

طراحی سیستمی بخش های حفاظتی یک مبدل ماتریسی ۳ کیلو واتی و تحلیل حرارتی گرماگیر آن به روش اجزای محدود

مصطفی گلرخ جوبنی^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳)

چکیده

در این مقاله به شبیه سازی مبدل ماتریسی با ساختار مستقیم و تحلیل حرارتی ادوات حفاظتی آن پرداخته می شود. امروزه، با توجه به پیشرفت فناوری در حوزه مبدل های الکترونیک قدرت، مبدل های ماتریسی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته اند. این مبدل ها قابلیت های بسیاری داشته و در کاربردهای صنعتی و نظامی گوناگون همچون صنایع فضایی، هوایی، دریایی، حمل و نقل ریلی، سایت های نظامی مرزی جدا از شبکه و موارد مشابه استفاده می شوند. هدف اصلی در این مقاله، ارائه یک روند به منظور طراحی زیرسامانه های حفاظتی شامل فیلتر ورودی، مدارهای محافظ (اسنابر) و گرماگیر می باشد. فیلتر ورودی موجب کاهش ورود اغتشاشات از سمت مبدل به شبکه می گردد. از طرفی با توجه به کلیدزنی با فرکانس بالا، استفاده از مدارهای اسنابر در مبدل های ماتریسی الزامی می باشد. همچنین، ادوات قدرت نیاز به حفاظت حرارتی و گرماگیر جهت عملکرد طولانی مدت دارند. در این مقاله، موارد مذکور با استفاده از روابط و روندنمای پیشنهادی، برای یک مبدل ماتریسی با توان ۳ کیلوواتی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاکی از کاهش اعوجاجات هارمونیک جریان ورودی در اثر استفاده از فیلتر ورودی طراحی شده و همچنین افزایش سرعت پاسخ پله سامانه به همراه کاهش خطای حالت ماندگار می باشد. همچنین، مدارهای اسنابر طراحی شده، توانایی کاهش ۲۰ درصدی استرس ولتاژ بر روی کلیدها را داشته و در خصوص دفع حرارت نیز به کمک تحلیل به روش اجزای محدود، تأثیر گرماگیر طراحی شده در کاهش ۶۰ درصدی استرس دمایی نشان داده می شود.

کلیدواژه ها: مبدل ماتریسی، فیلتر هارمونیک، مدارهای اسنابر، گرماگیر

System Design of Protection Subsystems of a 3 kw Matrix Converter and Its Heat sink Thermal Analysis by the Finite Element Method

M. Golrokh Joubeni, A. Dehestani Kolagar*, M. R. Alizadeh Pahlavani

Malek Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 01 / 11 / 2021; Accepted: 14 / 09 / 2022)

Abstract

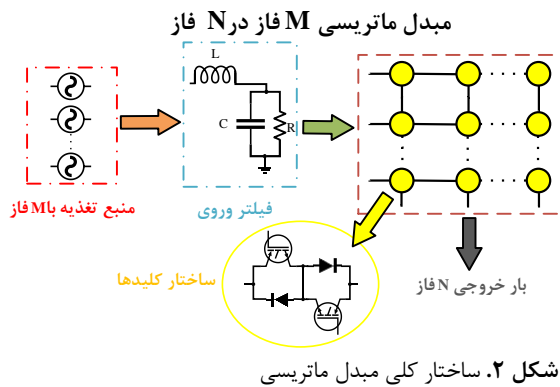
In this paper, the simulation of a direct matrix converter and the thermal analysis of its protection devices are performed. Nowadays, due to the technological advances in the field of power electronic converters, matrix converters are receiving more and more attention. These converters have many capabilities and are used in various industrial and military applications such as the aerospace industry, offshore platforms, rail transport, borderline military sites, apart from the power grid and similar applications. The main purpose of this paper is to provide a procedure for designing protection subsystems including input filters, protection circuits (snubbers), and heat sinks. The input filter reduces the penetration of disturbances from the converter to the network. On the other hand, due to the high switching frequency, the use of snubber circuits in matrix converters is essential. Also, power circuit devices need thermal protection for long-term operation. In this paper, the aforementioned requirements have been studied using a proposed procedure for a 3 kW matrix converter. The results show the reduction of the input current harmonic distortion due to the performance of the input filter and also the improvement of the step response of the system while reducing the steady state error. Also, the designed snubber circuits have the ability to reduce the voltage stress on the switches by 20%. Moreover, through the finite element analysis, the effect of heat sink in reducing the thermal stress by 60% is demonstrated.

Keywords: Matrix Converter, Harmonic Filter, Snubber Circuit, Heat Sink.

۱. مقدمه

ابعاد کوچک‌تر و هزینه ساخت کمتری می‌باشند. همچنین، به دلیل دسترسی‌تر بودن منبع ولتاژ در صنعت معمولاً از این منبع به‌عنوان تغذیه استفاده می‌گردد. از این رو مبدل مورد بحث در این مقاله، از نوع مبدل ماتریسی فاقد ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت مستقیم و با منبع ولتاژی می‌باشد. مبدل مورد بحث به رنگ آبی آسمانی در شکل (۱) قابل مشاهده است.

مبدل‌های ماتریسی بر خلاف مبدل‌های متداولی که برای تبدیل AC/AC مورد استفاده قرار می‌گرفتند و از ترکیب یک پل یکسوساز^۳ و خازن الکترولیتی لینک DC در ساختار خود استفاده می‌کردند؛ منبع ورودی را به‌طور مستقیم و از طریق کلیدهای دووجهته قدرت به بار متصل می‌کند. در شکل (۲) نمای کلی این مبدل قابل مشاهده است. مبدل ماتریسی، مبدلی است که توان را از منبع ورودی گرفته و در انتقال یک مرحله‌ای به مصرف‌کننده در خروجی منتقل می‌کند. همان‌طور که از عنوان مبدل ماتریسی برمی‌آید، این مبدل شامل آرایشی منظم از کلیدها است که به‌صورت ترکیبی از m سطر و n ستون در کنار هم قرار گرفته‌اند. به‌طوری که m فاز منبع ورودی را به n فاز در سمت خروجی مطابق شکل (۲) تبدیل می‌کند. بنابراین از لحاظ تئوری امکان اتصال یک سامانه با تعداد فاز دلخواه به یک بار با تعداد فاز دلخواه امکان‌پذیر است [۱ و ۲].



شکل ۲. ساختار کلی مبدل ماتریسی

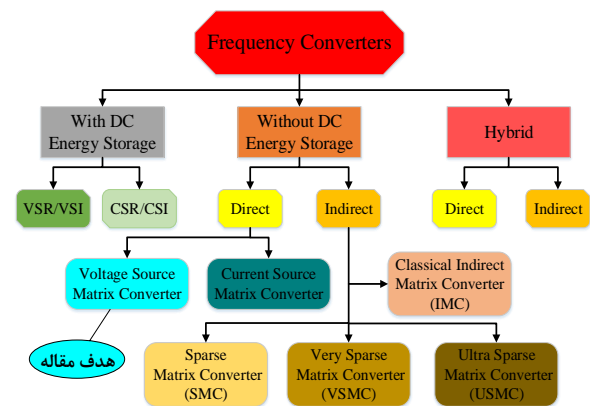
ادوات نیمه‌هادی در مبدل‌های ماتریسی به دلیل فرکانس کلیدزنی بالا و نیز توان انتقالی بالاتر، تحت اعوجاجات زیاد و نیز استرس ولتاژ و جریان قابل توجه قرار دارند. بنابراین توجه به خنک‌سازی و طراحی بهینه در آن‌ها ضروری است [۱ و ۲].

در ادامه مروری بر قابلیت‌ها، کاربردها و روش کنترل مبدل ماتریسی ارائه می‌شود. سپس، الگوریتم حفاظتی شامل: انتخاب فیلتر، مدار محافظ کلیدها و خنک‌کننده مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه، نتایج شبیه‌سازی مدار و تحلیل المان محدود برای حالت‌های استفاده از الگوریتم حفاظتی و عدم استفاده از آن، مقایسه شده و نتایج بهبود یافته منعکس می‌گردد.

دسته‌بندی مبدل‌های فرکانسی به‌صورت شکل (۱) می‌باشد. این دسته‌بندی با توجه به المان‌های داخلی متفاوت مبدل‌ها دارای بخش‌های مختلفی است. در واقع، سه دسته عمده وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- مبدل‌های فرکانسی با المان ذخیره‌سازی انرژی.
- ۲- مبدل‌های فرکانسی بدون المان ذخیره‌سازی انرژی.
- ۳- مبدل‌های فرکانسی ترکیبی.

دسته اول با توجه به منبع ورودی خود به دو بخش، مبدل‌های منبع جریانی و منبع ولتاژی تقسیم می‌شوند [۱].



شکل ۱. دسته‌بندی انواع مبدل‌های ماتریسی

دسته دوم که هدف این مقاله است، از دید نحوه انتقال توان از سمت ورودی به خروجی به دو گروه مبدل ماتریسی مستقیم (DMC^۱) و مبدل ماتریسی غیر مستقیم (IMC^۲) تقسیم می‌شود. نوع DMC انتقال ولتاژ و جریان از سمت منبع به بار را در یک مرحله انجام می‌دهد. در حالی که، IMC از دو مبدل جداگانه در ساختار خود بهره می‌برد و انتقال توان را در دو مرحله متوالی (یکسوسازی و موج‌سازی) انجام می‌دهد. هر دو ساختار رفتار مشابهی دارند ولی ساختار IMC کموتاسیون ساده‌تری نسبت به ساختار DMC دارد. این تفاوت در نحوه کموتاسیون سبب تفاوت در بارگذاری کلیدهای نیمه‌هادی و طرح‌های کلیدزنی می‌شود. مبدل ماتریسی غیر مستقیم به دلیل دو مرحله‌ای بودن تبدیل توان، کموتاسیون ساده‌تری دارد. اما، این ویژگی در مبدل با افزایش هزینه‌ها برای اضافه کردن تجهیزات قدرت مانند کلیدهای نیمه‌هادی که خود سبب افزایش توان تلفاتی و کاهش راندمان در مبدل می‌شود، به‌دست می‌آید [۱ و ۲]. دسته سوم نیز، از هر دو ساختار ذخیره‌سازی و بدون ذخیره‌سازی بهره می‌برد. به نحوی که، از دو بخش شامل المان ذخیره‌ساز و فاقد المان ذخیره‌ساز تشکیل می‌گردد [۲]. مبدل‌های فاقد المان ذخیره‌ساز انرژی دارای

^۳ Inverter

^۱ Direct Matrix Converter

^۲ Indirect Matrix Converter

۳- روش مدلاسیون فضای برداری (SVM).

در روش مستقیم با استفاده از روابط مداری، شکل موج خروجی به صورت ضریبی از شکل موج ورودی می‌باشد. همچنین، بهره ولتاژ حداکثر ۰/۵ می‌باشد [۹]. در روش Roy مقدار پالس‌های فرمان مورد نیاز کلیدها از روی الگوریتم نام‌گذاری وابسته به ولتاژ و جریان محاسبه می‌گردد. در این روش حداکثر بهره ولتاژ به ۰/۸۶۶ می‌رسد [۱۰]. روش SVM جدیدترین روش به کار رفته در مبدل‌های ماتریسی می‌باشد. در این روش با استفاده از بردارهای فضایی ولتاژ و جریان و سیگنال‌های کنترلی بازخوردی ناشی از حسگرها؛ زمان کلیدزنی مشخص می‌گردد. در روش SVM بهره ولتاژ با توجه به ساختارهای مختلف به ۱/۱۵ نیز می‌تواند ارتقاء یابد [۱۱].

به طور معمول دو قاعده کلی در مبدل‌های ماتریسی که در سمت ورودی از منبع ولتاژ تغذیه و عمدتاً بار با ماهیت سلفی را تغذیه می‌کنند، باید رعایت شود [۱۲].

(۱) فازهای ورودی هرگز نباید اتصال کوتاه شوند.

(۲) جریان خروجی هرگز نباید قطع شود.

در شکل (۳) فرآیند تولید زمان مورد نیاز، برای پالس کلیدها بر اساس حالت‌هایی که دو شرط گفته شده را برآورده نماید؛ نشان داده شده است. با استفاده از قوانین مداری ولتاژ در یک حلقه بسته و جریان در یک گره؛ با در نظر گرفتن شکل (۴) و روابط گفته شده و دو محدودیت مذکور تنها ۲۷ حالت کلیدزنی برای مبدل ماتریسی ۹ کلیدی وجود دارد [۱۳]. با توجه به شکل (۳) در ابتدا با تغییر مرجع از قاب abc به $\beta\alpha$ صورت می‌گیرد. سپس، برای جریان و ولتاژ شماره ناحیه و اندازه زاویه برای هر فاز به دست می‌آید. در ادامه مطابق شکل (۳) به کمک روابط مدت زمان از روی روابط استخراج می‌گردد. پس از آن، از روی ۲۷ حالت ممکن، جهت کاهش تلفات کلید زنی حالت‌های مورد نظر انتخاب می‌گردند [۱۳]. رابطه زمانی برای ولتاژ به صورت رابطه (۱) است [۱۳].

$$\begin{aligned}d_{\alpha} &= T_{\alpha} / T_S = M_V \times \sin(60 - \theta_V) \\d_{\beta} &= T_{\beta} / T_S = M_V \times \sin(\theta_V) \\d_{0V} &= T_{0V} / T_S = 1 - d_{\alpha} - d_{\beta}\end{aligned}\quad (1)$$

رابطه زمانی برای جریان نیز، به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۳].

$$\begin{aligned}d_{\mu} &= T_{\mu} / T_S = M_I \times \sin(60 - \theta_I) \\d_{\gamma} &= T_{\gamma} / T_S = M_I \times \sin(\theta_I) \\d_{0I} &= T_{0I} / T_S = 1 - d_{\mu} - d_{\gamma}\end{aligned}\quad (2)$$

به منظور تفکیک ولتاژ و جریان، در رابطه (۲) بردارهای $\beta\alpha$ به صورت $\mu\gamma$ فرض شده‌اند. مقدار M_I و M_V به ترتیب نمایانگر

۱-۱ قابلیت‌های مبدل ماتریسی

- ❖ در مبدل‌های ماتریسی با استفاده از فیلتر ورودی مناسب از اثرات ناخواسته به شبکه کاسته می‌شود [۳].
- ❖ هم‌فاز بودن ولتاژ و جریان تا حد مطلوبی در ورودی مبدل قابل تحقق است [۳].
- ❖ قابلیت کنترل فرکانس و دامنه ولتاژ در خروجی وجود دارد [۳].
- ❖ استرس ولتاژ^۱ بر روی ادوات الکترونیک قدرت شامل کلیدها و دیودها بسیار پایین می‌باشد. از این رو، قابلیت اطمینان این مبدل‌ها بسیار بالاتر از سایر ساختارهای مشابه است [۴].
- ❖ توانایی انتقال توان دو طرفه، با توجه به توانایی کلیدزنی به صورت چهار ربعی کلیدها وجود دارد [۵].
- ❖ با استفاده از اسنابر^۲ قابلیت اطمینان این مبدل‌ها بسیار بیشتر از مبدل‌های یکسوساز ۱۸ پالسی می‌شود [۶].
- ❖ استفاده از روش کنترلی SVM^۳ و الگوریتم‌های پیشنهادی جدید برای بر طرف کردن خطاهای فاز و نامتعادلی در این مبدل‌ها قابل پیاده‌سازی است [۷].
- ❖ وزن و ابعاد کم دارد و ماژولار است [۸].

۱-۲ کاربردهای مبدل ماتریسی

- از مبدل‌های ماتریسی برای درایو موتورهای استفاده می‌شود [۳].
- کاربردهای مختلف مبدل ماتریسی شامل: پیشرانس، تغذیه سلاح‌های الکترومغناطیسی، خودروهای الکتریکی، مدارهای محافظ و قطارهای برقی است [۵].
- به عنوان درایو موتور در برنامه‌های فضایی و هوایی استفاده شده است [۶].
- از مبدل‌های ماتریسی ماژولار در ایستگاه‌های مستقل از شبکه برق و متصل به سلول‌های خورشیدی جهت انتقال توان در مناطق مرزی استفاده می‌شود [۸].

۲. روش‌های کنترل

برای کنترل مبدل ماتریسی روش‌های مختلفی وجود دارد که سه روش زیر از معروف‌ترین آن‌ها هستند.

۱- روش مستقیم؛

۲- روش Roy؛

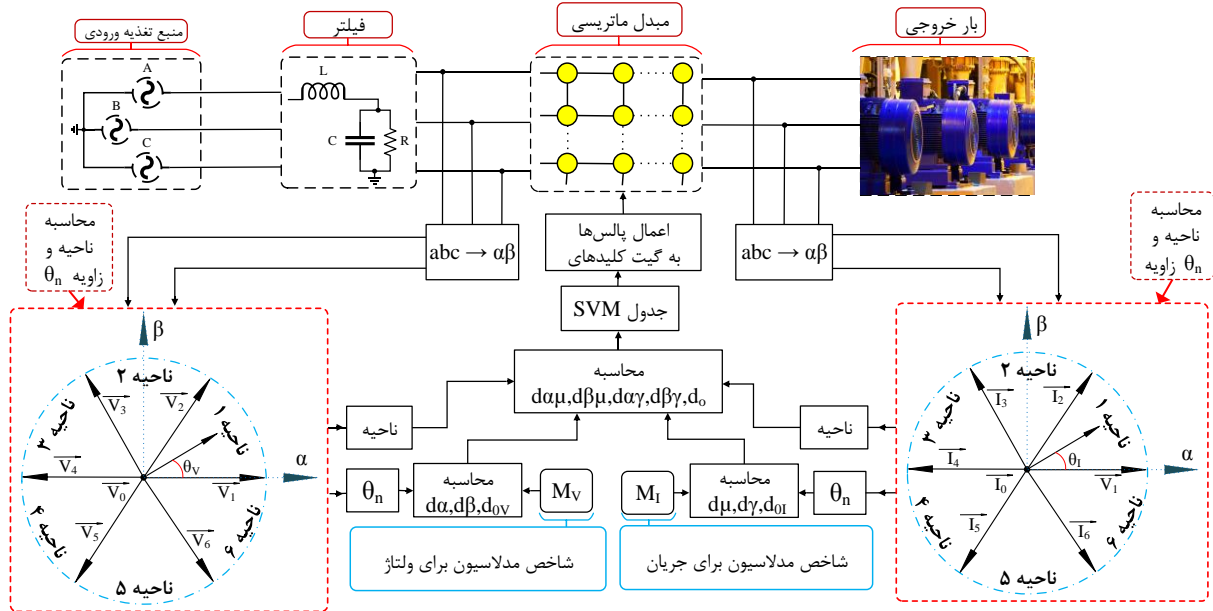
¹ Voltage Stress

² Snubber

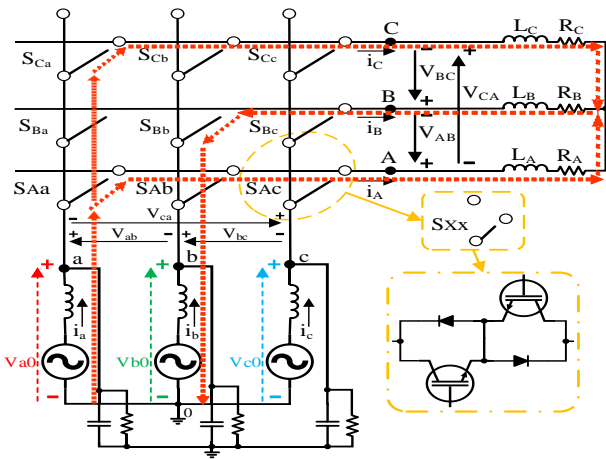
³ Space Vector Modulation

$$\begin{aligned}
 d_{\alpha\mu} &= d_\alpha \times d_\mu = M \times \sin(60 - \theta_v) \times \sin(60 - \theta_l) = T_{\alpha\mu} / T_S \\
 d_{\beta\mu} &= d_\beta \times d_\mu = M \times \sin(\theta_v) \times \sin(60 - \theta_l) = T_{\beta\mu} / T_S \\
 d_{\alpha\gamma} &= d_\alpha \times d_\gamma = M \times \sin(60 - \theta_v) \times \sin(\theta_l) = T_{\alpha\gamma} / T_S \\
 d_{\beta\gamma} &= d_\beta \times d_\gamma = M \times \sin(\theta_v) \times \sin(\theta_l) = T_{\beta\gamma} / T_S \\
 d_0 &= 1 - d_{\alpha\mu} - d_{\beta\mu} - d_{\alpha\gamma} - d_{\beta\gamma} = T_0 / T_S
 \end{aligned}
 \tag{۳}$$

شاخص مدلاسیون ولتاژ و جریان می‌باشند. سپس، جهت ادغام نتایج ولتاژ و جریان و محاسبه هم‌زمان آن‌ها مانند شکل (۳) روابط زمانی نهایی برای کلیدزنی به‌صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. همچنین، مقدار M شاخص مدلاسیون است و حاصل ضرب $M_V \times M_I$ است.



شکل ۳. فرآیند تولید پالس‌های کنترلی Gate کلیدها



شکل ۴. مدار مبدل ماتریسی شبیه‌سازی شده

۲-۱. الگوریتم پیشنهادی برای بخش‌های محافظتی

الگوریتم شکل (۵) برای انتخاب بهینه مدارهای محافظ شامل فیلتر ورودی، اسنابر و خنک کننده پیشنهاد شده است. در ابتدا محل قرارگیری فیلتر به نحوی انتخاب می‌شود که منجر به کاهش تلفات و افزایش راندمان گردد. سپس، مقدار سلف، خازن و مقاومت به نحوی محاسبه می‌گردند، که توانایی پاسخ مناسب

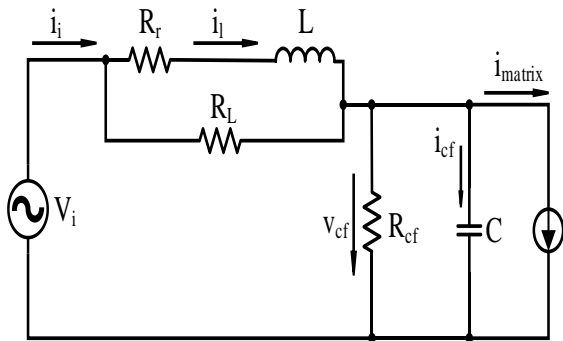
ارتباط بین ولتاژ و جریان خروجی و زمان‌های بیان شده در رابطه (۳)، با توجه نام گذاری نشان داده شده در شکل (۴) برای ولتاژ و جریان به ترتیب به‌صورت رابطه (۴) و رابطه (۵) است [۱۳].

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_\alpha + d_\beta \\ -d_\alpha \\ -d_\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_\mu + d_\gamma \\ -d_\mu \\ -d_\gamma \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix}
 \tag{۴}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{\alpha\mu} \\ -d_{\alpha\mu} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-i_B) + \begin{bmatrix} d_{\beta\mu} \\ -d_{\beta\mu} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-i_A) + \begin{bmatrix} d_{\beta\gamma} \\ 0 \\ -d_{\beta\gamma} \end{bmatrix} \cdot (-i_A) + \begin{bmatrix} d_{\alpha\gamma} \\ 0 \\ -d_{\alpha\gamma} \end{bmatrix} \cdot (-i_B)
 \tag{۵}$$

در شکل (۴) ابتدا ورودی شبکه سه فاز برق می‌باشند. سپس، ورودی به فیلتر متصل می‌گردد. در ادامه، مبدل ماتریسی با آرایش ۹ کلید قرار دارد. در انتها مبدل ماتریسی به بار متصل می‌شود [۱۳]. در شکل (۴) مسیر عبور جریان برای یک حلقه نشان داده شده است. این حلقه برای حالتی است که S_{Bb} و S_{Aa} و S_{Ca} وصل می‌باشند. در این حالت با نوشتن KVL بر روی حلقه نشان داده شده در شکل (۴)، مقدار ولتاژ $V_{BC} = -V_{ab}$ ، $V_{AB} = V_{ab}$ و $V_{CA} = 0$ می‌گردد.

می‌باشد. برای بهینه بودن مدار فیلتر از نظر تلفات باید ساختار تغییر یابد. در شکل (۶) در صورت استفاده از سه مقاومت تلفات فیلتر بالا می‌باشد. همچنین، اگر از مقاومت سری با سلف استفاده شود، تلفات بسیار بالا می‌باشد. مقاومت موازی با سلف موجب عبور برخی از اغتشاشات فرکانس بالا به شبکه می‌گردد. بنابراین برای کاهش تلفات و اغتشاشات از مقاومت موازی با خازن استفاده شده است.



شکل ۶. مدار معادل تک فاز از اجزای داخلی فیلتر روابط جریان و ولتاژ برای شرایطی که $R_i = 0$ و $R_L = \infty$ باشند، به صورت رابطه (۶) هستند [۱۴].

$$i_i(S) = \frac{1}{LC} \frac{i_{matrix}(S)}{S^2 + S \frac{1}{CR_{cf}} + \frac{1}{LC}} \quad | V_i(S) = 0 \quad (6)$$

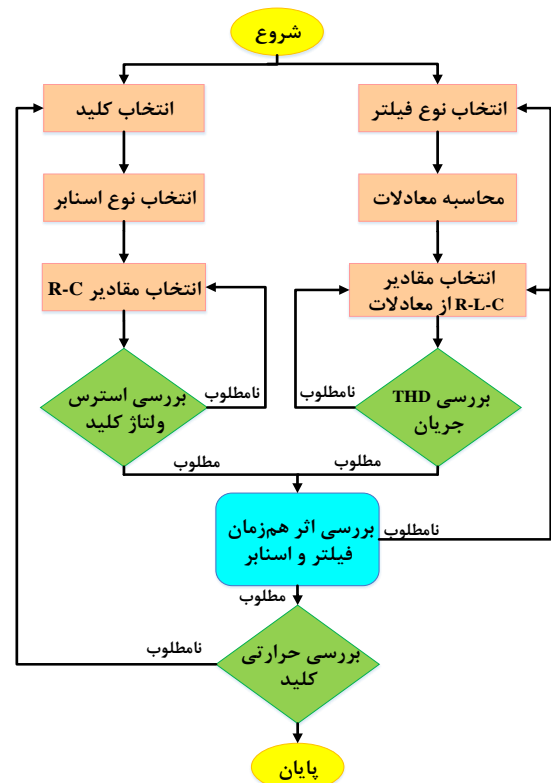
$$V_{cf}(S) = - \frac{S \frac{1}{C}}{S^2 + S \frac{1}{CR_{cf}} + \frac{1}{LC}} i_{matrix}(S) \quad | V_i(S) = 0$$

با توجه به فرم کانونی که به صورت $d(s) = s^2 + 2\omega_n \zeta s + \omega_n^2$ تعریف می‌شود و رابطه (۶) مقدار فرکانس طبیعی^۲ و ζ ضریب میرایی^۳ بوده که به صورت رابطه (۷) هستند [۱۴].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \zeta = \frac{1}{2R_{cf}} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

با توجه به مرجع [۱۴] برای یک پاسخ پله مناسب می‌بایست فرکانس‌های طبیعی مدار شرط $1000 \times 2\pi < \omega_n < 5000 \times 2\pi$ را ارضاء نمایند. همچنین، برای کاهش تلفات و پاسخ سریع سامانه مرتبه دوم مقاومت موازی با خازن بین $7/1 \Omega < R_{cf} < 22/4 \Omega$ باشد [۱۴]. مقدار المان‌های مدار شکل (۶) با توجه به رابطه (۷) به نحوی که شرط‌های مرجع [۱۴] را ارضاء نماید به صورت جدول (۱) است.

فرکانسی را داشته و موجب بهبود THD^۱ گردد. از روی نتایج ولتاژ و جریان کلیدها در شبیه‌سازی، نوع کلید انتخاب می‌گردد. پس از انتخاب نوع کلید، نوع اسنابر و روابط موجود برای خازن و مقاومت محاسبه می‌گردند. در گام بعد، شبیه‌سازی مجدد انجام می‌شود و نتایج شکل موج‌های خروجی با اثر هم‌زمان فیلتر ورودی و اسنابر بر روی تمامی مدار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورت نامطلوب بودن محل فیلتر یا مقادیر محاسبه شده فیلتر ورودی تغییر می‌یابد. به دلیل انتخاب کلید در ورودی و وابسته بودن اسنابر به کلید، به ناچار باید مقادیر فیلتر تغییر نماید. پس از بررسی مجدد مراحل، در صورت مطلوب بودن نتایج، از روی ابعاد و تلفات کلید، بررسی حرارتی توسط نرم‌افزار المان محدود صورت می‌گیرد. اگر نتایج تحلیل حرارتی و خنک کننده طراحی شده مطلوب نباشند، کلید دیگری انتخاب و مراحل تکرار می‌گردد.



شکل ۵. روندنمای انتخاب المان‌های حفاظتی

۲-۲. انتخاب فیلتر برای ورودی مبدل ماتریسی

تعداد کلیدهای مورد استفاده در مبدل ماتریسی ۹ عدد می‌باشد. بنابراین نیاز به یک فیلتر در ورودی جهت جلوگیری از وارد شدن اغتشاشات فرکانس بالای جریانی حاصل از کلیدزنی به شبکه وجود دارد. مدار فیلتر به صورت تک خطی برای یک فاز در شکل (۶) نشان داده شده است. مدار فیلتر ارائه شده برای حالت کلی

^۲ Natural frequency

^۳ Damping Factor

^۱ Total Harmonic Distortion

جدول ۱. مقادیر پارامترهای فیلتر

مقدار	نام	توضیحات
۵۷۷۳/۵۰۲	ω_n	فرکانس طبیعی
۰/۳۸۱	ξ	ضریب میرایی
۲۲ Ω	R_{CF}	مقاومت موازی با خازن
۵ mH	L	سلف
۶ μF	C	خازن

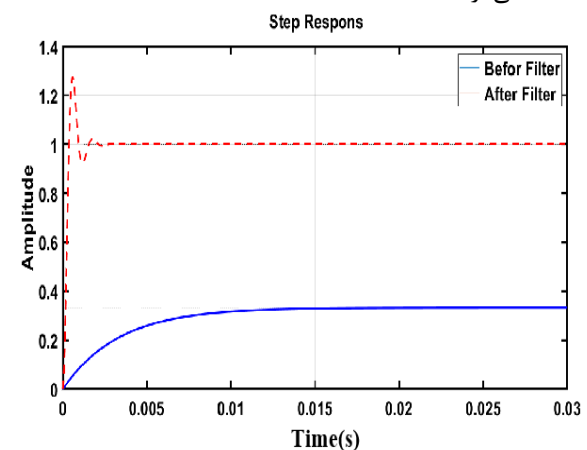
به منظور بررسی سرعت سامانه پاسخ پله در شکل (۷) برای دو حالت قبل از فیلتر و بعد از فیلتر رسم شده است. تابع تبدیل بدون فیلتر به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$\frac{1}{0.01s + 3} \quad (8)$$

با توجه به شکل (۷) پاسخ پله سامانه بودن فیلتر بسیار کند بوده و دارای خطای حالت ماندگار می‌باشد. تابع تبدیل با اضافه نمودن فیلتر به صورت رابطه (۹) است.

$$\frac{3.333 \times 10^7}{s^2 + 4400s + 6.667 \times 10^7} \quad (9)$$

با اضافه نمودن فیلتر، خطای حالت ماندگار رفع می‌گردد. در شکل (۷) مقدار نهایی پاسخ پله از ۰/۳۳۳ به ۱/۰۰۱ تغییر می‌یابد. بنابراین خطای حالت ماندگار بهبود می‌یابد. همچنین زمان نشست^۱ از 13×10^{-3} به 73×10^{-4} کاهش می‌یابد و به سرعت سامانه افزوده می‌شود. از طرفی زمان جهش^۲ نیز بهبود می‌یابد. به نحوی که مقدار زمان جهش 73×10^{-4} ثانیه به مقدار $1/5 \times 10^{-4}$ می‌رسد. بنابراین نتایج فیلتر طراحی شده موجب بهبود عملکرد سامانه می‌گردد.

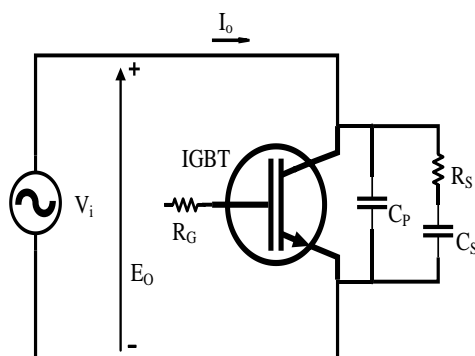


شکل ۷. پاسخ پله

۳-۲. انتخاب مدار محافظ برای ادوات قدرت

در مدارهای قدرت به واسطه کلیدزنی‌های پی در پی و وجود

المان‌های نظیر خازن و سلف که به ترتیب با تغییر ناگهانی ولتاژ و جریان ایجاد ضربات جریانی و ولتاژی می‌کنند؛ نیاز به مدارهای محافظی موسوم به اسنابر می‌باشد. در شکل (۸) مدار کلید به همراه خازن ذاتی C_p و مدار اسنابر مقاومتی - خازنی نشان داده شده است. جهت انتخاب اسنابر بهینه باید رابطه بین خازن اسنابر C_s با خازن خروجی کلید C_p به صورت تقریبی $C_s \approx 2 \times C_p$ باشد. مقاومت R_G جهت محافظت گیت کلیدها در مقابل جریان‌های هجومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه مقاومت اسنابر R_s با توجه به ولتاژ دو سر کلید و جریان عبوری از کلید که در رابطه (۱۰) نشان داده شده استفاده می‌شود [۱۵].



شکل ۸. کلید به همراه خازن ذاتی، اسنابر و مقاومت گیت

$$R_s = \frac{E_o}{I_o} \quad (10)$$

همچنین مقاومت باید از نظر تلفات، توانایی برآورده ساختن رابطه (۱۱) را داشته باشد. در این رابطه f_s فرکانس کلیدزنی، E_o ولتاژ دو سر کلید و C_s خازن اسنابر می‌باشد [۱۵].

$$P_{diss} \approx C_s \times E_o^2 \times f_s \quad (11)$$

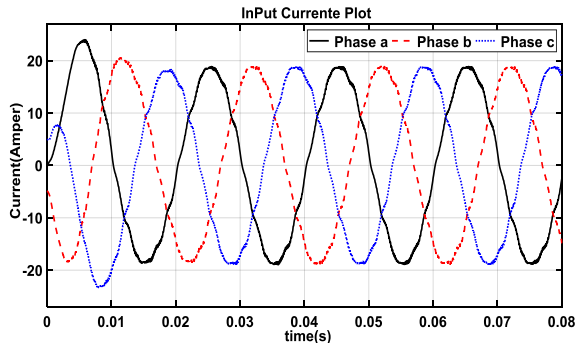
کلید و دیود انتخاب شده به ترتیب NGTB30N60FWG و RURG3060 می‌باشند. دلیل انتخاب نیز، توانایی تحمل ولتاژ و جریان حاصل از نتایج شبیه‌سازی و استفاده آن‌ها در صنعت می‌باشد. مقدار المان‌های اسنابر به کار رفته در مدار و مشخصات کلید IGBT و دیود مورد استفاده در شبیه‌سازی به صورت جدول (۲) می‌باشد. نوع اسنابر مورد استفاده خازنی - مقاومتی است. مقدار خازن و مقاومت از روی روابط مطرح شده، انتخاب گردیده است. تلفات بر روی مقاومت با R_s با توجه به رابطه (۱۱) برابر با ۱۸ mW است.

جدول ۲. اطلاعات کلید، دیود و اسنابر مدار

مقدار	نام	توضیحات
۰/۰۰۱ Ω	R_{ON}	مقاومت روشن شدن از روی کلید
۱/۵ V	FV	افت ولتاژ هدایت دیود از روی دیود
۱۲ Ω	R_s	مقاومت اسنابر
۹ nF	C_s	خازن اسنابر

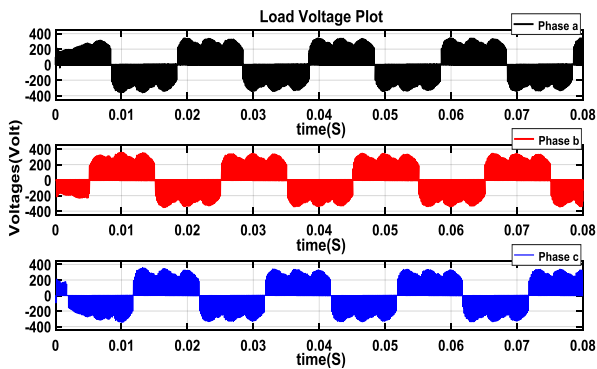
^۱ Settling Time^۲ Rise Time

پیوستگی جریان ناشی از قرار دادن فیلتر ورودی است. نتایج حذف فیلتر و اثر آن بر روی THD در ادامه ارائه خواهد شد.

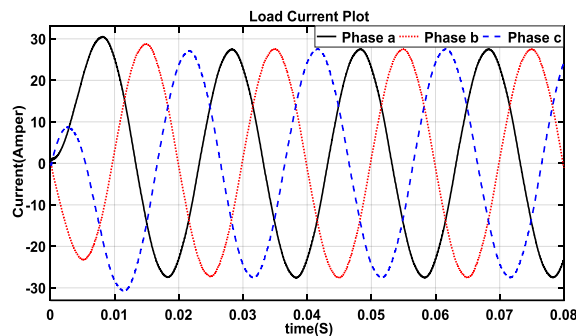


شکل ۱۱. جریان‌های ورودی فاز

ولتاژهای خروجی از مبدل ماتریسی بر روی بار در شکل (۱۲) آورده شده‌اند. همچنین جریان‌های خروجی از مبدل ماتریسی به بار نیز در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. ولتاژ خروجی به صورت پالسی است. اما، جریان خروجی به صورت پیوسته و سینوسی است. با توجه به بار خروجی که خاصیت سلفی - مقاومتی دارد. شکل موج ولتاژ و جریان دارای اختلاف فاز می‌باشند.



شکل ۱۲. ولتاژهای سه فاز خروجی



شکل ۱۳. جریان‌های سه فاز خروجی

۳-۲. تأثیر فیلتر ورودی بر روی جریان ورودی و خروجی

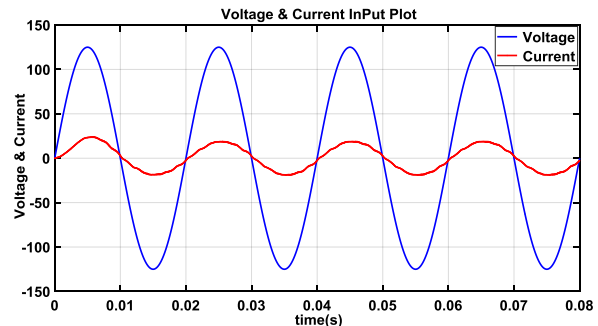
با توجه به کلیدزنی زیاد در مبدل‌های فرکانسی، فارغ از هر نوعی نیاز به فیلتر ورودی به منظور پیوستگی جریان الزامی است. نتایج استفاده از فیلتر برای جریان ورودی پیش‌تر در شکل (۱۱) مورد

۳-۲. نتایج شبیه‌سازی

نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی مبدل ماتریسی توسط Matlab 2021b و جعبه ابزار Simulink است. همچنین، برای شبیه‌سازی خنک‌کننده^۱ از نرم‌افزار Comsol MultiPhysics 5.6 استفاده شده و ماژول حرارتی، سیالات و تابش به صورت هم‌زمان استفاده شده است. در ابتدا شرح مختصری از سامانه داده می‌شود. سپس، در زیربخش‌های جداگانه به نتایج شبیه‌سازی شامل ولتاژها، جریان‌ها، استرس ولتاژ، استرس جریان، تأثیر فیلتر، تأثیر اسنابر، بهره سامانه، تعداد کلیدزنی و تأثیر خنک‌کننده با هوای اجباری بر روی قطعات پرداخته می‌شود.

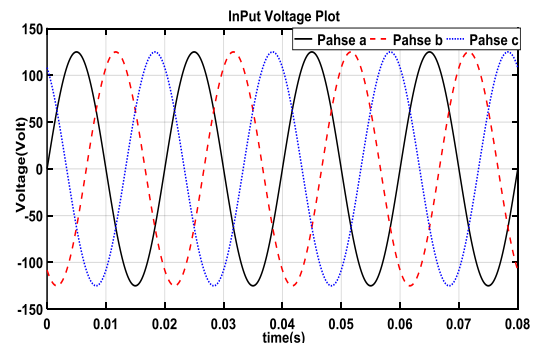
۳-۱. بررسی نتایج ولتاژ و جریان ورودی و خروجی

ورودی مبدل ماتریسی به صورت سینوسی سه فاز با دامنه ۱۲۵ V و فرکانس ۵۰ Hz است. در شکل (۹) ولتاژ و جریان برای فاز a نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۹) مشخص است. نوع بار به صورت سلفی - مقاومتی است. بار خروجی شامل یک مقاومت 2Ω و یک سلف ۱۰ mH است.



شکل ۹. شکل موج ولتاژ و جریان فاز a ورودی

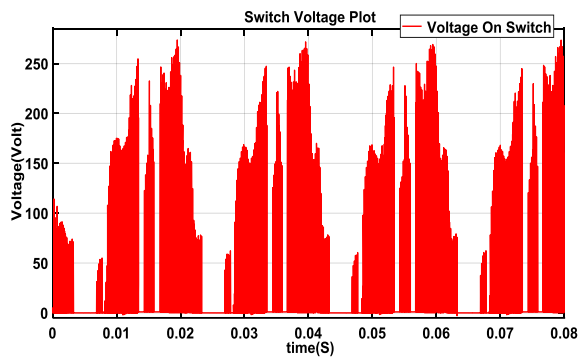
در شکل (۱۰) ولتاژهای ورودی از شبکه نشان داده شده است. این ولتاژها دارای ۱۲۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز می‌باشند.



شکل ۱۰. ولتاژهای ورودی سه فاز

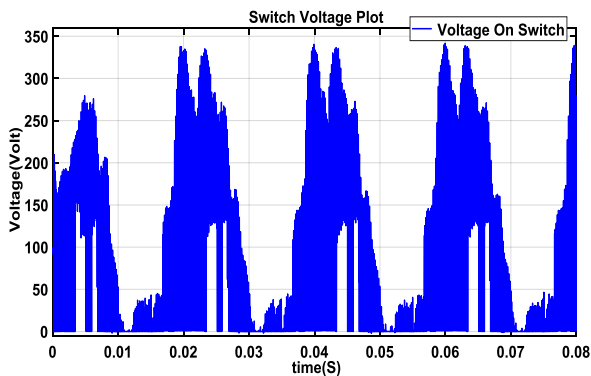
جریان سه فاز کشیده شده از ورودی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. جریان‌ها در هر فاز به صورت پیوسته می‌باشند. این

^۱ Heat Sink



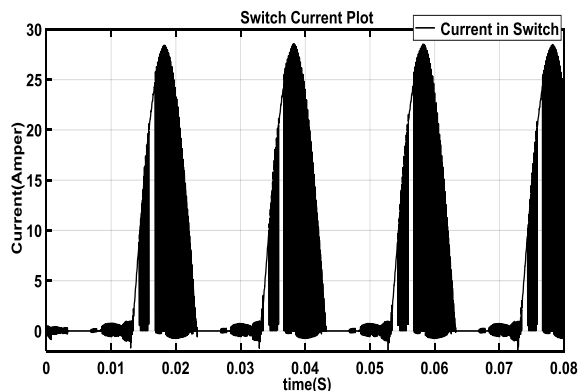
شکل ۱۵. استرس ولتاژ دو سر کلیدها با مدار اسنابر

در صورت حذف اسنابر میزان استرس ولتاژ افزایش می‌یابد و به $341/7$ ولت می‌رسد. استرس ولتاژ با حذف اسنابر در شکل (۱۶) نشان داده شده است. این افزایش ولتاژ ۲۰ درصدی تنها در شرایط عادی مدار رخ داده است. در صورتی که با ایجاد خطاهای مختلف دامنه آن می‌تواند بیشتر گردد.



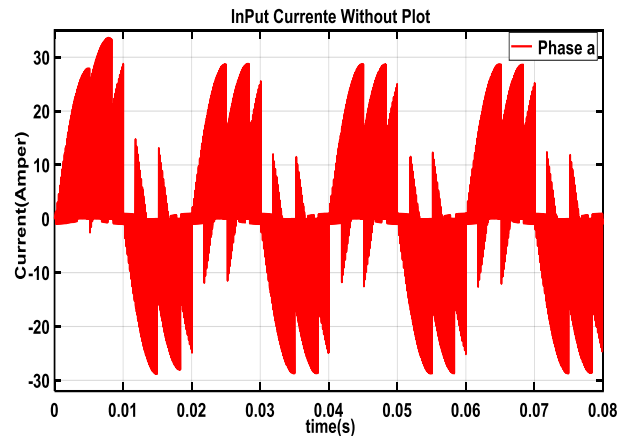
شکل ۱۶. استرس ولتاژ دو سر کلیدها بدون مدار اسنابر

با توجه به نتایج شکل‌های (۱۵ و ۱۶) تأثیر عملکرد و انتخاب درست مقادیر اسنابر اعتبارسنجی می‌گردد. شکل جریان عبوری از کلیدها به صورت شکل (۱۷) است. میزان حداکثر این جریان $28/5$ است. کلیدهای انتخاب شده توانایی عبور جریان شکل (۱۷) را دارا می‌باشند. همچنین در صورت حذف اسنابر تأثیر قابل توجهی بر روی جریان عبوری از کلیدها رخ نمی‌دهد.



شکل ۱۷. استرس جریان عبوری از کلیدها

بررسی قرار گرفته است. در صورت حذف فیلتر ورودی جریان‌ها به صورت پالسی و ناپیوسته بوده و دارای THD بالاتری می‌باشند. در شکل (۱۴) تأثیر حذف فیلتر ورودی جریان مشهود است. این جریان پر از اغتشاش موجب افت کیفیت برق شبکه می‌گردد. به طوری که بر مصرف کننده‌های حساس وصل شده شبکه آسیب وارد می‌نماید.



شکل ۱۴. جریان ورودی فاز a بدون استفاده از فیلتر

میزان THD جریان ورودی و خروجی در شرایط وجود فیلتر و حذف فیلتر RLC متصل بین منبع تغذیه (شبکه برق) و مبدل ماتریسی به صورت جدول (۳) است. با توجه به نتایج جدول (۳) میزان THD با حذف فیلتر در ورودی و خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین وجود فیلتر ورودی الزامی است. با افزودن فیلتر ورودی میزان THD خروجی اندکی افزوده می‌شود، این امر به دلیل افزایش امپدانس سلفی و خازنی در مدار است. همچنین، توجه به این نکته حائز اهمیت است که جریان خروجی دارای کیفیت مطلوبی است و میزان THD زیر یک درصد است. از این رو، مبدل ماتریسی گزینه مناسبی برای مصارف صنعتی و نظامی است.

جدول ۱. میزان THD جریان ورودی و خروجی فاز a

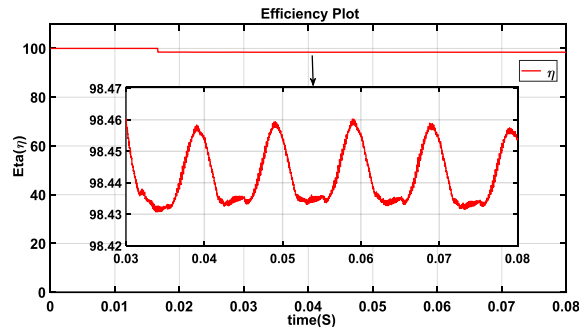
اعداد بر حسب درصد	با فیلتر در ورودی	بدون فیلتر ورودی
THD جریان ورودی فاز a	۳/۱۸	۵۹/۵۳
THD جریان خروجی فاز a	۰/۶۷	۰/۵۶

۳-۳. بررسی استرس ولتاژ و جریان و تأثیر اسنابر

مقدار المان‌های مورد استفاده برای اسنابر کلیدها در جدول (۲) آورده شده است. حداکثر ولتاژ دو سر کلید با به‌کارگیری اسنابر برابر است با $273/5$ V. شکل موج استرس ولتاژ دو سر کلیدها با استفاده از اسنابر در شکل (۱۵) آورده شده است.

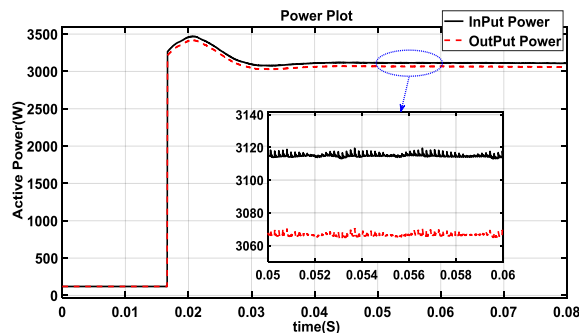
۴-۳. بهره سامانه شبیه‌سازی شده

بهره توان مبدل ماتریسی در شکل (۱۸) نشان داده شده است. پس از عبور از لحظه اول که گذرای مدار است. بهره متوسط ۹۵/۴۴ درصد است. میزان بهره به دست آمده در حد قابل قبولی است.



شکل ۱۸. نمودار بهره توان خروجی بر حسب زمان‌های مختلف

توان ورودی و توان خروجی در شکل (۱۹) نشان داده شده است. توان ورودی و خروجی به صورت لحظه‌ای بوده و حاصل ضرب لحظه‌ای ولتاژ و جریان هر فاز و سپس، جمع این مقادیر است. جهت انجام این محاسبات، از المان‌های اندازه‌گیری مهیا در نرم-افزار متلب استفاده شده است. توان دریافتی در حدود ۳۰۶۸ W و توان ورودی حدود ۳۱۱۵ W است. با توجه به توان خروجی، هدف مورد انتظار که تأمین توان ۳ kW است، برآورده شده است. لحظات اولیه گذرای ناشی از جذب توان در سلف و خازن مدار است. این زمان در این مقاله مورد بحث ناست.



شکل ۱۹. توان ورودی و خروجی بر حسب زمان

۵-۳. طراحی مدار خنک کننده برای المان‌های قدرت

با توجه به شکل (۱۹) حدود ۵۰ W تلفات در مدار رخ می‌دهد. این تلفات ناشی از ناپایده‌آلی موجود در کلیدها، دیودها، سلف، خازن و اسنایپر است. علت این امر نیز وجود مقاومت‌های ذاتی در هر کدام از المان‌های یاد شده است. از طرفی، حداکثر تلفات بر روی کلیدها و دیودها است. برای مصون ماندن کلیدها و دیودها از خنک کننده آلومینیومی به همراه موتور و پروانه جهت عبور

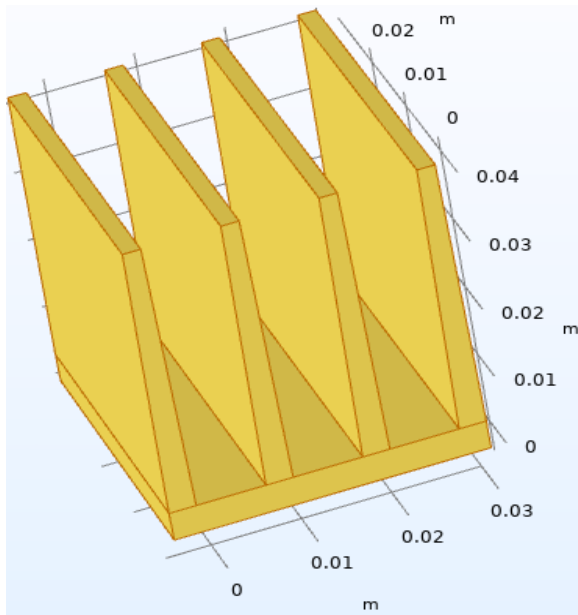
هوای اجباری استفاده می‌شود. به منظور افزایش قابلیت اطمینان، برای شبیه‌سازی حداکثر توان ۵۵ W بر روی کلیدها و دیودها در نظر گرفته شده است. این توان حاصل از تلفات کلیدزنی، مقاومت روشن شدن و تلفات ناشی از افت ولتاژ در هنگام عبور جریان است. برای انتخاب ابعاد خنک کننده، روندنمای شکل (۲۰) پیشنهاد شده است.

در ابتدا نوع کلید با توجه به شکل (۵) انتخاب می‌شود. سپس کلید با تلفات مورد بحث بدون خنک کننده شبیه‌سازی می‌گردد. در صورت استرس دمایی غیر قابل تحمل برای کلید، از یک خنک کننده ساده بدون فین^۱ به صورت یک صفحه ساده استفاده می‌شود. فرآیند شبیه‌سازی دمایی مجدد صورت می‌گیرد. در صورت برآورده نشدن آستانه تحمل حرارتی کلید، به سامانه خنک کننده پیشین، ارتفاع داده می‌شود. در این مرحله اگر نتایج شبیه‌سازی حرارتی مطلوب نباشد، آنگاه فین به خنک کننده اضافه می‌گردد. سپس مرحله شبیه‌سازی حرارتی تکرار می‌شود. در صورتی که باز هم حرارت تولید شده در اثر تلفات که با توزیع حرارتی یکنواخت در سطح قطعه در نظر گرفته شده است، بیشتر از آستانه تحمل کلید گردد. به خنک کننده یک موتور کوچک با پروانه اضافه می‌گردد. این کار به منظور انتقال هوای گرم اطراف به صورت همرفت و کاهش دمای قطعه مورد نظر است. در صورت ارضاء نشدن شرط حرارتی کلید، مطابق با آنچه در شکل (۵) نشان داده شده است، باید کلید دیگری انتخاب شود. اگر در هر مرحله نتایج شبیه‌سازی حرارتی در نرم‌افزار مطلوب باشد، آن خنک کننده انتخاب می‌گردد. تعداد مراحل اجرا شدن هر قسمت در شکل (۲۰) می‌تواند بیشتر از یک بار باشد. ابعاد کلید IGBT و دیودی که توان تحمل ولتاژ و جریان محاسبه شده در شبیه‌سازی را داشته باشد از روی مقادیر ارائه شده توسط سازنده در صفحه اطلاعات^۲ به صورت ۱۰ mm در ۱۰ mm با ارتفاع ۴/۵ mm در نظر گرفته شده است.

خنک کننده شامل چهار فین که ضخامت هر فین ۳ mm بوده و ارتفاع فین‌ها ۴ Cm است طراحی گردیده است. همچنین، ابعاد قاعده یک مربع با اضلاع ۳۵ mm و ارتفاع ۳۵ mm است. خنک کننده مذکور در شکل (۲۱) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر بین کلید IGBT یا دیود و خنک کننده ماده خمیر سیلیکون به صورت یک لایه نازک در نظر گرفته شده است. خمیر سیلیکون از مواد انتقال دهنده حرارت است. از این ماده در عمل برای انتقال حرارت بهتر استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی

^۱ Fin

^۲ Data Sheet

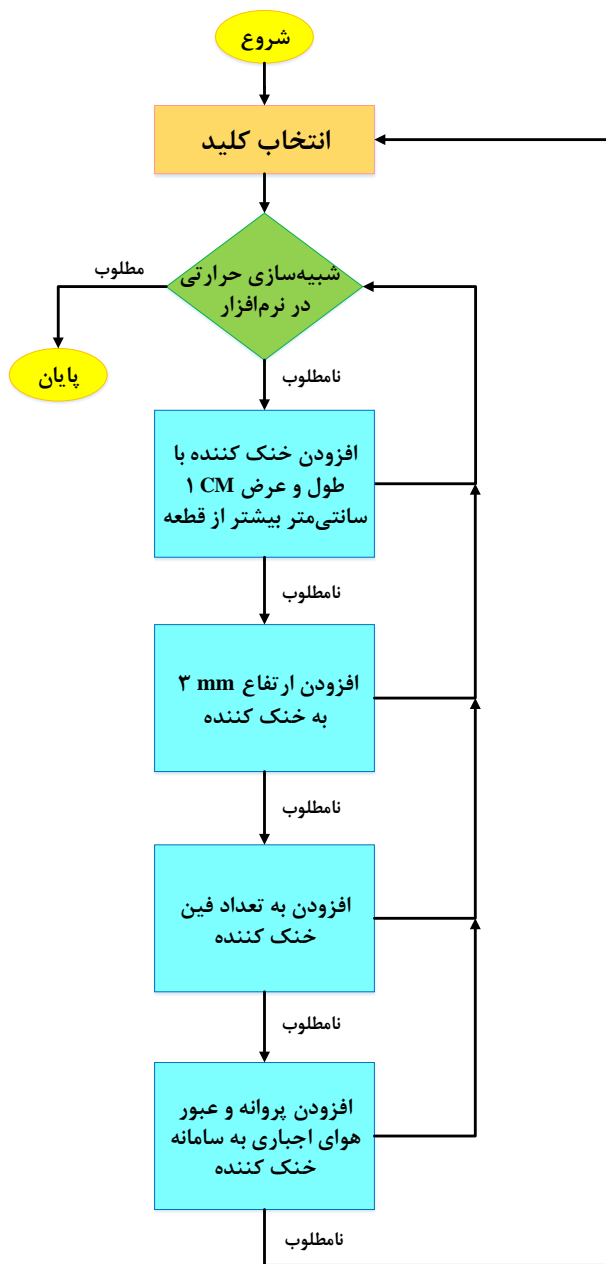


شکل ۲۱. ابعاد خنک کننده طراحی شده

در شکل (۲۲)، قسمت (۱)، مش‌بندی بر روی اجزای خنک کننده به همراه فین‌ها با ابعاد گفته شده، نشان داده شده است. در قسمت (۲) از شکل (۲۲) نیز کل کانال مستطیلی به همراه کلید IGBT یا دیودی در قسمت زیرین کانال نشان داده شده است. بیشتر قسمت‌ها دارای مش‌بندی سبز رنگ، به معنی مش قابل قبول می‌باشند. کمترین کیفیت مش نیز بالای ۴۰ درصد است. قسمت حائز اهمیت، بخش خنک کننده است. با توجه به شکل (۲۲) قسمت (۱)، میزان مش‌بندی در این نواحی بسیار ریز است و از این رو، مش‌بندی کلی دقت مورد نیاز مسئله را برآورده می‌نماید.

نتایج حرارتی برای حالت بدون خنک کننده از زوایای مختلف در شکل‌های (۲۳ و ۲۴) نشان داده شده است. دمای قطعه به ۲۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد. دمای کاری ادوات قدرت (دیود/کلید) بین ۴۰- تا ۱۵۵ درجه سلسیوس است. بنابراین این دما می‌تواند به کلید یا دیود آسیب برساند. بنابراین باید خنک کننده مناسب تعبیه شود. در بخش خنک سازی و آسیب پذیری قطعات در صورتی که توان تلفاتی به محیط انتقال یابد و دما در بازه کاری قطعه باشد، قطعه آسیب نمی‌بیند. بنابراین در هر فرکانسی، میزان انتقال حرارت و تلفات مهم است. اگر خنک کننده توان انتقال حرارت را داشته باشد، آنچه تأثیرگذار است، میزان تلفات تولید شده است. این امر به صورت تلفات در شبیه‌سازی دیده شده است. در شکل (۲۵) یک کانال مستطیلی به ابعاد $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ برای عبور جریان هوا در نظر گرفته شده است.

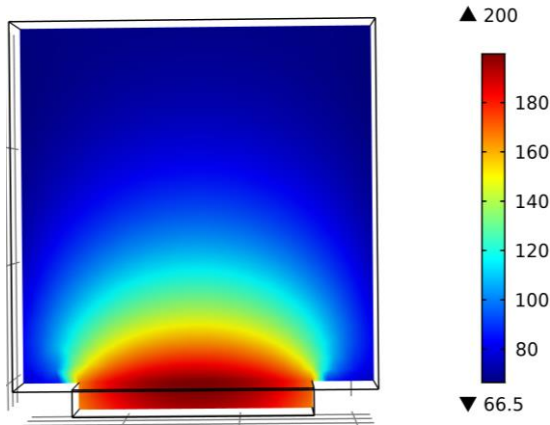
قابلیت استفاده از تقارن به صورت آینه‌وار را دارا است. زیرا شرایط ورودی و هندسه مسئله متقارن می‌باشند. با توجه به سامانه را دارا است، از تقارن استفاده نشده است. ماژول مورد استفاده برای معادلات انتقال حرارت در حالت سیال و جامد «Heat Transfer in Solids and Fluids»، ماژول «Laminar Flow» برای عبور هوا و تأثیر فن و برای انتقال حرارت به صورت تابشی نیز ماژول «Surface-to-Surface Radiation» در شبیه‌سازی مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۲۰. روندنمای انتخاب خنک کننده

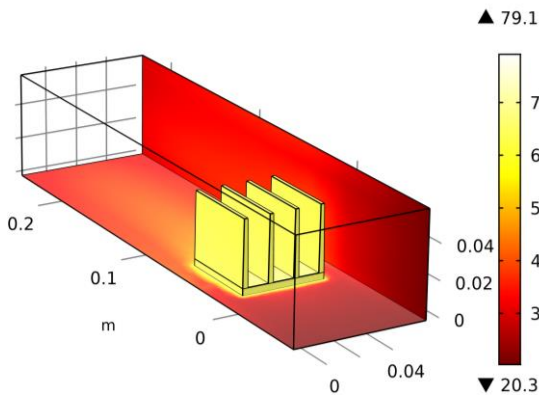
موجب کاهش دما به میزان ۶۰ درصد در قطعه کار است، این نتیجه در شکل (۲۶) قابل مشاهده است. با جریان هوای ایجاد شده دما به صورت همرفت و تابشی به محیط انتقال می‌یابد. بنابراین با استفاده از خنک کننده پیشنهاد شده در اثر تلفات اهمی آسیبی به ادوات قدرت وارد نمی‌شود.

Slice: T (degC)



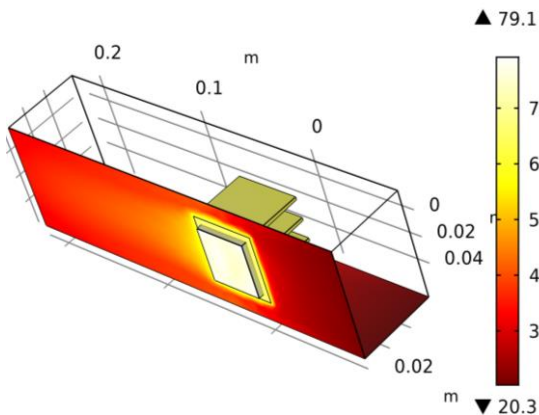
شکل ۲۴. دمای قطعه و کانال به صورت برش خورده بر حسب سلسیوس

Surface: Temperature (degC)

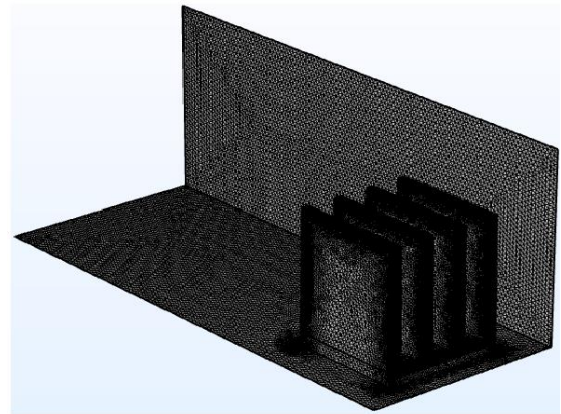


شکل ۲۵. تحلیل حرارتی از نمای بالا

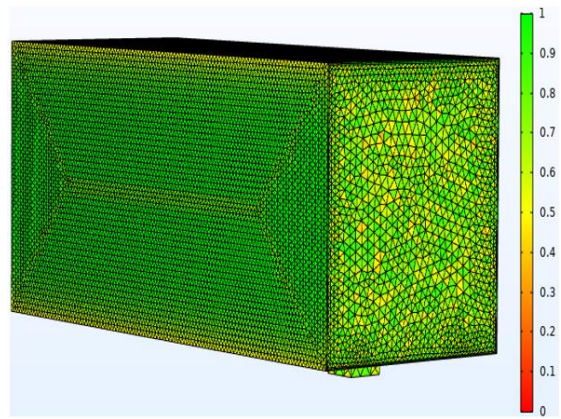
Surface: Temperature (degC)



شکل ۲۶. تحلیل حرارتی از نمای زیرین



۱

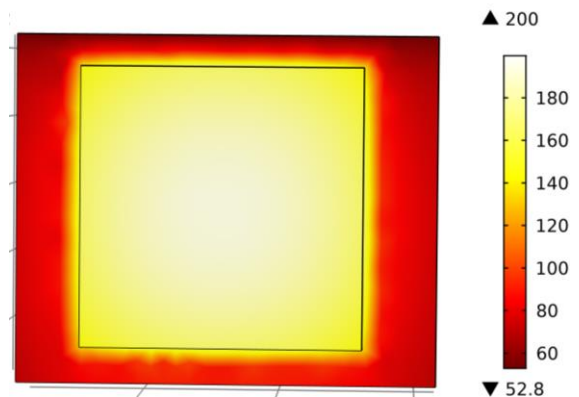


۲

شکل ۲۲. بررسی کیفیت مش‌بندی به صورت سه بعدی

همچنین، از عبور هوای اجباری شامل یک موتور کوچک با پروانه در ورودی برای انتقال حرارت هر چه بهتر استفاده شده است. دبی هوای خروجی از پروانه نیز برابر با 0.18 m/S است.

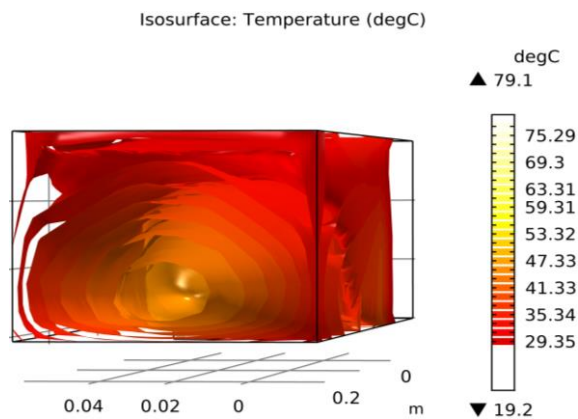
Surface: T (degC)



شکل ۲۳. دمای قطعه از زیر بر حسب سلسیوس

نتایج شبیه‌سازی دمایی در شکل‌های (۲۵ و ۲۶) نشان داده شده‌اند. با توجه به شرایط اولیه در نظر گرفته شده که شامل تلفات 55 W برای مکعب مستطیل زیرین که همان کلید یا دیود است؛ حداکثر دمای تولید شده 79.1 درجه بوده و خنک کننده

در شکل (۲۹) نما از زاویه انتهایی کانال شبیه‌سازی شده است. دمای هوای عبوری در وسط به دلیل عبور هوا از درون فین‌های خنک کننده و انتقال حرارت حداکثری گرم‌تر از اطراف است. به تدریج با دور شدن از مرکز کانال سطوح هم دما سرد شده و به دمای محیط نزدیک‌تر می‌شوند.

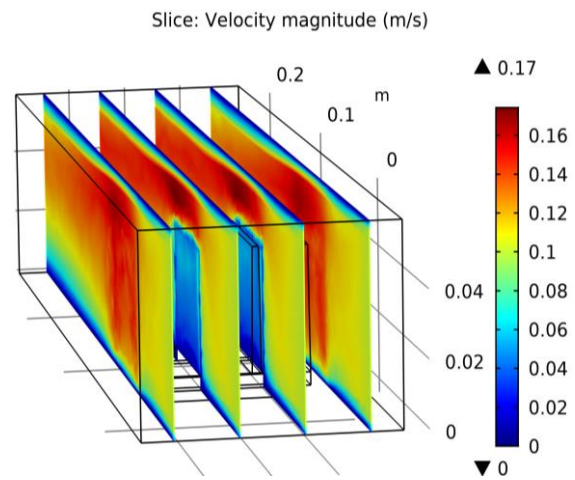


شکل ۲۹. تحلیل حرارتی برای سطوح هم دما از زاویه انتهایی کانال

در شکل (۳۰) از نمای زیرین کانال است. دما به صورت همرفت در حال انتقال است. اما در اطراف دیود یا کلید مشاهده می‌شود که با توجه به فشار هوا کماکان مقداری ازدیاد دما در سمت پروانه وجود دارد که ناشی از انتقال تابشی است. این مقدار در سمت چپ قطعه بیشتر است. زیرا ناحیه سفید سمت چپ هم دمای تابشی و هم دمای ناشی از انتقال حرارت همرفت را به صورت یک جا دریافت می‌نماید. بنابراین ناحیه حرارتی آن بیشتر از سایر اضلاع مکعب زیرین است. همچنین، در این قسمت به واسطه شکل فین‌ها سرعت عبور هوا بیشتر است. از این رو، انتظار می‌رود که توزیع دما از نمای زیرین در شکل (۳۰)، از سمت راست قطعه بیشتر امتداد یابد و دیرتر با محیط هم دما گردد.

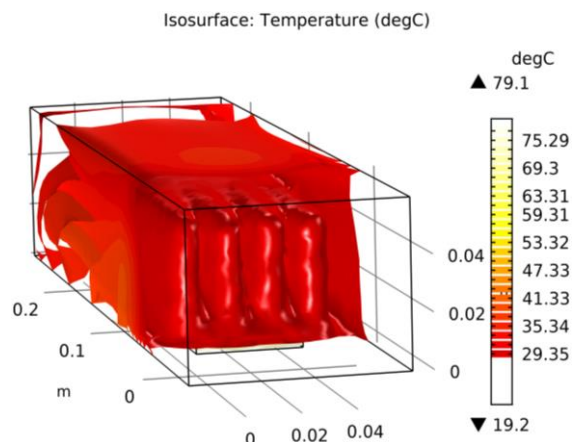
روش‌های مختلف کلیدزنی موجب کاهش یا افزایش تلفات می‌گردند. به این معنی که موجب کاهش کلیدزنی یا کاهش میزان استرس می‌شوند. در صورت استفاده از هر روشی، با محاسبه میزان تلفات و قرار دادن این مقدار به‌عنوان ورودی تلفات در شبیه‌سازی المان محدود، به‌عنوان ورودی توان تلفاتی، تأثیر خنک کننده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در صورت افزایش دما به بیش از ناحیه کاری، مراحل طراحی خنک کننده برای توان مورد نظر مجدداً صورت می‌گیرد.

در شکل (۲۷) تحلیل جریان سیال برای هوا آورده شده است. این تحلیل شامل چهار برش به صورت صفحه‌ای از جریان هوای ورودی است. با فاصله گرفتن از پروانه ورودی سرعت هوا کاسته می‌شود. اما، در اطراف فین‌ها و به خصوص بین دو فین حداکثر سرعت عبور هوا را شاهد هستید. این امر، به دلیل حالت نازل‌ای که به صورت طبیعی ساخته شده است. قسمت‌های آبی رنگ با سرعت صفر، نشان دهنده محل فین‌ها می‌باشند. با توجه به اینکه جنس فین‌ها از فلز است، هوا از داخل آن عبور نمی‌کند و در شبیه‌سازی با سرعت صفر نمایان می‌شود. همچنین، فشار هوای محیط نیز ۱ Atm در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۷. تحلیل جریان هوای سیال

در شکل (۲۸) تحلیل حرارتی برای سطوح هم دما از زاویه پروانه موتور مشاهده می‌شود. فشار هوای وارد شده و انتقال حرارت به واسطه جریان هوای اجباری ملموس است.

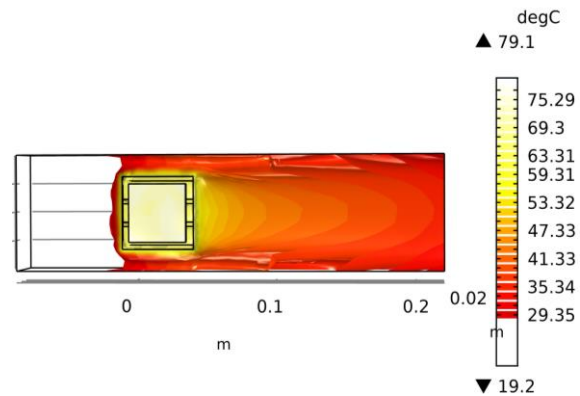


شکل ۲۸. تحلیل حرارتی برای سطوح هم دما از زاویه پروانه

۵. مراجع

- [1] Wheeler, P. W.; Rodriguez, J.; Clare, J. C.; Empringham, L.; Weinstein, A. "Matrix Converters: A Technology Review"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2002, 49, 276-88.
- [2] Erickson, R. W.; Al-Naseem, O. A. "A New Family of Matrix Converters"; IECON'01. 27th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electr. Soc. (Cat. No. 37243), 2001, 1515-20.
- [3] P. W. Wheeler; Clare, J. C.; de Lillo, L.; Bradley, K. J.; Aten, M.; Whitley, C.; Towers, G. "A Comparison of the Reliability of a Matrix Converter and a Controlled Rectifier-Inverter"; European Conf. Power Electr. App. IEEE 2005, 7.
- [4] Kwak, S.; Toliyat H. A. "An Approach to Fault-Tolerant Three-Phase Matrix Converter Drives"; IEEE Trans. Energy Convers. 2007, 22, 855-63.
- [5] Podlesak, T. F.; Katsis, D. C.; Wheeler, P. W.; Clare, J. C.; Empringham, L.; Bland, M. "A 150-kVA Vector-Controlled Matrix Converter Induction Motor Drive"; IEEE Trans. Ind. Appl. 2005, 41, 841-7.
- [6] Wheeler, P.; Clare, J.; De Lillo, L.; Bradley K.; Aten, M.; Whitley, C.; Towers, G. "A Reliability Comparison of a Matrix Converter and an 18-Pulse Rectifier for Aerospace Applications"; IEEE 12th Int. Power Electr. Motion Control Conf. 2006, 496-500.
- [7] Arevalo, S. L.; Zanchetta, P.; Wheeler, P. W.; Trentin, A.; Empringham, L. "Control and Implementation of a Matrix-Converter-Based AC Ground Power-Supply Unit for Aircraft Servicing"; IEEE Trans. Ind. Electr. 2009, 57, 2076-84.
- [8] Diaz, M.; Dobson, R. C.; Ibacetia, E.; Mora, A.; Urrutia, M.; Espinoza, M.; Rojas, F.; Wheeler, P. "An Overview of Applications of the Modular Multilevel Matrix Converter"; Energies, 2020, 13, 5546.
- [9] Ahmed, S. M.; Iqbal, A.; Abu-Rub, H.; Rodriguez, J.; Rojas, C. A.; Saleh, M. "Simple Carrier-Based PWM Technique for a Three-to-Nine Phase Direct AC-AC Converter"; IEEE Trans. Ind. Electr. 2011, 58, 5014-23.
- [10] Rodriguez, J.; Rivera, M.; Kolar, J. W.; Wheeler, P. W. "A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters"; IEEE Trans. Ind. Electr. 2011, 59, 58-70.
- [11] Kolar, J. W.; Friedli, T.; Rodriguez, J.; Wheeler, P. W. "Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies"; IEEE Trans. Ind. Electr. 2011, 58, 4988-5006.
- [12] Wu, B.; Narimani, M. "Matrix Converter Fed MV Drives"; Wiley-IEEE Press, 2th Ed., 2017, 393 – 416.
- [13] Liu, S.; Ge, B.; You, X.; Jiang, X.; Abu- Rub, H.; Peng, F. Z. "A Novel Quasi-Z-Source Indirect Matrix Converter"; Int. J. Circuit Theor. App. 2015, 43, 438-54.
- [14] Pinto, S.; Silva, J. "Input Filter Design of a Mains Connected Matrix Converter"; IEEE, 12th ICHQP Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, 2006.
- [15] Parvari, R.; Zarghani, M.; Kaboli, S. "RCD Snubber Design Based on Reliability Consideration: A Case Study for Thermal Balancing in Power Electronic Converters"; Microelectronics Reliability 2018, 88, 1311-5.

Isosurface: Temperature (degC)



شکل ۳۰. تحلیل حرارتی برای سطوح هم دما از زاویه کف کانال

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌صورت کلی به مبدل‌های ماتریسی و دسته‌بندی آن‌ها پرداخته شده است. از میان مبدل‌های ماتریسی، نوع متداول آن یعنی منبع ولتاژی که به‌صورت مستقیم و بدون نیاز به المان‌های مداری اضافه است، برای مطالعه انتخاب گردیده است. با توجه جدول (۳) میزان THD از ۵۹/۵۳ با افزودن فیلتر به ۳/۱۸ کاهش می‌یابد. بنابراین وجود فیلتر و صحت مقادیر انتخاب شده از روی نتایج استنباط می‌گردد. همچنین، نتایج استرس ولتاژ بر روی کلیدها با کاهش ۲۰ درصدی از ۳۴۱/۷ به ۲۷۳/۵ تقلیل می‌یابد، که گویای انتخاب اسنابر مناسب است. با توجه به کلید و دیودهای انتخابی و ابعاد گفته شده توسط سازندگان، میزان تلفات محاسبه شده است. این تلفات توسط شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار COMSOL مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده کاهش دمای ۶۰ درصدی و طراحی صحیح خنک کننده با عبور هوای اجباری است. نوآوری این پژوهش ارائه الگوریتمی جهت تعیین المان‌های حفاظتی با قابلیت بررسی ترکیبی است. در واقع نتایج و بخش‌های مورد مطالعه نظیر روش کنترل SVM، انتخاب یک مبدل با حداقل المان، فیلتر ورودی، انتخاب کلیدها، اسنابر و سامانه خنک کننده به نحوی صورت گرفته است که نیاز برای راه اندازی یک موتور ۳ kW را برآورده سازد. از طرفی، با توجه به ابعاد کوچک، قابلیت اطمینان بالا و بهره بالای مبدل ماتریسی ارائه شده، از آن می‌توان در صنایع هوایی، فضایی و قطارهای برقی، استفاده در ایستگاه‌های مرزی و دور افتاده بهره برد.

