا می توانند با استفاده از الگوریتم تطبیق منحنی[1] بر روی منحنی امپدانس حرارتی (Z_{th}) به دست آمده به صورت تجربی، تعیین شوند. سرانجام، مدل حرارتی دقیق تر و جزئی تر را می توان با در نظر گرفتن مقاومت حرارتی ماده رابط حرارتی (TIM)[2] و رفتار دینامیکی- حرارتی آهسته خنک کننده بدست آورد.

شکل ۱۸-۲ رویکردهای ارائه شده برای مدل سازی الکتریکی - حرارتی، تجزیه و تحلیل سریع و دقیق از رفتار حرارتی تجهیزات قدرت را تحت استرس های الکتریکی، شرایط کار و اطلاعات تجهیز ارائه می دهد.



شکل ۱۸-۲- نمودار بلوک مدل سازی الکتریکی- حرارتی در سطح تجهیزات نیمه هادی قدرت

۲-۵-۲-۲- قابلیت اطمینان در سطح قطعات

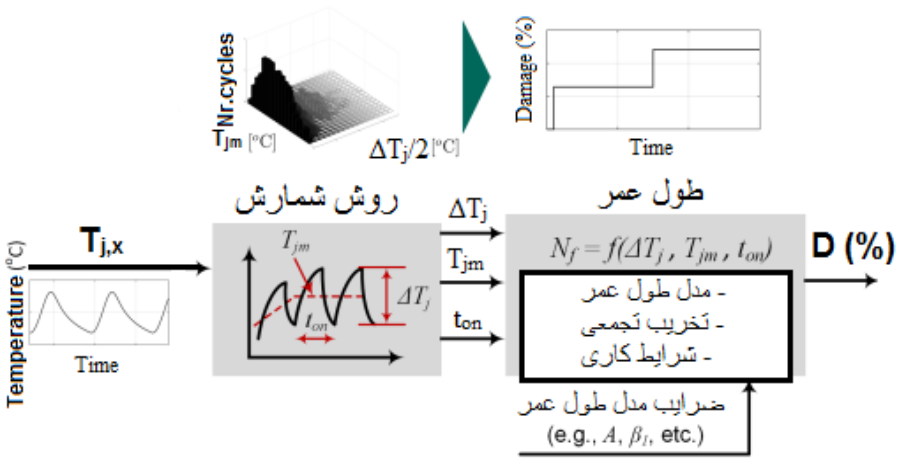
در این مرحله، عوامل استرس زای حرارتی تجهیز نیمه هادی قدرت مشخص شده است و می توان از آنها برای تخمین قابلیت اطمینان استفاده کرد. با این حال، همانطور که در نمودار کلی بلوک قابلیت اطمینان در سطح قطعه در شکل ۱۹-۲ نشان داده شده است، عوامل استرس زای الکتریکی در ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفته نمی شوند. این امر عمدتاً به این دلیل است که استرس ولتاژ و جریان تجهیز تأثیر ناچیزی در مکانیسم های خرابی انتخاب شده دارد.

اولین گام برای پیش بینی طول عمر ترانزیستور یا دیود، پردازش دمای پیوند متناظر ($T_{j,x}$) آن است. برای اینکه به درستی بر روی یک مدل تخمین طول عمر اعمال شود، داده های بارگذاری حرارتی باید برحسب دامنه چرخه حرارتی (ΔT_j)، مقدار میانگین چرخه حرارتی (T_{jmean}) و مدت زمان اعمال چرخه حرارتی (t_{on}) ارائه داده شود[121], [122]. با وجود اینکه تعداد زیادی از روشهای شمارش[3] موجود در تجزیه و تحلیل فرسودگی استفاده شده است[123]، الگوریتم شمارش Rainflow بهترین نتایج را نشان داده است[124], [125] و به طور گسترده ای در پیش بینی طول عمر الکترونیک قدرت استفاده می شود. بنابراین، به دنبال پیاده سازی الگوریتم Rainflow، می توان داده های حرارتی ورودی را با استفاده از چرخه های حرارتی سازمان داد. شکل ۲- بلوک قابلیت اطمینان در

[1] curve fitting algorithm
[2] Thermal Interface Material
[3] Counting method

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

سطح قطعه و در نهایت تخمین طول عمر تجهیز را نشان میدهد.



شکل ۱۹-۲- نمودار بلوک قابلیت اطمینان در سطح قطعه، مدل سازی قابلیت اطمینان تجهیزات نیمه هادی قدرت

داده های حاصل از چرخه های حرارتی می توانند در یک مدل طول عمر مبتنی بر تجربه به منظور پیش بینی تعداد چرخه های منتج به خرابی (N_f) استفاده شود[126]–[128]. به عنوان مثال، معادله مدل طول عمر تعیین شده در پروژه LESIT در زیر نشان داده شده است[127].

$$N_f = A\Delta T_j^{\alpha} e^{\left(\frac{E_a}{k_B . T_{jmean}}\right)} \qquad (۶)$$

که در اینجا، A و α به طور آزمایشی بدست آمده اند، E_a انرژی فعال سازی و k_B ثابت بولتزمن است.

بر اساس تخریب مربوط به تجهیز قدرت، که توسط هر یک از چرخه های تعیین شده تولید شده است، می توان کل تخریب تجمعی (D)[1] را طبق قانون ماینر[2] محاسبه کرد[129]، بنابراین می توان تخمین اولیه طول عمر تجهیز قدرت را انجام داد.

۳-۵-۲- مدل های طول عمر و استخراج حداقل شاخصها

برای پیش بینی طول عمر ماژول های قدرت، مدل سازی طول عمر مورد نیاز است. دو رویکرد مدل های طول عمر تجربی[3] و مدل های طول عمر مبتنی برفیزیک[4] برای مدل سازی طول عمر در مطالعات ارائه شده است. مدل های طول عمر تجربی نیاز به تجربه و مجموعه داده های بزرگ آزمون های چرخه های قدرت (PC)[5] دارند. این مدل ها تعداد چرخه های منتج به خرابی را با پارامترهای آزمایشات PC، مانند ΔT_{jmax}، t_{cycle}، t_{on} و غیره مرتبط می کنند. تخمین طول عمر بر اساس این مدل ها در شرایط آزمایش خاص که مدل ها بر روی آنها تولید شده است،

[1] Accumulated Damage
[2] Miner rule
[3] Empirical lifetime models
[4] physics-based lifetime models
[5] power cycling test

معتبر است. به منظور پیش بینی طول عمر در شرایط عملکرد طبیعی با استفاده از این مدل ها، نیاز به برون یابی برای شرایط میدانی است. حالت تخریبی غالب در شرایط آزمون و شرایط میدانی ممکن است متفاوت باشد. همچنین، برون یابی ها را نمی توان به صورت تجربی تأیید کرد. با این حال، نتایج این برون یابی ها را می توان از طریق نتایج مبتنی بر شبیه سازی، تأیید کرد[130].

شبیه سازی های مبتنی بر چرخه قدرت و پیش بینی طول عمر روش دیگری است که توجه بسیاری از گروه های تحقیقاتی را به خود جلب کرده است[130]، [131]، [132]، [133]. در این روش، مدل های مبتنی بر فیزیک برای نمایش مکانیسم های مختلف تغییر شکل[1] مورد نیاز است. با توجه به اینکه، توسعه مدلسازی تنش و کرنش در داخل ماژول تحقق یافته است، پس توسعه تغییر شکل با تعداد چرخه های منتج به خرابی ارتباط دارد. اگرچه این یک رویکرد مبتنی بر شبیه سازی است، اما هنوز هم، این مدل ها نیاز به اعتبار سنجی و پارامتر سازی با روش های تجربی دارند. مسئله مهم دیگر در مورد مدل های مبتنی بر فیزیک این است که آن ها برای شبیه سازی مشخصه های ماموریت پیچیده مناسب نیستند. این مدل ها شامل تجزیه و تحلیل عناصر محدود برای محاسبه عوامل استرس زای داخلی برای هر چرخه بار خارجی است که دستیابی به آن در صورت وجود مشخصه های ماموریت پیچیده دشوار است. در نتیجه، محققان بر این باورند که برای دستیابی به تخمین بهتر طول عمر در شرایط میدانی، پیشرفت و توسعه هر دو روش مدل سازی تجربی و مبتنی بر فیزیک مورد نیاز است[130].

از آنجا که ماژول های قدرت در معرض استرس مکانیکی - حرارتی دوره ای قرار می گیرند، می توان از قانون شناخته شده Coffin – Manson برای ارتباط تعداد چرخه های منتج به خرابی، N_f و تغییرات دما ΔT در چرخه های قدرت اعمال شده استفاده کرد[134]،

$$N_f = a(\Delta T)^{-n} \quad (۷)$$

که در اینجا ثابت های مدل a و n بسته به طراحی ماژول، پارامترهای تجربی هستند. تجربه به دست آمده در آزمایشات چرخه های قدرت نشان داد که سایر پارامترهای چرخه های قدرت علاوه بر ΔT نیز تأثیر زیادی بر روی تعداد چرخه های منتج به خرابی دارند[134].

این مدل برای پیش بینی N_f برای مواردی که مکانیسم های مختلف خرابی وجود دارد، مانند جدا شدن سیم پیوندی از سطح زیر خود[2]، لایه لایه شدن لحیم و ترک خوردگی سیم پیوندی[3] استفاده می شود. مکانیسم های مختلف خرابی ضوابط مختلف خرابی را در نظر می گیرند. به عنوان مثال، معیار تخریب لایه لایه شدن معمولاً بر اساس تخریب مقاومت حرارتی R_{th} ماژول تعریف می شود (به عنوان مثال $\Delta R_{th} = +10\%$). به طور مشابه، معیار تخریب برای مکانیزم های جدا شدن سیم پیوندی از سطح زیر خود به طور کلی افزایش قابل توجهی از V_{CE} اندازه گیری شده فرض می شود[134].

[1] deformation mechanisms
[2] bond wire lift-off
[3] bond wire cracking

برای جدا شدن سیم پیوندی، استفاده از مدل به شکل ساده آن معمول است[۴۹]، که به صورت زیر است:

$$N_f = a(\Delta T_j)^{-n} \quad (۸)$$

که ΔT_j دامنه چرخه دمای پیوند است و پارامترهای a و n معمولاً توسط سازنده ماژول در دیتا شیت ارائه می شوند.

همچنین از یک مدل Coffin – Manson مشابه می توان برای پیش بینی تعداد چرخه های منتج به خرابی برای لایه لایه شدن اتصالات لحیم کاری در رابط های مهم مانند پایه DCB و تراشه-DCB استفاده کرد. که به صورت زیر است:

$$N_f = 0.5\left(\frac{L\Delta\alpha\Delta T_{sub}}{\gamma x}\right)^{\frac{1}{C}} \quad (۹)$$

که L طول صفحه است که باید در نظر گرفته شود، $\Delta\alpha$ عدم تطابق حرارتی- مکانیکی هر دو ماده صفحه، ΔT_{sub} دامنه چرخه دما در رابط مانند صفحه پایه DCB و تراشه-DCB است و x و Υ به ترتیب ضخامت و ضریب شکل پذیری لایه لحیم هستند. که نمایانگر C از طریق آزمایش های تجربی بدست می آید[135].

مدل شفت[1] تعداد چرخه های منتج به خرابی مربوط به ترک خوردن سیم های پیوندی را پیش بینی می کند، که به صورت زیر تعریف شده است[135]:

$$N_f = A\left(\frac{r}{\rho_0}\left(\frac{ar\cos(\cos\Psi_0(1-\Delta\alpha\Delta T))}{\Psi_0}-1\right)\right)^n \quad (۱۰)$$

که ΔT نوسان چرخه دما است، A و n پارامترهای تناسبی هستند، $\Delta\alpha$ عدم تطابق حرارتی- مکانیکی بین مواد آلومینیوم و DCB، r شعاع سیم پیوندی، ρ_0 شعاع خمش و Ψ_0 زاویه بین صفحه تراشه و سیم پیوندی است.

لازم به ذکر است که این مدلهای ساده برای N_f به ΔT بستگی دارند. تا زمانیکه حداکثر دمای چرخه، T_{max}، خیلی به دمای ذوب آلیاژ لحیم نزدیک نباشد، این تقریب صحیح است. در مورد آلیاژهای لحیم کاری که دمای ذوب کم T_{MP} دارند، ضریب تصحیح لازم است. [135] چنین تصحیحی را ارائه داده است:

$$N_f(\Delta T, T_{\max}) = N_f(\Delta T)\frac{1}{\exp(m(T_{\max}-T_{MP}))+1} \quad (۱۱)$$

که m یک پارامتر تناسب برای تعریف تجربی است. عبارات جایگزین بر اساس دمای متوسط چرخه (T_{aver}) و قسمتی از رابطه آرهنیوس است، که به صورت زیر است:

$$N_f(\Delta T, T_{aver}) = N_f(\Delta T)\exp(\frac{C}{kT_{aver}}) \quad (۱۲)$$

که در اینجا C یک فاکتور تناسب است.

[1] Schafft model

پارامترهای اضافی، که برای محاسبه N_f مرتبط هستند، فرکانس چرخه، زمان سکون چرخه[1] و زمان افـزایش و سقوط پالس هستند. در سالهای اخیر[136]، مدلهای پدیدارشناختی[2] برای جـدا شـدن سـیم پیونـدی در تجهیـزات بدون صفحه پایه گسترش یافته اند که شامل تأثیر هندسه سیم پیوندی و مدت زمان پالس بـار مـی باشـند. لازم بـه ذکر است که چنین مدلهایی شامل حداکثر هشت پارامتر آزاد هستند. که این پارامترها بایـد بـا روش هـای مختلـف استخراج شوند. از آنجا که آنها تجهیزات مورد آزمایش را به شـدت تنظـیم مـی کننـد، چنـین مـدلهای پیچیـده ای همیشه نمی توانند در موارد کلی استفاده شوند.

یکی از اولین تلاشها برای تولید یک مدل تجربی در طول عمر ماژول های IGBT استاندارد با بسـتر سـرامیکی Al_2O_3 و صفحه پایه مسی در پروژه LESIT انجام شده است[130]، [137]. در ایـن پـروژه، تـأثیر ΔT_j و t_{cycle} بـر روی طول عمر ماژول بررسی شده است. در نتیجه، تأثیر میانگین دمای پیوند، T_{jmean}، در مـدل Coffin–Manson گنجانده شده است که رابطه این مدل طول عمر به صورت زیر بدست آمده است:

$$N_f = A\Delta T_j^{\alpha} e^{\left(\frac{E_a}{k_B . T_{jmean}}\right)} \quad (۱۳)$$

کـه در اینجـا k_B ثابـت بـولتزمن $k_B[J/K]= \ 1.380\times10^{-23}$، Ea انـرژی فعالسـازی $E_a[ev]=0.618$ و $\alpha = -5.039$ است. ΔT_j و T_{jmean} متغیرهای آزمایش می باشند که به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\Delta T_j = T_{j,\max} - T_{j,\min} \quad (۱۴)$$

$$T_{jmean} = \frac{T_{j,\max} + T_{j,\min}}{2} \quad (۱۵)$$

از این مدل معمولا زمانی استفاده می کنند که آنالیز اثرات t_{cycle} بر روی طول عمر ماژول قدرت هـدف مطالعـه باشد و حالت خرابی اصلی ماژول، جدا شدن سیم های پیوندی از زیر خود[3] باشد.

یک مدل جدید توسط Bayerer و همکارانش برای مقابله با پیشرفت فناوری های ماژول از زمان اجرای پـروژه LESIT ارائه شده است [130]، [138]، که در CIPS 2008 منتشر شده است. در این پـروژه یـک مجموعـه از داده های بزرگ چرخه های قدرت از ماژول های استاندارد با ساختارها و هندسه های مختلـف اسـتفاده شـده اسـت. ایـن مدل طول عمر، معمولا زمانی استفاده می شود که هدف مطالعات، آنالیز اثرات ضـخامت لایـه هـای مختلـف مـاژول، طول و قطر سیم های پیوندی بر روی طول عمر ماژول باشد. همچنـین ایـن مـدل فقـط بـرای مـاژول هـای قـدرت استاندارد با بستر Al_2O_3 استفاده می شود. که رابطه این مدل به صورت زیر بدست آمده است:

$$N_f = A\Delta T_j^{\beta_1} t_{on}^{\beta_3} I^{\beta_4} V^{\beta_5} D^{\beta_6} e^{\left(\frac{\beta_2}{T_{j\min}+273}\right)} \quad (۱۶)$$

[1] cycle dwell-time
[2] phenomenological
[3] bond wire lift-off

که در اینجا ΔT_j، t_{on}، T_{jmin}، I، V و D پارامترهای متغیر آزمایش و به ترتیب تغییرات دمای پیوند، مدت زمان گرمایش، حداقل دمای پیوند، جریان هر سیم پیوندی، ولتاژ تراشه و قطر سیم های پیوندی هستند و مقادیر پارامترهای ثابت β به صورت زیر هستند:

$$\beta_1 = -4.416, \beta_2 = 1285, \beta_3 = -0.463, \beta_4 = -0.716, \beta_5 = -0.761, \beta_6 = -0.5$$

همانطور که مشاهده شد این معادله شامل تأثیر زمان گرمایش t_{on}، حداکثر دمای پیوند مطلق $T_{j,max}$، جریان هر سیم پیوندی I، قطر سیم های پیوندی D و ولتاژ تراشه V، است. تأثیر این پارامترها در این مدل در نظر گرفته شده است و بنابراین، وابستگی N_f به t_{on}، I، V و D را می توان با یک مشخصه log–log خطی توصیف کرد. این مدل طول عمر تجربی، مبتنی بر تجزیه و تحلیل آماری تعداد زیادی از نتایج آزمون PC از فناوری های مختلف ماژول است. علاوه بر این، این مدل، محدودیت طول عمر را به دلیل خرابی لحیم کاری بستر و پایه، پوشش نمی دهد[139].

همچنین U. Scheuermann و همکارانش مدل طول عمرSKiM63 را بر اساس نتایج آزمون چرخه های قدرت که بر روی ماژول بدون لحیم کاری SKiM63 انجام شده است [130]، [140]، [136]، [141] ارائه داده اند.

مدل SKiM63 با مدلهای تجربی قبلی تفاوت دارد[142]. در این روش، فرسودگی لحیم کاری و تخریب سیم پیوندی باید جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد تا تأثیر فردی هرکدام بر روی طول عمر در نظر گرفته شود. مدل طول عمر SKiM63 پیشرو در جدا کردن حالتهای خرابی بوده است. روش اصلی برای تحقق بخشیدن به جداسازی حالت های خرابی از طریق ترکیب فن آوری های پیشرفته پکیج با فن آوری های کلاسیک است. توجه شود که این مدل فقط در مطالعات طول عمر ماژول های بدون لحیم کاری استفاده می شود. مدل طول عمر پیشنهادی شامل تأثیر نسبت ابعاد سیم پیوندی همانند قطر سیم پیوندی است زیرا با افزایش ارتفاع حلقه های سیم پیوندی، مشاهده شده است که طول عمر به طور قابل توجهی بیشتر می شود. که رابطه مربوط به این مدل به صورت زیر بدست آمده است:

$$N_f = A\Delta T_j^{\alpha} ar^{\beta_1 T_j + \beta_0} \left(\frac{C + t_{on}^{\gamma}}{C+1} \right) e^{\left(\frac{E_a}{k_B . T_{jmean}} \right)} f_{Diode} \quad (۱۷)$$

که در اینجا ΔT_j نوسانات دمای پیوند، t_{on} مدت زمان پالس بار، T_{jmean} متوسط دمای پیوند، k_B ثابت بولتزمن، E_a انرژی فعال سازی و f_{Diode} یک فاکتور ریتینگ است که برای آزمایش دیودهای چرخ آزاد استفاده می شود. β_0 و β_1 ضرایب مدل هستند که همراه با سایر پارامترهای مدل A، α، C، Υ، Ea و f_{Diode} با استفاده از روش برازش حداقل مربع تعیین می شوند. پارامتر سازی این مدل تحلیلی بر اساس مجموعه ای از ۹۷ تست PC بوده است که در آزمایشاتی که تقریباً ۵ سال به طول انجامید، بدست آمده است. به گفته نویسندگان، برای درک بهتر تأثیر پارامترهای مدل در طول عمر، آزمایشات PC بیشتری مورد نیاز است[142].

که پارامتر های ثابت در معادله به صورت زیر هستند:

$$\alpha = -4.923,$$
$$\beta_1 = -9.012\times10^{-3}, \beta_0 = 1.942$$
$$C = 1.434, \gamma = -1.208, E_a[eV] = 0.06606$$
$$f_{Diode} = 0.6204$$

تاکنون، تمام مدلهای مربوط به طول عمر مورد بحث برای نشان دادن طول عمر ماژول IGBT تحت چرخه‌های قدرت یکسان ساخته شده اند. با این حال، برنامه های واقعی با پروفایل های بار پیچیده منجر به پروفایل های پیچیده دمای پیوند می شود[130]،[143]،[144]،[145]. بنابراین، اولین قدم برای پیش بینی طول عمر، تجزیه و تحلیل این پروفایل های پیچیده به مجموعه ای از چرخه های قدرت یکسان ساده تراست که معمولاً این کار با الگوریتم های شمارش مانند الگوریتم Rainflow حاصل می شود[146], [147].

اطلاعات مشخصه های ماموریت از جمله بار و شرایط آب و هوایی مانند دمای محیط به مدل مبدل منتقل می شوند. سپس از مشخصات مربوط به تجهیز مانند مشخصات الکتریکی و حرارتی برای محاسبه تلفات ماژول IGBT و مشخصات دمای محل پیوند استفاده می شود. سپس، مشخصات دما به الگوریتم های شمارش چرخه ها (مانند Rainflow) که برای شمارش چرخه های دمای پیوند استفاده می شود، داده می شود. پس از آن با استفاده از یک مدل طول عمر، مانند CIPS2008، تعداد چرخه های منتج به خرابی در ΔT_j محاسبه می شود. سرانجام، چرخه های دمای پیوند شمارش شده در ΔT_j و تعداد چرخه های منتج به خرابی به یکی از مدل های تخریب[1] داده می شود تا تخمین طول عمر IGBT با توجه به مشخصات ماموریت انجام شود.

۴-۵-۲- مدل های تخریب

مرحله دوم تخمین طول عمر با استفاده از مدل تخریب (Damage model)، است[130]، [132]، [148]،که مدل Miner، یک مدل تخریب محبوب است[129]. این مدل به این صورت است که فرض می کند تخریب ناشی از سهم هر مجموعه را می توان به صورت خطی جمع کرد تا تخریب تجمعی را بدست آورد. رابطه این مدل به صورت زیر ارائه شده است:

$$D = \sum \frac{n}{N_f} = 1 \rightarrow D = \frac{n_{\Delta T_1}}{N_{f\,\Delta T_1}} + \frac{n_{\Delta T_2}}{N_{f\,\Delta T_2}} + \ldots + \frac{n_{\Delta T_n}}{N_{f\,\Delta Tn}} = 1 \qquad (۱۸)$$

که در اینجا $n_{\Delta Tn}$ تعداد چرخه ها در ΔT_{jn} است و $N_{f\Delta Tn}$ تعداد چرخه های منتج به خرابی مطابق با مدل طول عمر برای استرس ΔT_{jn} است. تعداد کل چرخه ها $n_{\Delta Tn}$ برای استرس خاص ΔT_{jn} با استفاده از الگوریتم Rainflow تعیین می شود. بنابراین، قانون تخریب خطی با الگوریتم ساده شمارش Rainflow همچنان به طور گسترده برای تخمین طول عمر IGBT استفاده می شود.

باید توجه شود که طول عمر تخمینی فقط تأثیر چرخه های قدرت را در نظر می گیرد. رطوبت بالا و اشعه

[1] Damage models

های کیهانی می توانند طول عمر را کاهش دهند. بنابراین، طول عمر تخمین زده شده بر اساس چرخه های قدرت نشان دهنده یک حد بالا برای طول عمر ماژول های قدرت در یک برنامه خاص است [130]. همچنین تولیدکنندگان ماژول IGBT پروژه هایی را با هدف استخراج مدل های تجربی طول عمر برای فناوری های پیشرفته پکیجینگ اجرا می کنند[130].

۵-۵-۲- الگوریتم شمارش

در برنامه های نیمه هادی قدرت، الگوریتم های شمارش چرخه[1] بر روی داده های دمای بدست آمده از مدل های حرارتی اعمال می شوند. با استفاده از مدل های طول عمر بر اساس دمای به دست آمده از داده های آزمون سازنده، می توان یک مدل تخریب[2] را با فرض تجمع خطی تخریب با قانون ماینر تخمین زد[149]–[151]. که در پیش بینی طول عمر یک قطعه تحت یک متغیر پروفایل بار پیچیده، روشهای شمارش چرخه، مانند الگوریتم Rain flow، که محبوب است، پروفایل پیچیده را به تعدادی چرخه ساده تبدیل می کند.

الگوریتم Rain flow برای ترکیب چرخه های تشکیل شده توسط حلقه هیسترزیس مشخصه نمودار تنش-کرنش، همانطورکه در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است، توسعه یافته است. این الگوریتم محبوبیت بیشتری پیدا کرده است چراکه مقدار متوسط را فراهم می کند[152] و خطای نسبی کمی دارد [147]. تشابه شمارش Rain flow که برای اولین بار توسط ماتسویشی و اندو شرح داده شد [153] از بارانی که از سقف بتکده می ریزد، گرفته شده است، که در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است.

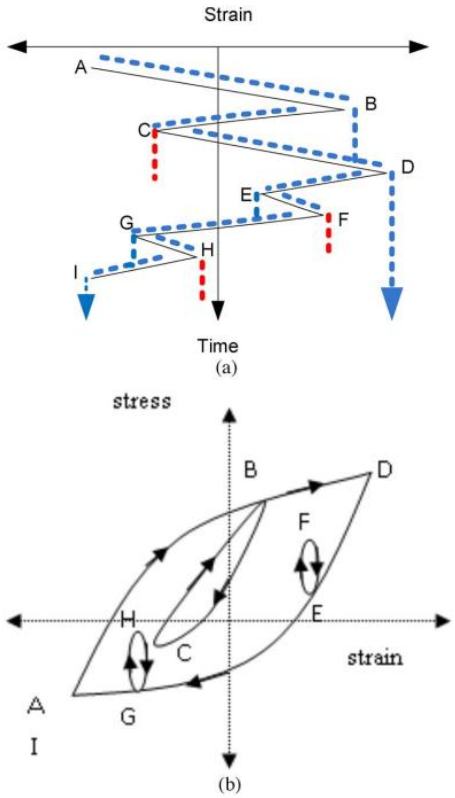
۲-۵-۵-۱- کاربرد الگوریتم Rain flow برای تخمین طول عمر نیمه هادی ها

استفاده از الگوریتم Rainflow برای ارزیابی قابلیت اطمینان نیمه هادی ها شامل درک اصول انبساط حرارتی، تنش و کرنش است که کرنش نسبت تغییر طول یک ماده به طول واقعی آن در نتیجه تغییر دما (ΔT) است.

بنابراین، برای به دست آوردن کرنش در مواد پکیجینگ مختلف ماژول نیمه هادی قدرت، در نظر گرفتن نوسانات دما (ΔT) بسیار مهم است. برای تجهیزات های نیمه هادی قدرت، دمای محیط معمولاً ۲۵ درجه سانتیگراد است و داده های دمایی بالاتر از ۲۵ درجه سانتیگراد منجر به ایجاد کرنش درمواد مختلف ماژول می شود. به جای در نظر گرفتن نوسان دما برای مجموعه داده های کامل، فقط نوسان دمای چرخه های تعیین شده توسط الگوریتم Rainflow برای تخریب در نظر گرفته می شود. از این رو، الگوریتم Rainflow می تواند به راحتی بر روی داده های دما اعمال شود.

[1] Cycle counting algorithms
[2] Damage model

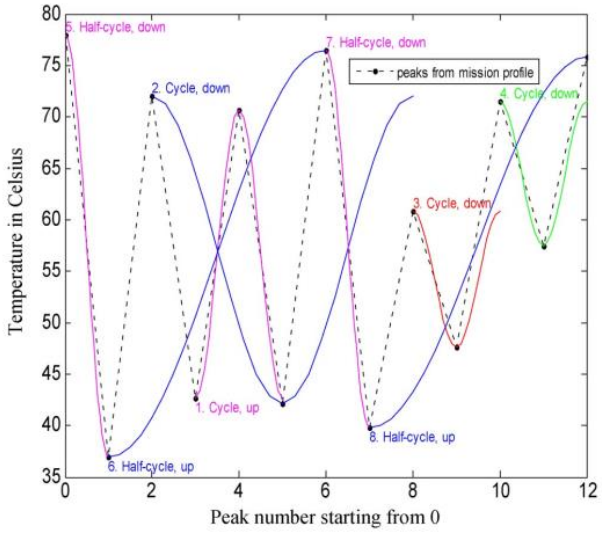
DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۲۰-۲-"Rainflow"، (الف) توالی بار و (ب) طرح استرس-کرنش آن

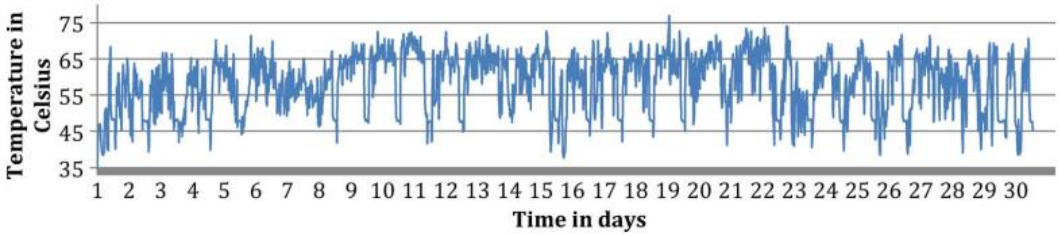
بیشتر تحقیقاتی که اخیرا انجام شده است، از الگوریتم های Rainflow استفاده کرده اند که با استفاده از کد نرم افزار C و MATLAB موجود در MATLAB Central برای داده های دما توسط Nieslony نوشته شده است[154]. شکل ۲۱-۲ کاربرد الگوریتم Rainflow را با خطوط خط دار بر روی یک پروفایل بار نمونه نشان می دهد. در این شکل محور x نشان دهنده تعداد قله ها در پروفایل بار است. که هر محدوده به عنوان چرخه کامل یا چرخه نیمه با توجه به الگوریتم Rainflow سه نقطه [155] که توسط Nieslony در MATLAB اجرا شده است، در نظر گرفته می شود[154].

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



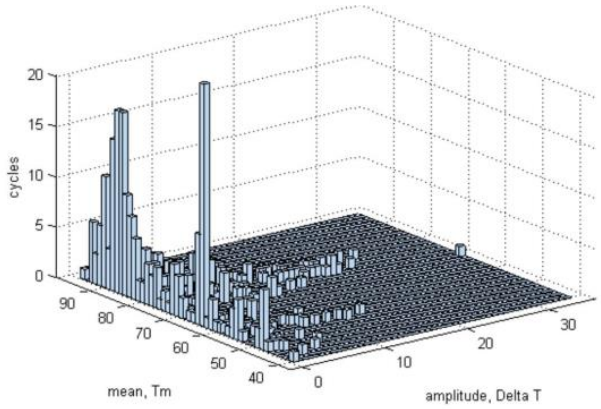
شکل ۲۱-۲- الگوریتم Rain flow یک سیگنال با اطلاعات چرخه از کد موجود در MATLAB [۶۸]

به عنوان مثال در [155] پروفایل توزیع دما IGBT و همچنین پروفایل تعداد چرخه ها بر اساس نوسانات دما و دمای متوسط بدست آمده از الگوریتم Rain flow در شکل ۲- ۲۲ و شکل ۲۳-۲ نشان داده شده است.



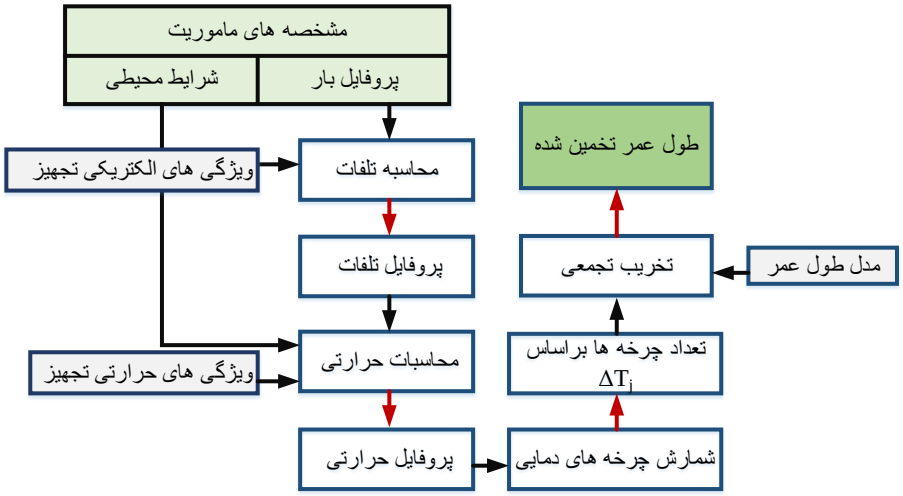
شکل ۲۲-۲- پروفایل تغییرات دمای یک IGBT [۶۹]

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل ۲۳-۲- پروفایل تعداد چرخه ها بر اساس نوسانات دما و دمای متوسط بدست آمده از الگوریتم Rain flow [155]

در نهایت نمودار روند تخمین طول عمر تجهیز در شکل ۲۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۲-نمودار روند تخمین طول عمر تجهیز قدرت

۶-۲-جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل توپولوژی های پرطرفدار مبدل‌های الکترونیک قدرت برای سیستم های PV، توربین بادی و درایو موتور ارائه شد. همچنین روند ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات قدرت به طور کامل بر اساس مراجع موجود شرح داده شده است که برخی از مدل های طول عمر بر اساس شاخص هایشان ارائه داده شدند. در این پروژه که هدف اصلی ایجاد ابزاری برای بررسی و ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک است یک نمونه اینورتر تک فاز تمام پل که به عنوان یک توپولوژی پرطرفدار برای برنامه های PV می باشد، بررسی خواهد شد که در طول تخمین طول عمر این مبدل از مدل طول عمر Bayerer ارائه شده در این فصل و همچنین الگوریتم Rain flow استفاده خواهد شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

۳- توسعه یک برنامه نرم‌افزاری به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌ها

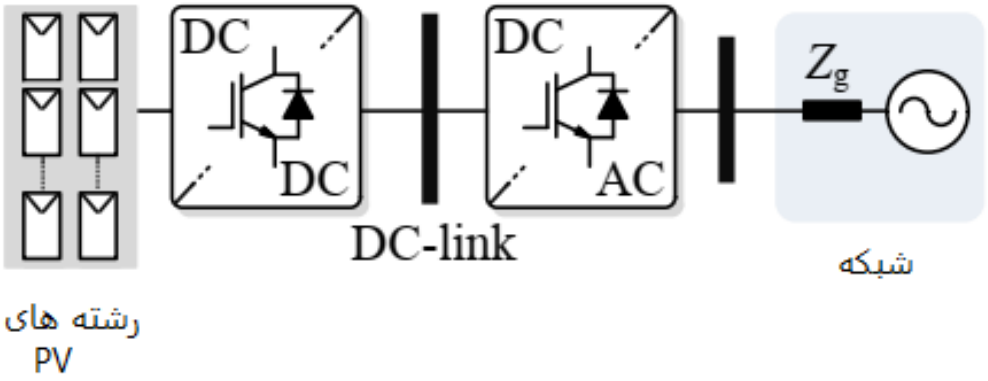
مقدمه

در این فصل به منظور ارزیابی تاثیرات پروفایل‌های ماموریت بر روی طول عمر اینورتر سیستمPV متصل به شبکه، قابلیت اطمینان پیشنهادی(رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان) با توجه به مشخصات پروفایل‌ها ارزیابی شده است.

پروفایل های ماموریت شامل اندازه گیری های یک ساله تابش خورشید و دمای محیط می‌باشند. بنابراین ابتدا یک اینورتر تمام پل رایج PV در محیط PLECS BLOCKSET مدلسازی شده است، سپس مدل سازی حرارتی قطعه IGBT بالایی اینورتر براساس صفحه اطلاعات قطعه مورد نظر در این محیط انجام شده و شبیه سازی های بر اساس پروفایل های ماموریت ورودی انجام می‌شود تا پروفایل دمای پیوند قطعه استخراج گردد. پس از مرحله استخراج پروفایل دما، طول عمر قطعه با استفاده از الگوریتم Rainflow، مدل طول عمر Bayerer و قانون ماینر در محیط MATLAB بدست آمده است.

۳-۱- ساختار کلی سیستم PV متصل به شبکه

شکل ساختار کلی یک سیستم PV رایج متصل به شبکه را نشان می دهد که شامل اینورتر منبع ولتاژ (VSI)، فیلتر خروجی و رشته ها ی PV است. همچنین در این سیستم از یک مرحله مبدل DC-DC تقویت کننده بین رشته های PV و اینورتراستفاده می شود.



شکل ۳-۱: ساختار کلی یک سیستم PV رایج متصل به شبکه

در این مطالعه برای ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات نیمه هادی قدرت, یک سیستم PV ۲ کیلووات متصل به شبکه در محیط نرم افزار PLECS BLOCKSET شبیه سازی و بررسی شده است و تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان بر روی جفت ترانزیستور/دیود فوقانی اینورتر متصل به شبکه انجام می شود.

۳-۲- ابزار نرم افزار PLECS

نرم افزار PLECS [1] یک ابزار برای شبیه سازی مدارهای الکتریکی در سطح سیستم است که توسط Plexim توسعه یافته است. این ابزار به ویژه برای مباحث الکترونیک قدرت طراحی شده است اما می تواند برای هر شبکه الکتریکی استفاده شود. PLECS امکان مدل سازی کنترل ها و حوزه های مختلف فیزیکی مانند حوزه‌های حرارتی ، مغناطیسی و مکانیکی را فراهم می سازد.

اکثر برنامه های شبیه سازی مدار های الکتریکی، سوئیچ ها را به عنوان عناصر بسیار غیر خطی مدل می کنند. با توجه به شیب بالای ولتاژ و جریان های گذرا، هنگام سوییچ زنی کلیدها، شبیه سازی ها کند می شوند. در بیشتر کاربردهای ساده، سوئیچ ها به عنوان مقاومت های متغیری مدل می شوند که بین مقاومت بسیار کوچک و بسیار بزرگ متناوب هستند. در موارد دیگر ، آنها با یک مدل نیمه هادی پیچیده نشان داده می دهند.

با این حال، هنگام شبیه سازی سیستم های الکترونیکی قدرتمند پیچیده، فرایندها هنگام سوییچ زنی از اهمیت چندانی برخوردار نیستند. بنابراین در این شرایط استفاده از سوئیچ های ایده آل که بین مدار بسته و باز تغییر وضعیت می دهند مناسب‌تر است. این رویکرد ، که در PLECS پیاده سازی شده است، دو مزیت عمده دارد:

۱) سیستم هایی را ارائه می دهد که در طول گذراهای سوییچ زنی بصورت قطعه خطی هستند، بنابراین مشکل شبیه سازی ناپیوستگی غیر خطی را که در مدار معادل در لحظه سوئیچینگ رخ می دهد حل می کند.
۲) برای ناپیوستگی ها در لحظه های سوئیچینگ ، فقط دو مرحله ادغام مورد نیاز است یکی برای قبل از لحظه گذرا و یکی پس از لحظه گذرا.

هر دوی این مزایا ، شبیه سازی را بطور قابل ملاحظه ای سرعت می بخشند ، بدون آنکه دقت را کاهش دهند.

بنابراین این نرم افزار به طور ایده آل برای مدل سازی و شبیه سازی سیستم های درایو پیچیده و مبدل های قدرت چند سطحی مدولار ، بسیار مناسب است.

از این رو دراین پروژه به دلیل مزایای ذکر شده این نرم افزار و همچنین امکان مدلسازی حرارتی سوییچ ها که در نرم افزار MATLAB این امکان وجود ندارد، سیستمPV در این نرم افزار مدلسازی شده است و در نهایت پس از مدلسازی های حرارتی و استخراج دمای پیوند سوییچ مبدل قدرت از نرم افزار MATLAB به منظور استخراج طول عمر تجهیز استفاده شده است که در ادامه شرح داده می شود.

۳-۳- ساختار کلی سیستمPV متصل به شبکه

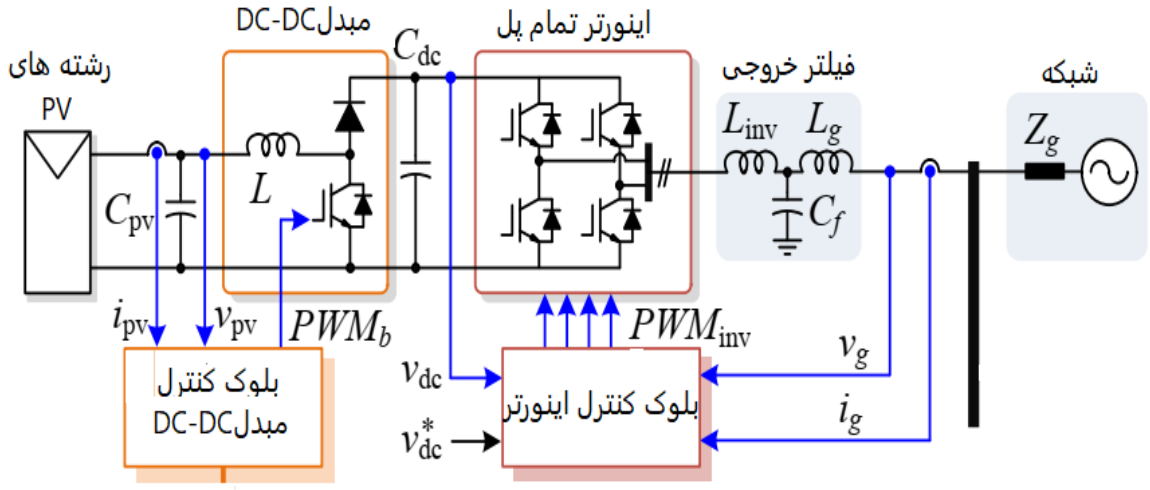
[1] Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

ساختار کلی سیستم PV متصل به شبکه که در این پروژه مدلسازی شده است درشکل ۳-۲ نشان داده شده است و همچنین پارامترهای این سیستم در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱: مشخصات طراحی سیستم PV

توان نامی سیستم PV	2KW
ولتاژ نامی شبکه	230 V(RMS)
ولتاژ لینک DC	400 V
فرکانس سوِییچینگ مبدل DC-DC	20KH
فرکانس سوِییچینگ اینورتر	20KH
فرکانس شبکه	50 Hz
خازن ورودی	22e-6 F
خازن لینکDC	1000e-6 F
سلف مبدل بوست	1e-3 H
سلف فیلتر خروجی	5e-3 H
مقاومت فیلتر خروجی	0.15Ohm

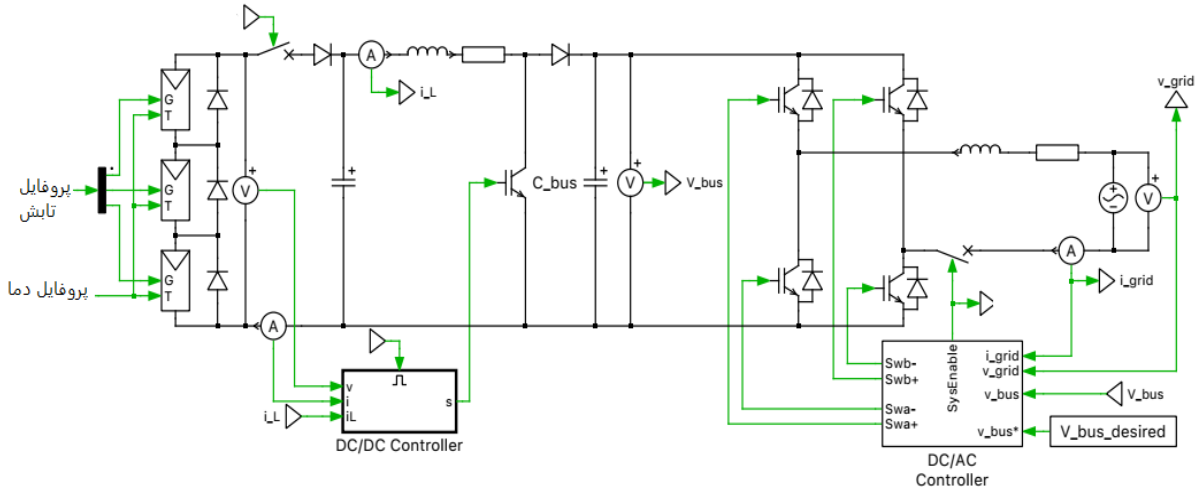


شکل ۳-۲: اینورتر PV متصل به شبکه

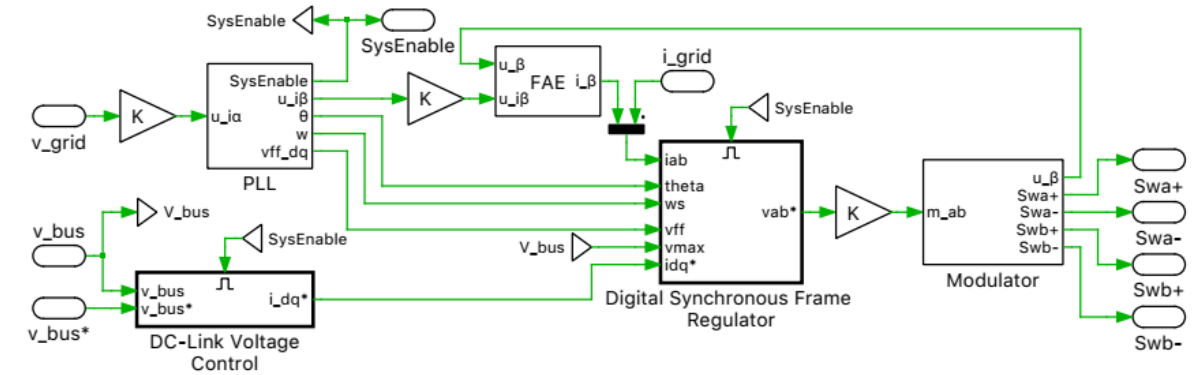
سیستم PV مورد مطالعه همانطور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است یک سیستم پنل خورشیدی متصل به شبکه با یک مبدل تقویت کننده DC-DC می باشد که مبدل تقویت کننده DC-DC طوری طراحی شده است که پنل خورشیدی در حداکثر توان (MPP)[1] کار کند.

[1] Maximum power point

ساختار سیستم PV و همچنین کنترل کننده اینورتر در محیط PLECS در شکل ۳-۳ و شکل۳- ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: ساختار سیستم PV



شکل۳- ۴: کنترل کننده اینورتر

در این سیستم مبدل تقویت کننده DC-DC برای عملکرد پنل خورشیدی در حداکثر توان، کنترل می شود. همچنین الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT[1]) برای بهبود عملکرد پنل خورشیدی در شرایط سایه جزئی اجرا شده است. دو الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان (P&O)[2] وهدایت افزایشی (INC)[3]، که در[89] و [90] پیشنهاد شده است، پیاده سازی شده اند. این الگوریتم های MPPT ولتاژهای مرجع را برای افزایش توان خروجی پنل خورشیدی تغییر می‌دهند. علاوه بر این، اینورتر با یک حلقه ولتاژ خارجی برای کنترل ولتاژ لینک DC که شامل کنترل کننده PI می‌باشد، کار می کند.

[1] Maximum power point tracking
[2] Perturb and Observe
[3] Incremental conductance

همچنین در این مدار، خروجی مبدل تقویت کننده از طریق خازن لینک DC به سمت DC اینورتر منبع ولتاژ تک فاز (VSI) متصل شده است که اینورتر VSI توسط یک طرح کنترل تو در تو با حلقه ولتاژ خارجی و یک حلقه جریان داخلی تنظیم می شود. که حلقه ولتاژ خارجی برای کنترل ولتاژ لینک DC و حفظ ولتاژ در سطح مورد نظر استفاده می شود.

پس از شبیه سازی این سیستم براساس پروفایل های ماموریت طولانی مدت که در ادامه نشان داده شده‌اند ، ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیز قدرت با توجه به نتایج استخراج شده از شبیه سازی ها در محیط MATLAB انجام شده است که روند و نتایج تجزیه و تحلیل ها در ادامه ارائه شده است.

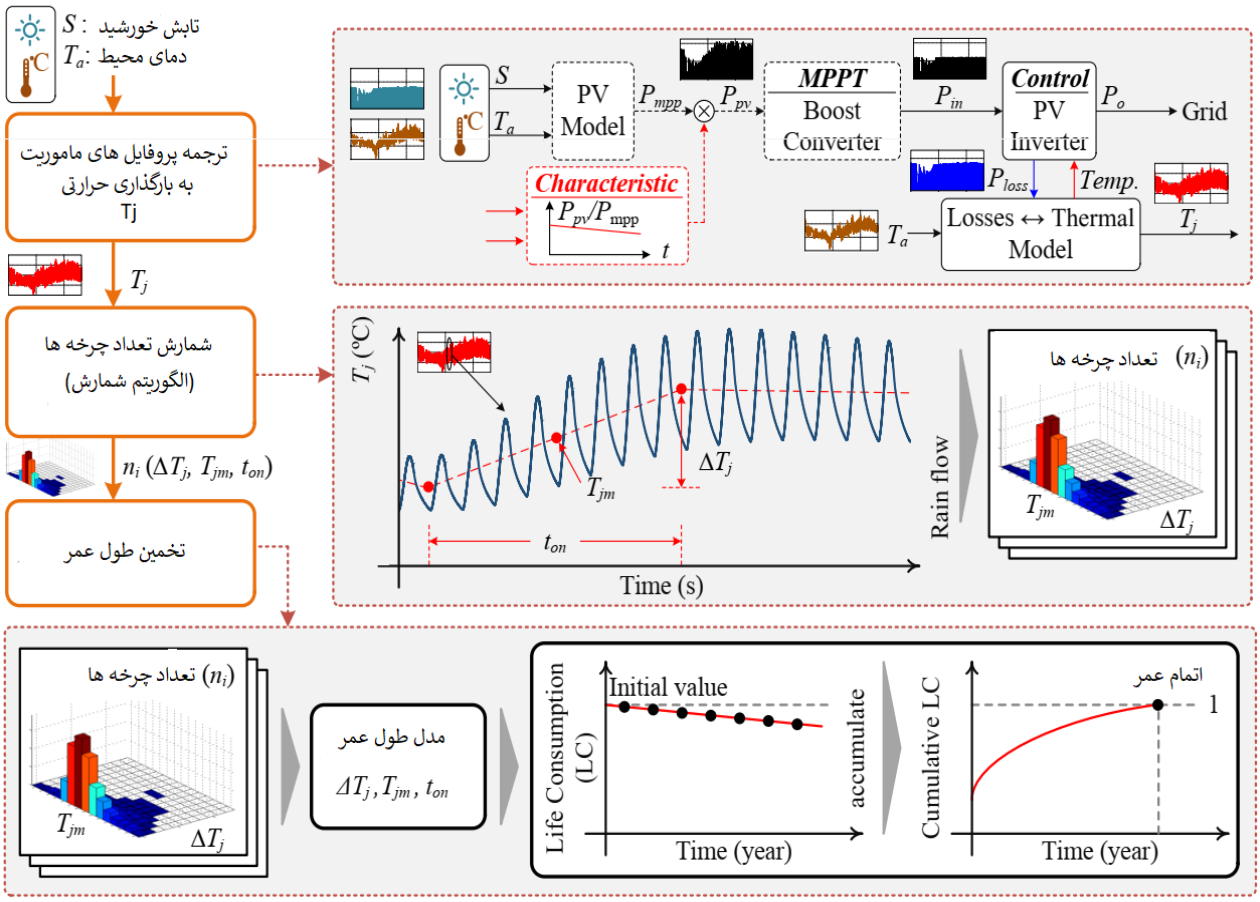
۳-٤- روند ارزیابی قابلیت اطمینان

یک مطالعه جامع در مورد استفاده از روش طراحی برای قابلیت اطمینان DfR در طراحی اینورترهای PV در گزارشهای پیشین مورد بحث قرار گرفته است. یک نمودار کلی از فرایند ارزیابی قابلیت اطمینان اینورتر PV در شکل ۳-۵ نشان داده شده که فرآیندهای اصلی در این روش در ادامه توضیح داده شده است.

۱-۴-۳- ترجمه پروفایل های ماموریت به بارگیری حرارتی

همانطور که در گزارشات قبل اشاره شد در رویکرد طراحی برای قابلیت اطمینان DfR، وضعیت عملکرد اینورتر PV یعنی پروفایل های ماموریت، به عنوان ورودی فرایند ارزیابی قابلیت اطمینان مورد نیاز است[142-144]. پروفایل تابش خورشید و دمای محیط معمولاً به عنوان پروفایل های ماموریت در سیستم PV در نظر گرفته می شوند که این پروفایل ها باید به تنش اجزای حیاتی قابلیت اطمینان در سیستم تبدیل شوند [145 ، 146]. معمولاً تجهیزات نیمه های قدرت و خازن ها قطعات محدود کننده طول عمر در اینورتر PV هستند که بار حرارتی آنها عامل اصلی تنش است که مکانیسم های خرابی فرسودگی اجزا را تسریع می کند [147-149].

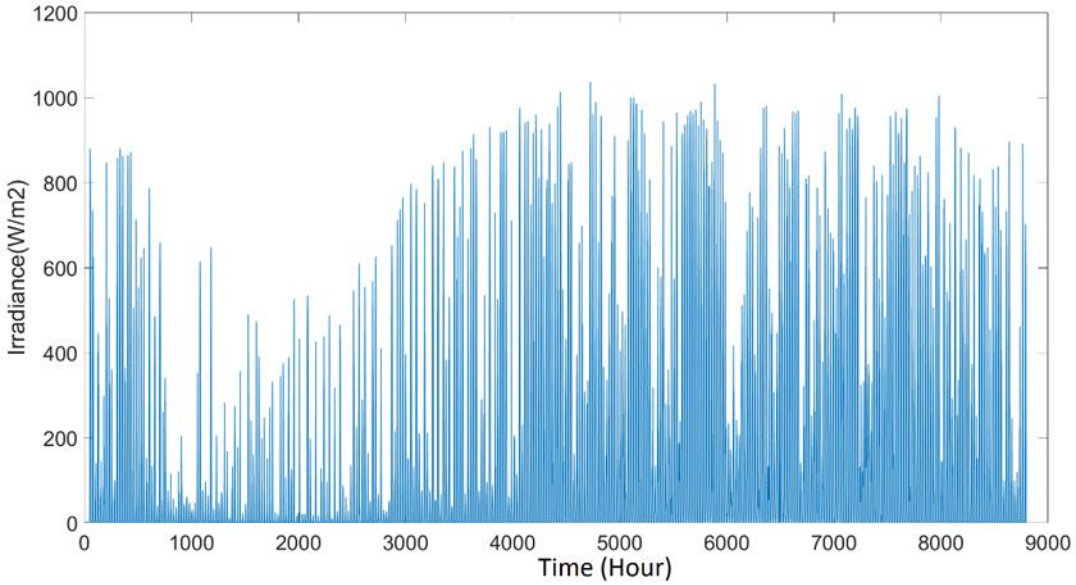
DOI: 10.30503/nripress.2020.329



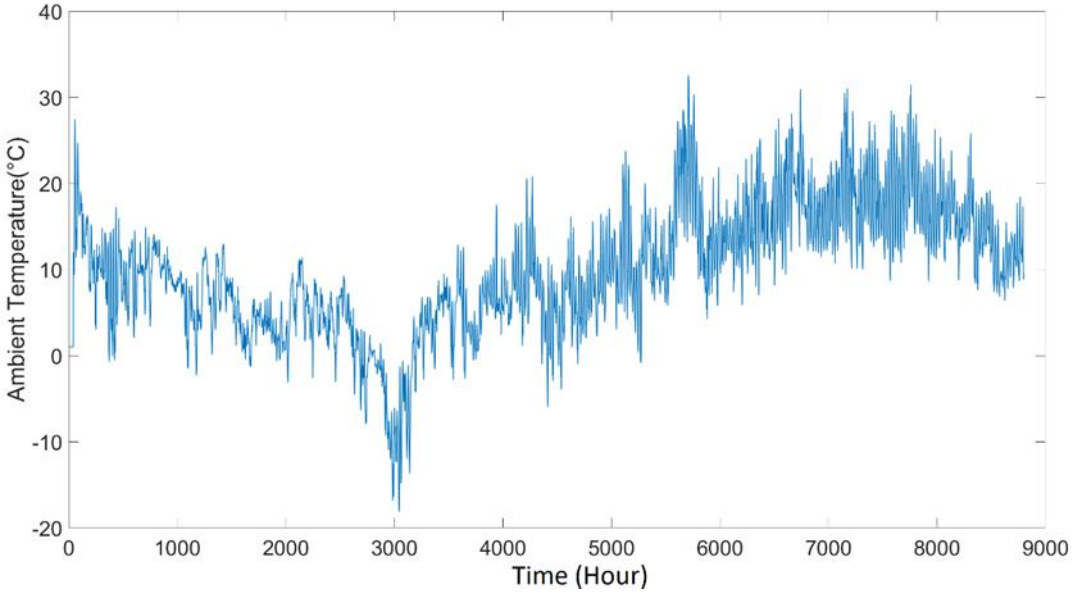
شکل ۳-۵: روند ارزیابی قابلیت اطمینان

در این مطالعه دو نمونه تابش سالانه خورشید و دمای محیط که به عنوان پروفایل های ماموریت زیست محیطی طولانی مدت سیستم PV در نظر گرفته شده اند در شکلهای۳-۶ الی ۳-۹ نشان داده شده اند و به عنوان ورودی های سیستم PV در نظر گرفته شده اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.329

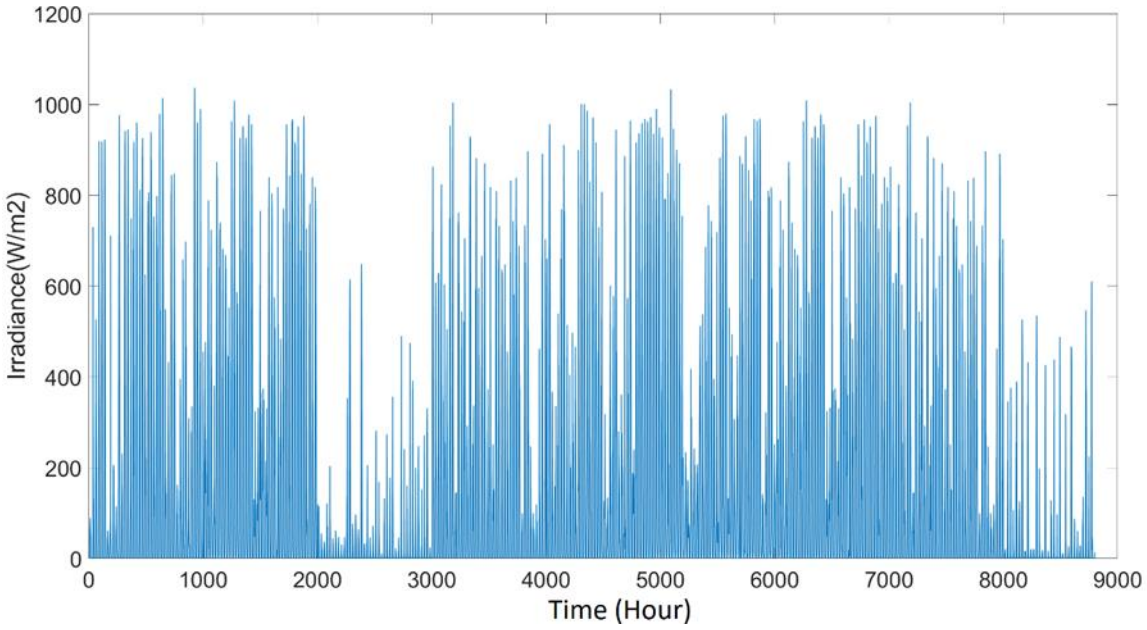


شکل ۳-۶: پروفایل اول تابش سالانه

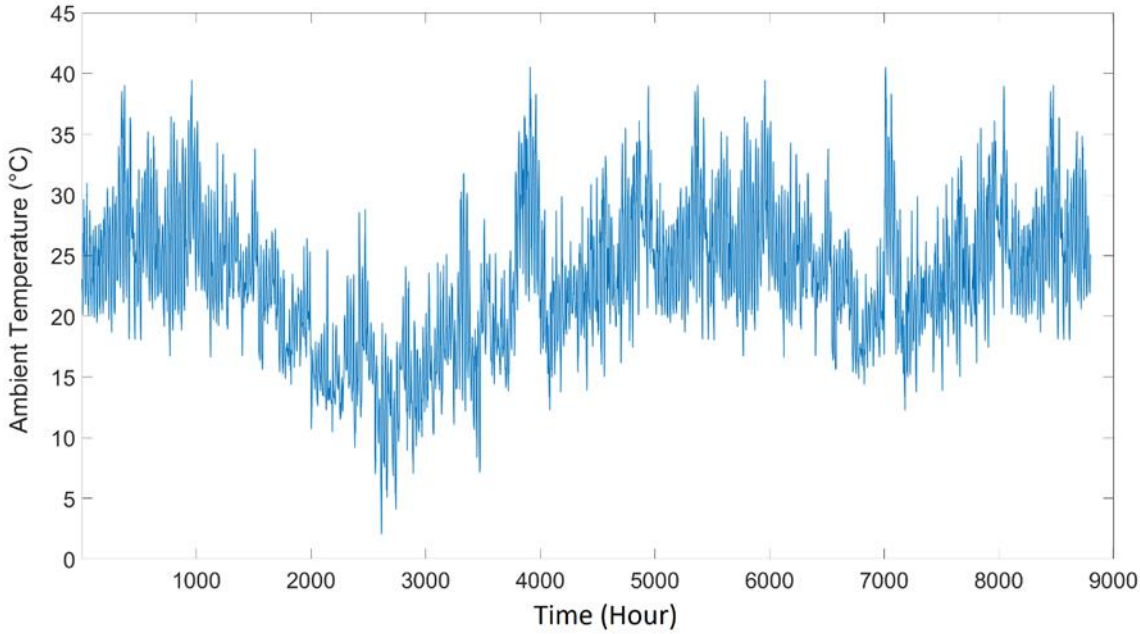


شکل۳-۷: پروفایل اول دمای محیط سالانه

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل۳- ۸: پروفایل دوم تابش سالانه



شکل۳- ۹: پروفایل دوم دمای محیط سالانه

پس از تعیین پروفایل های ماموریت به عنون ورودی های سیستم PV، مدلسازی حرراتی تجهیز قدرت با در نظر گرفتن مدل حرارتی تجهیز، بر اساس اطلاعات تجهیز مورد نظر، در محیط نرم افزار PLECS انجام شده و شبیه سازی ها انجام می شود تا بارگذاری حرارتی تجهیز همانند دمای پیوند تجهیز و همچنین استرس های ولتاژ، جریان،

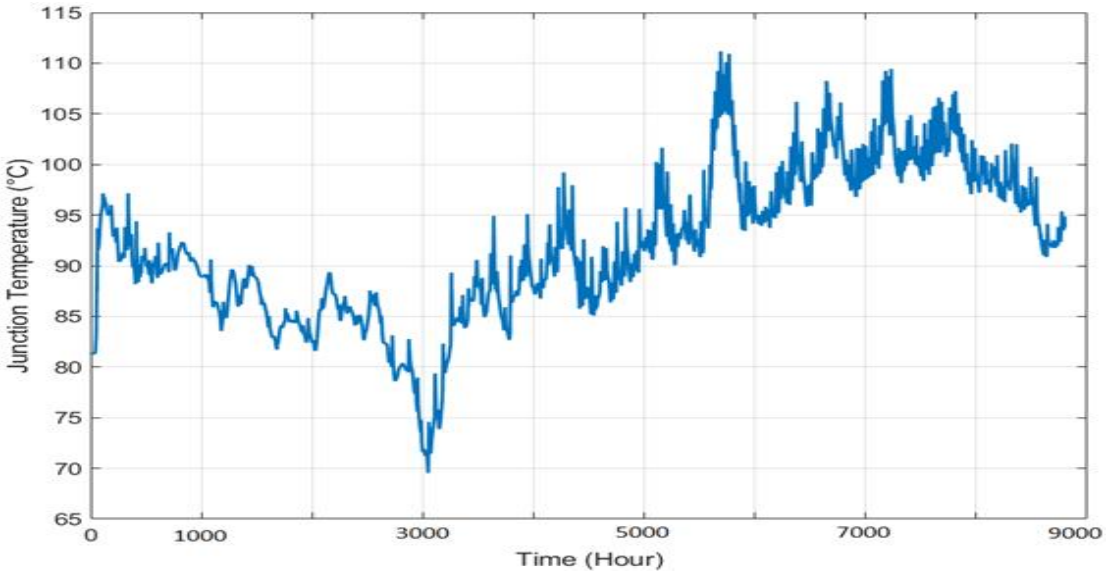
DOI: 10.30503/nripress.2020.329

تلفات هدایتی و تلفات سوئیچینگ تجهیز به صورت سالانه بدست می آید. تجهیز IGBT انتخاب شده IKQ75N120CH3 می باشد که با تجزیه تحلیل های حرارتی در محیط PLECS امپدانس حرارتی تجهیز به صورت جدول ۳-۲ بدست آمده است.

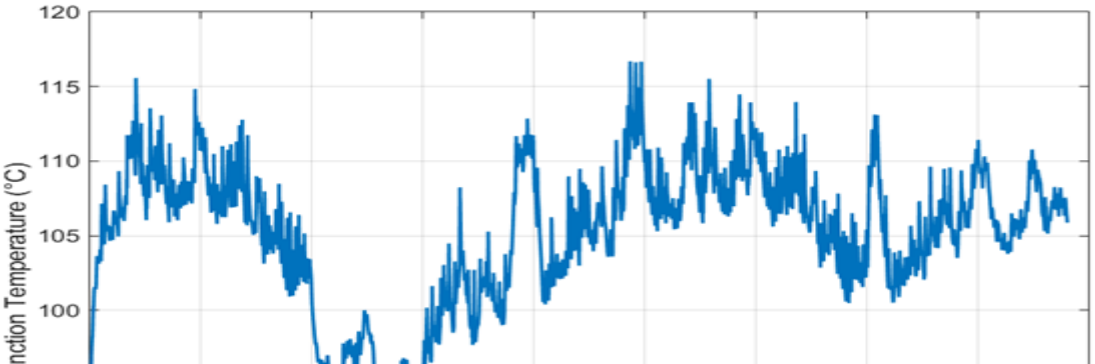
جدول۳- ۲: امپدانس حرارتی تجهیز

ثابت زمانی شبکه حرارتی FOSTER (s)		مقادیر مقاومت حرارتی شبکه حرارتی (K/W)FOSTER	
۰.۰۰۰۴۳۵۳	τ_1	۰.۰۲۷۷۲	R1
۰.۰۰۳۷۰۳	τ_2	۰.۰۵۲۴۱	R2
۰.۰۸۵۰۸	τ_3	۰.۰۸۵۰۸	R3

در نهایت دمای پیوند تجهیز پس از مدلسازی الکتریکی و حرارتی سیستم بر اساس پروفایل های ماموریت بدست آمده است که در شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ نشان داده شده اند.



شکل۳- ۱۰: دمای پیوند سالانه کلید IGBT در اینورتر بر اساس پروفایل های اول



شکل۳-۱۱: دمای پیوند سالانه کلید IGBT در اینورتر بر اساس پروفایل های دوم

۳-٤-۲- تفسیر چرخه های حرارتی

همانطور که در گزارش های قبلی ذکر شده است، در تجهیزات نیمه هادی قدرت، مکانیسم اصلی خرابی، فرسودگی مربوط به چرخه های حرارتی است که باعث بلند شدن سیم پیوندی از زیر خود[1] و فرسودگی اتصالات لحیم کاری[2] پس از چندین چرخه حرارتی می شود [148-150]. بنابراین، بار حرارتی ترجمه شده از پروفایل ماموریت که در مرحله قبل بدست آمده است باید به منظور تعیین اطلاعات چرخه های حرارتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

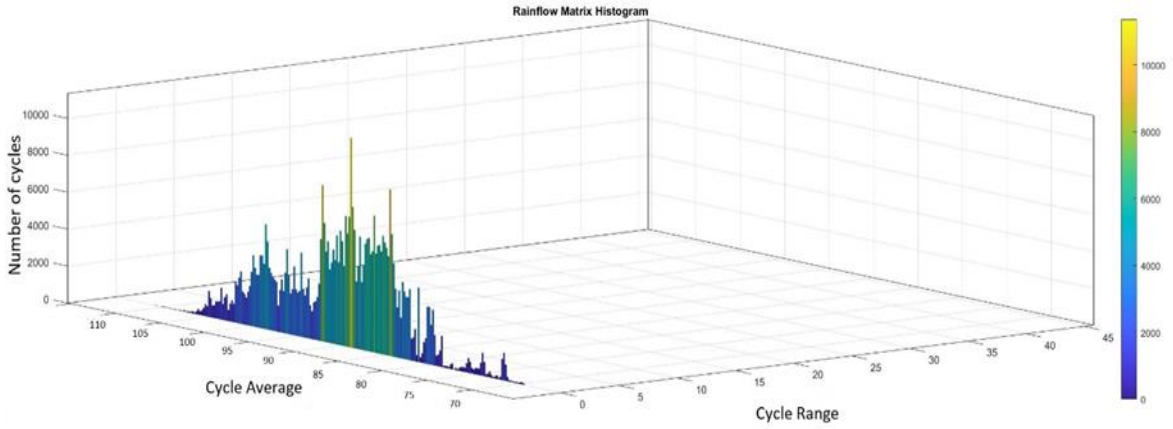
به طور معمول، از یک الگوریتم شمارش چرخه (به عنوان مثال الگوریتم Rainflow) برای تفسیر یا استخراج اطلاعاتی مانند دامنه چرخه، مقدار متوسط و دوره چرخه پروفایل بارگذاری حرارتی استفاده می شود [142].

از اینرو، در این مطالعه پس از استخراج دمای پیوند ترانزیستور ($T_{j,x}$) و انتقال این داده ها درMATLAB، الگوریتم Rainflow در MATLAB بر روی این داده ها اعمال شده است و داده های بارگذاری حرارتی برحسب دامنه چرخه حرارتی (ΔT_j)، مقدار میانگین چرخه حرارتی (T_{jmean}) و مدت زمان اعمال چرخه حرارتی (t_{on}) استخراج شده اند.

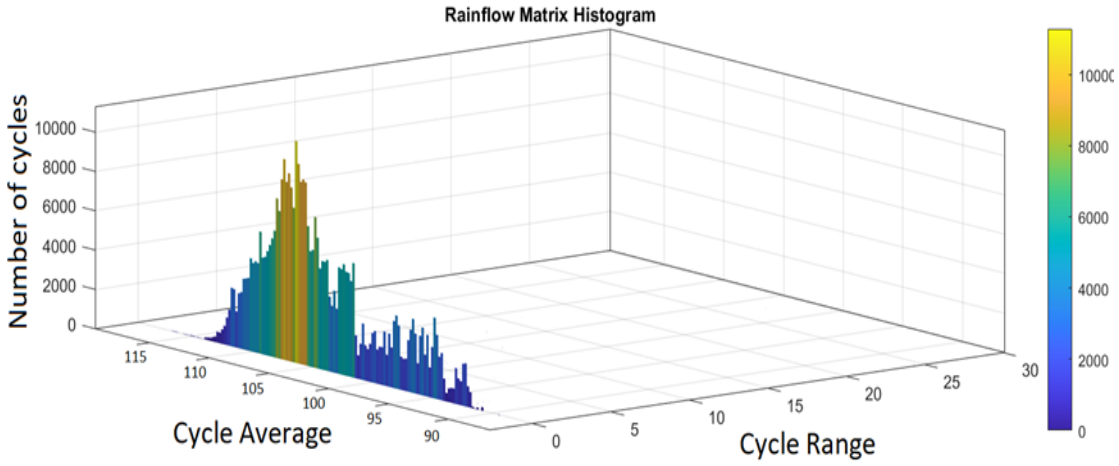
شکلهای۳-۱۲ و ۳-۱۳ نتایج و نمودار حاصل از الگوریتم Rainflow را برای هر دو پروفایل ماموریت نشان می‌دهد.

[1] Bond-wire lift-off
[2] Solder joint fatigue

DOI: 10.30503/nripress.2020.329



شکل۳-۱۲: نتایج حاصل از الگوریتم Rainflow برای پروفایل ماموریت اول



شکل۳- ۱۳ : نتایج حاصل از الگوریتم Rainflow برای پروفایل ماموریت دوم

۳-۴-۳- ارزیابی طول عمر

طول عمر یا زمان خرابی قطعه مانند تجهیزات نیمه هادی قدرت و خازن ها را می توان با توجه به عامل تنش و مکانیسم خرابی مدل کرد. هنگام اعمال اطلاعات تنش حرارتی، به عنوان مثال، از داده های استخراج شده از الگوریتم شمارش چرخه، و با استفاده از مدل های طول عمر می توان تخریب مربوطه را برای یک پروفایل ماموریت معین محاسبه کرد [125]. که معمولا برای محاسبه تخریب تجمعی از قانون ماینر استفاده می شود. در این پروژه داده های حاصل از چرخه های حرارتی حاصل از الگوریتم Rainflow که در بخش قبل استخراج شدند در مدل طول عمرBayerer گنجانده شده است تا تعداد چرخه های منتج به خرابی (N_f) تخمین زده شوند. رابطه ی طول عمر Bayerer در زیر نشان داده شده است.

$$N_f = A\Delta T_j^{\beta_1} t_{on}^{\beta_3} I^{\beta_4} V^{\beta_5} D^{\beta_6} e^{\left(\frac{\beta_2}{T_{j\min}+273}\right)}$$

$$\Delta T_j = T_{j,\max} - T_{j,\min}$$

$$T_{jmean} = \frac{T_{j,\max} + T_{j,\min}}{2}$$

که در اینجا $T_j\Delta$، t_{on}، T_{jmin}، I، V و D پارامترهای متغیر آزمایش و به ترتیب تغییرات دمای پیوند، مدت زمان گرمایش، حداقل دمای پیوند، جریان هر سیم پیوندی، ولتاژ تراشه و قطر سیم های پیوندی هستند و بقیه پارامترها مقادیر ثابت هستند که به صورت زیر هستند:

$$\beta_1 = -4.416, \beta_2 = 1285, \beta_3 = -0.463, \beta_4 = -0.716, \beta_5 = -0.761, \beta_6 = -0.5$$

A=9.3e+14;

پس از استخراج تعداد چرخه های منتج به خرابی (N_f)، از قانون ماینر که رابطه اش در زیر آمده است برای محاسبه تخریب تجمعی (D)[1] استفاده شده است:

$$D = \sum \frac{n}{N_f} = 1 \rightarrow D = \frac{n_{\Delta T_1}}{N_{f\,\Delta T_1}} + \frac{n_{\Delta T_2}}{N_{f\,\Delta T_2}} + \ldots + \frac{n_{\Delta T_n}}{N_{f\,\Delta Tn}} = 1$$

در نهایت طول عمرقطعه MOSFET (LC) از رابطه زیر بر اساس تعداد سال ها بدست می آید.

$$LC = 1/D$$

[1] Accumulated Damage

که نتایج بدست آمده بر اساس هر دو پروفایل ماموریت که شامل تخریب تجمعی (D) و تعداد سال های منتج به خرابی (LC)است به صورت زیر می باشند:

نتایج مربوط به پروفایل های ماموریت ۱		نتایج مربوط به پروفایل های ماموریت ۲	
$D_1(1/(Year))$	1.2377×10^{-6}	$D_2(1/(Year))$	5.032×10^{-7}
$LC_1(Year)$	807920	$LC_2(Year)$	1987300

بررسی نتایج حاصل با توجه به نوع پروفایلهای اعمالی صحت فعالیتهای صورت گرفته را تایید می‌نماید.

۳-۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل، ارزیابی قابلیت اطمینان تحت پروفایل های ماموریت برای یک برنامه اینورتر PV رایج مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا، پس از اعمال پروفایل های ماموریت به سیستمPV، مدلسازی حرارتی IGBT فوقانی مورد استفاده در اینورتر انجام شده و نتایج بارگذاری حرارتی که شامل دمای پیوند است از شبیه سازی استخراج شده است، سپس با استفاده از الگوریتم Rainflow داده های حاصل از چرخه های حرارتی استخراج شده و در مدل طول عمر Bayerer گنجانده می شوند تا تعداد چرخه های منتج به خرابی (N_f) IGBT برآورد شود و در نهایت با استفاده از قانون ماینر تخریب تجمعی قطعهIGBT محاسبه شده و طول عمر آن پیش بینی شده است.

در این مطالعه شبیه سازی ها برای دو نمونه پروفایل ماموریت متفاوت انجام شده است مطابق با نتایج بدست امده، پروفایل دمای پیوند تجهیز و همچنین طول عمر تجهیز برای دو پروفایل مجزا متفاوت است. بنابراین اهمیت پروفایل های ماموریت بر روی قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیک قدرت بر اساس نتایج بدست آمده نشان داده شده است.

مراجع

[1] M. K. C. Durand, D. Coutellier, H. Naceur, "Power Cycling Reliability of Power Module: a Survey," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability,* pp. -۸۰ ۹۷, .۲۰۱٦

[2] J. C. CLULEY, *Electronic Equipment Reliability*. London: THE MACMILLAN PRESS L TO, London and Basingstoke Companies and representatives throughout the world, .۱۹۸۱

[۳] ف. پ. م. ع. ع. نوده, "بررسی قابلیت اطمینان از سیستم های الکترونیک قدرت," سومین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، برلین، آلمان, ۱۳۹۵تیرماه.

[4] H. W. Edited by Henry Shu-hung Chung, Frede Blaabjerg and Michael Pecht, *Reliability of Power Electronic Converter Systems*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, .۲۰۱۵

[5] "http://stat.rzb.ir/Forum/Post/٢٤." (accessed.

[6] A. K. PATRICK D. T. O'CONNOR, *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, .۲۰۱۲

[7] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (version ٤٠)," *Ieee Trans Fuzzy Syst,* vol. ٢٠, no. ٦, pp. ١١٢٩--١١١٤, ٢٠١٢, doi: ١٠,١٠٠٢/pip.

[8] J. B. Gayo, "Reliability focused research on optimizing Wind Energy systems design, operation and maintenance - Tools, proof of concepts, guidelines \& methodologies for a new generation," *ReliaWind Project,* .۲۰۱۲

[9] R. R. Errabelli and P. Mutschler, "Fault-tolerant voltage source inverter for permanent magnet drives," *IEEE Trans. on Power Electron,* vol. ٢٧, no. ٢, pp. ٥٠٨--٥٠٠, .۲۰۱۲

[10] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters ",*IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. ٤٧, no. ٣, pp. ١٤٥١--١٤٤١, ٢٠١١, doi: ١٠,١١٠٩/TIA..٢٠١١,٢١٢٤٤٣٦

[11] *Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules*. ZVEI, .۲۰۱۳

[12] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules," *Microelectronics Reliability,* vol. ٤٢, no. ٥-٤, pp. ٦٦٧--٦٥٣, ٢٠٠٢, doi: ١٠,١٠١٦/S٢٧١٤-٠٠٢٦(٠٢).٢-٠٠٠٤٢

[13] "Separating Failure Modes in Power Cycling Tests - IEEE Conference Publication," ed.

[14] H. Wang and F. Blaabjerg" ,Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters - An overview," vol. ٥٠, no. ٥, pp. ٣٥٧٨--٣٥٦٩, ٢٠١٤, doi: ١٠,١١٠٩/TIA..٢٠١٤,٢٣٠٨٣٥٧

[15] "Application Guide, Aluminum Electrolytic Capacitors," ed.

[16] R. S. Alwitt and R .G. Hills, "The chemistry of failure of aluminum electrolytic capacitors," pp. ١٠٧--٩٣, ١٩٦٤, doi: ١٠,١١٠٩/IRPS..١٩٦٤,٣٦٢٢٨٢

[17] J. Hudgins, "Power Electronic Devices in the Future," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol ,۱ .no. ۱, pp. ۱۷--۱۱, .۲۰۱۳

[18] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, and T. Reimann, *Application Manual Power Semiconductors*. SEMIKRON International GmbH, .۲۰۱۱

[19] A. Albarbar, C. Batunlu, A. Albarbar, and C. Batunlu, "Thermal Analysis of Power Electronics: Review," pp. ٤٧--١٩, ۲۰۱۸, doi: ٤-٥٩٨٢٨-٣١٩-٣-٩٧٨/١٠,١٠٠٧_.٢

[20] K. B. Pedersen, "IGBT Module Reliability. Physics-of-Failure based Characterization and Modelling".

[21] K. K. Jinka, "Thermo-mechanical Analysis of Encapsulated Ball-Wedge Wire Bonds in Microelectronics, using Raleigh-Ritz Modeling," ٢٠٠٦. [Online]. Available: https://drum.lib.umd.edu/handle/.٣٩٣٣/١٩٠٣

[22] N. Patil, J. Celaya, D. Das, K. Goebel, and M. Pecht, "Precursor parameter identification for insulated gate bipolar transistor) IGBT) prognostics," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. ٥٨, no. ٢, pp. ٢٧٦--٢٧١, ٢٠٠٩, doi: ١٠,١١٠٩/TR..٢٠٠٩,٢٠٢٠١٣٤

[23] D. L. Blackburn, "Temperature measurements of semiconductor devices - A review," vol. ٢٠, pp. ٨٠--٧٠, ٢٠٠٤, doi: ١٠,١١٠٩/stherm..٢٠٠٤,١٢٩١٣٠٤

[24] W. E. Newell, "Power Electronics-Emerging from Limbo Conference Keynote Address," vol. ١٩٧٣-January, pp. ١٢--٦, ١٩٧٣, doi: ١٠,١١٠٩/PESC..١٩٧٣,٧٠٦٥١٦٢

[25] H. Oh, B. Han, P. McCluskey, C. Han, and B. D. Youn, "Physics-of-failure, condition monitoring, and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: A review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. ٣٠, no. ٥, pp. ٢٤٢٦--٢٤١٣, ٢٠١٥, doi: ١٠,١١٠٩/TPEL..٢٠١٤,٢٣٤٦٤٨٥

[26] P. G. Harris and K. S. Chaggar, "The role of intermetallic compounds in lead-free soldering," *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. ١٠, no. ٣, pp. ٥٢--٣٨, ١٩٩٨, doi: .٠٩٥٤٠٩١٩٨١٠٢٣٧١١٠/١٠,١١٠٨

[27] *Engineering Statistics Handbook*. National Institute of Standard and Technology Gaithersburg MD.

[28] "JEDEC Solid State Technology Association.," ed.

[29] *MIL-STD-* ٨٨٣*– Test Method Standard for Microcircuits*. Defense Logistics Agency Columbus OH.

[30] "No Title," ed.

[31] "JEDEC Solid State Technology Association,, JESD٢٢-A١٠٤D," ed, .٢٠٠٥

[32] S. Groothuis, W. Schroen, and M. Murtuza, "Computer Aided Stress Modeling for Optimizing Plastic Package Reliability.," pp. ١٩١--١٨٤, ١٩٨٥, doi: ١٠,١١٠٩/irps..١٩٨٥,٣٦٢٠٩٦

[33] H. S. H. Chung, H. Wang, F. Blaabjerg, and M. Pecht, *Reliability of power electronic converter systems*. ٢٠١٦, pp. .٤٩٠--١

[34] R. Schmidt and C. Spindler, "Failure assessment and HALT test of electrical converters," ٢٠١٢, doi: ١٠,١١٠٩/RAMS..٢٠١٢,٦١٧٥٤٣٩

[35] G. K. Hobbs, *Accelerated reliability engineering: HALT and HASS*. Wiley, .٢٠٠٠

[36] O .J. Luste, "Accelerated testing methods for reliability prediction," *Journal of Thermoelectricity*, vol. ٢٠١٨, no. ٤, pp. ٧٠--٦٦, .٢٠١٨

[37] L. A. a. Escobar, "A review of accelerated test models," *Statistics Preprints*, .٢٠٠٦

[38] A. B. Kentved, "Acceleration factors and accelerated life testing," *Spm*-۱۷۹, .۲۰۱۱
[39] P. Hacke *et al.*, "A status review of photovoltaic power conversion equipment reliability, safety, and quality assurance protocols," vol. ۸۲, ed, ۲۰۱۸, pp. --۱۰۹۷ .۱۱۱۲
[40] U. M. Choi, F. Blaabjerg, and S. Jrgensen, "Power Cycling Test Methods for Reliability Assessment of Power Device Modules in Respect to Temperature Stress," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. ۳۳, no. ۳, pp. ۲۵۵۱--۲۵۳۱, ۲۰۱۸, doi: ۱۰,۱۱۰۹/TPEL..۲۰۱۷,۲۶۹۰۵۰۰
[41] *Military handbook: Reliability prediction of electronic equipment*. Standard MIL-HDBK-۲۷۱F, .۱۹۹۱
[42] "Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution - D. H. Stamatis - Google Books," ed.
[43] V. Ionut, "Model-based Reliability Analysis of Power Electronic Systems," PHD, Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, .۲۰۱۹
[44] K. Ma, H. Wang, and F. Blaabjerg, "New Approaches to Reliability Assessment: Using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. ۳, no. ٤, pp. ٤۱--۲۸, ۲۰۱٦, doi: ۱۰,۱۱۰۹/MPEL..۲۰۱٦,۲٦۱٥۲۷۷
[45] K. Ma, D. Zhou, and F. Blaabjerg, "Evaluation and design tools for the reliability of wind power converter system," *Journal of Power Electronics*, vol. ۱٥, no. ٥, pp. ۱۱٥۷--۱۱٤۹, ۲۰۱٥, doi: ۱۰,٦۱۱۳/JPE..۲۰۱٥,۱٥,٥,۱۱٤۹
[46] M. Pecht and A. Dasgupta, "Physics-of-failure: an approach to reliable product development," pp. ٤--۱, doi: ۱۰,۱۱۰۹/IRWS..۱۹۹٥,٤۹۳٥٦٦
[47] W. Huai, M. Liserre, and F. a. Blaabjerg, "Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. ۲, no. ۱, pp. ۱۱٤--۹۷, ۲۰۱٤, doi: ۱۰,۱۱۰۹/JESTPE..۲۰۱۳,۲۲۹۰۲۸۲
[48] D. Zhou, H. Wang, F. Blaabjerg, S. K. Kor, and D. Blom-Hansen, "System-level reliability assessment of power stage in fuel cell application," ۲۰۱٦, doi: ۱۰,۱۱۰۹/ECCE..۲۰۱٦,۷۸٥٥٤۹۲
[49] X. Perpina, X. Jorda, M. Vellvehi, J. Rebollo, and M. Mermet-Guyennet, "Long-term reliability of railway power inverters cooled by heat-pipe-based systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. ٥۸, no. ۷, pp. ۲٦۷۲--۲٦٦۲, ۲۰۱۱, doi: ۱۰,۱۱۰۹/TIE..۲۰۱۰,۲۰۸۷۲۹۸
[50] D. Hirschmann, D. Tissen, and S. a. Schroder, "Reliability prediction for inverter in hybrid electrical vehicles," *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. ۲۲, no. ٦, pp. ۲٥۱۷--۲٥۱۱, .۲۰۰۷
[51] R. Borgos, G. Chen, F. Wang, D. Boroyevich, and W. G. a. Odendaal, "Reliability-oriented design of three-phase power convrters for aircraft applications," *IEEE Trans. on Aerosp. and Electron. Sys*, vol. ٤۸, no. ۲, pp. ۱۲٦۳--۱۲٤۹, .۲۰۱۲
[52] A. Sangwongwanich, Y. Yang, D. Sera, and F. Blaabjerg, "Lifetime evaluation of grid-connected PV inverters considering panel degradation rates and installation sites," *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. ۳۳, no. ۲, pp. ۱۲۳٦--۱۲۲٥, .۲۰۱۸
[53] K. Ma, M. Liserre, and T. a. Kerekes, "Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. ۳۰, no. ۲, p. IEEE Trans. Power Electron, .۲۰۱٥

[54] H. Wang, P. Davari, H. Wang, D. Kumar, F. Zare, and F. Blaabjerg, "Lifetime estimation of DC-link capacitors in adjustable speed drives under grid voltage unbalances," *IEEE Trans. Power Electron,* vol. ٣٤, no. ٥, pp. ٤٠٧٨--٤٠٦٤, .٢٠١٩

[55] Y. Zhang, H. Wang, Z. Wang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "The impact of mission profile models on the predicted lifetime of IGBT modules in the modular multilevel converter," vol. ٢٠١٧-January, pp. ,٢٠١٧ ,٧٩٨٥--٧٩٨٠doi: ١٠,١١٠٩/IECON..٢٠١٧,٨٢١٧٣٩٩

[56] A. Sangwongwanich, D. Zhou, E. Liivik, and F. Blaabjerg, "Mission profile resolution impacts on the thermal stress and reliability of power devices in PV inverters," *Microelectronics Reliability,* vol. ,٩٠-٨٨pp. ١٠٠٧--١٠٠٣, ٢٠١٨, doi: ١٠,١٠١٦/j.microrel..٢٠١٨,٠٦,٠٩٤

[57] G. Zhang, D. Zhou, F. Blaabjerg, and J. Yang, "Mission profile resolution effects on lifetime estimation of doubly-fed induction generator power converter," vol. ٢٠١٨-January, pp. ٦--١, ,٢٠١٨doi: ١٠,١١٠٩/SPEC..٢٠١٧,٨٣٣٣٦٥٧

[58] Y. Zhang, H. Wang, Z. Wang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Impact of lifetime model selections on the reliability prediction of IGBT modules in modular multilevel converters," vol. ٢٠١٧-January, pp. ٤٢٠٧--٤٢٠٢, ٢٠١٧, doi: ١٠,١١٠٩/ECCE..٢٠١٧,٨٠٩٦٧٢٨

[59] "DfR Solutions," ed.

[60] "Center for Advanced Life Cycle Engineering," ed.

[61] "ReliaSoft," ed.

[۶۲] ح. جباری, "ارزیابی قابلیت اطمینان مبدلهای الکترونیک قدرت انواع توربین باد متصل به شبکه," کارشناسی ارشد, دانشگاه فردوسی مشهد, ۱۳۹۱.

[63] M. A. M. Farhadi, B. Mohammadi-lvatloo, "Reliability Analysis of Component Level Redundant Topologies for solid state Fault Current Limiter," *International Journal of Electronics,* sep .٢٠١٧

[64] M. S. Z. M.H.Babayi Nozadian, M. Aapour" ,The Effect of Series and Shunt Redundancy on Power Semiconductor Reliability," *Journal of Power Electronics,* vol. ١٦, pp. ١٤٣٧-١٤٢٦, July .٢٠١٦

[65] M. A. F. Abbasi, "Reliability and Cost Optimization of Multi-input Bidirectional DC/DC Converter Implemented in Renewable Sources," *Majlesi Journal of Electrical Engineering,* vol. ١٢, Decemer .٢٠١٨

[۶۶] ت. ر. ح. ح. م. ص. م. ع. گ. ق. پتیان, "تحلیل قابلیت اطمینان آرایشهای مازاد متداول برای کلیدهای قدرت وارائه ساختار مازاد جدید," مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران, بهار ۱۳۹۷.

[67] M. T. F. M. Farhadi, M. abapour, M. Tarafdar Hagh, "DC-AC Converter-Fed Induction Motor Drive with Fault-Tolerant Capaility under Open- and Short-Circuit Switch Failures," *IEEE Transaction on Power Electronics,* .٢٠١٧

[68] M. N .M.M. Haji-Esmaeili, H. Khoun-Jahan, M. Aapour, "Fault-tolerant structure for cascaded H-bridge multilevel inverter and reliability evaluation," *IET Power Electronics,* April .٢٠١٦

[69] M. N. M. M. Haji-Esmaeili, H. Khoun-Jahan, M. Abapour, "Fault-Tolerant and Reliable Structure for Cascaded Quasi-Z Source DC-DC Converter," *IEEE Transaction on Power Electronics,* .٢٠١٦

[70] F. P. H. Khoun Jahan, M. Abapour, S. Tohidi, "Reconfigurable Multilevel Inverter with Fault Tolerant Ability," *IEEE Transaction on Power Electronics,* .۲۰۱۷

[71] H. H. T. Rahimi, M. Sabahi, G. B Gharehpetian, M. Abapour, "Reliability evaluation of a fault-tolerant three-phase interleaved DC-DC boost converter," *Transactions of the Institute of Measurement and Control,* .۲۰۱۸

[72] S. K. K .Pouresmaeil, "Reliability Analysis of High Voltage Diode Bridge Rectifiers To Achieve Fault Tolerance," presented at the Iranian Conference on Electrical Engineering, .۲۰۲۰

[73] M. N. H. Khoun Jahan, M.M. Haji-Esmaeili, M. Abapour, K. Zare, "Low component merged cells cascadedtransformer mmultilevel inverter featuring an menhanced reliability," *IET Power Electronics,* .۲۰۱۷

[74] M. Z. R. Parvari, S. Kaoli, "RCD snubber design based on reliability consideration: A case study for thermal balancing in power electronic converters," *Microelectronics Reliability,* .۲۰۱۸

[75] H. H. T. Rahimi, M. Sabahi, M. Abapour, "A New Three-Phase Soft-Switching-Based Interleaved Boost Converter with High Reliability," *IET Power Electronics,* .۲۰۱٦

[76] A. S. B. M. Akbaria, P.D .Reigosab, F. Iannuzzob, M.T. Bina, "Thermal modeling of wire-bonded power modules considering non-uniform temperature and electric current interactions," *Microelectronics Reliability,* .۲۰۱۸

[77] P. D. R. Mohsen Akbari, Amir Sajjad Bahman, Lorenzo Ceccarelli,Francesco Iannuzzo, and Mohammad Tavakoli Bina, "Enhancement of Thermo-mechanical Behavior of IGBT Modules through Engineered Threshold Voltages," presented at the European Conference on Power Electronics and Applications, .۲۰۱۹

[78] M. Z. S. Mohsenzade, and S. Kaboli, "A Voltage Balancing Scheme for Series IGBTs to Increase Their Expected Lifetime in Pulsed Load Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,* .۲۰۱۹

[79] M. A. F. H. Aghdam, "Reliability and Cost Analysis of Multistage Boost Converters Connected to PV Panels," *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS,* .۲۰۱٦

[80] M. a. M. Farhadi, M. Sabahi, "Failure analysis and reliability evaluation ofmodulation techniques for neutral point clamped inverters—A usage model approach," *Engineering Failure Analysis,* .۲۰۱٦

[81] S. T. A. Sadeghfam, M. Abapour, "Reliability comparison of different power electronic converters for grid-connected PMSG wind turbines," *International Transaction of Electric Engineering System,* .۲۰۱۷

[82] F .T. H. Tarzamni, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Panahandeh Esmaeelnia, "Reliability Analysis of Buck-Boost Converter Considering the Effects of Operational Factors," *International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC),* .۲۰۱۹

[83] M. T. H. F. Hamzeh Aghdam, M. Abapour, "Reliability Evaluation of Two-Stage Interleaved Boost Converter Interfacing PV Panels Based on Mode of Use," *Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC),* .۲۰۱٦

[84] M. T. B. Yousef Firouz, Bahman Eskandari, "Efficiency of three-level neutral-point clamped converters: analysis and experimental validation of power losses, thermal modelling and lifetime prediction," *IET Power Electronics,* .۲۰۱۲

[85] S. K. V. Javadian, "Reliability Assessment of Some High Side MOSFET Drivers for Buck Converter," presented at the International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, .۲۰۱۳

[86] "https://faradars.org/courses/fvctr۹۵۰۳-reliability-and-availability-evaluation-through-markov-model#commentSection."

[87] M. Meinhardt, G. Cramer, B. Burger, and P. Zacharias, “Multi-string-converter with reduced specific costs and enhanced functionality,” *Sol. Energy*, vol. 69, pp. 217–227, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(01)00067-6.

[88] W. Mcmurray, “Inverter Circuits,” US Patent 3207974.

[89] M. Victor, “US Patent Application,” Publication Number US 2005/0286281 A1.

[90] H. Schmidt, C. Siedle, and J. Ketterer, “US7046534B2 - DC/AC converter to convert direct electric voltage into alternating voltage or into alternating current - Google Patents,” US Patent 7046534.

[91] J. Hantschel, “Inverter circuit for extended input voltage range,” DE102006010694.

[92] R. González, J. López, P. Sanchis, and L. Marroyo, “Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 693–697, Mar. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.892120.

[93] T. Kerekes, R. Teodorescu, P. Rodríguez, G. Vázquez, and E. Aldabas, “A New high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 184–191, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2009.2024092.

[94] N. Mohan, T. Undeland, and P. W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition | Wiley*. John Wiley & Sons, 2003.

[95] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, 1981, doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.

[96] P. Knaup, “WO2007048420 INVERTER.”

[97] M. Calais and V. G. Agelidis, “Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE’98 (Cat. No.98TH8357)*, vol. 1, pp. 224–229, doi: 10.1109/ISIE.1998.707781.

[98] T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, C. Klumpner, and M. Sumner, “Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 9, pp. 2202–2211, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2020800.

[99] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, “Power electronics converters for wind turbine systems,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 708–719, doi: 10.1109/TIA.2011.2181290.

[100] J. Rodríguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

[101] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, “Multilevel voltage-source-

converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6. pp. 2930–2945, Dec-2007, doi: 10.1109/TIE.2007.907044.

[102] R. José *et al.*, "Multilevel converters: An enabling technology for high-poer applications," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1786–1817, 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235.

[103] S. Kouro *et al.*, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2049719.

[104] K. Ma, H. Wang, and F. Blaabjerg, "New Approaches to Reliability Assessment: Using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems," *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 28–41, Dec. 2016, doi: 10.1109/MPEL.2016.2615277.

[105] I. Vernica, "Model-based Reliability Analysis of Power Electronic Systems," Aalborg Universitet, 2019.

[106] *Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules*. Germany: ZVEI, 2013.

[107] S. K. Salman and A. L. J. Teo, "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 793–802, May 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.811180.

[108] D. J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: Time-domain simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 311–320, Mar. 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914309.

[109] A. Tapia, G. Tapia, J. Xabier Ostolaza, and J. R. Sáenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 194–204, Jun. 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811727.

[110] T. Ahonen, J. Tamminen, J. Ahola, and J. Kestilä, "Frequency-converter-based hybrid estimation method for the centrifugal pump operational state," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4803–4809, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2176692.

[111] V. Vodovozov, L. Gevorkov, and Z. Raud, "Modeling and Analysis of Pumping Motor Drives in Hardware-in-the-Loop Environment," *J. Power Energy Eng.*, vol. 2, pp. 19–27, 2014, doi: 10.4236/jpee.2014.210003.

[112] "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems | Wiley." [Online]. Available: https://www.wiley.com/en-us/Grid+Converters+for+Photovoltaic+and+Wind+Power+Systems-p-9780470057513. [Accessed: 06-Apr-2021].

[113] A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "High-performance constant power generation in grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 3, pp. 1822–1825, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2465151.

[114] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd Edition | Wiley*. USA: Wiley.

[115] A. M. Hava, R. J. Kerkman, and T. A. Lipo, "A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 5, pp. 1059–1071, 1998, doi: 10.1109/28.720446.

[116] 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 Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 894–903, May 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.921388.

[117] K. Ma, A. S. Bahman, S. Beczkowski, and F. Blaabjerg, "Complete loss and thermal model of power semiconductors including device rating information," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 2556–2569, May 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2352341.

[118] M. Musallam, C. Yin, C. Bailey, and M. Johnson, "Mission profile-based reliability design and real-time life consumption estimation in power electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 2601–2613, May 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2358555.

[119] K. Ma and F. Blaabjerg, "Multi-timescale modelling for the loading behaviours of power electronics converter," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 2015, pp. 5749–5756, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310467.

[120] I. Vernica, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Optimal derating strategy of power electronics converter for maximum wind energy production with lifetime information of power devices," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 267–276, Mar. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2745714.

[121] M. Musallam and C. M. Johnson, "An efficient implementation of the rainflow counting algorithm for life consumption estimation," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 61, no. 4, pp. 978–986, 2012, doi: 10.1109/TR.2012.2221040.

[122] L. R. GopiReddy, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, and J. O. P. Pinto, "Rainflow Algorithm-Based Lifetime Estimation of Power Semiconductors in Utility Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3368–3375, Jul. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2407055.

[123] "Standard practices for cycle counting in fatigue analysis." ASTM, 1985.

[124] "Lifetime calculation for power modules, application and theory of models and counting methods | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore." [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6020520. [Accessed: 06-Apr-2021].

[125] H. OKAMURA, S. SAKAI, and I. SUSUKI, "CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE UNDER RANDOM LOADS," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 1, no. 4, pp. 409–419, May 1979, doi: 10.1111/j.1460-2695.1979.tb01328.x.

[126] S. S. Manson and T. J. Dolan, "Thermal Stress and Low Cycle Fatigue," *J. Appl. Mech.*, vol. 33, no. 4, pp. 957–957, Dec. 1966, doi: 10.1115/1.3625225.

[127] M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, and M. H. Poech, "Fast power cycling test

for IGBT modules in traction application," in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 1997, vol. 1, pp. 425–430, doi: 10.1109/peds.1997.618742.

[128] "Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime | VDE Conference Publication | IEEE Xplore." [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/5755669. [Accessed: 06-Apr-2021].

[129] M. A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue," *J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 3, pp. A159–A164, Sep. 1945, doi: 10.1115/1.4009458.

[130] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, and R. De Doncker, *Semiconductor power devices: Physics, characteristics, reliability*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[131] G. Zeng, R. Alvarez, C. Kunzel, and J. Lutz, "Power cycling results of high power IGBT modules close to 50 Hz heating process," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe*, 2019, doi: 10.23919/EPE.2019.8915070.

[132] G. Zeng, C. Herold, T. Methfessel, M. Schafer, O. Schilling, and J. Lutz, "Experimental Investigation of Linear Cumulative Damage Theory with Power Cycling Test," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4722–4728, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2859479.

[133] P. Steinhorst, T. Poller, and J. Lutz, "Approach of a physically based lifetime model for solder layers in power modules," in *Microelectronics Reliability*, 2013, vol. 53, no. 9–11, pp. 1199–1202, doi: 10.1016/j.microrel.2013.07.094.

[134] H. S. H. Chung, H. Wang, F. Blaabjerg, and M. Pecht, *Reliability of power electronic converter systems*. 2016.

[135] M. P. M. Ciappa, "Some reliability aspects of IGBT modules for high-power applications," 2000, doi: 10.3929/ethz-a-004042135.

[136] U. Scheuermann and R. Schmidt, "Impact of load pulse duration on power cycling lifetime of Al wire bonds," in *Microelectronics Reliability*, 2013, vol. 53, no. 9–11, pp. 1687–1691, doi: 10.1016/j.microrel.2013.06.019.

[137] M. Schäfer, "Comparison between active and passive thermal cycling stress with respect to substrate solder reliability in IGBT modules with Cu baseplates," 2014.

[138] R. Bayerer, T. Herrmann, T. Licht, and J. Lutz, "Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime | VDE Conference Publication | IEEE Xplore," 2008. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/5755669. [Accessed: 06-Apr-2021].

[139] M. Ciappa, P. Malberti, W. Fichtner, P. Cova, L. Cattani, and F. Fantini, "Lifetime extrapolation for IGBT modules under realistic operation conditions," *Microelectron. Reliab.*, vol. 39, no. 6–7, pp. 1131–1136, Jun. 1999, doi: 10.1016/S0026-2714(99)00160-2.

[140] U. Scheuermann and R. Schmidt, *A New Lifetime Model for Advanced Power Modules with Sintered Chips and Optimized Al Wire Bonds*. Stuttgart, Germany: Mesago PCIM GmbH, 2013.

[141] “The Road to the Next Generation Power Module - 100% Solder Free Design | VDE Conference Publication | IEEE Xplore.” [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/5755680. [Accessed: 06-Apr-2021].

[142] R. Schmidt and U. Schmidt, “Separating Failure Modes in Power Cycling Tests - IEEE Conference Publication.” [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6170628. [Accessed: 27-Jan-2021].

[143] K. Ma, U. M. Choi, and F. Blaabjerg, “Prediction and Validation of Wear-Out Reliability Metrics for Power Semiconductor Devices with Mission Profiles in Motor Drive Application,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 11, pp. 9843–9853, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2798585.

[144] L. A. Escobar and W. Q. Meeker, “A review of accelerated test models,” *Stat. Prepr.*, 2006.

[145] M. Dbeiss, Y. Avenas, H. Zara, L. Dupont, and F. Al Shakarchi, “A Method for Accelerated Aging Tests of Power Modules for Photovoltaic Inverters Considering the Inverter Mission Profiles,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 12, pp. 12226–12234, Dec. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2907218.

[146] A. Antonopoulos, S. Drarco, M. Hernes, and D. Peftitsis, “Challenges and strategies for a real-time implementation of a rainflow-counting algorithm for fatigue assessment of power modules,” in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2019, vol. 2019-March, pp. 2708–2713, doi: 10.1109/APEC.2019.8722284.

[147] K. Mainka, M. Thoben, and O. Schilling, “Lifetime calculation for power modules, application and theory of models and counting methods | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore,” in *in Proc. 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, 2011, p. Birmingham, U.K.

[148] C. Li, Z. Tan, Q. Huang, W. Nie, and J. Yao, “Lifetime evaluation of IGBT module in DFIG considering wind turbulence and nonlinear damage accumulation effect,” in *Proceedings of 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, AUTEEE 2019*, 2019, pp. 472–476, doi: 10.1109/AUTEEE48671.2019.9033443.

[149] M. Shahzad, V. S. Bharath K., M. A. Khan, and A. Haque, “Review on Reliability of Power Electronic Components in Photovoltaic Inverters,” in *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation, ICPECA 2019 - Proceedings*, 2019, vol. 2019-November, doi: 10.1109/ICPECA47973.2019.8975585.

[150] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, “An industry-based survey of reliability in power electronic converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2124436.

[151] C. V. Pop, A. Buzo, G. Pelz, H. Cucu, and C. Burileanu, “The Estimation of the Lifetime Variation for Power Devices,” *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 19, no. 4, pp. 654–663, Dec. 2019, doi: 10.1109/TDMR.2019.2940672.

[152] X. Perpina, X. Jorda, M. Vellvehi, J. Rebollo, and M. Mermet-Guyennet, “Long-term reliability of railway power inverters cooled by heat-pipe-based systems,” *IEEE Trans.*

Ind. Electron., vol. 58, no. 7, pp. 2662–2672, Jul. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2087298.

[153] M. Matsuichi and T. Endo, "Fatigue of metals subjected to varying stress," *undefined*, 1968.

[154] A. Nieslony, "Rainflow Counting Algorithm." MATLAB File Exchange Central, 2003.

[155] S. D. Downing and D. F. Socie, "Simple rainflow counting algorithms," *Int. J. Fatigue*, vol. 4, no. 1, pp. 31–40, Jan. 1982, doi: 10.1016/0142-1123(82)90018-4.

www.nri.ac.ir

تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید دادمان (پونک باختری) - صندوق پستی ۵۱۷-۱۴۶۶۵
تلفن : ۸۸۰۷۹۴۰۰ - فاکس : ۸۸۰۷۸۲۹۶