مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 13-24

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی بهبود عملکرد انتقال حرارت برای یک اینورتر قدرت سه فاز

حمیده دل‌آرام[1]، علی دستفان[2]، محمود نوروزی[3*]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود
2- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه شاهرود، شاهرود
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود
* شاهرود، صندوق‌پستی 3619995161 mnorouzi@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 شهریور 1393
پذیرش: 14 آبان 1393
ارائه در سایت: 29 آذر 1393

کلید واژگان:
اینورتر قدرت
مدیریت حرارتی
طراحی چیدمان
طراحی ابعاد هندسی گرمابر
بازده گرمابر

چکیده

در این مقاله، شبیه‌سازی سه‌بعدی انتقال حرارت برای یک نمونه تجهیز الکترونیک قدرت و سیستم خنک‌ساز آن پیاده‌سازی می‌شود. تجهیز یک اینورتر سه‌فاز توان بالا ساخت شرکت سِمیکرُن است که کاربرد اصلی آن در وسایل نقلیه برقی و هیبریدی است. سیستم خنک‌ساز یک گرمابر دارای پره مستقیم مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت است که از طریق همرفت خنک می‌شود. عامل محدودکننده طراحی سیستم انتقال حرارت، بالا بودن دمای بیشینه تراشه‌ها و به عبارتی منابع حرارتی موجود در اینورتر با نام اختصاری IGBT است. دمای IGBTها برای جلوگیری از شکست حرارتی و مکانیکی تجهیز بایستی زیر 125°C باشد. یکی از اهداف اصلی، کاهش دمای بیشینه با طراحی دقیق چیدمان تراشه‌ها است. طراحی ابعاد هندسی گرمابر، با توجه به محدویت حرارتی تراشه‌ها و مصالحه بین حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر انجام می‌شود. پارامترهای هندسی مورد بررسی تعداد، ارتفاع و ضخامت پره‌ها و نیز ضخامت پایه گرمابر است. تلفات توان منابع حرارتی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب و اطلاعات فنی ارائه شده از طرف شرکت سازنده به دقت محاسبه می‌شود. مدل حرارتی اینوتر و سیستم خنک‌ساز آن توسط روش اجزاء محدود پیاده‌سازی می‌شود. صحت مدل‌سازی حرارتی و توان اتلافی محاسبه شده، توسط نرم‌افزار سِمیسِل تأیید می‌شوند. طراحی دقیق چیدمان سبب کاهش چشمگیر دمای بیشینه تراشه‌ها به مقدار 20 °C می‌شود. بازده گرمابر با طراحی مناسب برای ضرایب انتقال حرارت 50، 75 و 100 W/m².K به‌ترتیب با افزایش حجم 22/52%، 13/51% و 0%، به مقدار 10/35%، 16/67% و 27/51% نسبت به گرمابر اولیه افزایش یافته است.

A numerical study on efficiency improvement of heat transfer for a 3-phase inverter

Hamideh Delaram[1], Ali Dastfan[2], Mahmood Norouzi[3*]

1,2- Faculty of Electrical and Robotics Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran.
3- Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran
* P.O.B. 361 9995161 Shahrood, Iran, mnorouzi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 August 2014
Accepted 05 November 2014
Available Online 20 December 2014

Keywords:
Power Inverter
Thermal Management
Layout Design
Heatsink Geometry Design
Heatsink Efficiency

ABSTRACT

In this paper, 3-D simulation of heat transfer in a power electronic device and its cooling system is performed. The device is a high voltage three-phase inverter manufactured by Semikron Company; its main application is in electric and hybrid vehicles. Cooling system is a forced-air plate-fin heat sink. A limitation factor of designing heat transfer is maximum temperature of the inverter's chips, heat sources, called IGBT. Maximum temperature of IGBTs should be below 125°C in order to avoid both the thermal and the mechanical failures. One of the primary objectives is the reduction of the maximum temperature by designing the layout of chips. Also, the heatsink geometry design is accomplished by taking intoconsideration the maximum temperature and tradeoff between both the usage material volume and the heatsink efficiency. Geometries are the number of fins, the fin height, fin thickness and the base thickness of the heatsink. The power dissipation is estimated using datasheet information and output waveforms obtained from simulation in MATLAB. A thermal model of the inverter and its cooling system are simulated by using finite-element method (FEM). The accuracy of the thermal model and power dissipation estimation are verified by Semisel software. The maximum temperature is significantly reduced about 20°C by designing the layout precisely. Also, the heatsink efficiency is increased 10.35%, 16.67% and 27.51% with the increase of the material volume about 22.52%, 13.51% and 0% for the heat transfer coefficient, 50, 75 and 100 (W/m2.K) by good design of the heatsink geometry, respectively.

1- مقدمه

در 60 سال اخیر مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیک قدرت که همان طراحی اجزاء داخلی و نیز سیستم خنک‌ساز مناسب است، سبب توسعه روش‌های انتقال حرارت پیشرفته شده است. مزایایی مانند قابلیت کنترل بهتر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Delaram, A. Dastfan, M. Norouzi, 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

توان انتقالی، افزایش توان و کوچک‌سازی تجهیزات الکترونیک قدرت، بدون توسعه روش‌های طراحی و آنالیز حرارتی امکان پذیر نیستند [1]. هدف اولیه مدیریت حرارتی این تجهیزات، جلوگیری از شکست حرارتی است که به‌عنوان شکست ناشی از حرارت و از دست رفتن کل عملکرد الکترونیکی یک جزء مشخص تعریف می‌شود. این نوع شکست معمولاً منجربه ترک‌خوردگی قطعات مکانیکی تجهیز الکترونیک قدرت و یا جدا شدن هدایت‌کننده‌ها در داخل تجهیز از اتصالات الکتریکی خارج از آن می‌شود، همچنین افزایش حرارت از محدوده مجاز منجربه شکست مواد نیمه‌رسانای تجهیز الکترونیک قدرت خواهد شد. هدف ثانویه از مدیریت حرارتی در این تجهیزات، دستیابی به قابلیت اطمینان و طول عمر مطلوب است. دستیابی به این هدف از آن‌جا که نرخ شکست تراشه‌ها تقریباً به‌طور نمایی با دمای عملکردی افزایش می‌یابد، تنها با کنترل درجه حرارت عملکردی امکان‌پذیر است [1].

الکترونیک قدرت، مطالعات مربوط به مدارات الکترونیکی با هدف کنترل انتقال انرژی الکتریکی را شامل می‌شود [2]. امروزه الکترونیک قدرت کنترل توان و انرژی را به شدت متحول کرده است. در قلب این تحول، تجهیزات نیمه‌رسانا قرار گرفته‌اند که وظیفه مهم تبدیل‌انرژی به‌صورت متناسب با کاربرد مورد نیاز را عهده دارند [3]. اینورترها تجهیزات الکترونیک قدرتی هستند که توان الکتریکی مستقیم را به توان الکتریکی متناوب سینوسی با ولتاژ خروجی و فرکانس مطلوب تبدیل می‌کنند. اینورترها در رنج‌های وسیعی، از منابع تغذیه کوچک رایانه‌ها گرفته تا صنایع بزرگ توان بالا استفاده می‌شوند. از جمله کاربردهای صنعتی اینوترها می‌توان به درایوهای ماشین‌های الکتریکی، فیلترهای اکتیو، جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو، نیروگاه‌های انرژی‌های نو مانند انرژی بادی و پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های گرمایش القایی، منابع تغذیه هواپیماها، منابع تغذیه بدون وقفه[1] رایانه‌ها، خطوط انتقال برق ولتاژ مستقیم توان بالا[2] اشاره کرد [1،4]. به‌طور خاص پیشرفت‌های مختلف انجام شده در فناوری اینورترها به دلیل کاربرد آن‌ها در وسایل نقلیه برقی است. در حال حاضر از اینورترها جهت کنترل قدرت کشش موتور در برخی وسایل نقلیه برقی مانند قطار برقی و همچنین برخی از خودروهای الکتریکی و هیبریدی استفاده می‌شود [5]. المان کلیدزنی در اینورترها، کلید قدرت IGBT دارای کاربرد بیشتری است که اوایل دهه 1980 معرفی شده و امروزه به دلیل ویژگی‌های منحصربه فردشان به تجهیزاتی مهم در عرصه صنعت تبدیل شده‌اند. از مزیت‌های عمده IGBT استفاده از آن در توان و فرکانس کلیدزنی بالا است [2].

همگام با افزایش توان نامی، فرکانس کلیدزنی و چگالی جریان و همچنین نیاز به قابلیت اطمینان بالاتر و محدودیت‌های فضای قابل دسترس در تجهیزات الکترونیک، آنالیز حرارتی و بهبود طراحی حرارتی این تجهیزات اهمیت ویژه‌ای یافته است [1،6،7]. هدف اصلی در آنالیز حرارتی بررسی دمای نقاط اتصال تجهیزات الکترونیک قدرت و قرارگیری این دما در محدوده قابل قبول از دیدگاه محدودیت‌های حرارتی است. بیشینه دمای اتصالی قابل تحمل برای تراشه IGBT، 150℃ است. با این حال، با هدف افزایش قابلیت اطمینان، دمای اتصالی تراشه IGBT بهتر است در دمایی پایین‌تر از 125℃ قرار گیرد [8]. این امر تنها با مدیریت حرارتی و پیاده‌سازی روش‌های خنک‌سازی مناسب قابل دستیابی است. نخستین گام در آنالیز حرارتی یک تجهیز الکترونیک قدرت، تخمین صحیح توان تلفاتی تمامی تراشه‌های موجود در آن است. تخمین صحیح تلفات در تجهیزات الکترونیک قدرت به بهبود طراحی‌های حرارتی که شامل جایابی یا چیدمان اجزای داخلی تجهیز، خنک‌سازی و مدیریت حرارتی است، منجر می‌شود.

افزایش بیش از حد دما در اجزاء سازنده، عامل اصلی شکست تجهیزات الکترونیک قدرت است. بررسی تأثیر حرارتی هر یک از اجزاء داخلی بر سایر اجزاء به تعیین عملکرد کلی سیستم کمک می‌کند. دانستن دمای تقریبی هر یک از اجزاء نسبت به اجزاء دیگر و توانایی انتخاب چیدمان مناسب از بین چیدمان‌های مختلف به بهبود عملکرد حرارتی در سطح سیستم می‌انجامد؛ بنابراین امروزه چیدمان اجزاء داخلی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی تجهیزات الکترونیک قدرت است. روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود (FEM[3]) [9] و روش FDM[4] [10]، برای شبیه‌سازی و تحلیل حرارتی ساختارهای هندسی پیچیده استفاده می‌شوند. نرم‌افزارهای تحلیلی سه‌بعدی اطلاعاتی از جمله توزیع دمایی تجهیز، محل داغ‌ترین نقاط و افزایش دمای داخلی تجهیز را در اختیار قرار می‌دهند.

خنک‌سازی با هوا ساده‌ترین روش کنترل درجه حرارت است که به‌صورت گسترده برای سیستم‌های الکتریکی مختلفی استفاده می‌شود [11]. مزیت خنک‌سازی با هوا در دسترس بودن و کاربرد راحت آن است. روش‌های بهبود انتقال حرارت همچون گرمابرهای پره‌دار با طراحی‌های مختلف برای خنک‌سازی بسته‌های الکترونیک قدرت توان بالا استفاده می‌شوند. وقتی آرایشی از پره‌ها تحت شرایط همرفت برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود، ابعاد هندسی بهینه برای پره‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های فضایی و اقتصادی (متناسب با نرخ انتقال حرارت بیشینه) بایستی طراحی شوند. پره‌های مستطیلی[5] برای افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق همرفت در سیستم‌ها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا این نوع پره‌ها ازنظر ساخت بسیار ساده و کم هزینه هستند. استفاده از پره‌های طولی[6] برای افزایش نرخ انتقال حرارت در کانال‌های مستطیلی امکان خنک‌سازی مناسب تجهیزات الکترونیک قدرت را فراهم می‌کند [12].

در زمینه طراحی چیدمان منابع حرارتی کارهای مختلفی انجام شده است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و یا مقایسه حالات مختلف چیدمان، طراحی مطلوب انتخاب شده است. هامفری[7] و همکاران [13]، با یک برنامه بهینه‌سازی N منبع حرارتی را در داخل یک محفظه با ابعاد معین و دارای تهویه به‌صورت بهینه جایابی کردند. کویپو[8] [14]، از الگوریتم ژنتیک برای حل معادلات انتقال حرارت با هدف مینیمم کردن نرخ شکست ناشی از افزایش بیش از حد حرارت اجزاء داخلی استفاده کرد. در این مطالعه دمای بیشینه چند جزء داخلی که با فواصل مساوی روی بورد قرار داده شده بودند، بهینه شده است. در پژوهشی که توسط سِوال[9] [15] انجام شده است، آنالیز حرارتی در سطح سیستم و با استفاده از نرم‌افزار تجاری I-deas برای کانورتر قدرت 1/2 کیلو وات مورد بررسی قرار گرفته و دمای عملکردی اجزای داخلی آن استخراج شده است. سپس چیدمان مطلوب با هدف بهبود عملکرد حرارتی و الکتریکی از بین چندین چیدمان انتخاب شده است.

پژوهش‌های مختلفی در زمینه مطالعه همرفت طبیعی و اجباری جهت بررسی و استخراج معادلات انتقال حرارت، نحوه مدل‌سازی حرارتی و پارامترهای هندسی مؤثر گرمابر در بهبود انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. نخستین پژوهش در زمینه مطالعه همرفت طبیعی بین صفحات

1- UPS
2- HVDC

3- Finite element method
4- Finite difference method
5- Rectangular Fins
6- Longitudinal Fins
7- Humphrey
8- Queipo
9- Sewall

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

موازی ایزوترمال توسط ایلن‌باس[1] [16] انجام شده است. لِوی[2] [17] فاصله بین صفحات موازی ایزوترمال عمودی را با هدف دستیابی‌به کمینه دما برای صفحات یا ضریب انتقال حرارت بیشینه در یک نرخ انتقال حرارت معین، بهینه‌سازی کرد. بار- کوهن[3] و همکاران [18] رابطه‌هایی را برای بهینه‌سازی فاصله بین صفحات موازی و عمودی که به‌صورت همرفت طبیعی خنک‌سازی می‌شوند تحت شرایط مرزی حرارتی مختلف توسعه دادند. در چند سال اخیر با افزایش توان اتلافی اجزاء الکترونیک قدرت اغلب خنک‌سازی با همرفت طبیعی دیگر پاس‌گو نبوده و طراحان مجبور به استفاده از فن یا پمپ برای خنک‌سازی سیستم‌ها شدند. سیمنس[4] [19] روشی برای افزایش عملکرد حرارتی گرمابر با صفحات موازی که با همرفت اجباری خنک می‌شود از طریق محاسبه مقاومت حرارتی کل از پایه پره‌ها تا محیط ارائه داد، همچنین سیمنس [20] در مقاله‌ای دیگر عملکرد گرمابر با صفحات موازی را برحسب افت فشار هوای عبوری از پره‌ها بالا برد. دروفنیک[5] [21,22] محدودیت‌های تئوری چگالی توان یک مبدل قدرت با سیستم خنک‌ساز همرفت اجباری هوا مورد بررسی قرار داد و با استفاده از معادلات تجربی و مدل تحلیلی گرمابر را برحسب چگالی توان بهینه‌سازی کرد. لی[6] [23] توصیه‌هایی کاربردی برای انتخاب گرمابر معرفی کرد و استفاده از رابطه جریان فراگیر را پیشنهاد داد. نینگ[7] [12] یک مدل حرارتی بر پایه معادلات تحلیلی برای گرمابر، فن، کانال و جریان هوای برگشتی را ارائه داد. بر پایه این مدل بهینه‌سازی سیستم خنک‌ساز با هدف دستیابی به کم‌ترین وزن انجام شد. اسدی و عارضی [24] مدلی از سیستم خنک‌ساز همرفت اجباری هوا برای یک نمونه تجهیز الکترونیک قدرت با استفاده از معادلات انتقال حرارت و شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس[8] ارائه و مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش بر ابعاد هندسی گرمابر و کانال‌های آن متمرکز شده است و همچنین فلوچارتی برای طراحی گرمابر براساس سرعت هوا و ابعاد کانال‌ها ارائه شده است. چن و همکارانش [25]، یک مدل حرارتی برای پیش‌بینی افزایش دما در یک مبدل قدرت مورد استفاده در درایو موتور رلوکتانسی ارائه کرده‌اند و براساس اطلاعات به‌دست آمده از مدل حرارتی دو طرح مختلف چیدمان اجزاء توان[9] بررسی شد. همچنین تأثیر تعدادی از پارامترهای هندسی گرمابر به‌صورت مجزا بر دمای بیشینه تراشه‌های موجود در مبدل قدرت، مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، شاخص انتخاب چیدمان مناسب و هر یک از پارامترهای هندسی گرمابر مورد بررسی، افزایش دمای بیشینه تراشه‌ها در نظر گرفته شد.

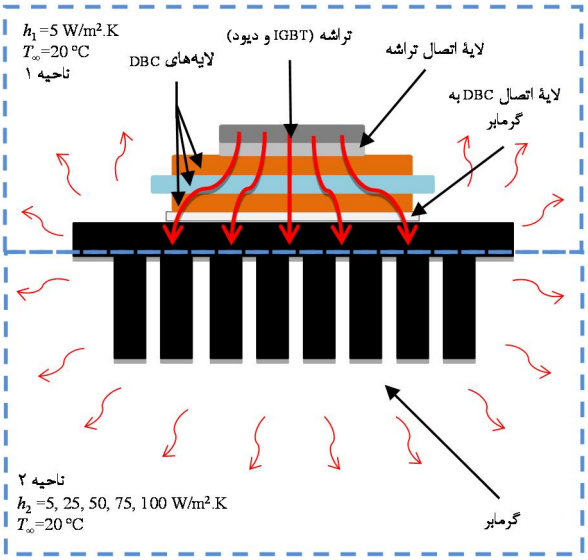
در تحقیق حاضر، مدل حرارتی مناسب برای پیش‌بینی توزیع دما در یک مبدل قدرت اینورتری ارائه خواهد شد. در این مقاله نسبت به [25]، تعداد بیشتری از حالت‌های چیدمان منابع حرارتی به‌منظور کاهش دمای بیشینه تراشه‌های موجود در اینورتر ارائه و بررسی شده است. همچنین علاوه‌بر در نظر گرفتن تعداد بیشتری از پارامترهای هندسی گرمابر، تأثیر هر کدام به‌صورت مجزا بر دمای بیشینه تراشه‌ها و نیز بازده حرارتی گرمابر مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج حاصله، ابعاد هندسی مناسب برای گرمابر استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق، تلفات توان در یک نمونه اینورتر سه فاز با روش کلیدزنی پهنای باند[10] توسط پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب و برخی اطلاعات موجود در اطلاعات فنی شرکت سازنده تجهیز انتخابی، تخمین‌زده می‌شود. سپس مدل حرارتی اینورتر در نرم‌افزار کامسول[11] شبیه‌سازی می‌شود. شمای کلی انتقال حرارت از منبع حرارتی (تجهیز الکترونیک قدرت) و گرمابر با پره مستقیم مستطیلی و مقطع عرضی یکنواخت که با همرفت هوا خنک می‌شود، در شکل 1 نمایش داده شده است. پس از پیاده‌سازی مدل حرارتی اینورتر مورد مطالعه، دو هدف عمده با انجام طراحی‌های مختلف دنبال می‌شوند که عبارتند از: 1) مینیمم کردن دمای نقاط داغ با چیدمان مطلوب منابع تولید حرارت و 2) تعیین هر یک از ابعاد هندسی مورد نظر به‌طور مجزا با هدف دستیابی‌به بیشترین بهره برای گرمابر. پارامترهای هندسی مورد بررسی تعداد، ارتفاع و ضخامت پره‌ها و نیز ضخامت پایه گرمابر است. سپس با توجه به مقدار محاسبه‌شده برای هر یک از پارامترهای هندسی، طراحی‌های مختلف ابعاد هندسی گرمابر استخراج می‌شوند، همچنین طراحی‌های مناسب، با توجه به محدویت حرارتی تراشه‌ها و مصالحه بین حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر انتخاب می‌شوند. از جمله مشکلات طراحی گرمابر برای خنک‌سازی اینوتر مورد نظر از طریق هوا می‌توان به چگالی توان بالا و محدودیت حرارتی تراشه‌ها اشاره کرد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده، ابعاد هندسی مناسب برای گرمابر و چیدمان مطلوب برای منابع حرارتی در اینورتر که همان کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت است، از بین چندین طراحی مورد بررسی انتخاب می‌شود.

2- تخمین تلفات اینورتر قدرت

مدارات الکترونیک قدرت سطوح و انواع مختلف شکل موج ولتاژ و جریان را به یکدیگر تبدیل می‌کند؛ بنابراین به این مدارت مبدل‌های الکترونیک قدرت گفته می‌شود. این مبدل‌ها بین بار و منبع به‌عنوان یک تجهیز واسط قرار می‌گیرند [26]. مبدل‌های الکترونیک قدرت براساس نوع ارتباط بین ولتاژ ورودی و خروجی به چهار گروه زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ورودی متناوب سینوسی و خروجی مستقیم (یکسوکننده‌ها[12])
- ورودی مستقیم و خروجی متناوب سینوسی (اینورترها[13])

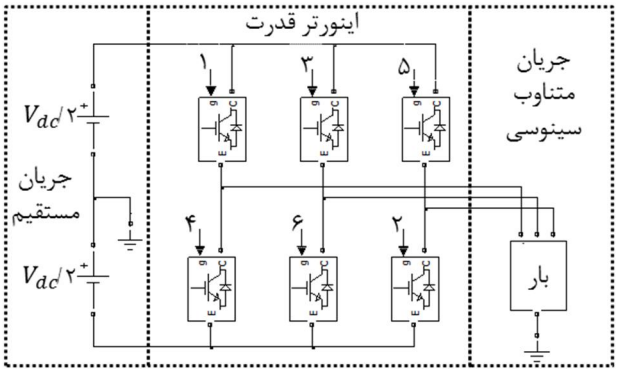


شکل 1 شمای کلی منبع حرارتی، گرمابر و شرایط مرزی

1- Elenbaas
2- Levy
3- Bar-Cohen
4- Simons
5- Drofenik
6- Lee
7- Ning
8- Ansys
9- Power Components

10- PWM
11- Comsol
12- Rectifiers
13- Inverters

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]



شکل 2 ساختار مداری یک اینورتر سه فاز

جدول 1 مقادیر نامی و مشخصات عملکردی اینورتر مورد مطالعه

نوع کمیت	علامت اختصاری	مقدار
ولتاژ مستقیم ورودی اینورتر	V_{dc}	350 ولت
جریان ورودی اینورتر	I_{dc}	272/6 آمپر
مقدار اصلی ولتاژ خط خروجی	V_{ab}	220 ولت
فرکانس نامی	f	50 هرتز
فرکانس کلیدزنی اینورتر	f_{sw}	10 کیلو هرتز
توان اکتیو بار	P_{Load}	85/5 کیلو وات
ضریب قدرت	PF	0/911
مقدار اصلی جریان خروجی	I_{Load}	249/6 آمپر

جدول 2 مقایسه توان اتلافی تخمین‌زده‌شده با تلفات به‌دست‌آمده از سِمیسِل

نوع توان اتلافی	تخمین‌زده‌شده	سِمیسِل	میزان خطا
تلفات کلیدزنی IGBT	115 وات	146 وات	%21/2
تلفات هدایتی IGBT	130 وات	141 وات	%7/8
کل توان اتلافی در IGBT	245 وات	287 وات	%14/6
تلفات بازیابی معکوس دیود	41 وات	42 وات	%2/4
تلفات هدایتی دیود	19 وات	21 وات	%9/5
کل توان اتلافی در دیود	60 وات	63 وات	%4/8
کل توان اتلافی	305 وات	350 وات	%12/8

- ورودی و خروجی مستقیم (چاپرها[1])
- ورودی و خروجی متناوب سینوسی (سیکلوکانورترها[2])

مبدل ولتاژ مستقیم به ولتاژ متناوب سینوسی به‌عنوان اینورتر شناخته می‌شود. ورودی اینورتر یک منبع ولتاژ مستقیم و خروجی آن به‌صورت ولتاژ متناوب است. در اینورتر کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت عملیات کلیدزنی را انجام می‌دهند و خروجی مطلوب با تغییر زمان خاموش و روشن شدن آن‌ها به‌دست می‌آید. اینورترها برای تولید ولتاژهای سینوسی تک‌فاز یا چند فاز از یک منبع ولتاژ مستقیم به‌کار می‌روند. در بین اینورترهای چند فاز، اینورترهای سه فاز بیشترین کاربرد را دارند. یکی از کلیدهای قدرت رایج مورد استفاده در اینورترها، کلیدهای قدرت IGBT است. دو سر هر IGBT در اینورتر یک دیود به‌صورت برعکس موازی می‌شود. شکل 2، ساختار مداری یک اینورتر سه فاز را نشان می‌دهد. در این شکل، منابع تولیدکننده توان (IGBT و دیود) با شماره‌های 1 تا 6 مشخص شده‌اند.

تلفات توان IGBT و دیود شامل دو نوع تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی می‌شوند. تلفات کلیدزنی IGBT شامل دو نوع تلفات در لحظه خاموش‌شدن و تلفات در لحظه روشن‌شدن است. تلفات کلیدزنی دیود با نام تلفات بازیابی معکوس[3] شناخته می‌شود. با شبیه‌سازی مدار اینورتر در نرم‌افزار متلب، تلفات هدایتی و کلیدزنی IGBT و دیود به‌ترتیب از طریق منحنی‌های خروجی ولتاژ- جریان و منحنی‌های انرژی برحسب جریان بار که در اطلاعات فنی شرکت سازنده موجود است، تخمین‌زده می‌شود. مقادیر نامی و مشخصات عملکردی مربوط به این شبیه‌سازی در جدول 1 ارائه شده است. اینورتر سه فاز SKiM606GD066HD ساخت شرکت سمیکرون[4] به‌عنوان نمونه مورد مطالعه در این مقاله انتخاب می‌شود. شرکت سمیکرون، یک شرکت آلمانی بسیار معتبر و پیشرو در زمینه تولید قطعات نیمه‌رسانا و تجهیزات الکترونیک قدرت در سطح بین‌المللی است. تجهیز انتخابی یک اینورتر با قابلیت اطمینان بالاست و کاربرد اصلی آن در خودروهای الکتریکی و هیبریدی است؛ بنابراین به‌گونه‌ای طراحی شده است، که قابلیت عملکرد مطلوب در تکان‌های شدید و لرزش‌ها و نیز تحمل دمای بالا را داشته باشد [27]. منحنی‌های موجود در اطلاعات فنی تجهیز مورد مطالعه در دو دمای نقطه اتصال ℃25 و ℃150 رسم شده است [28]. از آن‌جایی که در عمل دمای نقطه اتصال تراشه‌ها بسیار بالاتر از دمای ℃25 است، منحنی‌های رسم شده در دمای ℃150 برای تخمین تلفات توان هر یک از تراشه‌های IGBT و دیود استفاده می‌شود. علاوه‌بر این برای طراحی سیستم خنک‌ساز بهتر است که بدترین شرایط عملکردی اینورتر از نقطه نظر حرارتی در نظر گرفته شود. شرکت سمیکرون برای محاسبه تلفات، دما و انتخاب بهینه محصولات خود، نرم‌افزار سِمیسِل[5] را ارائه کرده است که با توجه به اعتبار بالای این شرکت در سطح بین‌المللی، داده‌های تجربی ارائه شده توسط این نرم‌افزار قابل استناد است. توان اتلافی تخمین‌زده‌شده IGBT و دیود با تلفات به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سمیسل مقایسه می‌شود و در جدول 2 ارائه شده‌اند. خطای تلفات کل IGBT و دیود در تجهیز اینورتری بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سِمیسِل، 12/8% است. کارهای پیشین در [۷،29،30] که در زمینه تخمین تلفات انجام شده‌اند، خطای محاسباتی در حدود 15% و حتی بیشتر از این مقدار را گزارش داده‌اند.

3- مدل‌سازی حرارتی اینورتر قدرت سه‌فاز

در این بخش، به توصیف معادلات ریاضی مربوط به انتقال حرارت و تقریب‌هایی که برای ساده‌سازی این معادلات فرض می‌شوند، پرداخته می‌شود. این تقریب‌ها عبارتند از:

1- ضریب رسانش تمامی مواد ثابت و مستقل از دماست.

2- ضریب انتقال حرارت از اجزاء الکترونیک قدرت و گرمابر ثابت فرض می‌شود.

3- از انتقال حرارت تشعشعی صرف‌نظر می‌شود.

4- در شبیه‌سازی‌ها دمای محیط ثابت و مستقل از زمان درنظر گرفته می‌شود.

5- از مقاومت‌های حرارتی تماسی بین سطوح و مواد مختلف به جز سطح اتصال تراشه‌ها چشم‌پوشی می‌شود.

6- از آن‌جایی‌که ساختار داخلی و مواد تشکیل‌دهنده اجزاء الکترونیک قدرت پیچیده و در انحصار طراحان است، در شبیه‌سازی‌های حرارتی، ساختار هر یک از این اجزاء به‌صورت یک مکعب ساده که تنها از یک ماده تشکیل شده است درنظر گرفته می‌شود.

7- توان تلفاتی هر یک از کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت مستقل از زمان و با توجه

1- Choppers
2- Cycloconverters

3- Reverse Recovery Loss
4- Semikron Company
5- Semisel

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

به جدول 2، مقدار متوسط آن در شبیه‌سازی‌های حرارتی استفاده می‌شود.

معادله حاکم بر مسئله انتقال حرارت از گرمابر با پره مستقیم مستطیلی با قطع عرضی یکنواخت با در نظر گرفتن تقریب‌های بیان شده، رابطه (1)، عبارت است از:

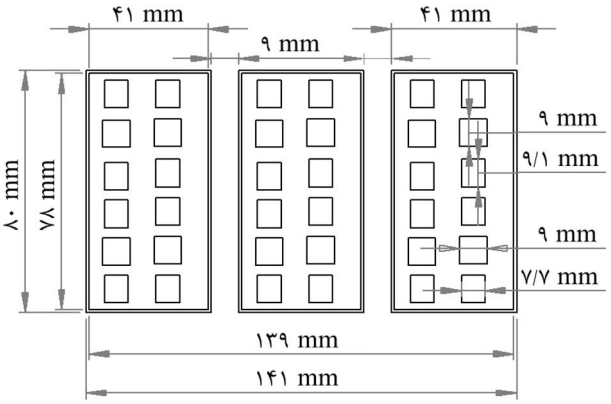
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{q} \quad (1)$$

که در آن $\dot{q}$ معرف توان چشمه حرارتی (W/m^3) است و با توجه به شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش پیشین، مقدار آن برای هر IGBT، $12/4425\times10^9 W/m^3$ و هر دیود، $1/525\times10^9 W/m^3$ است.

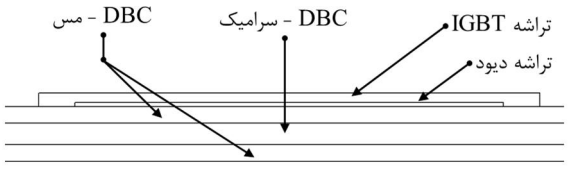
همچنین بازده کلی سطح، عملکرد آرایه پره‌ها و سطحی از پایه را که پره‌ها به آن متصل‌اند، مشخص می‌کند و از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\eta_\circ = \frac{q}{h_1 A_1 (T_1 - T_\infty) + h_2 A_2 (T_2 - T_\infty)} \quad (2)$$

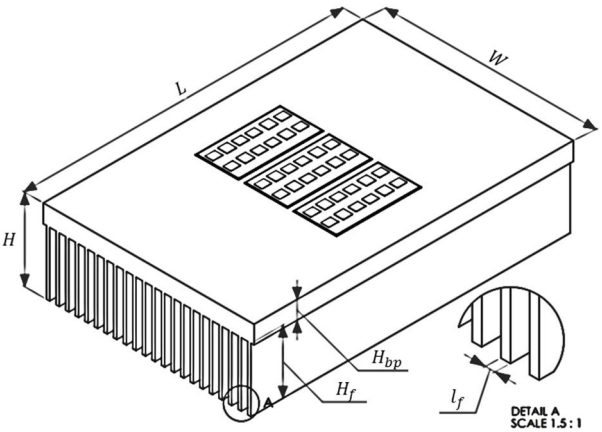
مدل‌سازی اینورتر سه فاز SKiM606GD066HD با توجه به تقریب‌ها و معادلات ارائه شده، در نرم‌افزار کامسول نسخه 4.4 انجام می‌شود. تحلیل‌های حرارتی این نرم‌افزار براساس روش اجزاء محدود است. اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی و مشخصات مواد تجهیز مورد نظر از اطلاعات فنی که توسط شرکت سازنده فراهم می‌شود، به‌دست می‌آید.



شکل 3 چیدمان تراشه‌ها در هر یک از فازهای تجهیز SKiM606GD066HD و نحوه قرارگیری فازها در مجاورت یکدیگر [28]



شکل 4 نمای جانبی لایه‌های مختلف تجهیز SKiM606GD066HD



شکل 5 نمونه نخستین گرمابر دارای پره مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت

جدول 3 مشخصات مواد و ضخامت لایه‌ها برای تجهیز SKiM606GD066HD [28]

نوع لایه	جنس	ضخامت (mm)	هدایت حرارتی (W/m/K)	ظرفیت حرارتی (J/kg/K)	چگالی (kg/m^3)
تراشه IGBT	سیلیکون	0/07	124	750	2330
تراشه دیود	سیلیکون	0/24	124	750	2330
اتصال تراشه	Ag-sinter	0/02	250	230	7350
DBC مس	مس	0/30	390	390	8960
DBC سرامیک	AL_2O_3	0/38	24	830	3780
DBC مس	مس	0/30	390	390	8960

جدول 4 ابعاد هندسی نمونه نخستین گرمابر

نوع پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
طول گرمابر	L	300 میلی‌متر
عرض گرمابر	W	198 میلی‌متر
ارتفاع گرمابر	H	77 میلی‌متر
تعداد پره‌ها	N	22
ارتفاع پره‌ها	H_f	60 میلی‌متر
ضخامت پره‌ها	l_f	3 میلی‌متر
ضخامت پایه گرمابر	H_{bp}	17 میلی‌متر

جدول 5 آنالیز حساسیت مش‌بندی در اینورتر مورد مطالعه

شماره شبکه	شبکه 1	شبکه 2	شبکه 3	شبکه 4	شبکه 5
تراکم در حجم	176900	226428	391474	778752	3203844
تراکم در مرزها	83082	103446	159399	259506	781924
تراکم در لبه‌ها	9864	11426	15686	22129	35630
دمای ماکزیمم (°C) و	117/479	117/604	117/810	117/861	117/898
خطای نسبی (%)	(0/355)	(0/250)	(0/075)	(0/032)	(—)
دمای متوسط IGBTها (°C)	102/333	102/411	102/516	102/531	102/549
و خطای نسبی (%)	(0/210)	(0/135)	(0/032)	(0/017)	(—)
دمای متوسط دیودها (°C)	94/835	94/897	95/010	95/021	95/035
و خطای نسبی (%)	(0/210)	(0/145)	(0/026)	(0/014)	(—)

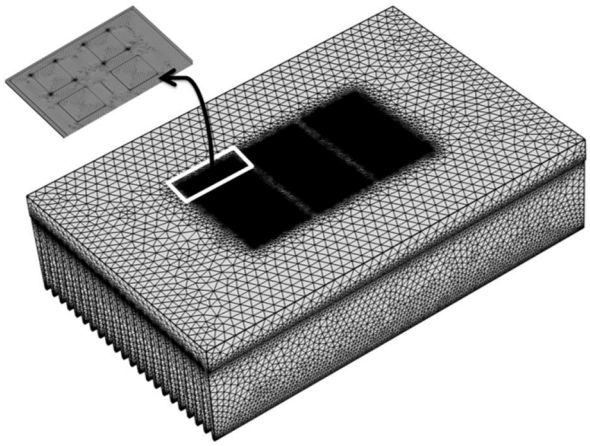
مدل‌سازی هندسی تجهیز مورد مطالعه: محل قرارگیری اجزاء کلیدهای نیمه‌رسانای قدرت برای استخراج توزیع دمایی بسیار دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چیدمان تراشه‌ها در هر یک از فازهای اینورتر مورد نظر و نحوه قرارگیری فازهای کنار هم در شکل 3 و همچنین نمای جانبی لایه‌های مختلف در شکل 4 نمایش داده می‌شوند. این اطلاعات از اطلاعات فنی ارائه شده توسط شرکت سمیکرون استخراج می‌شوند. هر فاز از اینورتر، دارای 8 تراشه IGBT و 4 تراشه دیود است که بر لایه DBC[1] قرار گرفته‌اند. ضخامت تراشه‌ها، لایه‌های مختلف DBC و لحیم بین لایه DBC و تراشه و نیز مشخصات مواد آن‌ها در جدول 3 ارائه شده‌اند. نمونه نخستین گرمابر دارای پره مستطیلی با مقطع عرضی یکنواخت در شکل 5 نمایش داده شده است و ابعاد هندسی آن در جدول 4 ارائه شده‌اند. این ابعاد با توجه به نمونه استاندارد گرمابر P16 که توسط شرکت سمیکرون به‌عنوان سیستم خنک‌ساز برای تجهیز SKiM606GD066HD طراحی شده است، انتخاب می‌شوند. گرمابر مورد نظر در این مقاله از جنس آلومینیوم انتخاب می‌شود.

شرایط مرزی: شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی به‌صورت رابطه (3) در نظر گرفته شده است:

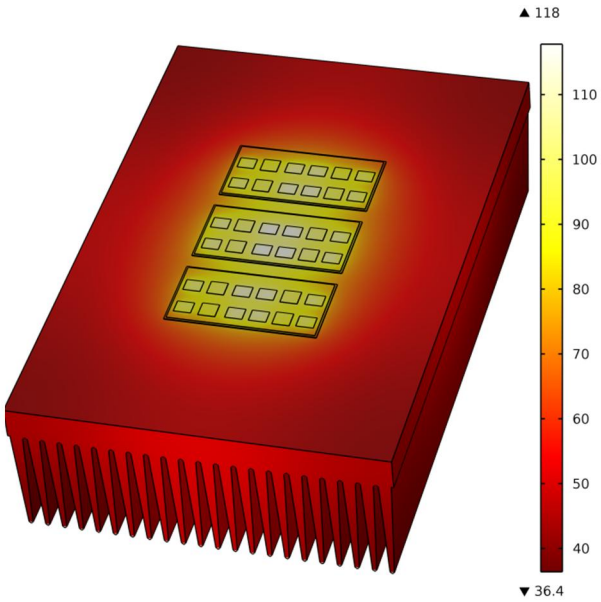
$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (3)$$

1- Direct Bond Copper

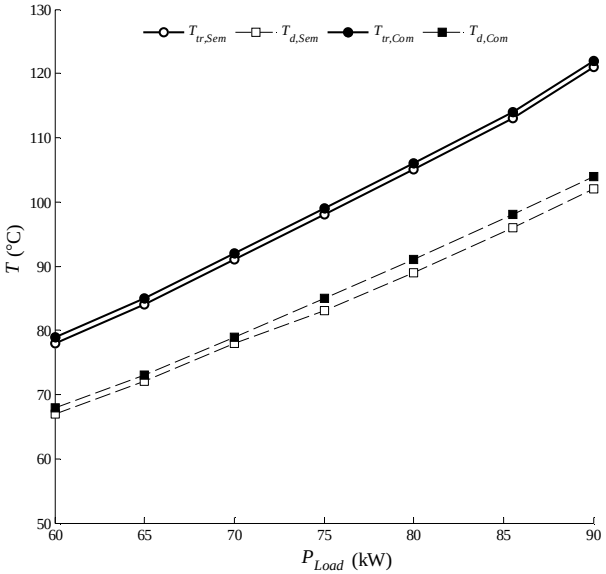
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]



شکل 6 نمای ایزمتریک شبکه 4



شکل 7 توزیع دما در نمونه ماژول مورد نظر و گرمابر P16



شکل 8 مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سِمیسِل

ضریب انتقال حرارت از سطح زیر گرمابر ثابت و مقدار آن در طراحی‌های مختلف 5، 25، 50، 75 و 100 با واحد $W/m^2.K$ است. فرض می‌شود که باقی سطوح جانبی غیر از سطح بالایی فازهای اینورتر که عایق در نظر گرفته می‌شوند، با محیط اطراف تبادل حرارت دارند و ضریب انتقال حرارت این سطوح $5\ W/m^2.K$ است. در شبیه‌سازی‌ها دمای محیط ثابت و برابر $20\ ^\circ C$ است.

4- بررسی حساسیت شبکه محاسباتی و راستی آزمایی حرارتی اینورتر سه فاز مورد مطالعه

4-1- آنالیز حساسیت شبکه محاسباتی

مطالعه مش‌بندی مدل حرارتی جهت اطمینان از دقت محاسبات متغیرها انجام خواهد شد. تأثیر تغییر تعداد گره‌ها بر برخی پارامترهای خروجی مهم مانند دمای بیشینه و دمای متوسط تراشه‌های IGBT و دیود مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به هندسه پیچیده مساله، استفاده از شبکه با سازمان میسر نبوده و جهت حل عددی مساله از شبکه‌بندی چهار وجهی استفاده شده است. به دلیل بالا بودن گرادیان دما در نزدیکی تراشه‌ها، تراکم شبکه در این قسمت‌ها بیشتر در نظر گرفته شده است تا توزیع دمای مناسب‌تری از شبیه‌سازی عددی حاصل شود. جدول 5 تعداد گره‌ها، مقادیر پارامترهای مورد نظر و خطای آن‌ها نسبت به شبکه متراکم شماره 5 را برای مش‌بندی‌های مختلف گزارش می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول 5، میزان خطا در شبکه‌های 2 تا 4 نسبت به شبکه 5 کوچک بوده؛ بنابراین عدم‌وابستگی مدل‌سازی عددی به این شبکه‌ها کاملاً مشهود است. در این تحقیق، از شبکه 4 به‌عنوان شبکه مرجع جهت سایر مدل‌سازی‌های انتقال حرارت در تراشه‌ها استفاده شده است تا نخست حل عددی به شبکه محاسباتی وابسته نباشد و همچنین با حفظ دقت، میزان هزینه محاسباتی نیز در حد قابل قبولی باشد. نمای ایزمتریک شبکه 4 در شکل 6 نمایش داده شده است.

4-2- بررسی صحت مدل حرارتی اینورتر سه فاز مورد مطالعه

شکل 7 توزیع دما در نمونه تجهیز مورد نظر و گرمابر P16که توسط شرکت سمیکرون ارائه شده است را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به ابعاد هندسی و مشخصات مواد آن‌ها از اطلاعات فنی به‌دست آمده است. برای بررسی صحت مدل‌سازی حرارتی که در بخش 3 بیان شد، از نمونه استاندارد گرمابرP16 استفاده شده است، و دمای متوسط تراشه‌های IGBT و تراشه‌های دیود در مقادیر مختلف توان خروجی اینورتر سه‌فاز با دمای به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سِمیسِل مقایسه شده‌اند. شکل 8 مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نرم‌افزار سِمیسِل را ارائه می‌دهد. با توجه به شکل 8، نتایج شبیه‌سازی با نتایج به‌دست‌آمده از این نرم‌افزار تطابق قابل قبولی دارند. بیشینه خطا در پیش‌بینی دمای متوسط تراشه‌های IGBT و تراشه‌های دیود به‌ترتیب 1/28% و 2/41% است؛ بنابراین مدل حرارتی مورد نظر برای پیش‌بینی توزیع دما دقت قابل قبولی دارد.

5- چیدمان مطلوب منابع توان و تعیین پارامترهای هندسی بهینه برای گرمابر

در این بخش دو هدف عمده با انجام طراحی‌های مختلف دنبال می‌شود. از آن‌جایی‌که نقاط داغ محتمل‌ترین مکان‌های شکست حرارتی و مکانیکی تجهیز است، هدف نخستین کمینه کردن دمای نقاط داغ با چیدمان مطلوب منابع تولید حرارت است؛ بنابراین چندین طراحی مختلف از نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد نظر و همچنین تغییر فاصله‌گذاری بین فازها در هر یک از طراحی‌ها برای کاهش دمای بیشینه بررسی می‌شود. هدف بعدی دستیابی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

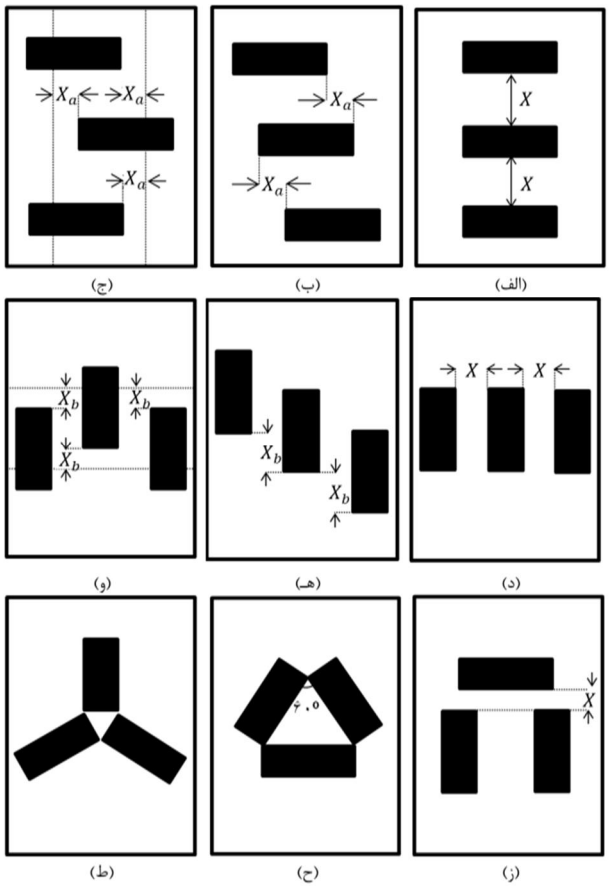
به بیشترین بهره برای گرمابر با تعیین ابعاد هندسی بهینه برای آن است، البته با این شرط که دمای تراشه‌های IGBT در محدوده حرارتی مجاز یعنی زیر 125℃ قرار گیرند. در شبیه‌سازی‌ها تأثیر تعداد پره‌ها (N)، ارتفاع پره‌ها (H_f)، ضخامت پره‌ها (l_f) و ضخامت پایه گرمابر (H_{bp}) روی بازده گرمابر بررسی می‌شوند. رابطه بین بهره گرمابر با این پارامترها برای دستیابی به بالاترین بازده مورد بررسی قرار می‌گیرند. با این شرط که دمای تراشه‌های IGBT در محدوده حرارتی مجاز یعنی زیر 125℃ باشند، ضریب انتقال حرارت از سطح زیر گرمابر ثابت و مقدار آن در طراحی‌های مختلف 5، 25، 50، 75 و 100 ($W/m^2.K$) است. بیان این نکته لازم است که برای بررسی تأثیر هر یک از طراحی‌های مختلف چیدمان منابع حرارتی و ابعاد هندسی گرمابر، تنها پارامترهای مربوط به طراحی مورد نظر تغییر می‌کنند و دیگر ابعاد هندسی ارائه شده در جدول 4 و سایر خصوصیات فیزیکی و مواد بیان شده در جدول 3 تغییری نخواهند کرد.

5-1- چیدمان‌های مختلف فازهای اینورتر مورد مطالعه

با توجه به شکل 7، محل داغ‌ترین نقاط در 4 تراشهٔ IGBT که در مرکز هر یک از فازها و در مجاورت هم قرار دارند، است. مکان قرارگیری تراشه‌ها در هر یک از فازها ثابت است؛ بنابراین تنها تغییر نحوه چیدمان فازها کنار هم برای کاهش دمای بیشینه امکان‌پذیر است. طراحی‌های مختلف چیدمان و نیز فاصله‌گذاری هر یک از طراحی‌ها، بهتر است به‌گونه‌ای انتخاب شوند که مرکز فازها از هم دور شوند. چند طراحی مختلف برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه در شکل 9 نمایش داده شده‌اند که در هر یک از این طراحی‌ها تلاش می‌شود با تغییر فاصله‌گذاری بین فازها کم‌ترین دمای بیشینه برای تراشه‌های IGBT (T_j) حاصل شود.

در چیدمان شکل 9-الف سعی می‌شود که با تغییر X دمای بیشینه کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-الف در جدول 6 بیان شده‌اند. کم‌ترین دما در X=60 mm و برابر 106/9℃ است. سپس با ثابت نگه‌داشتن فاصله X در مقدار بهینه، همان‌طور که در شکل 9-ب و شکل 9-ج نشان داده است، دمای بیشینه با تغییر فاصله X_a بین فازها بررسی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای چیدمان شکل 9-ب و شکل 9-ج در شکل 10 نشان داده شده‌اند. در هر دو نمودار با افزایش X_a دمای بیشینه افزایش می‌یابد و همچنین در فاصله کمتر از 10 mm اختلاف دما بین دو نمودار بسیار اندک است؛ بنابراین از بین شکل 9-الف، شکل 9-ب و شکل 9-ج چیدمان شکل 9-الف با X=25 mm و بیشینه دمای 106/9℃ به‌عنوان طراحی بهینه انتخاب می‌شود.

در چیدمان شکل 9-د سعی می‌شود که با تغییر X دمای بیشینه کاهش یابد. جدول 7 نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-د را ارائه می‌دهد. کم‌ترین دما در X=25 mm و برابر 117/2℃ است. سپس با ثابت نگه داشتن فاصله X در مقدار بهینه همان‌طور که در شکل 9-هـ و شکل 9-و نشان داده است، دمای بیشینه با تغییر فاصله X_b میان فازها بررسی می‌شود. شکل 11 نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-هـ و شکل 9-و را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 11، کم‌ترین دمای بیشینه برابر 113/05℃ است؛ بنابراین از بین شکل 9-د، شکل 9-هـ و شکل 9-و چیدمان شکل 9-و با X=25 mm و X_b=60 mm و بیشینه دمای 113/05℃ به‌عنوان طراحی بهینه انتخاب می‌شود. در چیدمان شکل 9-ز سعی می‌شود که با تغییر X دمای بیشینه کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی برای چیدمان شکل 9-ز در شکل 12 نشان داده شده است.



شکل 9 طراحی‌های مختلف برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه

کم‌ترین دما در X=70 mm و برابر 107/50℃ است. دو طراحی دیگر برای نحوه چیدمان فازهای اینورتر مورد مطالعه در شکل 9-ح و شکل 9-ط نمایش داده شده‌اند و دمای بیشینه در آن‌ها به‌ترتیب برابر 113/88℃ و 111/93℃ است. شکل 13 توزیع دمای مربوط به چیدمان شکل 9-الف (X=60 mm)، شکل 9-و (X=25 mm و X_b=60 mm)، شکل 9-ز (X=70 mm)، شکل 9-ح و شکل 9-ط را نمایش می‌دهد و دمای بیشینه آن‌ها در جدول 8 بیان شده‌اند. با مقایسه بیشینه دما در جدول 8، این نتیجه حاصل می‌شود که چیدمان شکل 9-الف با X=60 mm دارای کم‌ترین دمای بیشینه برابر 106/9℃ است.

5-2- تغییر ارتفاع پره‌های گرمابر

شکل 14 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ارتفاع پره‌های گرمابر نشان می‌دهد.

جدول 6 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-الف با تغییر فاصله میان فازها

فاصله بین فازها (X)	دمای ماکزیمم (T_j)
1 میلی‌متر	130/85 ℃
10 میلی‌متر	124/29 ℃
20 میلی‌متر	118/63 ℃
30 میلی‌متر	114/23 ℃
40 میلی‌متر	110/76 ℃
50 میلی‌متر	108/05 ℃
60 میلی‌متر	106/90 ℃
70 میلی‌متر	109/65 ℃
80 میلی‌متر	114/72 ℃

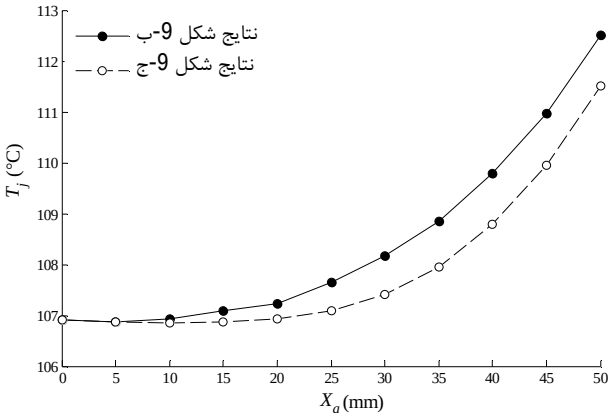
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

جدول 7 دمای ماکزیمم برای چیدمان شکل 9-د با تغییر فاصله بین فازها

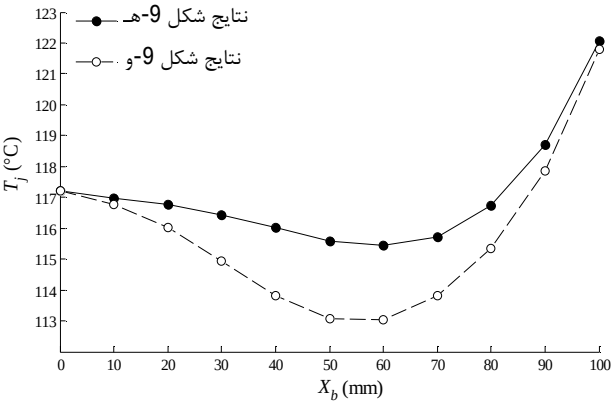
فاصله بین فازها (X)	دمای ماکزیمم (T_j)
1 میلی‌متر	130/05 ºC
5 میلی‌متر	126/85 ºC
10 میلی‌متر	123/38 ºC
15 میلی‌متر	120/43 ºC
20 میلی‌متر	117/94 ºC
25 میلی‌متر	117/20 ºC
30 میلی‌متر	119/84 ºC
35 میلی‌متر	124/05 ºC

جدول 8 دمای ماکزیمم چیدمان‌های انتخابی از بین طراحی‌های مختلف چیدمان

نوع چیدمان	دمای ماکزیمم (T_j)
شکل 8-الف (X=60 mm)	106/90 ºC
شکل 8-و (X=25 mm و X_b=60 mm)	113/05 ºC
شکل 8-ز (X=70 mm)	107/50 ºC
شکل 8-ح	113/88 ºC
شکل 8-ط	111/93 ºC



شکل 10 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-ب و شکل 9-ج با تغییر X_a

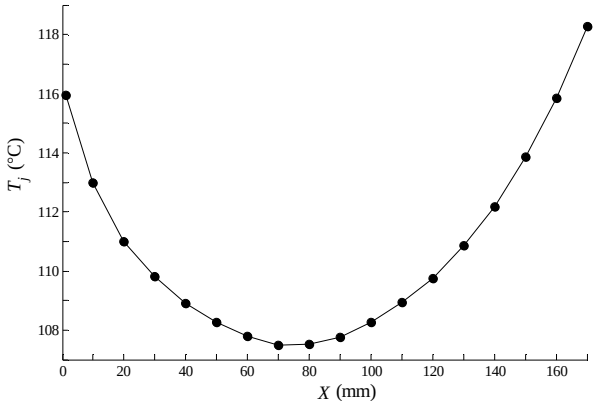


شکل 11 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-هـ و شکل 9-و با تغییر X_b

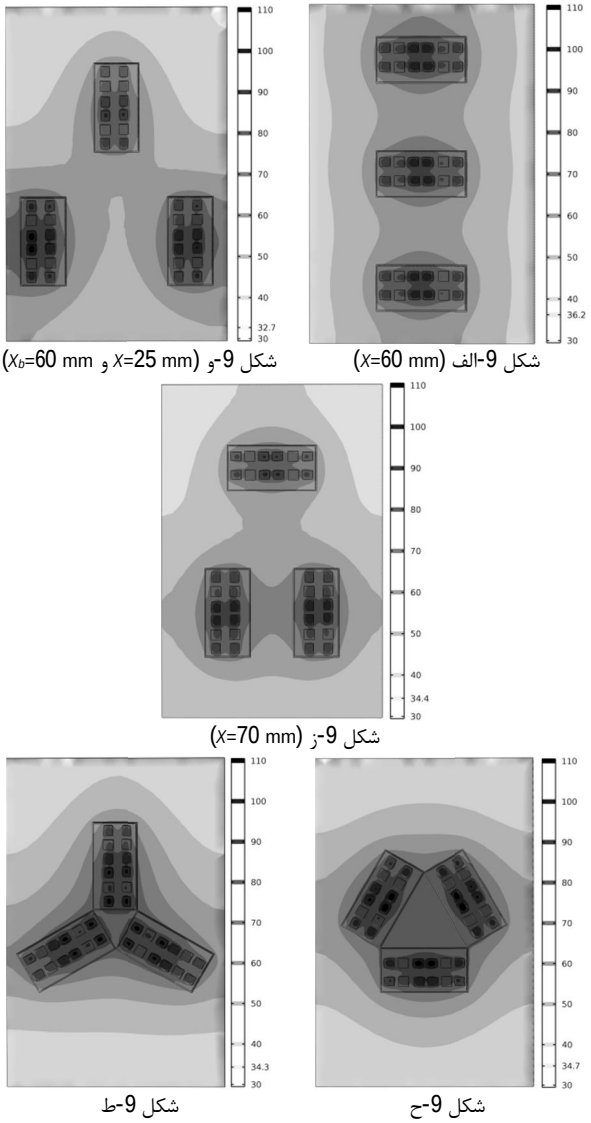
1) با توجه به شکل 14 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از 50 W/m2.K است، بالای 125℃ و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

2) در هر یک از نمودارها با افزایش ارتفاع پره‌های گرمابر، بازده گرمابر و دمای بیشینه کاهش می‌یابند.

3) بالاترین بازده در h=75 W/m².K با دمای بیشینه 123/1℃، در ارتفاع پره 75 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 31/16% است.



شکل 12 دمای بیشینه برای چیدمان شکل 9-ز با تغییر فاصلهٔ بین فازها



شکل 13 توزیع دمایی در چیدمان‌های انتخابی (جدول 8)

4) بالاترین بازده در h=100 W/m².K با دمای بیشینه 123/5℃، در ارتفاع پره 45 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 37/3% است.

3-5- تغییر ضخامت پره‌های گرمابر

شکل 15 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ضخامت پره‌های گرمابر نشان می‌دهد.

1) با توجه به شکل 15 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از 25 W/m².K، بالای 125℃ و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

2) در هریک از نمودارها با افزایش ضخامت پره‌های گرمابر، دمای بیشینه کاهش می‌یابد.

3) بالاترین بازده در h=50 W/m².K با دمای بیشینه 124/5℃، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 57/72% است.

4) بالاترین بازده در h=75 W/m².K با دمای بیشینه 112/7℃، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 46/16% است.

5) بالاترین بازده در h=100 W/m².K با دمای بیشینه 104/8 ℃، در ضخامت پره 7 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 39/93% است.

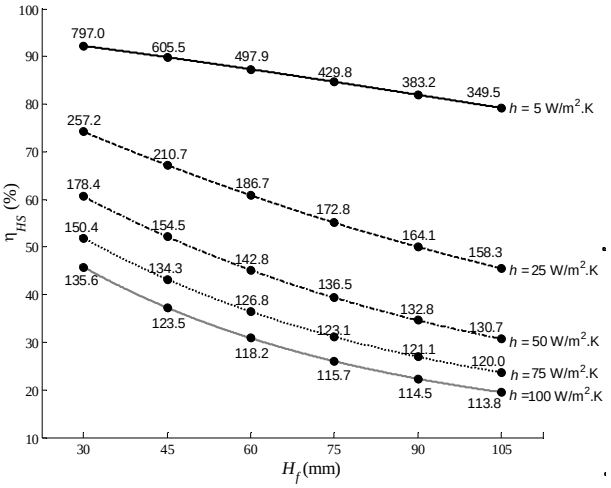
5-4- تغییر تعداد پره‌های گرمابر

شکل 16 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف تعداد پره‌های گرمابر نشان می‌دهد.

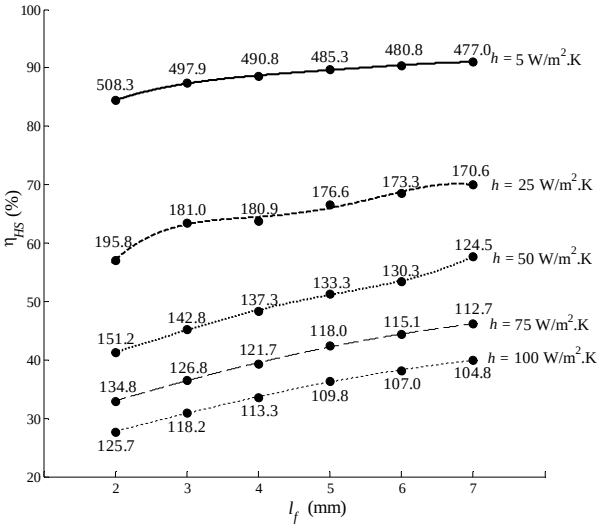
1) با توجه به شکل 16 دمای سایر نقاط روی نمودار با ضریب انتقال حرارت 5 W/m².K، بالای 125℃ و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

2) در هریک از نمودارها با افزایش تعداد پره‌های گرمابر، بازده گرمابر و دمای بیشینه کاهش می‌یابد.

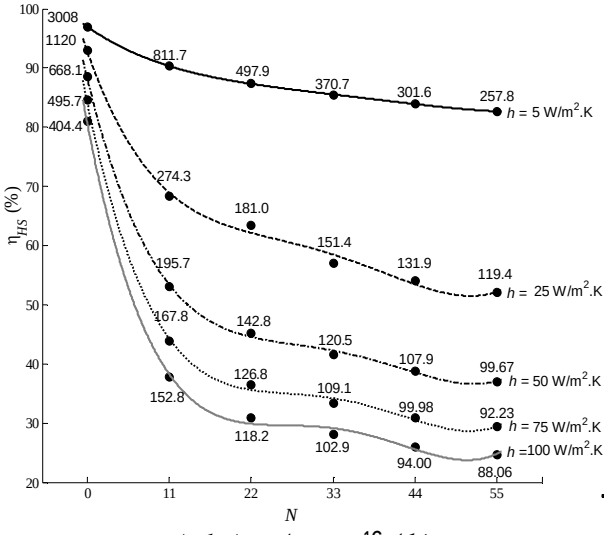
3) بالاترین بازده در h=25 W/m².K با دمای بیشینه 119/4℃، در تعداد پره 55 حاصل می‌شود و مقدار آن 52/04% است.



شکل 14 تغییر ارتفاع پره‌های گرمابر



شکل 15 تغییر ضخامت پره‌های گرمابر



شکل 16 تغییر تعداد پره‌های گرمابر

4) بالاترین بازده در h=50 W/m².K با دمای بیشینه 120/5℃، در تعداد پره 33 حاصل می‌شود و مقدار آن 41/59% است.

5) بالاترین بازده در h=75 W/m².K با دمای بیشینه 109/1℃، در تعداد پره 33 حاصل می‌شود و مقدار آن 33/32% است.

6) بالاترین بازده در h=100 W/m².K با دمای بیشینه 118/2℃، در تعداد پره 22 حاصل می‌شود و مقدار آن 30/9% است.

5-5- تغییر ضخامت پایه گرمابر

شکل 17 بازده گرمابر را برحسب مقادیر مختلف ضخامت پایه گرمابر نشان می‌دهد.

1) با توجه به شکل 17 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از 50 W/m².K است، بالای 125℃ و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

2) در هر یک از نمودارها با افزایش ضخامت پایه گرمابر، دمای بیشینه کاهش و بازده گرمابر افزایش می‌یابد.

3) بالاترین بازده در h=75 W/m².K با دمای بیشینه 121/8℃، در ضخامت پایه 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 43/32% است.

4) بالاترین بازده در h=100 W/m².K با دمای بیشینه 113/9 ℃، در ضخامت پایه 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 37/18% است.

5-6- تغییر هم‌زمان ارتفاع پره و ضخامت پایه با ثابت بودن ارتفاع گرمابر

شکل 18 بازده گرمابر برحسب مقادیر مختلف ارتفاع پره و ضخامت پایه با فرض ثابت بودن ارتفاع گرمابر را نشان می‌دهد.

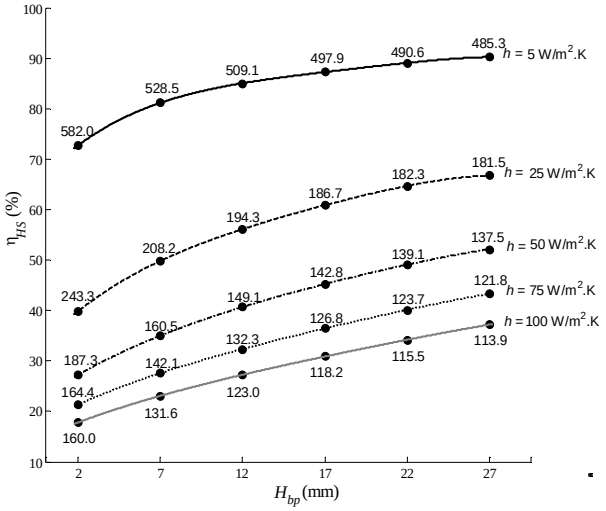
1) با توجه به شکل 18 دمای سایر نقاط روی نمودارهایی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها از سطح زیر گرمابر کمتر از 75 W/m².K، بالای 125℃ و خارج از محدوده مجاز حرارتی است.

2) بالاترین بازده در h=100 W/m².K با دمای بیشینه 116/6℃، برای ارتفاع پره 50 mm و ضخامت پایه گرمابر 27 mm حاصل می‌شود و مقدار آن 41/50% است.

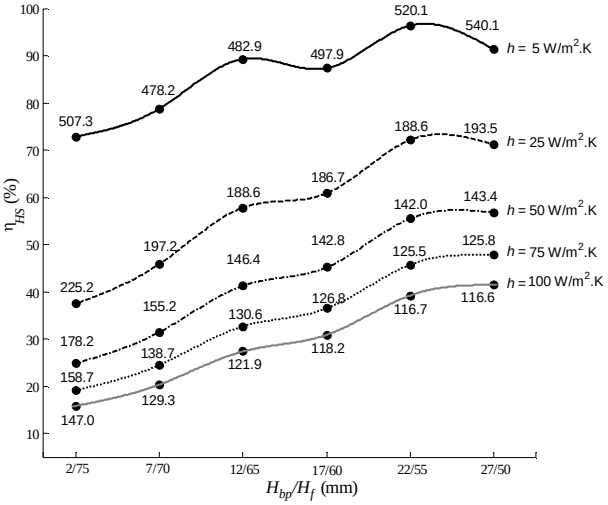
5-7-استخراج طراحی‌های مختلف ابعاد هندسی گرمابر با در نظر گرفتن نحوه چیدمان

کلیه نتایج مربوط به طراحی ابعاد هندسی گرمابر با شرط قرارگیری دمای تراشه‌ها در محدوده حرارتی مجاز و بازده بیشینه گرمابر (نتایج بخش 5-2 تا 5-6) در جدول 9 ارائه شده‌اند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]



شکل 17 تغییر ضخامت پایه گرمابر



شکل 18 تغییر هم‌زمان ارتفاع پره و ضخامت پایه با ثابت بودن ارتفاع گرمابر

نتایج جدول 9 مربوط به طراحی چیدمان فازهای اینورتر به‌صورت شکل 9-د با X=5 mm است. همچنین طراحی ابعاد هندسی گرمابر با دو شرط یادشده در بالا، برای چیدمان بهینه شکل 9-الف با X=60 mm انجام شده و نتایج آن در جدول 10 گزارش شده‌اند. شایان یاد است، از ترکیب ابعاد هندسی که برای هر یک از پارامترها (تعداد پره‌ها، ارتفاع پره‌ها، ضخامت پره‌ها و ضخامت پایه گرمابر) با شرط بازده بیشینه به‌صورت جداگانه به‌دست آمده‌اند، طراحی‌های دیگری برای گرمابر استخراج می‌شود. یاد این نکته لازم است که طراحی بهینه در این پژوهش لزوماً بهترین حالت ممکن نیست، بلکه منظور از چیدمان بهینه و ابعاد هندسی بهینه، ارزیابی و انتخاب بهترین گزینه از بین طراحی‌های مختلف شکل 9، جدول 9 و جدول 10 است. نکته پسین این است که انتخاب حالت بهینه از بین طراحی‌های مختلف چیدمان منابع حرارتی و گرمابر به نظر طراح بستگی دارد.

نتایج مربوط به جدول 9 به این صورت است که در ضریب انتقال حرارت 25 W/m².K، تنها یک طراحی وجود دارد که دمای بیشینه در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. بازده در این طراحی به بهای افزایش حجم 81/08% مواد مصرفی نسبت به گرمابر اولیه، به مقدار 21/14% افزایش یافته است. در ضریب انتقال حرارت 50 W/m².K، بازده در طراحی 3 نسبت‌به طراحی 2 بیشتر است، اما باید به این نکته توجه کرد که حجم مواد مصرفی در طراحی 3 بسیار بیشتر از طراحی 2 است.

جدول 9 طراحی‌های مختلف گرمابر برای چیدمان شکل 8-د (X=5 mm)

طراحی	h	N	l_f	H_f	H_{bp}	$^*\Delta V$	T_j (°C)	η_{HS}
1	25	55	3	60	17	81/08	109/4	52/04
2	50	33	3	60	17	27/03	120/5	41/59
3	50	22	7	60	17	72/07	124/5	57/72
4	75	33	3	60	17	27/03	109/1	33/32
5	75	22	7	60	17	72/07	112/7	46/16
6	75	22	3	75	17	13/51	123/1	31/16
7	75	22	3	60	27	27/03	121/8	43/32
8	75	33	3	75	27	74/76	104/3	34/04
9	75	22	7	75	27	130/63	107/2	47/33
10	75	22	3	75	27	40/54	118/34	37/21
11	100	22	3	60	17	0	118/2	30/90
12	100	22	7	60	17	72/07	104/8	39/93
13	100	22	3	45	17	-13/51	123/5	37/3
14	100	22	3	60	27	27/03	113/9	37/18
15	100	22	3	50	27	18/02	116/6	41/5
16	100	22	7	50	27	78/08	107/97	50/92
17	100	22	7	45	27	67/57	110/5	53/23
18	100	22	3	45	27	13/51	118/6	44/57

*درصد اختلاف حجمی مواد هر نمونه گرمابر با نمونه اولیه

جدول 10 طراحی‌های مختلف گرمابر برای چیدمان شکل 8-الف (X=60 mm)

طراحی	h	N	l_f	H_f	H_{bp}	$^*\Delta V$	T_j (°C)	η_{HS}
1	25	44	3	60	17	54/05	117/79	63/69
2	50	22	3	60	17	0	122/03	56/93
3	50	22	7	60	17	72/07	114/94	64/35
4	50	22	3	60	27	21/28	119/23	64/73
5	50	22	3	55	22	9/01	122/84	63/84
6	50	22	7	55	22	75/08	116/93	70/88
7	50	22	7	60	27	99/10	113/25	72/51
8	50	22	7	60	22	85/59	113/69	68/93
9	50	22	3	60	22	13/51	120/05	61/33
10	50	22	7	55	27	88/59	116/46	74/41
11	50	22	3	55	27	22/52	121/99	67/28
12	75	22	3	60	17	0	106/90	47/90
13	75	22	7	60	17	72/07	100/02	55/87
14	75	22	3	45	17	-13/51	113/51	56/97
15	75	22	3	60	27	21/28	104/62	55/93
16	75	22	3	50	27	18/02	108/35	61/56
17	75	22	7	50	27	78/08	103/43	69/16
18	75	22	7	45	27	67/57	106/50	71/50
19	75	22	3	45	27	13/51	110/98	64/57
20	100	22	3	60	17	0	98/95	41/64
21	100	22	7	60	17	72/07	92/25	49/73
22	100	22	7	30	17	-27/03	113/8	59/96
23	100	22	3	60	27	21/28	97/06	49/54
24	100	22	3	50	27	18/02	99/6	56/58
25	100	22	7	50	27	78/08	94/80	63/50
26	100	22	7	30	27	36/04	108/23	74/38
27	100	22	3	30	27	0	111/22	69/15

*درصد اختلاف حجمی مواد هر نمونه گرمابر با نمونه اولیه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

در ضریب انتقال حرارت $75\ W/m^2.K$، هر چند بالاترین بازده مربوط به طراحی 9 است، اما حجم مواد مصرفی در این طراحی بسیار بالاست؛ بنابراین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر، می‌توان طراحی 7 را با افزایش حجم 27/03% و بازده 43/32% به‌عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. در ضریب انتقال حرارت $100\ W/m^2.K$، بازده در طراحی 17 به بهای افزایش حجم 67/57% مواد مصرفی نسبت‌به گرمابر اولیه، به مقدار 22/33% افزایش یافته است. در طراحی 13 با این‌که حجم مواد مصرفی 13/51% کاهش پیدا کرده، بازده به مقدار 6/4% بهبود یافته است. در این‌جا نیز با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر، می‌توان طراحی 18 را با افزایش حجم 13/51% و بازده 44/57% به‌عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت.

نتایج مربوط به جدول 10 به این صورت است که در ضریب انتقال حرارت $25\ W/m^2.K$، تنها یک طراحی وجود دارد که دمای بیشینه در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. در ضریب انتقال حرارت $50\ W/m^2.K$، اگر حجم مواد مصرفی عامل محدودکننده نباشد، می‌توان طراحی 10 با افزایش حجم مواد مصرفی 88/59% و بازده 74/41% را انتخاب کرد و در غیراین‌صورت می‌توان از طراحی 5 با افزایش حجم مواد مصرفی 9/01% و بازده 63/84% استفاده کرد. همچنین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر، می‌توان طراحی 11 را با افزایش حجم 22/52% و بازده 67/28% به‌عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. به‌صورت مشابه در ضریب انتقال حرارت $75\ W/m^2.K$، اگر حجم مواد مصرفی عامل محدودکننده نباشد، می‌توان طراحی 18 با افزایش حجم مواد مصرفی 67/57% و بازده 71/50% را انتخاب کرد و در غیراین‌صورت می‌توان از طراحی 14 با کاهش حجم مواد مصرفی 13/51% و بازده 56/97% استفاده کرد. همچنین با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر، می‌توان طراحی 19 را با افزایش حجم 13/51% و بازده 64/57% به عنوان حالت مطلوب در نظر گرفت. در ضریب انتقال حرارت $100\ W/m^2.K$، با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر، می‌توان سه طراحی 22، 26 و 27 را به عنوان حالات مطلوب انتخاب کرد. در طراحی 22 حجم مواد مصرفی 27/03% کاهش یافته و بازده 69/15% است. در طراحی 26 با 36/04% افزایش حجم در مواد مصرفی بازده برابر با 74/38% می‌شود. جالب توجه است که در طراحی 27 بدون تغییر حجم مواد مصرفی نسبت به گرمابر اولیه بازده 27/51% افزایش یافته است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تلفات توان در یک نمونه اینورتر سه فاز با روش کلیدزنی پهنای باند توسط پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب و برخی اطلاعات فنی شرکت سازنده تجهیز انتخابی، تخمین‌زده شد. سپس مدل حرارتی اینورتر برای بررسی توزیع دمایی در چیدمان‌های مختلف منابع حرارتی و محاسبه بهره گرمابر در شرایط هندسی مختلف، در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. صحت مدل‌سازی حرارتی با مقایسهٔ دمای متوسط تراشه‌های IGBT و دیود در مقادیر مختلف توان خروجی اینورتر با دمای به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سِمیسِل تأیید شد. نتیجه جالب توجه از طراحی‌های مختلف چیدمان فازهای اینورتر این است که با چیدمان مطلوب منابع حرارتی، می‌توان دمای بیشینه تراشه‌ها را به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای حدوداً $20\ ^\circ C$ کاهش داد. طراحی مطلوب ابعاد هندسی گرمابر برای خنک کردن اینورتر با چیدمان بهینه، با مصالحه بین دو عامل حجم مواد مصرفی و بازده گرمابر انجام شد. در ضرایب انتقال حرارت $50\ W/m^2.K$ و $75\ W/m^2.K$ به‌ترتیب با افزایش حجم 22/52% و 13/51%، بازده 10/35% و 16/67% نسبت‌به گرمابر اولیه با ضریب انتقال حرارت یکسان افزایش یافته است. همچنین در ضریب انتقال حرارت $100\ W/m^2.K$، حجم مواد مصرفی 27/03% کاهش یافته و بازده 15/32% نسبت به گرمابر اولیه افزایش پیدا کرده است و از طرفی با 36/04% افزایش حجم در مواد مصرفی بازده 32/92% افزایش یافته است. جالب توجه است که در ضریب انتقال حرارت $100\ W/m^2.K$ بدون تغییر حجم مواد مصرفی نسبت‌به گرمابر اولیه و تنها با طراحی مناسب می‌توان بازده را 27/51% افزایش داد.

7- فهرست علائم

q	آهنگ انتقال گرما (W)
$\dot{q}$	آهنگ تولید انرژی در واحد حجم (W/m^3)
T	دما (K)
k	رسانندگی گرمایی (W/mK)
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی (W/m^2K)
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
A	مساحت گرمابر (m^2)

علایم یونانی

η	بهره (%)
ρ	چگالی جرمی (kg/m^3)

زیرنویس‌ها

HS	گرمابر
j	مقدار بیشینه برای تراشهٔ IGBT
1	ناحیه 1 در شکل شماتیک (شکل 1)
2	ناحیه 2 در شکل شماتیک (شکل 1)
d, Com	نتایج شبیه‌سازی برای تراشهٔ دیود
d, Sem	نتایج نرم‌افزار سمسیل برای تراشهٔ دیود
tr, Com	نتایج شبیه‌سازی برای تراشهٔ IGBT
tr, Sem	نتایج نرم‌افزار سمسیل برای تراشهٔ IGBT

8- مراجع

[1] R. K. Ulrich, W. D. Brown, *Advanced electronic packaging,* 2 ed., New York: Wiley-IEEE Press, 2006.

[2] M. H. Rashid, *Power electronics handbook,* United Kingdom: Academic Press Inc., 2006.

[3] M. Rahimo, Future trends in high-power bipolar metal-oxide semi-conductor controlled power semi-conductors, *IET Circuits, Devices & Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 155-167, 2014.

[4] P. S. Bimbhra, *Power Electronics,* 3 ed.: Raheel Naseem Printing Press, 2002.

[5] D. Bortis, B. Wrzecionko, J. W. Kolar, A 120 °C Ambient Temperature Forced Air-Cooled Normally-off SiC JFET Automotive Inverter System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2345- 2358, 2014.

[6] M. Ishiko, T. Kondo, A simple approach for dynamic junction temperature estimation of IGBTs on PWM operating conditions, in *Power Electronics Specialists Conference,* Orlando, FL, pp. 916-920, 2007

[7] A. M. Bazzi, P. T. Krein, J. W. Kimball, IGBT and diode loss estimation under hysteresis switching, *IEEE Transactions on Power Electronics,* Vol. 27, No. 3, pp. 1044-1048, 2012.

[8] H. Bostanci, D. V. Ee, B. A. Saarloos, D. P. Rini, L. C. Chow, Thermal Management of Power Inverter Modules at High Fluxes via Two-Phase Spray Cooling, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology,* Vol. 2, No. 9, pp. 1480-1485, 2012.

[9] G. Chen, D. Han, Y. Mei, X. Cao, T. Wang, X. Chen, G. Lu, Transient thermal performance of IGBT power modules attached by low-temperature sintered nanosilver, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability,* Vol. 12, No. 1, pp. 124-132, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]

[10] A. Castellazzi, Comprehensive compact models for the circuit simulation of multi-chip power modules, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 5, pp. 1251-1264, 2009.

[11] A. Shah, B. G. Sammakia, H. Srihari, K. Ramakrishna, A numerical study of the thermal performance of an impingement heat sink-fin shape optimization, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 27, No. 4, pp. 710-717, 2004.

[12] P. Ning, F. Wang, K. D. T. Ngo, Forced-Air Cooling System Design Under Weight Constraint for High-Temperature SiC Converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1998- 2007, 2013.

[13] J. Humphrey, R. Devarakonda, N. Queipo, Interactive computational-experimental methodologies (ICEME) for thermofluids research: application to the optimized packaging of heated electronic components, in *Advances in electronic packaging,* pp. 179-191, 1992.

[14] N. Queipo, J. Humphrey, A. Ortega, Multiobjective optimization of component placement on planar printed wiring boards, in *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium,* Austin, TX, pp. 92-105, 1997.

[15] E. A. Sewall, *Development of a thermal management methodology for a front-end dps power supply,* Master of Science Thesis, Mechanical Engineering Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 2002.

[16] W. Elenbaas, Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection, *Physica,* Vol. 9, No. 1, pp. 1–28, 1942.

[17] E. K. Levy, Optimum Plate Spacing for Laminar Natural Convection Heat Transfer from Parallel Vertical Isothermal Flat Plates, *ASME Journal of Heat Transfer,* Vol. 93, No. 4, pp. 463–465, 1971.

[18] A. Bar-Cohen, W. M. Rohsenow, Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates, *ASME Journal of Heat Transfer,* Vol. 106, No. 1, pp. 116-123, 1984.

[19] R. E. Simons, Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Thermal Resistance, *Electronics Cooling Magazine,* pp. 8-9, 2003.

[20] R. E. Simons, Estimating Parallel Plate-Fin Heat Sink Pressure Drop, *Electronics Cooling*, Vol. 9, No. 2, pp. 8-10, 2003.

[21] U. Drofenik, G. Laimer, J. W. Kolar, Theoretical converter power density limits for forced convection cooling, in *International conference, Power electronics, intelligent motion, power quality,* Nuremberg, Germany, pp. 608–619, 2007.

[22] U. Drofenik, J. W. Kolar, Analyzing the theoretical limits of forced air-cooling by employing advanced composite materials with thermal conductivities>400 W/mK, in *4th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS),* Naples, Italy, pp. 1-6, 2006.

[23] S. Lee, Optimum design and selection of heatsinks, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, Vol. 18, No. 4, pp. 812-817, 2002.

[24] M. Asadi, B. Arezi, Modeling and Simulation of Air Forced Cooling Heat Sink for Thyristor Controlled Reactor (TCR), in *2nd international Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference,* Tehran, 1389.

[25] H. Chen, Y. Xu, H. H. Iu, Analysis of temperature distribution in power converter for switched reluctance motor drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 991-994, 2012.

[26] D. W. Hart, *Power Electronics,* 1 ed.: Tata McGraw-Hill, 2011.

[27] A. Zanin, SKiM-Technical Explanations, SEMIKRON, 2013.

[28] SKiM606GD066HD datasheet, SEMIKRON, 2013.

[29] A. Consoli, C. Licitra, S. Musumeci, A. Testa, F. Frisina, R. Letor, Comparative investigation on power losses in soft-switching insulated gate devices, in *Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs,* Davos, 1994.

[30] X. Dewei, L. Haiwei, H. Lipei, S. Azuma, M. Kimata, R. Uchida, Power loss and junction temperature analysis of power semiconductor devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1426-1431, 2002.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.10.8]