

طراحی و بهینه‌سازی گرماگیر در مبدل خورشیدی شامل اینورتر تک فاز تمام پل و مبدل بوست

ائل یار فهیما^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمدعلی شمس‌نژاد^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - elyarfahima@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mshamsi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، متوسط تلفات توان در یک مبدل افزایش‌دهنده بوست، در سه حالت هدایتی پیوسته، پیوسته اجباری و ناپیوسته و تلفات متوسط توان مبدل اینورتر نیز با روش کلید زنی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی در نرم‌افزار متلب به‌دقت تخمین زده و محاسبه می‌شود. سپس توسط یک روش کلی، معادلات انتقال حرارت بر سه روش همرفت، رسانش و تشعشع در یک گرماگیر با پره‌های موازی خنک‌شونده توسط سیستم‌های همرفت آزاد و اجباری، بررسی می‌شود و این دو روش باهم مقایسه می‌گردد. به‌منظور افزایش عملکرد حرارتی با تبدیل‌شدن مدل حرارتی به یک مدار هم‌ارز الکتریکی از طریق محاسبه و بهینه‌سازی مقاومت حرارتی گرماگیر تا هوا، تمام پارامترهای هندسی گرماگیر با استفاده از یک الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات مقید از بین چندین طراحی مختلف با در نظر گرفتن حجم گرماگیر به‌عنوان قید، تعیین می‌شوند. برای طراحی هر چه مطلوب‌تر سیستم خنک‌کننده و افزایش قابلیت اطمینان اجزا، چیدمان مناسب اجزا توسط یک روش ریاضی و ابتکاری بررسی می‌گردد. در این روش که خصوصیات خاص خود را از نظر دقت، سازگاری و پایداری دارد، ابتدا توزیع دمایی توسط روش اختلاف محدود روی سطح پایه گرماگیر انجام گرفته و سپس دمای نقاط داغ توسط الگوریتم مذکور کاهش می‌یابد. در سیستم خنک‌کنندگی همرفت اجباری نسبت به همرفت طبیعی، دما و بازده مبدل به‌طور متوسط به ترتیب ۴۶ درجه سلسیوس و ۰/۳۷ درصد کاهش می‌یابند و حجم سیستم خنک‌کننده همرفت اجباری ۳ برابر حجم گرماگیر در همرفت آزاد است.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهینه، مبدل الکترونیک قدرت، همرفت آزاد، گرماگیر، ازدحام ذرات.

Design and Optimization of Heat Sink in Solar Converter Containing of H-Bridge Single Phase Inverter and Boost Converter

Elyar Fahima¹, MSc Student, Mohammad Ali Shamsi nejad², Associate Professor

1- University of Birjand, Birjand, Iran, Email: elyarfahima@yahoo.com

2- University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mshamsi@birjand.ac.ir

Abstract: In this paper, the average power losses in a nonsynchronous boost converter are carefully estimated and calculated at three continuous, discontinuous and forced continuous conductive mode and average power losses of the H-bridge single phase inverter is estimated by sinusoidal pulse width modulation method. Then by a general approach, thermal model and Heat transfer equations are discussed in a natural convection and forced convection with parallel fins and these two methods are compared together. In order to increase thermal performance, thermal model change to electrical equivalent circuit and heat sink to air thermal resistance optimized, all of geometric parameters determined by a constrained particle swarm evolutionary algorithm among several designs. In order to optimize design of cooling and increase reliability of the components, the suitable arrangement examined by a mathematical and innovative approach. In this method which has its own characteristics in terms of accuracy, compatibility and stability, at first, temperature distributed on heat sink baseplate and then decrease hot spots temperature by optimization algorithm above mentioned. In forced convection compared to free convection cooling system, converter temperature and efficiency decrease respectively 46 Celsius degrees and 0.37 percent and forced convection cooling system volume tripled than free convection.

Keywords: Optimize Design, power electronic converter, natural convection, heat sink, particle swarm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۲ و ۱۳۹۷/۳/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۲۵

نام نویسنده مسئول: محمدعلی شمس‌نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - شوکت‌آباد - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

امروزه الکترونیک قدرت جایگاه مهمی در فناوری مدرن دارد و در تجهیزات توان بالای گوناگون به کار گرفته می‌شود. افزایش مصرف انرژی الکتریکی، مسائل آلودگی هوا و محدودیت سوخت‌های فسیلی باعث شده تا استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در اولویت قرار بگیرد [۱]. یکی از این منابع انرژی خورشید است. افزایش دما در تجهیزات الکترونیک قدرت سبب تقسیم توان نابرابر تجهیزات سری و موازی داخل قطعه، کاهش ولتاژ شکست، افزایش جریان ناشی، افزایش زمان کلید زنی و افزایش تلفات و کاهش بازده تجهیز می‌گردد [۲]. در کاربردهای توان بالا، استفاده از اجزای الکترونیک قدرت بدون استفاده از سیستم خنک‌کننده ممکن نیست و گرمای تولیدی باید از اجزا پراکنده شوند. روش‌های گوناگونی برای خنک‌کنندگی تجهیزات الکترونیک وجود دارند. در توان‌های بالا از خنک‌کنندگی با آب به علت هزینه‌های بالای مانیتورینگ و اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی آب از جمله مقاومت ویژه در سیستم خنک‌کننده و مشکلات نگهداری آن استفاده نمی‌گردد. از خنک‌کننده اجباری هوا^۱ با فن (فعال) نیز به علت سبکی و وزن فن و تأثیر بازده فن بر بازده کل سیستم در صنعت به صورت اندک در کاربردهای توان بالا استفاده می‌گردد [۳ و ۴]. به همین دلیل برای سیستم‌های با بازده بالا و مقاومت حرارتی نسبتاً بزرگ‌تر، خنک‌سازی طبیعی یا آزاد هوا^۲ (غیرفعال) گزینه بهتری است. خنک‌سازی با هوا ساده‌ترین روش کنترل درجه حرارت است که به صورت گسترده برای سیستم‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌شود. مزیت خنک‌سازی با هوا در دسترس بودن و کاربرد راحت آن است [۴ و ۵]. مبدل‌های الکترونیک قدرت تجهیزات حیاتی در صنعت برق هستند که بسته به کاربردشان تلفات بزرگی را تولید می‌کنند. طراحی یک مبدل با تلفات بالاتر نیازمند یک گرماگیر با مقاومت حرارتی بهینه‌شده کمتر است [۵]. الگوریتم ازدحام ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فرا کاوشی است که یک روش محاسباتی تکاملی موازی برای حل مسائل بهینه‌سازی است که در استفاده از آن رفتار جمعی حیوانات الهام گرفته شده است. این الگوریتم برای دستیابی به جواب از تعدادی ذره استفاده می‌کند که در سرتاسر فضای مسئله در حال گردش هستند. هر ذره از یک موقعیت و سرعت تصادفی تعیین شده تشکیل می‌شود. که جواب نهایی در حقیقت بهترین محل، ذره‌ای است که دور از جمعیت دیگر است. در مسائل کاربردی برای جواب مسئله قید در نظر گرفته می‌شود که در آن بازه بهینه گردد [۶]. در سال‌های اخیر طراحی بهینه گرماگیر اهمیت فراوانی یافته و نویسندگان مقالات پارامترهای مختلف گرماگیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۱] مقاومت حرارتی گرماگیر ثابت فرض شده و وزن گرماگیر در همرفت اجباری با روش المان محدود بهینه‌شده است. در بسیاری از مقالات از جمله [۲] فقط نرخ شکست چیدمان اجزا مورد بررسی قرار گرفته و طول سیم بندی کاهش یافته است. در [۵]، یک مبدل ۱۰ کیلووات توسط روش همرفت اجباری، حجم گرماگیر

بهینه‌شده است. در [۶] با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، با هدف بیشینه کردن تلفات به بررسی گرماگیر پرداخته شده است. در [۷] به منظور طراحی بهینه طول سیم بندی استفاده شده در بین اجزا بهینه‌شده است. در [۸] پارامترهای هندسی گرماگیر به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی در چند مرحله انجام می‌پذیرد و در هر مرحله یک پارامتر بررسی گردیده تا در نهایت جواب بهینه با چشم‌پوشی از انتقال حرارت تابشی به دست آمده است.

مدارات الکترونیک قدرت سطوح و انواع مختلف شکل موج ولتاژ و جریان را به یکدیگر تبدیل می‌کنند. مبدل ولتاژ مستقیم به ولتاژ متناوب سینوسی به عنوان اینورتر شناخته می‌شود. یکی از کلیدهای قدرت رایج مورد استفاده در این نوع مبدل‌ها، کلیدهای قدرت IGBT است. دو سر هر IGBT در اینورتر با یک دیود چرخش آزاد به صورت برعکس موازی می‌شود [۸]. مبدل بوست غیر سنکرون، یک مبدل افزایش ولتاژ است و تشکیل شده از تنها یک کلید توان اکتیو (دوسویه)، یک کلید توان پسیو (واکنشی) یا دیود، یک عنصر القایی یا سلف، و یک عنصر ذخیره کننده خازنی است. در مبدل بوست سنکرون از یک MOSFET با افت کم به جای دیود استفاده می‌شود. اگر هدف کاهش سایز مبدل و کارکرد مبدل در بار کامل باشد مبدل بوست سنکرون بازده بالاتری دارد اما برای بارهای متوسط تا سبک مبدل بوست غیر سنکرون کارایی بهتری دارد [۹]. توان ورودی مورد نیاز برای یک مبدل بوست از منابع DC مناسب مثل باتری‌ها، پنل‌های خورشیدی، یکسو کننده‌ها و ژنراتورهای DC می‌تواند تأمین شود. جریان خروجی مبدل بوست کمتر از جریان ورودی یا منبع است. ولتاژ مستقیم خروجی در مبدل بوست در واقع همان ولتاژ مستقیم ورودی در اینورتر است. در اینورتر کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت عملیات کلید زنی را انجام می‌دهند. یکی از کلیدهای قدرت رایج مورد استفاده در اینورترها، کلیدهای قدرت IGBT است که مزایای MOSFET و ترانزیستور معمولی را باهم دارد که برای کاربردهای توان بالا کلید قدرت بسیار مناسبی است.

روش‌های کلید زنی نقش مهمی در کنترل یک مدار قدرت ایفا می‌کند. روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی به خاطر سادگی آن، در صنعت استفاده فراوانی دارد. در این روش موج سینوسی به عنوان سیگنال مرجع و موج مثلی به عنوان سیگنال حامل گرفته می‌شود، این دو موج مقایسه شده و سپس با توجه به دامنه موج سینوسی، پالس‌های مدوله شده به ورودی گیت کلید قدرت فرستاده می‌شود [۱۰]. دو سر هر IGBT در اینورتر با یک دیود هرز گرد^۳ یا فلای بک یا اسنابر به صورت معکوس موازی می‌گردد که کاربرد آن در کلید زنی بار سلفی است. این حالت‌ها در ضریب قدرت هم نقش مهمی ایفا می‌کنند. در بحث تخمین تلفات کلی مبدل‌های DC/DC سنکرون و غیر سنکرون بررسی هر سه حالت هدایتی پیوسته، پیوسته اجباری و ناپیوسته حائز اهمیت بوده و حالتی که ماکزیمم تلفات را در مبدل ایجاد می‌کند به عنوان معیار بررسی تلفات سیستم است. اندازه سلف در

سیم، زیاد بوده و در افزایش تلفات کلی مبدل، بالا رفتن دمای پیوند مبدل و کاهش قابلیت اطمینان کلیدهای قدرت مؤثر است اما مقدار اندوکتانس سلف در مبدل بوست نقش بسیار مهمی در تلفات کلی اجزای مبدل بوست ایفا می‌کند بدین‌صورت که بسته به کاربرد، هرچه مقدار اندوکتانس بالاتر رود تلفات کلید قدرت کاهش می‌یابد. در شکل ۱، این تأثیر در بین مقادیر اندوکتانس ۵ میکروهنری تا ۵ میلی‌هنری نشان داده شده است. لذا سلف‌های کامپوزیتی با مقدار اندوکتانس کمتر برای مبدل مناسب نمی‌باشند. در مبدل ارائه شده از یک سلف با هسته فریت دارای مقدار اندوکتانس ۱ میلی‌هنری استفاده شده است که دور از محل گرماگیر قرار می‌گیرد و به علت تأثیر آن روی دمای پیوند سیستم از تلفات سلفی در تخمین تلفات کلی سیستم صرف‌نظر می‌گردد و فقط تأثیر آن روی تلفات هدایتی و کلید زنی کلیدهای قدرت در نظر گرفته می‌شود. تلفات خازنی در کاربردهای فیلتر و اسنابر نیز به علت داشتن مقاومت معادل سری خیلی کوچک، خیلی ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. طبق شکل ۱، برای انتخاب سلف مناسب برای مدار، مقدار اندوکتانس کمتر از اندوکتانس بحرانی (کارکرد مدار)، حالت انتقالی ناپیوسته بازده بالاتری دارد و حالت پیوسته به سمت ناپایداری و نابودی سیستم میل پیدا می‌کند و در مقادیر اندوکتانس بالاتر از اندوکتانس بحرانی، حالت انتقالی پیوسته به دلیل کمتر بودن میزان هارمونیک و اغتشاش آن کاربرد بالاتری دارد و همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود کاربرد حالت ناپیوسته به‌منظور رعایت اصول و استانداردها به کمتر از ۳۰۰ وات محدود می‌شود. در صورت انتخاب سلف با مقادیر اندوکتانس کمتر از اندوکتانس بحرانی برای حالت هدایتی پیوسته، به‌منظور جبران‌سازی و اینکه سیستم به حالت ناپایدار نرود، فرکانس کلید زنی را باید افزایش داد تا از ۰٫۱ فرکانس قطع فیلتر بیشتر باشد. افزایش فرکانس کلید زنی میزان تلفات کلید زنی را افزایش داده و باعث می‌شود حجم گرماگیر بی‌رویه افزایش یابد که از نقطه‌نظر طراحی چنان مطلوب نیست به همین دلیل تحلیل حالت‌های انتقالی مبدل از اهمیت فراوانی برخوردار است. پارامترهای هندسی گرماگیر با توجه به مقدار اندوکتانس سلف و مقدار فرکانس کلید زنی با توجه به اینکه نقطه کاری مبدل در کدام‌یک از این حالت‌های هدایتی قرار دارد متفاوت است. در شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب ساختار کلی مبدل اینورتر تمام پل تک فاز و مبدل بوست غیر سنکرون نشان داده شده است. عناصر ذخیره‌ساز درجایی دورتر از گرماگیر قرار می‌گیرند که در شکل‌های ۲ و ۳ قطعات قرار گرفته بر روی گرماگیر با رنگ تیره مشخص شده‌اند.

تلفات کلی مبدل بوست خیلی مؤثر است. در اندوکتانس‌های کم جریان سلف برای لحظاتی به مقدار صفر می‌رسد لذا به‌منظور ایجاد تلفات کمتر مبدل در حالت هدایتی DCM کار می‌کند. از مزایای حالت هدایتی DCM می‌توان به کاهش تلفات کلید زنی اشاره کرد. با افزایش اندوکتانس به‌منظور کاهش تلفات، مبدل اغلب در حالت هدایتی پیوسته کار می‌کند. حالت هدایتی DCM در مبدل‌های سنکرون (ماسفت جایگزین شده به‌جای دیود) وجود ندارد و به‌جای حالت فوق، حالت FCCM رخ می‌دهد که جریان سلف مقداری منفی می‌گردد. برای رفع این مشکل در سخت‌افزار مبدل سنکرون از یک مقایسه کننده در خروجی به‌منظور خاموش کردن دیود استفاده می‌کنند که می‌توان از معادلات حالت هدایتی پیوسته برای حالت FCCM استفاده کرد. اگر تلفات بازیابی معکوس مبدل بوست را صرف‌نظر کنیم حالت DCM بازده بالاتری دارد با این‌حال، این حالت ریپل جریان بالاتر و اعوجاج قابل‌توجهی را تولید می‌کند و معمولاً هارمونیک مهم پنجم به دست می‌آید. بنابراین معمولاً کاربردهای بوست DCM، به‌منظور رعایت اصول و استانداردها تا سطوح قدرت ۳۰۰ وات محدود می‌شوند. حالت DCM با فرکانس کلید زنی متغیر مقدار این هارمونیک‌ها را در طیف جریان‌های توزیع شده بالاتر کاهش داده و تمام مشکلات مبدل طراحی شده در این حالت را رفع می‌کند [۱۱].

۴-۱ ساختار کلی

در این مقاله روشی را ارائه می‌دهیم که گرماگیر از نقطه‌نظر انتقال حرارت، حجم، وزن و چیدمان قطعات الکترونیک قدرت بهبود یابد. از طول سیم بندی بین اجزا صرف‌نظر می‌کنیم و فرض می‌کنیم سیم بندی‌ها تلفات خیلی ناچیزی دارند. با ارائه یک روش کلی، پارامترهای هندسی به‌عنوان خروجی سیستم در یک مرحله به دست می‌آید که از نظر سرعت و زمان و دقت بهینه‌سازی بسیار مطلوب است. برای طراحی مبدل کلید قدرت IGBT، مدل FGH60N60UFD با ولتاژ ۶۰۰ ولت و جریان ۶۰ آمپر انتخاب می‌شود. از مزایای این کلید قدرت به امیدانس ورودی بالا، کلید زنی سریع، قابلیت تحمل جریان زیاد، تلفات هدایتی و کلید زنی کم اشاره کرد. دیود انتخاب شده برای مبدل بوست، دیود قدرت اپیتاکسیال مدل FF60UP30DN با ولتاژ ۳۰۰ ولت و جریان ۶۰ آمپر انتخاب می‌شود. از مزایای این دیود می‌توان به زمان بازیابی خیلی سریع، قابلیت بازیابی نرم، ولتاژ مستقیم کم، قابلیت تحمل جریان زیاد، جریان نشستی کم و تلفات کلید زنی کم اشاره کرد. از طرفی در اکثر مبدل‌ها یک‌سوم فضای مبدل را فیلترها و عناصر سلفی با تلفات زیاد اشغال می‌کنند. لذا برای کاهش اندازه فیلتر، فرکانس کلید زنی باید افزایش یابد لذا دیودهای معمولی (سیلیکونی) گزینه مناسبی برای فرکانس‌های بالا نیستند زیرا تلفات کلید زنی بالایی ایجاد می‌کنند که مستقیماً در حجم گرماگیر مؤثر است. لذا دیودهای قدرت اپیتاکسیال با بازیابی سریع، حتی در فرکانس‌های بالا تلفات کمی برای انتقال حامل‌های اکثریت دارند. تلفات کلی عنصر القایی اعم از تلفات هسته، تلفات اهمی و تلفات AC ناشی از اثر پوستی

چیدمان مطلوب منابع تولید حرارت، به دست می‌آید. در بخش ۵ یک نتیجه کلی از مقاله ارائه می‌گردد.

۲- تخمین تلفات مبدل طراحی شده

با توجه به مشخصات مداری مبدل مندرج در جدول ۱، تلفات هدایتی و کلید زنی قطعات الکترونیک قدرت در مدار مبدل، توسط یک الگوریتم تخمین تلفات در نرم‌افزار متلب تعیین شده است و در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. مقادیر تلفات در سه حالت مختلف هدایتی در شکل ۴ نشان داده شده است. تلفات و بازده مبدل اینورتر تمام پل تک فاز در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر نامی و مشخصات عملکردی مبدل مورد مطالعه

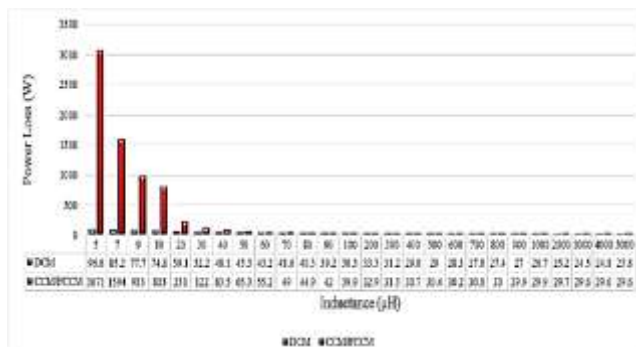
مقدار	علامت اختصاری	نوع کمیت
ولت ۳۵۰	$V_{DC,inv}$	ولتاژ مستقیم ورودی اینورتر
ولت ۲۲۰	$V_{out,inv}$	مقدار اصلی ولتاژ خروجی اینورتر
آمپر ۱۴/۹۸	$I_{out,inv}$	مقدار اصلی جریان خروجی اینورتر
۰/۸۵	m_a	شاخص مدولاسیون
۰/۹۱	PF	ضریب قدرت
هرتز ۵۰	f_r	فرکانس نامی مبدل
۱۰ کیلوهرتز	f_s	فرکانس کلید زنی مبدل
ولت ۱۴۴	$V_{in,boost}$	ولتاژ ورودی مبدل بوست
ولت ۳۵۰	$V_{out,boost}$	ولتاژ خروجی مبدل بوست
آمپر ۲۰	$I_{in,boost}$	جریان ورودی مبدل بوست

جدول ۲: مقادیر تلفات و بازده در مبدل بوست غیر سنکرون

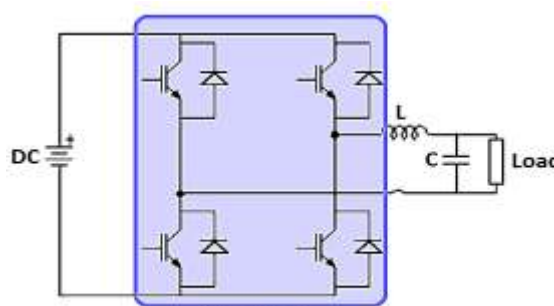
نوع تلفات	FCCM/CCM	DCM
تلفات هدایتی IGBT	۱۷/۷ وات	۱۶/۶۳ وات
تلفات کلید زنی IGBT	۳/۳۷ وات	۱/۹۷ وات
تلفات هدایتی دیود	۸/۵ وات	۷/۹ وات
تلفات کلید زنی دیود	۰/۳ وات	۰/۲۳ وات
تلفات کلی IGBT	۲۱/۰۹ وات	۱۸/۶ وات
تلفات کلی دیود	۸/۸ وات	۸/۱۴ وات
تلفات کلی مبدل	۲۹/۹ وات	۲۶/۷۵ وات
بازده مبدل	۹۸/۹ درصد	۹۹ درصد

جدول ۳- مقادیر تلفات و بازده در مبدل اینورتر تمام پل تک فاز

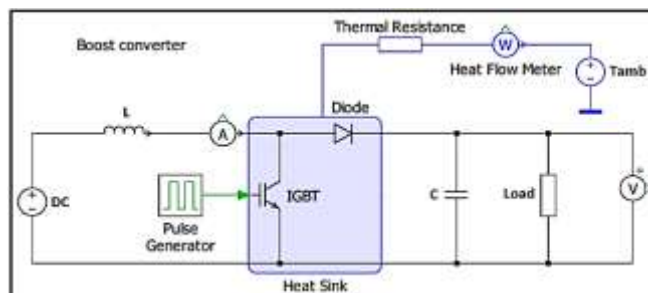
نوع تلفات	DCM
تلفات هدایتی IGBT	۷/۹ وات
تلفات کلید زنی IGBT	۲/۳۶ وات
تلفات هدایتی دیود	۱/۸۸ وات
تلفات کلید زنی دیود	۰/۵۲ وات
تلفات کلی IGBT	۱۰/۲۵ وات
تلفات کلی دیود	۲/۴۱ وات
تلفات کلی اینورتر	۵۰/۶۸ وات
بازده اینورتر	۹۸/۴۸ درصد
بازده کلی سیستم	۹۷/۳۸ درصد



شکل ۱- تأثیر مقدار اندوکتانس روی تلفات کلیدهای قدرت مبدل بوست



شکل ۲- اینورتر تمام پل تک فاز



شکل ۳- ساختار کلی یک مبدل بوست غیر سنکرون [۱۲]

در این مقاله در بخش ۲ مبدل باک بوست در سه حالت انتقالی پیوسته، پیوسته اجباری و ناپیوسته بررسی گردیده و تلفات هدایتی و کلید زنی مبدل تخمین زده می‌شود. مبدل اینورتر تک فاز تمام پل نیز به روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بررسی شده و تلفات هدایتی و کلید زنی این مبدل محاسبه می‌شود. با استفاده از تلفات کل سیستم، بیشترین مقاومت حرارتی قابل تحمل توسط گرماگیر به دست می‌آید. در بخش ۳ انتقال حرارت و مدل حرارتی گرماگیر بررسی می‌شود و پس از پیاده‌سازی مدل حرارتی مورد مطالعه و حل مدار معادل هم‌ارز الکتریکی، پارامترهای هندسی گرماگیر از جمله تعداد کانال، عرض کانال، ارتفاع فین، ضخامت فین، ضخامت پایه اصلی گرماگیر و طول گرماگیر با استفاده از یک الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات مقید (CPSO) از بین چندین طراحی بهینه‌سازی و تعیین می‌شوند. در بخش ۴ با استفاده از روش اختلاف محدود و کم کردن خطا، توزیع دمایی روی سطح گرماگیر انجام گرفته و توسط الگوریتم CPSO دمای نقاط داغ کاهش می‌یابد و شبکه‌های انتخابی برای

حرارتی مطلوب دارند استفاده می‌شود. با حل مدار هم‌ارز الکتریکی دمای پیوند تجهیزات و مبدل به دست می‌آید. هدف سیستم خنک‌کنندگی کاهش دمای پیوند است که در مدار هم‌ارز الکتریکی یک ولتاژ است به همین دلیل کاهش مقاومت گرماگیر تا هوا نقشی اساسی و تعیین‌کننده در کاهش دمای پیوند سیستم دارد. کاهش مقاومت حرارتی گرماگیر باعث ایجاد دمای یکنواخت در پره‌ها و داخل گرماگیر می‌گردد و کارایی سیستم افزایش می‌یابد. در این بخش با یک الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات مقید (CPSO)، مقدار این مقاومت طبق رابطه ۵، به کمترین مقدار رسانده شده است تا هم عملکرد و بازده گرماگیر بهبود یابد و هم میانگین دمای پیوند سیستم کاهش پیدا کند. با افزایش دمای پیوند مقاومت گرماگیر هم تا مقاومت بیشینه افزایش می‌یابد. مقاومت حرارتی گرماگیر ناشی از عامل همرفت برحسب کلوین بر وات طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$R_{th,hs,conv} = R_{th,d} + \frac{I (R_{th,fin} + R_{th,A}) R_{th,a}}{n R_{th,fin} + R_{th,A} + 2R_{th,a}} \quad (1)$$

که در رابطه ۱، $R_{th,d}$ ، $R_{th,A}$ ، $R_{th,fin}$ ، $R_{th,a}$ به ترتیب، مقاومت حرارتی پایه اصلی، مقاومت حرارتی پره، مقاومت حرارتی پره تا هوا، مقاومت حرارتی پایه اصلی تا هوا برحسب کلوین بر وات می‌باشند. مقاومت عامل تابش نیز طبق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$R_{th,hs,rad} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_s + T_a) (T_s^2 + T_a^2)} \quad (2)$$

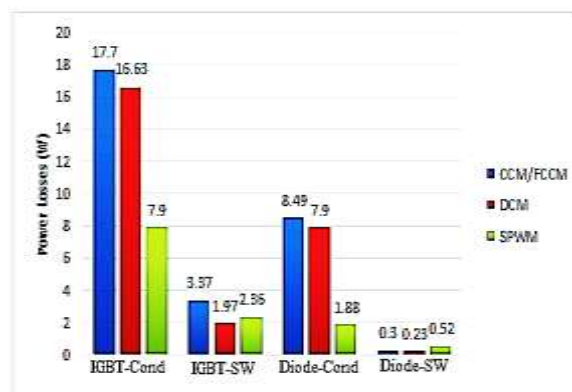
که در رابطه ۲، ε ضریب انتشار آلومینیوم (۰/۹۵)، σ ثابت بولتزمن برابر با مقدار $(5/670.3 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4))$ ، A مساحت جانبی گرماگیر، T_s دمای نقطه داغ گرماگیر برحسب کلوین و T_a دمای محیط برحسب کلوین است. مقاومت حرارتی گرماگیر، معادل دو مقاومت موازی همرفت و تابش است و طبق رابطه ۳ تعیین می‌گردد.

$$R_{th,hs} = \left(\frac{1}{R_{th,hs,conv}} + \frac{1}{R_{th,hs,rad}} \right)^{-1} \quad (3)$$

به‌طور کلی بیشترین مقاومت حرارتی قابل تحمل گرماگیر از رابطه ۴ به دست می‌آید. درواقع این مقاومت، یک مقدار مرزی است که گرماگیر با تمام توان خود به خنک‌کنندگی می‌پردازد و بعدازآن مقدار، نقش گرماگیر در خنک‌کنندگی سیستم صفر است.

$$R_{th,hs,max} = \frac{T_{j,max} - P_{Diode} (R_{th,j-c,D} + R_{th,c-hs,D})}{P_{Diode} + P_{IGBT}} + \frac{-P_{IGBT} (R_{th,j-c,IGBT} + R_{th,c-hs,IGBT}) - T_a}{P_{Diode} + P_{IGBT}} \quad (4)$$

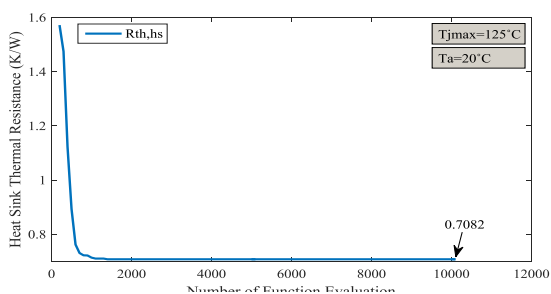
در رابطه ۴، $T_{j,max}$ بیشترین دمای پیوند قابل تحمل IGBT برحسب کلوین، T_a حداکثر دمای هوای اطراف گرماگیر، P_{IGBT} تلفات متوسط IGBT برحسب وات، P_{Diode} تلفات متوسط دیود برحسب وات، $R_{th,j-c}$ مقاومت حرارتی از پیوند تا بدنه برحسب کلوین بر وات و $R_{th,c-hs}$



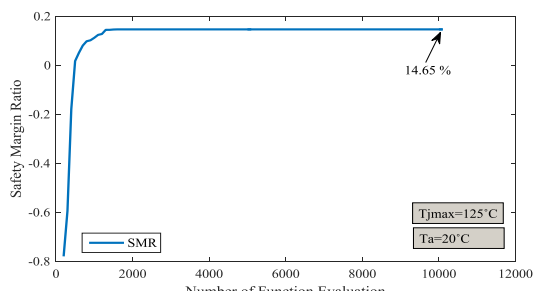
شکل ۴ - تلفات هدایتی و کلید زنی IGBT و دیود

۳- آنالیز الکتریکی و حرارتی گرماگیر

انتقال حرارت در روش همرفت آزاد توسط هوا و بدون فن انجام می‌گیرد که توسط اختلاف چگالی هوای محیط و هوای داخل کانال، هوا به گردش درآمده و گرما را از آلومینیوم جذب کرده به محیط انتقال می‌دهد. با مقاومت حرارتی کمتر یک دمای پره یکنواخت ایجاد می‌شود. ضریب انتقال حرارت همرفت آزاد (h)، بستگی به اعداد بدون بعد نوسلت^۲، گراش^۳، پراتل^۴ و رابلی^۵ دارد. عدد نوسلت نسبت انتقال حرارت همرفت به هدایت را مشخص می‌کند. اگر عدد نوسلت برابر واحد باشد یعنی انتقال تحت هدایت انجام گرفته است. انتقال حرارت تابش نیازی به محیط مادی ندارد و در تمامی اجسام با درجه حرارت بالاتر از صفر مطلق انجام می‌گیرد. در بسیاری از مقالات معتبر از انتقال حرارت تابش صرف‌نظر شده است درحالی‌که دانستن مقدار انرژی تابشی از گرماگیر در درجه حرارت معلوم نیز بسیار مهم است. تعاریف اعداد بدون بعد و روابط مربوط به آن‌ها در [۴] تعیین می‌شود. در این بخش، معادلات ریاضی مربوط به انتقال حرارت بررسی می‌شود. بیشترین مقدار تلفات متوسط (مستقل از زمان) به‌عنوان ورودی تلفات سیستم انتقال حرارت فرض می‌شود تا حاشیه ایمنی مناسبی را در کارکرد مبدل در حالت‌های هدایتی مختلف ایجاد کند. در طراحی یک گرماگیر، مدل حرارتی با روش هم‌ارزی به یک مدار الکتریکی ساده تبدیل می‌شود که دما با ولتاژ، توان با جریان، مقاومت الکتریکی با مقاومت حرارتی، و ظرفیت خازنی با ظرفیت گرمایی معادل‌سازی می‌شوند. این مدل‌سازی در شکل ۵، روی یک گرماگیر نشان داده شده است. تلفات متوسط کلی تجهیزات الکترونیک قدرت قرارگرفته بر روی گرماگیر به‌عنوان یک منبع جریان فرض می‌شود. مقاومت حرارتی پیوند تا بدنه، مقاومت حرارتی بدنه تا گرماگیر معمولاً مقادیر ثابتی هستند اما مقاومت حرارتی گرماگیر تا هوا که به‌عنوان مقاومت حرارتی ذاتی گرماگیر در نظر گرفته می‌شود، مقدار متغیری است. پارامترهای مقاومت متغیر گرماگیر تا هوا در شکل ۶ نشان داده شده است. دمای محیط (عنصر خنک‌کننده) به‌عنوان یک منبع ولتاژ فرض می‌شود. معمولاً برای دست‌یابی به حاشیه ایمنی بالاتر سیستم، بیشترین دمای محیط در نظر گرفته می‌شود. برای بهبود قابلیت انتقال حرارت بین بدنه و گرماگیر از گریس‌های سیلیکون که خاصیت عایق الکتریکی و هدایت



شکل ۷ - کاهش مقدار بهینه مقاومت حرارتی گرماگیر



شکل ۸ - نرخ افزایش نسبت حاشیه ایمنی مبدا

در الگوریتم ازدحام ذرات به منظور کم کردن تخطی، معمولاً یک ضریب جریمه در نظر گرفته می‌شود. با تخطی جواب خارج از آن بازه، مقدار ضریب جریمه باید افزایش یابد تا جواب بهینه در آن بازه به دست آید. در شکل ۹ یک نمودار گردشی کلی از مراحل طراحی و بهینه‌سازی گرماگیر ارائه شده است. در شکل ۷ مقاومت حرارتی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات مقید در تعداد ۱۰۰۰۰ ارزیابی بهینه شده است. در صورت کارکرد غیر صحیح مبدا (مشکلات فرکانس، اعوجاج، نویز و...) در تلفات، نوسان ایجاد می‌شود و تلفات متوسط مبدا دچار تغییراتی می‌گردد لذا نسبت حاشیه ایمنی^۱ (SMR)، یکی از مهم‌ترین معیارها برای تصمیم‌گیری طراحان در انتخاب راه‌حل‌های مناسب برای مقابله با جلوگیری از زیان‌های احتمالی سیستم محسوب می‌شود. هر چه این ضریب بالاتر باشد احتمال خطر از نظر تحمل زیان، کمتر است و امنیت سیستم بالاتر می‌رود. در شکل ۸ نسبت حاشیه ایمنی مبدا با کاهش مقاومت حرارتی گرماگیر، افزایش یافته است. معمولاً با افزایش ابعاد گرماگیر نسبت حاشیه ایمنی افزایش می‌یابد اما افزایش ابعاد گرماگیر بسته به نوع مبدا مورد استفاده در گرماگیر از نظر بهینه‌سازی حجم و وزن و قیمت، اقتصادی نیست و تا یک حدی می‌تواند مورد قبول طراحان واقع شود. در شکل ۸ نسبت حاشیه ایمنی مبدا با کاهش مقاومت حرارتی گرماگیر و در نظر گرفتن حجم مطلوب گرماگیر، در تعداد ۱۰۰۰۰ ارزیابی تا ۱۴/۶۵ درصد افزایش یافته است. در شکل ۹ نمودار گردشی کلی طراحی و بهینه‌سازی گرماگیر توسط الگوریتم ذرات که عملکرد بسیار بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد نشان داده شده است.

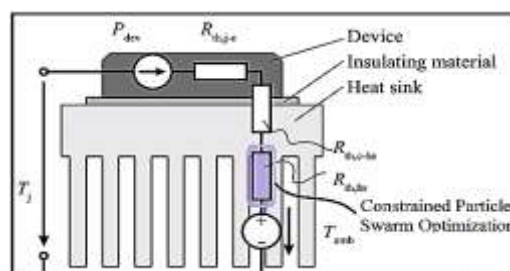
مقاومت حرارتی بدنه تا گرماگیر تجهیز بر حسب کلون بر وات است. حداکثر دمای محیط برای تعیین حداقل مقدار ضریب انتقال حرارت نیز استفاده می‌شود. در نظر گرفتن بالاترین مقدار برای حداکثر دمای محیط از نظر بهینه‌سازی وزن، حجم و قیمت مطلوب نیست و در صورت افزایش میزان دمای محیط از دمای حداکثر، نسبت حاشیه ایمنی مبدا مدنظر خواهد بود که هر چقدر این ضریب مقدار بیشتری داشته باشد نوسانات دمای محیط را جبران خواهد کرد. بهینه‌سازی مقاومت حرارتی گرماگیر در یک بازه محدود با در نظر گرفتن حجم مطلوب گرماگیر طبق رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$\min(R_{th,hs} + \alpha(\max(\frac{R_{th,hs}}{R_{th,hs,max}} - 1, 0)))$$

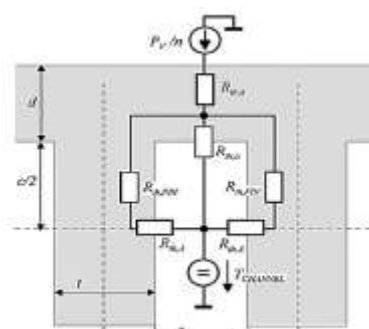
$$0 \leq R_{th,hs} \leq R_{th,hs,max} \quad (5)$$

$$\min(A_{Baseplate} - 2A_{Semiconductors})$$

که در رابطه ۵، α ضریب جریمه^۱ در میزان تخطی مقاومت حرارتی گرماگیر است. $A_{Baseplate}$ مساحت پایه اصلی گرماگیر بر حسب مترمربع و $A_{Semiconduct}$ مساحت تمامی اجزایی که بر روی سطح گرماگیر قرار می‌گیرند.

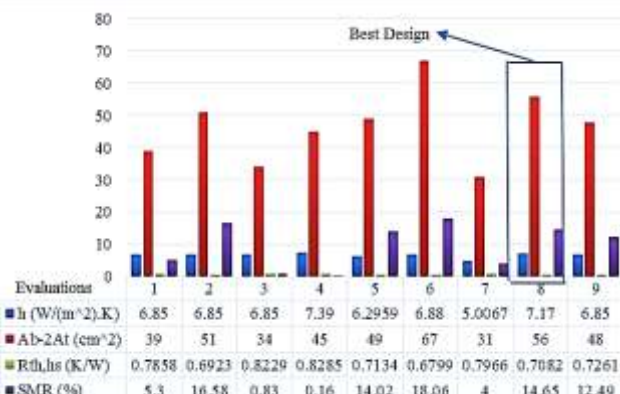


شکل ۵ - مدار معادل الکتریکی یک سیستم حرارتی [۴]



شکل ۶ - عناصر تأثیرگذار در مقاومت‌های حرارتی همرفت و هدایتی گرماگیر [۵]

وزن گرماگیر	۰/۷۹۵ کیلوگرم
نسبت حاشیه ایمنی	۱۴/۶۵ درصد
بازده فین	۸۶/۹۵ درصد
ضریب انتقال هم رفت متوسط	۷/۱۷ وات بر مترمربع کلویین
عدد ناسلت متوسط	۲/۰۵
بیشترین دمای قابل تحمل مبدل	۱۲۵ درجه سلسیوس
متوسط دمای هوای اطراف مبدل	۲۰ درجه سلسیوس
متوسط سرعت هوای داخل کانال	۰/۰۰۵ متر بر ثانیه
بیشترین مقاومت حرارتی قابل تحمل برای گرماگیر	۰/۸۲۹۸ کلویین بر وات



شکل ۱۰ - طراحی‌های مختلف گرماگیر در هم رفت آزاد



شکل ۹ - نمودار گردش کلی طراحی و بهینه‌سازی گرماگیر

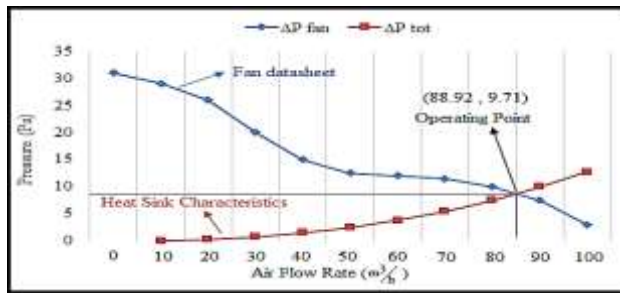
۳-۴ آنالیز حرارتی هم رفت اجباری

در توان‌های بالاتر به علت ایجاد تلفات توان بسیار بالا، اختلاف چگالی بین هوای کانال و هوای محیط دیگر کارساز نیست و به‌منظور ایجاد گردش هوا در داخل کانال از یک فن (دمنده) در خنک‌کنندگی اجباری استفاده می‌شود. میزان حد مجاز طراحی گرماگیر برای سیستم همرفت طبیعی ۵۰۰ وات است. در همرفت اجباری مقاومت حرارتی گرماگیر وابستگی شدیدی به سرعت هوای گردش در داخل کانال دارد. با توجه به وزن و حجم قابل توجه فن و تأثیر توان فن در بازده کلی سیستم پیدا کردن یک فن مناسب برای این نوع خنک‌کنندگی و دستیابی به ابعاد بهینه گرماگیر برحسب همرفت اجباری، نیاز به یک طراحی قدرتمند بر اساس معادلات حرارتی خاص احساس می‌شود ولی از آنجایی که هدف این مقاله مقایسه دو سیستم خنک‌کنندگی است لذا محدوده پارامترهای هندسی (تنظیم پارامتر) گرماگیر به‌دست‌آمده در همرفت طبیعی را به‌عنوان مرجع برای همرفت اجباری فرض می‌کنیم و توسط الگوریتم CPSO، مقاومت حرارتی گرماگیر را به مقاومت حرارتی هم رفت طبیعی میل می‌دهیم تا سرعت جریان هوای داخل کانال گرماگیر مشخص شود. معیار اصلی مقایسه دو سیستم، سرعت جریان گردش هوا در داخل کانال‌ها خواهد بود که در همرفت طبیعی توسط اختلاف چگالی هوای داخل کانال و هوای محیط اطراف گرماگیر و در همرفت اجباری توسط فن ایجاد می‌شود. در شکل ۱۱ میزان این تغییرات و رسیدن به مقاومت حرارتی همرفت طبیعی نشان داده شده است که مقدار نرخ جریان هوا در این حالت ۰/۰۲۴۷ مترمکعب بر ثانیه است. در شکل ۱۲ نیز نسبت حاشیه ایمنی مبدل در سیستم

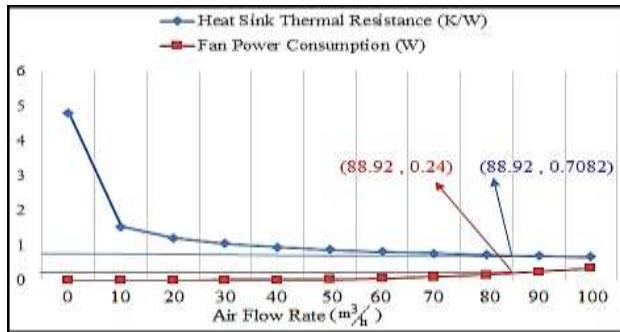
آلومینیوم با ضریب انبساط حرارتی نسبتاً بالا برای طراحی‌های با ساختار بزرگ مناسب نیست ولی برای گرماگیرهای در ابعاد کوچک با توجه به قیمت، وزن مخصوص و رسانایی مناسب در صنعت کاربرد زیادی دارد. لذا مواد تشکیل‌دهنده گرماگیر طراحی‌شده از آلومینیوم است. با مشخص کردن محدوده تغییرات پارامترها در قسمت تنظیم پارامتر الگوریتم و بهینه کردن تابع هدف، مقدار پارامترهای بهینه مشخص می‌شود. در شکل ۱۰ چند نمونه از خروجی الگوریتم توسط مشخصات مندرج در زیر هر طراحی، باهم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد طراحی شماره ۸، به دلیل حجم مطلوب و اقتصادی بودن طراحی، داشتن ضریب انتقال هم رفت بهتر و ضریب حاشیه ایمنی بالاتر به‌عنوان طراحی مطلوب در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۴، پارامترهای طراحی بهینه نشان داده شده است.

جدول ۴ - مشخصات طراحی بهینه

پارامترهای گرماگیر	مقدار
ضخامت فین (پره)	۰/۰۰۱۵ متر
عرض کانال	۰/۰۰۴۵ متر
ارتفاع فین	۰/۱ متر
ضخامت پایه	۰/۰۰۳ متر
طول گرماگیر	۰/۰۸ متر
تعداد کانال	۲۱
عرض گرماگیر	۰/۱۲۷۵ متر
مقاومت حرارتی گرماگیر	۰/۷۰۸۲ کلویین بر وات
حجم گرماگیر	۲۹۴/۶ سانتی‌متر مکعب



شکل ۱۳ - اختلاف فشار کلی سیستم و اختلاف فشار فن



شکل ۱۴ - مقاومت حرارتی گرماگیر و توان مصرفی فن

مقدار سرعت جریان هوا و اختلاف فشار کلی سیستم (استاتیک) در انتخاب یک فن مناسب مؤثر می‌باشند. برای اینکه ولتاژ و ولت ورودی مبدل ۱۴۴ ولت مستقیم و خروجی مبدل ۲۲۰ ولت متناوب است، به‌منظور جلوگیری از ایجاد تلفات اضافی و جلوگیری از ایجاد مبدل اضافی دیگری در مدار سیستم، از یک فن AC محوری مدل 9956M استفاده می‌کنیم که می‌تواند در داخل کانال مقدار سرعت جریان هوای مذکور را ایجاد کند. بر این اساس مشخصات کلی سیستم خنک‌کنندگی اجباری در جدول ۴ آورده شده است. برای یافتن نقطه کاری سیستم، معمولاً مشخصه $\Delta P-V$ فن موجود در برگه اطلاعاتی را با مشخصه $\Delta P-V$ گرماگیر قطع می‌دهند و توان الکتریکی فن و مقاومت حرارتی گرماگیر مشخص می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ این موضوع نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات طراحی بهینه هم رفت اجباری

مقدار	پارامترهای گرماگیر
۰/۷۰۸۲ کلوبین بر وات	مقاومت حرارتی گرماگیر
۳۵۴ سانتی‌متر مکعب	حجم فن
۲۳۲/۲۴ سانتی‌متر مکعب	حجم مجرای هوا
۰/۳۲۵ کیلوگرم	وزن فن
۱۴/۴ درصد	نسبت حاشیه ایمنی
۹۲/۱ درصد	بازده فین
۱۴۱/۶ وات بر مترمربع کلوبین	ضریب انتقال همرفت متوسط
۴۰/۴۸۹۹	عدد نوسلت متوسط
۱۰۷۳/۴	عدد رینولدز متوسط
۱۲۵ درجه سلسیوس	بیشترین دمای قابل تحمل مبدل
۲۰ درجه سلسیوس	متوسط دمای هوای اطراف مبدل
۰/۰۲۴۷ مترمکعب بر ثانیه	متوسط جریان هوای داخل کانال

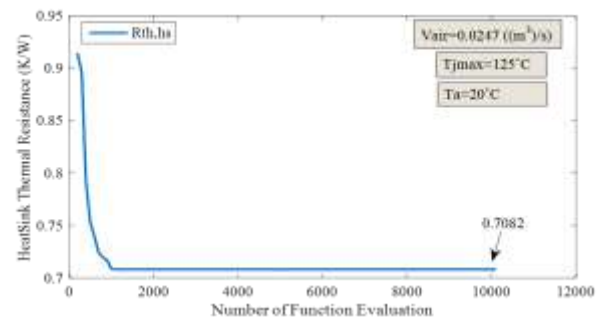
همرفت اجباری نشان داده شده است. برای محاسبه ضریب انتقال همرفت، از عدد بدون بعد رینولدز استفاده می‌گردد. اعداد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ نشان‌دهنده جریان هوای آرام داخل کانال می‌باشند. اعداد رینولدز بزرگتر از این مقدار، نمایانگر جریان هوای آشفته است. برای طراحی موردنظر مقدار عدد رینولدز ۱۰۷۳/۴ به دست آمده است و نمایانگر جریان هوای آرام است. روابط مربوط به اعداد بی‌بعد در [۵] موجود است. در حالت کلی طبق رابطه ۶، اختلاف فشار مجرای هوا و اختلاف فشار شتاب جریان هوا برحسب پاسکال است که به عوامل زیادی از جمله زاویه تیغه روتور، ابعاد فن، سرعت چرخش روتور و ... بستگی دارد.

$$\Delta P_{fan} = \Delta P_{hs} + \Delta P_{duct} + \Delta P_{acc} \quad (6)$$

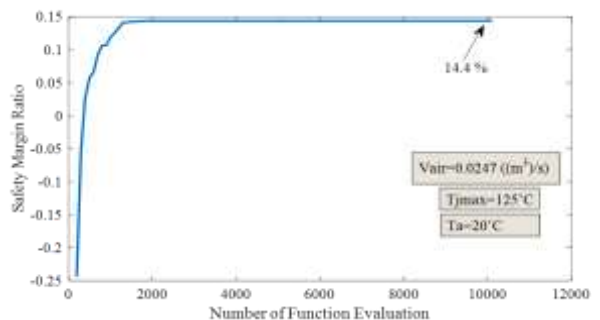
توان الکتریکی فن طبق رابطه ۷، به بازده فن بستگی دارد. بازده فن با کاهش سرعت روتور کاهش می‌یابد. در توان‌های بالای فن (۱۰ الی ۲۰ وات)، توان فن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی مقاومت حرارتی نمی‌گذارد ولی در توان‌های کم فن میزان حساسیت مقاومت حرارتی گرماگیر روی توان فن، بالا است. توان الکتریکی فن برحسب وات از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$P_{fan,el} = \eta_{fan} \cdot \Delta P_{fan,max} \cdot V \approx \eta_{fan} \cdot k_{tot} \cdot V \quad (7)$$

که در رابطه ۷، k_{tot} ترکیبی از ثوابت تلفات استفاده شده در [۱] است. η_{fan} بازده فن است که با کاهش سرعت روتور کاهش می‌یابد. V جریان هوای داخل گرماگیر برحسب مترمکعب بر ثانیه است.



شکل ۱۱ - مقاومت حرارتی گرماگیر در هم رفت اجباری



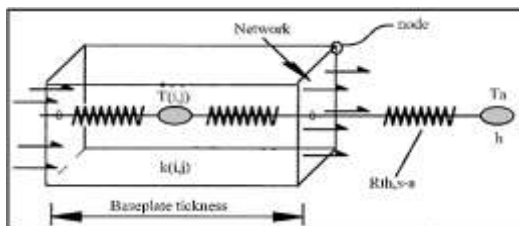
شکل ۱۲ - نسبت حاشیه ایمنی برای هم رفت اجباری

هر شبکه می‌تواند دربرگیرنده فین یا کانال باشد. تلفات بیشینه هر شبکه توسط رابطه ۹، به دست می‌آید. اجزا باید طوری روی سطح گرماگیر قرار بگیرند که شبکه‌های ریز انتخابی آن‌ها را در برگیرند. اگر توزیع تلفات متوسط مبدل، به‌طور صحیح در بین شبکه‌ها انجام گیرد به‌طوری‌که از مقدار تلفات بیشینه آن‌ها بالاتر نرود، دمای کارکرد سیستم کمتر از بالاترین دمای مجاز سیستم خواهد بود.

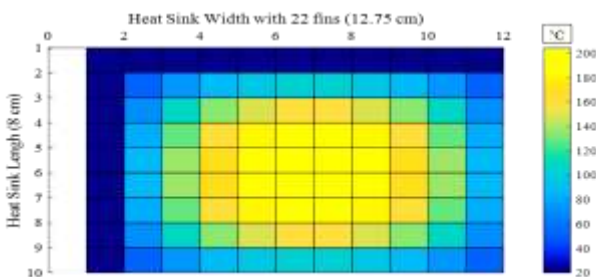
$$P_{\max, \text{Item}} = \frac{T_{j, \max} - P_{\text{Diode}}(R_{th, j-c, D} + R_{th, c-hs, D})}{R_{s-a, \min} \cdot (n_x - 1) \cdot (n_y - 1)} \quad (9)$$

$$+ \frac{-P_{\text{IGBT}}(R_{th, j-c, \text{IGBT}} + R_{th, c-hs, \text{IGBT}}) - T_a}{R_{s-a, \min} \cdot (n_x - 1) \cdot (n_y - 1)}$$

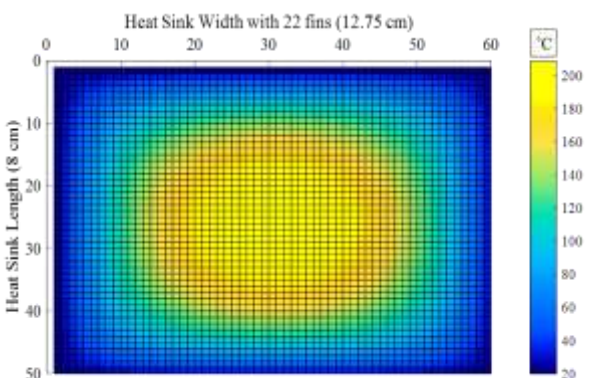
که در رابطه ۹ n_x و n_y به ترتیب تعداد نقاط روی عرض و طول گرماگیر می‌باشند. هر چه تعداد درایه‌های ماتریس دما بیشتر باشد، تعداد معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیشتر و دقت چیدمان بالاتر خواهد بود. برای درک بهتر این موضوع، توزیع دمایی روی سطح گرماگیر در یک مبدل ۸۱ وات با مقادیر $R_{th, c-hs} = 0$ ، $R_{th, j-c} = 0$ و $R_{th, s-a} = \infty$ با تعداد نقاط متفاوت در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵ - توزیع دمایی روی یک شبکه از سطح گرماگیر [۱۹]



شکل ۱۶ - توزیع دمایی با تعداد ۱۲۰ درایه و ۳۵۴ تکرار



شکل ۱۷ - توزیع دمایی برای با تعداد ۳۰۰۰ درایه و ۹۵۸۵ تکرار

بیشترین مقاومت حرارتی قابل تحمل برای گرماگیر	۰/۸۲۷۳ کلوین بر وات
طول مجرای هوا	۰/۱۶۴ متر
اختلاف فشار کلی (استاتیک)	۹/۷۱۶ پاسکال
توان الکتریکی فن	۰/۲۴۰۳ وات
سرعت نامی فن	۲۲۵۰ دور بر دقیقه
ولتاژ ورودی فن	۲۲۰ ولت
بازده فن	۲/۴ درصد
بازده کلی سیستم (مبدل)	۹۷ درصد

۴ چیدمان مطلوب منابع توان روی سطح گرماگیر

به‌طور کلی در مسائل جایابی با توجه به بزرگی ابعاد مسائل جایابی و تعداد معادلات زیاد، استفاده از روش‌های ریاضی و تحلیلی ناممکن بوده و عمدتاً از راه‌حل‌های تقریبی و ابتکاری استفاده می‌گردد. در این مقاله توزیع دما و جریان حرارتی در حالت پایدار یا یکنواخت بررسی می‌شود و از تلفات سیم‌های انصالی بین اجزای مبدل در مسئله بهینه‌سازی صرف‌نظر می‌کنیم. هدف ما بهینه‌سازی دمای توزیع‌شده و کاهش نقاط داغ روی سطح گرماگیر است. سطح گرماگیر به‌صورت یک شبکه کلی (Grid) است که به چند شبکه یا ناحیه کوچک‌تر (Nodal Networks) تقسیم می‌شود. شبکه‌های ایجادشده روی سطح گرماگیر را به‌صورت مستقل و مجزا از هم در نظر می‌گیریم. با استفاده از روش تفاضل محدود (FDM)، توزیع دمایی روی سطح گرماگیر انجام می‌گیرد و دمای اولیه نقاط حدس زده می‌شود. سپس با استفاده از اپراتور Relaxation دمای نقاط به‌گونه‌ای تصحیح می‌گردد که مجموع خطاها کمینه گردد. در هر تکرار یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی حل می‌شود و در نهایت نقاط داغ گرماگیر مشخص می‌گردد. در واقع سطح گرماگیر به‌صورت یک ماتریس تعریف می‌شود که درایه‌های ماتریس، دمای توزیع‌شده روی سطح گرماگیر را تشکیل می‌دهند و دمای هر شبکه، میانگین دمای نقاط دربرگیرنده است. شبکه‌ها به‌صورت یک چهارضلعی در نظر گرفته می‌شود که تنها از یک ماده تشکیل شده‌اند و به یک اندازه حساس به دما می‌باشند. دمای توزیع‌شده بین درایه‌ها طبق رابطه ۸ تعیین می‌شود.

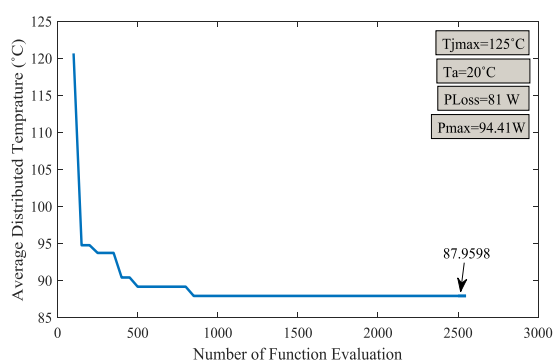
$$T_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y^2 (T_{i-1,j} + T_{i+1,j})}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)} + \frac{\Delta x^2 (T_{i,j-1} + T_{i,j+1})}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \right) + \frac{\Delta x^2 \Delta y^2 G}{2k (\Delta x^2 + \Delta y^2)} \quad (8)$$

که در رابطه ۸، G توان حجمی منابع حرارتی برحسب وات بر مترمکعب و k ، ضریب هدایت ماده استفاده‌شده در گرماگیر (آلومینیوم) برحسب وات بر متر کلوین است. برای کاهش حداکثر درجه حرارت در یک مدار با جایابی اجزا روی گرماگیر، اگرچه توان کلی تغییرناپذیر است اما هدایت حرارتی بستر (گرماگیر) بر توزیع دما تأثیرگذار است. شکل ۱۵، ساختار یک شبکه در سطح گرماگیر را نشان می‌دهد.

ثابت، از پایه کلکتور (C) به سمت پایه امیتر (E) جاری می‌شود. دیود قدرت اپیتاکسیال دارای دو دیود موزی معمولی و سه پایه آند، کاتد و آند است. هدایت مستقیم از پایه آند به کاتد است. معمولاً طراحی ساختار گرماگیر به منظور افزایش بازده حرارتی، کاهش حجم، وزن و قیمت گرماگیر انجام می‌پذیرد اما چیدمان مطلوب به منظور افزایش قابلیت اطمینان اجزای مبدل و کاهش دمای نقاط داغ انجام می‌پذیرد. در شکل ۲۰ شبیه‌سازی حرارتی گرماگیر طراحی شده به روش تفاضل محدود در سیستم همرفت طبیعی و چیدمان مطلوب اجزا بر روی آن، نشان داده شده است.

۴-۴ چیدمان قطعات در همرفت اجباری (مستقیم)

چون ابعاد فن‌ها معمولاً به شکل مربعی است و برای پوشش ابعاد تمامی کانال‌های گرماگیر و گردش جریان هوا در داخل کانال^{۱۱} از یک مجرای هوا^{۱۲} استفاده می‌گردد. که چیدمان قطعات خنک‌سازی غیرمستقیم همانند چیدمان هم رفت طبیعی است. اما در مواقعی به منظور جبران اثرات حرارتی افزایش طول سیم‌کشی از قسمتی از فن برای به گردش درآوردن هوای خارجی پایه گرماگیر^{۱۳}، استفاده می‌گردد که به‌طور مستقیم (بدون واسط گرماگیر) در خنک‌سازی قطعات تأثیرگذار است که مسئله را بسیار پیچیده‌تر می‌کند. اگر اجزای بالادست (تلفات بالا) مقابل خروجی فن قرار داده شود با توجه به حضور بسته فن، کارایی کمی در خنک‌کنندگی سیستم ایجاد خواهد شد علاوه بر آن هوای پشت تجهیزات که wake نامیده می‌شود رفته‌رفته گرم‌تر می‌شود. سپس اجزای دیگر با گردش هوای گرم توسط فن، گرم‌تر می‌شوند و رفته‌رفته این عامل باعث افزایش مقاومت حرارتی گرماگیر از مقدار مجازش خواهد شد و در کارایی سیستم خنک‌کنندگی، عملکرد مدار و قابلیت اطمینان اجزای حساس به دما مشکل ایجاد خواهد کرد.



شکل ۱۸ - بهینه‌سازی دمای پیوند برای یافتن نقاط داغ (هم رفت آزاد)

در مسئله بهینه‌سازی چیدمان مطلوب دمای هر شبکه را به‌عنوان ارزش مسئله (v_i) و تلفات بیشینه هر شبکه را به‌عنوان وزن مسئله (w_i) فرض می‌کنیم. درواقع الگوریتم بهینه‌سازی موردنظر در این مقاله، یک الگوریتم چندهدفه است که دمای شبکه‌ها به‌عنوان تابع هدف و تلفات بیشینه شبکه‌ها به‌عنوان یک محدودیت یا قید برای مسئله ظاهر می‌شوند. چون در چیدمان، هر شبکه نمی‌تواند بیش از یک‌بار انتخاب شود، به همین دلیل متغیرهای تصمیم به‌صورت باینری خواهند بود. در هر مرحله از چیدمان یکی از اجزای مبدل جایابی می‌شود و چون اجزای پایین دست (تلفات کم) تحت تأثیر دمای پیوند اجزای بالادست (تلفات زیاد) قرار می‌گیرند، بهترین حالت این است که چیدمان را به ترتیب از اجزای با تلفات بیشتر تا کم آغاز کنیم و فاصله بین قطعات بیشتری شود. بعد از مشخص شدن مکان قطعه متغیر تصمیم مربوط به شبکه‌های جاگذاری شده غیرفعال گردیده و توزیع دمایی قطعات بین شبکه‌های باقی‌مانده دیگر انجام می‌پذیرد و نهایتاً پایه اصلی گرماگیر در حالت ماندگار به یک توزیع دمای یکنواخت خواهد رسید و دمای نقاط داغ کاهش خواهد یافت. در بهینه‌سازی حجم چون تلفات تجهیزات تقریباً به تلفات بیشینه نزدیک‌تر است لذا از اکثر شبکه‌ها برای جایابی استفاده می‌گردد و معمولاً تجهیزات با توان بالا نزدیک به نقاط مرزی روی سطح گرماگیر قرار می‌گیرند. توسط الگوریتم ازدحام ذرات مقید (CPSO)، متوسط دمای توزیع شده پیوند سیستم بهینه گردیده و به کمترین مقدار خود می‌رسد تا تلفات متوسط بین شبکه‌های انتخابی توزیع شود. در این مسئله تابع هدف، قید و متغیر تصمیم در رابطه ۱۰ بیان شده است.

$$\min \frac{1}{n} \sum_i v_i x_i$$

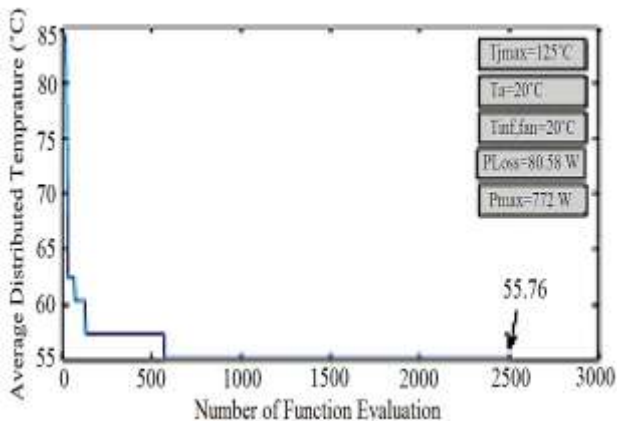
$$\sum_i w_i x_i \geq W \quad (10)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad i=1 \dots N \quad N=(n_x-1)(n_y-1)$$

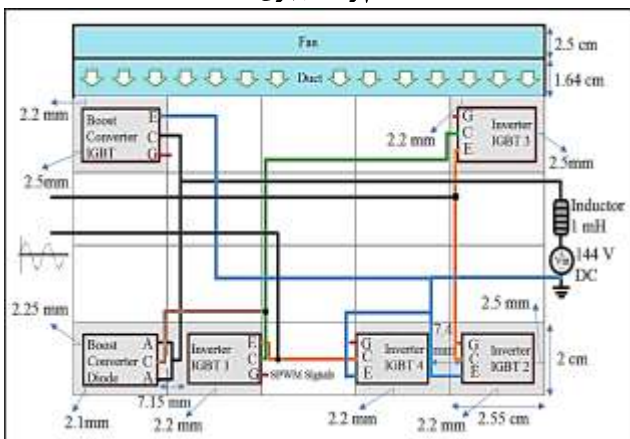
که در رابطه ۱۰، n تعداد شبکه‌های انتخاب شده، v_i دمای توزیع شده شبکه i ، w_i برابر با تلفات بیشینه شبکه i ، x_i متغیر تصمیم شبکه i ، W تلفات کلی تجهیزات الکترونیک قدرت، n_x تعداد نقاط روی عرض گرماگیر، n_y تعداد نقاط روی طول گرماگیر و N تعداد کل شبکه‌ها است. فرایند بهینه‌سازی در انتخاب چیدمان طوری انجام می‌پذیرد که الگوریتم موردنظر با انتخاب شبکه‌های متفاوت در هر تکرار، مقدار دمای توزیع شده روی سطح گرماگیر را به حداقل رسانده و تا حد امکان از گرم شدن دوباره نقاط داغ روی سطح گرماگیر محافظت می‌کند. این فرایند در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

در شکل ۱۹ چیدمان مطلوب و سیم بندی بین اجزای الکترونیک قدرت روی سطح گرماگیر نشان داده شده است. شبکه‌های انتخابی توسط الگوریتم با رنگ تیره مشخص شده‌اند. کلیدهای قدرت طوری باید قرار بگیرند که شبکه‌های انتخاب شده آن‌ها را پوشش دهند. در کلید قدرت IGBT، جریان با فعال شدن پایه گیت با یک منبع ولتاژ

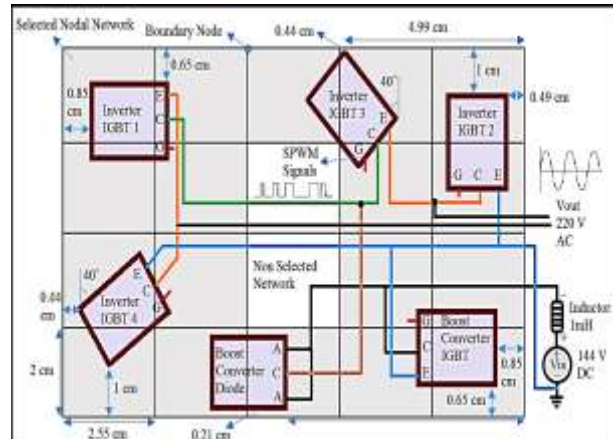
است. p یک ثابت عددی بین صفر و یک است که برای جریان‌های آرام و اعداد رینولدز پایین‌تر این عدد به مقدار ۱ میل پیدا می‌کند و برای جریان‌های خیلی آشفته این عدد به سمت صفر میل پیدا می‌کند. لذا مقدار مناسب p طبق نتایج تجربی موجود در [۲۲] برای عدد رینولدز ۱۳۵۵ این مقدار ۰/۷۵، برای عدد رینولدز ۱۳۰۲۰ این مقدار ۰/۵۵، برای اعداد رینولدز ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱۷ است. با یک تخمین خطی برای عدد رینولدز ۱۰۷۳/۴ مقدار مناسب p مقدار ۰/۷۵۴۸ به دست می‌آید. عملکرد کلی چیدمان مطلوب در سیستم همرفت اجباری شبیه همرفت آزاد است با این تفاوت که توزیع توان مجاز روی شبکه‌ها توسط تابع بیداری حرارتی انجام می‌گیرد که به عدد رینولدز و ماتریس توزیع دما بستگی دارد. با جایگذاری عدد p در تابع بیداری حرارتی و توزیع توان مجاز روی گرماگیر به‌منظور کاهش دمای نقاط داغ، دمای توزیع‌شده طبق الگوریتم CPSO طبق شکل ۲۱، کاهش‌یافته است. در شکل ۲۲ جایابی قطعات الکترونیک قدرت در سیستم هم رفت اجباری مستقیم نشان داده‌شده است و در شکل ۲۳ شبیه‌سازی حرارتی گرماگیر طراحی‌شده و چیدمان مطلوب اجزای بر روی آن، در سیستم همرفت اجباری نشان داده‌شده است. در جدول ۵، دمای پیوند تجهیزات برای دو سیستم خنک‌کنندگی در تلفات متوسط ۸۱ وات به‌دست‌آمده و مقایسه شده است.



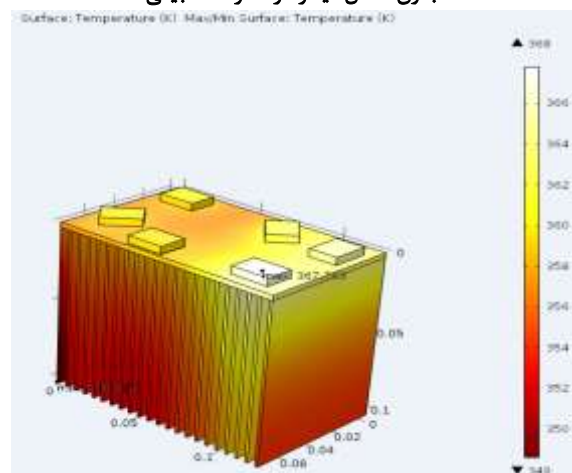
شکل ۲۱ - بهینه‌سازی دمای پیوند برای یافتن نقاط داغ (هم رفت اجباری)



شکل ۲۲ - چیدمان مطلوب قطعات الکترونیک قدرت روی سطح گرماگیر با خنک‌کنندگی مستقیم و بدون مجرای هوا



شکل ۱۹ - چیدمان مطلوب قطعات الکترونیک قدرت روی سطح گرماگیر بدون اعمال فیلتر در همرفت طبیعی



شکل ۲۰ - شبیه‌سازی حرارتی گرماگیر در سیستم همرفت طبیعی پس از چیدمان مطلوب اجزا

اگر اجزای منبع تلفات گرما را دورتر از فن قرار داده شود هوایی که از خروجی فن تولید می‌شود ابتدا از اجزای الکترونیک قدرت پایین‌دست (با تلفات کم) بر روی سطح گرماگیر عبور کرده و باعث افزایش اصطکاک و کاهش سرعت جریان هوا قبل از رسیدن به منبع حرارتی بالادست می‌شود. بنابراین اجزای الکترونیک قدرت بالادست به‌طور مؤثر خنک نمی‌شوند و آسیب می‌بینند. اگر ما منبع حرارتی را در وسط مدار قرار دهیم هم‌زمان با هم دو مشکل اشاره‌شده را خواهیم داشت. در این سیستم برعکس سیستم همرفت آزاد، توزیع توان یکسان روی سطح گرماگیر مشکل ایجاد خواهد کرد. برای حل این مشکل و طراحی یک چیدمان مطلوب، با استفاده از روش اختلاف محدود، در سیستم همرفت اجباری توزیع توان مجاز روی سطح گرماگیر را طبق رابطه ۱۱ با یک تابع بیداری حرارتی مدل می‌کنیم.

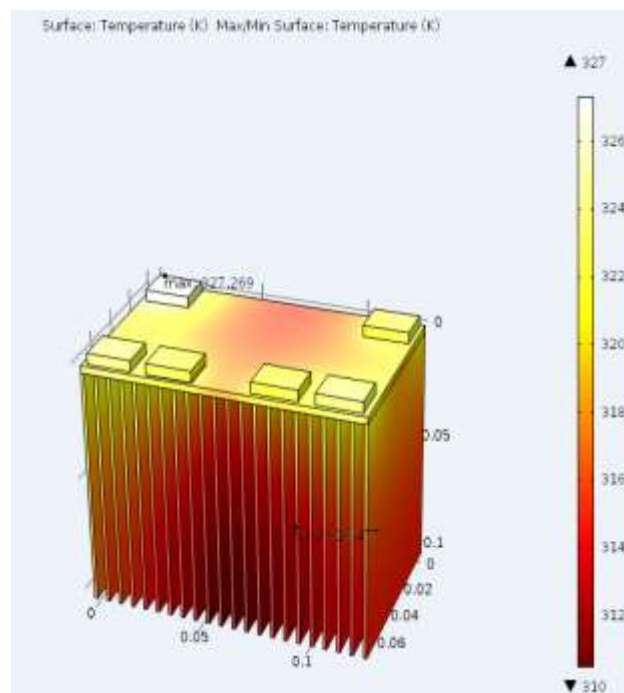
$$q(x) = T(x) \frac{\sin \pi p}{\pi} \frac{1}{x^{1-p}} \quad (11)$$

که در رابطه ۱۱، $q(x)$ توان تولیدی در فاصله x از فن برحسب وات و $T(x)$ دمای توزیع‌شده در فاصله x برحسب کلونین روی سطح گرماگیر

توسط یک نمودار ارائه گردید. سپس مدل حرارتی یک گرماگیر توسط معادلات انتقال حرارت بر مبنای سه روش هدایت، همرفت و تابش، با حل مدار معادل هم‌ارز الکتریکی به دست آمد. مقاومت متغیر گرماگیر تا هوا نقش مهمی در کاهش دمای پیوند سیستم دارد لذا توسط الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات مقید (CPSO) در نرم‌افزار متلب، مقدار این مقاومت با در نظر گرفتن حجم گرماگیر، وزن و مقادیر اقتصادی تا حد امکان بهینه شد و پارامترهای هندسی گرماگیر به‌عنوان خروجی سیستم، محاسبه گردید. مقدار نسبت حاشیه ایمنی گرماگیر طراحی شده در دو سیستم خنک‌کنندگی مختلف به‌صورت نمودار ارائه گردید. برای طراحی هرچه مطلوب‌تر، چیدمان مطلوب اجزا توسط یک روش ریاضی و ابتکاری در دو سیستم خنک‌کنندگی ارائه شد. ابتدا با روش اختلاف محدود توزیع دمایی روی سطح گرماگیر انجام گرفت و با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات مقید (CPSO) دمای پیوند سیستم بهینه‌سازی شده و شبکه‌های ریز روی سطح گرماگیر در یک ماتریس با ۳۰ درایه توسط الگوریتم به دست آمد. هر چه تعداد نقاط شبکه زیادتر باشد تعداد معادلات اختلاف محدود در چیدمان زیادتر شده و دقت چیدمان بالاتر می‌رود اما تحلیل کلی مسئله جایابی به‌مراتب دشوارتر می‌گردد. نتایج مقایسه دو روش نشان می‌دهد در سیستم همرفت اجباری در مقایسه با سیستم همرفت آزاد، دمای تجهیزات و مبدل به ترتیب به‌طور متوسط ۲۶ و ۴۶ درجه کاهش می‌یابند که از نقطه‌نظر حرارتی، امنیت مبدل در کارکرد غیرعادی و قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیک قدرت مناسب‌تر است. از نقطه‌نظر حجم و وزن، به علت حجم و وزن فن و مجرای هوا در سیستم همرفت اجباری، این روش مناسب نیست. از نقطه‌نظر بازده مبدل به علت وجود توان فن و تأثیر بازده فن در بازده کل سیستم، بازده همرفت اجباری ۰/۳۸ درصد کاهش یافته است. از نقطه‌نظر اقتصادی، همرفت طبیعی به علت طراحی ساده و کارکرد بدون توان مصرفی، در صنعت استفاده زیادی می‌شود و قیمت آن پایین‌تر است. لذا در تلفات پایین مبدل، به شرط رعایت حد مجاز دما همرفت طبیعی به‌صرفه‌تر است ولی در ساختارها و حجم‌های بزرگ و تلفات خیلی بالاتر، به دلیل عملکرد حرارتی بهتر سیستم همرفت اجباری این نوع سیستم برای خنک‌کنندگی مناسب است.

مراجع

- [1] C. Gammeter, F. Crismer, J. W. Kolar. (2015), "Weight Optimization of a Cooling System Composed of Fan and Extruded-Fin Heat Sink," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 1, 2015.
- [2] N. Booplan, A. K. Ramasamy, F. Nagi. (2016), "Electronic Component Heat Distribution Optimization using MATLAB," International Journal of Computer Aided Mechanical Design and Implementation, Vol. 2, No. 1, pp. 1-8.
- [3] M. Asadi, B. Arezi. (2011), "Thermal Design, Modeling and Simulation of AirForced Cooling Heat Sink for Thyristor Controlled Reactor (TCR)," IEEE, 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference.



شکل ۲۳ - شبیه‌سازی حرارتی گرماگیر در سیستم همرفت اجباری پس از چیدمان مطلوب اجزا

جدول ۵- مقایسه مقادیر دمای پیوند تجهیزات در دو سیستم

مقدار اختلاف دما	دمای پیوند تجهیز در همرفت اجباری (مستقیم) برحسب سلسیوس	دمای پیوند تجهیز در همرفت آزاد برحسب سلسیوس	نوع تجهیز
۱/۵۴	۶۹/۳۲	۷۰/۸۶	IGBT شماره ۱
۴۶/۳۷	۶۹/۳۲	۱۱۵/۶۹	IGBT شماره ۲
۳۲/۹	۵۲/۹	۸۵/۸	IGBT شماره ۳
۱۶/۴۸	۶۹/۳۲	۸۵/۸	IGBT شماره ۴
۲۶/۴۷	۷۱/۲۹	۹۷/۷۶	IGBT بوست
۳۲/۵۴	۵۶/۸۲	۸۹/۳۶	دیود قدرت اپیتاکسیال
۴۶/۰۸	۶۸	۱۱۴/۰۸	مبدل کلی

۵ نتیجه‌گیری

در بسیاری از مبدل‌ها سیستم خنک‌کننده تأثیر مهمی در عملکرد صحیح سیستم دارد. فراتر رفتن دمای تجهیزات از میزان محدوده مجازشان باعث صدمه دیدن تجهیزات و مبدل می‌گردد به همین دلیل برای محافظت عناصر از تنش حرارتی از گرماگیر استفاده می‌شود. در این مقاله به‌منظور بهبود کارایی سیستم خنک‌کننده، و افزایش حاشیه ایمنی، یک مدل بهینه‌سازی شده از یک گرماگیر به روش‌های همرفت آزاد و همرفت اجباری ارائه شد و نتایج مقایسه گردید. ابتدا تلفات توان در مدار یک مبدل اینورتر تک فاز تمام‌پل و یک مبدل بوست بر پایه IGBT با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب، توسط روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی در سه حالت هدایتی تخمین زده شد و تأثیر مقدار اندوکتانس مبدل بوست در تلفات کلی مبدل بررسی شده و

- [14] A. Bouzida, R. Abdelli, M. Ouadah. (2016), "Calculation of IGBT Power Losses and Junction Temperature in Inverter drive," IEEE, 8th International Conference on Modeling, Identification and control (ICMIC), Algeria.
- [15] S. Manictala. (2006), "Switching Power Supplies A to Z," Elsevier, <http://www.books.elsevier.com/>.
- [16] M. Rashid. (2014), "Power Electronics Devices, Circuits and Applications," 4th ed, 2014.
- [17] <http://www.mouser.com/ds/2/149/FGH60N60UFD-889110.pdf/>.
- [18] www.thinkisemi.com/pdf/FF60UP30DN.pdf
- [19] 18. C. A. Santos, J. A. Spim Jr, A. Garcia. (2000), "Modeling of Solidification in Twin Roll Strip Casting," Elsevier, Journal of Materials Processing Technology.
- [20] <http://www.ebmpapst.com/products/datasheets/AC-axial-fan-9956M-ENU.pdf>
- [21] G. D. Mey, M. Fekczak, B. Wiecek. (2015), "The use of fractional calculus for the optimal placement of electronic components on a linear array," Electronic and Energetics, Vol. 28, No 1, pp. 77-84, 2015.
- [22] G. D. Mey, M. Fekczak, B. Wiecek. (2008), "Exact solution for optimal placement of electronic components on linear array using analytical thermal wake function," Electronics Letters, Vol. 44, No. 20, 2008.
- [۲۳] بنائی، محمدرضا؛ فائق بناب، حسین‌آذر؛ "ارائه یک مدل dc-dc جدید بدون ترانسفورماتور با بهره ورتاژ بهبودیافته"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحه ۷۱-۵۹، پاییز ۱۳۹۶.
- [۲۴] پورجمال، یوسف؛ عجمی، علی؛ "یک روش جدید برای جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۲، صفحه ۶۵-۷۵، پاییز ۱۳۹۱.
- [4] D. Christen, M. Stojadinovic, J. Biela. (2016), "Energy Efficient Heat Sink Design: Natural vs. Forced Convection Cooling", IEEE Transactions on Power Electronics.
- [5] U. Drofenic, A. Stupar, J. W. Kolar. (2011), "Analysis of Theoretical Limits of Forced Air cooling using advanced composite Materials with high thermal conductivities," IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, Vol. 1, No. 4, April 2011.
- [6] M. Z. M. Hanafi, F. S. Ismail. (2014), "HeatSink Model and Design Analysis Based on Particle Swarm Optimization," IEEE Innovative Smart Grid Technologies, Asia (ISGT Asia), 2014.
- [7] K. Deb, P. Jain, N. K. Gupta, H. K. Maji. (2004), "Multiobjective Placement of Electronic Components using Evolutionary Algorithms," IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol. 27, No. 3, 2004.
- [8] H. Delaram, A. Dastfan, M. Norouzi. (2015), "A numerical study on efficiency improvement of heat transfer for a 3-phase inverter," Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 13-24, 2015 (in Persian).
- [9] R. Nowakowski, N. Tang. (2009), "Efficiency of Synchronous Versus Nonsynchronous Buck converters," Texas Instrument corporated, Analog Applications Journal, 2009.
- [10] P. Sanjeev, Sh. Jain. (2013), "Analysis of conduction and switching losses in two level inverter for low power applications", IEEE, Annual India Conference (INDICON).
- [11] K. N. Mude. (2018), "Single phase controlled Rectifiers," Elsevier inc, 2018.
- [12] N. Rao, D. Chamund. (2014), "Calculating Power Losses in an IGBT Module," <http://www.dynexsemi.com/>.
- [13] M. Felczak, B. Wiecek, G. De Mey. (2009), "Optimal placement of electronic devices in forced convective cooling conditions" Elsevier Ltd, Microelectronics Reliability, Vol 49, Issue 12, December 2009, Pages 1537-1545.

زیرنویس‌ها

- 1 Air forced convection
- 2 Air natural or free convection
- 3 Free wheeling diode
- 4 Nusselt number
- 5 Grashof number
- 6 Prandtl number
- 7 Rayleigh number
- 8 Penalty factor
- 9 Safety margin ratio
- 10 Finite Difference Method
- 11 Channel Interior Air Flow
- 12 Air duct
- 13 Baseplate Exterior Air flow