

به نام خدا

# طراحی و ساخت مبدل های جریان مستقیم

مؤلف:

سروش دامود

انتشارات ارسطو

(سازمان چاپ و نشر ایران - ۱۴۰۴)

نسخه الکترونیکی این اثر در سایت سازمان چاپ و نشر ایران و اپلیکیشن کتاب رسان موجود می باشد

Chaponashr.ir

شماره کتابشناسی ملی : ایران ۱۰۲۷۹۶۱۳  
شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۱۱۷-۶۳۴-۲  
سرشناسه : دامود، سروش، ۱۳۵۷-  
عنوان و نام پدیدآور : طراحی و ساخت مبدل‌های جریان مستقیم [منابع الکترونیکی: کتاب]/  
مؤلف سروش دامود.  
مشخصات نشر : مشهد: ارسطو، ۱۴۰۴.  
مشخصات ظاهری : ۱ منبع بر خط (۱۱۰ ص.).  
وضعیت فهرست نویسی: فیبا  
یادداشت : کتابنامه: ص. ۱۰۹ - ۱۱۰.  
نوع منبع الکترونیکی: فایل متنی (PDF).  
یادداشت : دسترسی از طریق وب.  
موضوع : مبدل‌های جریان مستقیم به جریان مستقیم -- طراحی و ساخت  
موضوع : DC-to-DC converters -- Design and construction  
رده بندی کنگره : ۶۲۲ /TK۷۸۷۲  
رده بندی دیویی : ۶۲۱/۳۸۱۰۴۴  
دسترسی و محل الکترونیکی : آدرس الکترونیکی منبع

نام کتاب : طراحی و ساخت مبدل‌های جریان مستقیم

مؤلف : سروش دامود

ناشر : انتشارات ارسطو ( سازمان چاپ و نشر ایران)

صفحه آرای، تنظیم و طرح جلد : پروانه مهاجر

تیراژ : ۱۰۰۰ جلد

نوبت چاپ : اول - ۱۴۰۴

چاپ : زیرجد

قیمت : ۱۴۵۰۰۰ تومان

فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :

<https://:chaponashr.ir/ketabresan>

شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۱۱۷-۶۳۴-۲

تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵

[www.chaponashr.ir](http://www.chaponashr.ir)



## فهرست

|  |    |
|--|----|
| مقدمه :  | ۵  |
| فصل اول : مبانی و اصول مبدل‌های جریان مستقیم:                    | ۹  |
| تعریف و ضرورت استفاده از مبدل‌های جریان مستقیم:                  | ۱۲ |
| مروری بر انواع سیستم‌های توان DC و AC :                          | ۱۵ |
| اصول تبدیل انرژی الکتریکی و مفاهیم پایه توان:                    | ۱۹ |
| دسته‌بندی مبدل‌های DC-DC بر اساس توپولوژی و عملکرد:              | ۲۱ |
| مفاهیم کلیدی در طراحی مدارهای سوئیچینگ:                          | ۲۳ |
| بررسی کاربردهای صنعتی و الکترونیکی مبدل‌های DC :                 | ۲۶ |
| فصل دوم : تحلیل و طراحی مبدل‌های DC-DC غیرایزوله:                | ۲۹ |
| ساختار و عملکرد مبدل باک (Buck Converter) :                      | ۳۰ |
| تحلیل حالت‌های کاری مبدل بوست (Boost Converter) :                | ۳۴ |
| طراحی و محاسبه پارامترهای مبدل باک-بوست (Buck-Boost Converter) : | ۳۷ |
| بررسی راندمان و تلفات در مبدل‌های غیرایزوله:                     | ۳۹ |
| طراحی فیلترهای خروجی و کنترل ریپل ولتاژ:                         | ۴۰ |
| مدل‌سازی دینامیکی و پاسخ گذرای مدارهای غیرایزوله:                | ۴۲ |
| فصل سوم : مبدل‌های ایزوله و سیستم‌های پیشرفته:                   | ۴۵ |
| اصول ایزولاسیون گالوانیکی در مبدل‌های DC :                       | ۴۸ |
| معرفی مبدل‌های فلای‌بک (Flyback) و فوروارد (Forward) :           | ۵۲ |
| بررسی مبدل‌های پوش‌پول (Push-Pull) و نیم‌پل و تمام‌پل:           | ۵۷ |
| طراحی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا برای ایزولاسیون:              | ۶۰ |
| کاهش EMI و بهبود کیفیت توان در مبدل‌های ایزوله:                  | ۶۳ |

|  |            |
|--|------------|
| کاربردهای صنعتی و ارتباطی مبدل‌های ایزوله: .....                       | ۶۷         |
| <b>فصل چهارم: روش‌های کنترل، مدولاسیون و حفاظت: .....</b>              | <b>۶۹</b>  |
| اصول کنترل مد جریان و مد ولتاژ در مبدل‌های DC: .....                   | ۷۲         |
| الگوریتم‌های PWM و تکنیک‌های مدولاسیون پیشرفته: .....                  | ۷۳         |
| کنترل دیجیتال در مبدل‌های سوئیچینگ: .....                              | ۷۶         |
| سیستم‌های فیدبک و پایداری حلقه بسته: .....                             | ۷۹         |
| حفاظت در برابر جریان بیش از حد، حرارت و اضافه‌ولتاژ: .....             | ۸۰         |
| روش‌های بهینه‌سازی راندمان و کاهش نویز: .....                          | ۸۱         |
| <b>فصل پنجم: طراحی عملی، شبیه‌سازی و ساخت نمونه: .....</b>             | <b>۸۵</b>  |
| انتخاب قطعات کلیدی: ترانزیستورها، دیودها و خازن‌ها: .....              | ۸۶         |
| طراحی مدار چاپی (PCB) با ملاحظات حرارتی و الکترومغناطیسی: .....        | ۹۰         |
| شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای تخصصی مانند MATLAB/Simulink و LTspice: ..... | ۹۴         |
| تست و اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی مبدل: .....                          | ۹۸         |
| تحلیل خطا، رفع اشکال و بهبود عملکرد: .....                             | ۱۰۰        |
| نمونه‌های کاربردی در خودروهای برقی، منابع تغذیه و انرژی خورشیدی: ..... | ۱۰۲        |
| نتیجه‌گیری: .....  | ۱۰۵        |
| <b>منابع: .....</b>  | <b>۱۰۹</b> |

## مقدمه :

در دنیای مدرن امروز که مصرف انرژی الکتریکی به صورت گسترده و متنوعی در تمامی صنایع و تجهیزات الکترونیکی جریان دارد، مبدل‌های جریان مستقیم یا DC-DC Converter به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین اجزای سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی شناخته می‌شوند. این مبدل‌ها وظیفه تبدیل سطح ولتاژ جریان مستقیم از یک مقدار به مقدار دیگر را بر عهده دارند تا تجهیزات مختلف بتوانند در شرایط مناسب و بهینه از انرژی الکتریکی بهره‌مند شوند. در واقع، بدون حضور مبدل‌های جریان مستقیم، بسیاری از دستگاه‌های امروزی از جمله لپ‌تاپ‌ها، خودروهای برقی، سیستم‌های مخابراتی، تجهیزات پزشکی و سامانه‌های انرژی خورشیدی قادر به عملکرد پایدار و دقیق نخواهند بود. طراحی و ساخت مبدل‌های جریان مستقیم، نه تنها دانشی فنی بلکه هنری است که نیازمند درک عمیق از اصول الکترونیک قدرت، مواد، حرارت، و کنترل مدارات است. درک رفتار نیمه‌هادی‌ها، قوانین پایه مدار، و نحوه تعامل ولتاژ و جریان در حالت‌های گذرا از الزامات ورود به این حوزه است. مهندس طراح باید بتواند بین کارایی، پایداری، هزینه و ایمنی تعادل برقرار کند، زیرا هر یک از این عوامل در کارکرد نهایی مبدل نقشی تعیین‌کننده دارند. در طراحی اولیه، باید نوع مبدل متناسب با نیاز سیستم انتخاب شود؛ به‌عنوان مثال، مبدل‌های باک (Buck) برای کاهش ولتاژ، مبدل‌های بوست (Boost) برای افزایش ولتاژ، و مبدل‌های باک-بوست (Buck-Boost) برای هر دو حالت کاربرد دارند. علاوه بر این، طراحی مدارات سوئیچینگ که هسته عملکرد این مبدل‌هاست، مستلزم تسلط بر مفاهیم کلیدی چون فرکانس سوئیچینگ، راندمان تبدیل، تلفات حرارتی و پارامترهای فیلتر است. انتخاب سوئیچ مناسب از بین ترانزیستورهای MOSFET ، IGBT یا BJT ، بسته به سطح توان و کاربرد، تأثیر بسزایی بر راندمان و پایداری مدار دارد.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی مبدل‌های جریان مستقیم، کنترل ریپل جریان و ولتاژ در خروجی است. ریپل بیش از حد می‌تواند موجب آسیب به بار متصل و کاهش طول عمر اجزای مدار شود. از این رو، طراحی فیلترهای ورودی و خروجی با استفاده از سلف‌ها و خازن‌ها، نقش مهمی در کیفیت توان خروجی دارد. علاوه بر این، باید به ملاحظات

الکترومغناطیسی و نویزهای ناشی از فرکانس بالا توجه ویژه داشت، زیرا این نویزها می‌توانند بر سایر بخش‌های سیستم اثر منفی بگذارند. طراحی مسیرهای زمین، کاهش حلقه‌های جریان بالا و استفاده از تکنیک‌های EMI Shielding از روش‌های مؤثر در کنترل این پدیده‌هاست. در مبدل‌های پیشرفته‌تر، کنترل دیجیتالی جایگزین کنترل آنالوگ شده و با استفاده از ریزپردازنده‌ها یا DSPها، تنظیم دقیق‌تری بر پارامترهای کلیدی مانند ولتاژ خروجی، جریان، و پایداری فراهم می‌شود. در فرآیند طراحی، مدل‌سازی ریاضی مدار یکی از مراحل بنیادین است. مهندس طراح باید بتواند روابط بین ولتاژ، جریان، و زمان را از طریق تحلیل حالت‌های روشن و خاموش سوئیچ‌ها استخراج کند تا معادلات حالت (State Equations) مدار شکل گیرد. با این تحلیل‌ها می‌توان عملکرد مبدل را در شرایط مختلف پیش‌بینی و بهینه کرد. شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری با ابزارهایی چون MATLAB/Simulink، LTspice یا PSpice، کمک می‌کنند تا قبل از ساخت نمونه واقعی، رفتار مدار بررسی و خطاهای احتمالی اصلاح شود. پس از تأیید نتایج شبیه‌سازی، نوبت به طراحی مدار چاپی (PCB) می‌رسد که خود هنری دقیق در کنترل مسیرهای جریان، حداقل‌سازی نویز و کاهش تلفات است. چیدمان صحیح اجزاء، کوتاه نگه‌داشتن مسیرهای جریان بالا، و تفکیک نواحی قدرت از نواحی کنترل، اصول حیاتی در طراحی برد محسوب می‌شوند.

در مرحله ساخت، انتخاب قطعات الکترونیکی با کیفیت و مطابقت مشخصات آن‌ها با شرایط طراحی اهمیت زیادی دارد. سلف‌ها و خازن‌های به‌کاررفته باید توان تحمل جریان و دمای بالا را داشته باشند. همچنین ترانزیستورهای قدرت باید دارای مشخصات سوئیچینگ سریع، مقاومت پایین در حالت روشن و تحمل ولتاژ مناسب باشند. خنک‌سازی مؤثر نیز عامل دیگری است که در طراحی مبدل‌های جریان مستقیم نباید نادیده گرفته شود، زیرا افزایش دما به‌طور مستقیم بر عمر و پایداری مدار اثر می‌گذارد. استفاده از هیت‌سینک، فن یا حتی سیستم‌های خنک‌سازی مایع در توان‌های بالا می‌تواند از آسیب به قطعات جلوگیری کند.

در حوزه کاربرد، مبدل‌های جریان مستقیم دامنه گسترده‌ای را پوشش می‌دهند. در سیستم‌های خورشیدی، برای تنظیم ولتاژ پنل‌های خورشیدی و تطبیق آن با ولتاژ باتری

یا اینورتر از مبدل‌های DC-DC استفاده می‌شود. در خودروهای برقی، این مبدل‌ها انرژی باتری‌های ولتاژ بالا را برای تغذیه مدارهای کم‌ولتاژتر مانند سیستم‌های کنترل و روشنایی تنظیم می‌کنند. در تجهیزات الکترونیکی قابل حمل، مانند تلفن همراه و لپ‌تاپ، نقش مبدل‌ها در مدیریت توان و افزایش عمر باتری غیرقابل انکار است. حتی در شبکه‌های مخابراتی، مبدل‌های جریان مستقیم برای تثبیت ولتاژ تغذیه ایستگاه‌های پایه به کار می‌روند تا اختلالی در انتقال داده‌ها رخ ندهد. بابایی، ی. (۱۳۹۵).

به موازات گسترش فناوری، نیاز به مبدل‌هایی با راندمان بالاتر، اندازه کوچک‌تر و قابلیت هوشمند بیشتر، روزبه‌روز افزایش می‌یابد. امروزه مبدل‌های DC-DC نه تنها در سطح سخت‌افزار، بلکه در سطح نرم‌افزار نیز کنترل می‌شوند. کنترل‌کننده‌های دیجیتال با الگوریتم‌های تطبیقی، قابلیت تشخیص شرایط بار و تنظیم لحظه‌ای پارامترها را دارند تا انرژی با حداقل تلفات انتقال یابد. استفاده از فناوری‌های نوین مانند ترانزیستورهای GaN (گالیوم نیتريد) و SiC (کاربید سیلیسیم) موجب جهش قابل توجهی در عملکرد مبدل‌ها شده است. این مواد، به دلیل مقاومت کمتر و سرعت سوئیچینگ بالاتر، امکان افزایش فرکانس کاری و در نتیجه کاهش اندازه فیلترها را فراهم می‌کنند. آقاجانی، س.، و رضایی، ف. (۱۳۹۷).

در کنار مباحث فنی، باید به مسائل ایمنی و استانداردسازی نیز توجه داشت. مبدل‌های جریان مستقیم، به‌ویژه در کاربردهای صنعتی یا خودرویی، باید با استانداردهای جهانی از جمله IEC، ISO و UL سازگار باشند تا از خطرات ناشی از اضافه‌ولتاژ، اتصال کوتاه یا افزایش حرارت جلوگیری شود. طراحی مدارهای حفاظتی شامل مدارهای OVP (محافظةت از اضافه‌ولتاژ)، OCP (محافظةت از اضافه‌جریان) و OTP (محافظةت در برابر حرارت بیش از حد) بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند طراحی است.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه مواد مغناطیسی و تکنیک‌های بسته‌بندی الکترونیکی نیز به بهبود چشمگیر در چگالی توان مبدل‌ها منجر شده است. با به‌کارگیری سلف‌ها و ترانسفورماتورهای با هسته فریت پیشرفته، می‌توان توان بیشتری را در حجم کمتر منتقل کرد. همچنین استفاده از تکنولوژی‌های مازولار، امکان ترکیب چند مبدل کوچک برای

تشکیل یک سیستم قدرتمندتر را فراهم کرده است. این رویکرد در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و مراکز داده کاربرد گسترده‌ای یافته است.

در مسیر طراحی و ساخت مبدل‌های جریان مستقیم، آزمایش و اعتبارسنجی نهایی نقش اساسی دارد. پس از مونتاژ مدار، باید با استفاده از ابزارهایی مانند اسیلسکوپ، آنالایزر توان و مولتی‌مترهای دقیق، پارامترهای عملکردی از جمله ولتاژ خروجی، ریپل، راندمان، و پاسخ گذرا اندازه‌گیری شوند. این داده‌ها نشان می‌دهند که طراحی تا چه حد به اهداف تعیین‌شده نزدیک است. هرگونه ناپایداری یا نوسان غیرعادی باید با تحلیل دقیق منشأ آن در مدار شناسایی و اصلاح گردد.

از منظر آموزشی، آشنایی با اصول طراحی مبدل‌های جریان مستقیم می‌تواند دریچه‌ای به دنیای وسیع‌تر الکترونیک قدرت باشد. دانشجویان و پژوهشگران با درک مفاهیم پایه‌ای مانند تبدیل انرژی، کنترل توان و تحلیل سوئیچینگ، قادر خواهند بود در آینده مبدل‌هایی با کارایی بالا و ویژگی‌های هوشمند طراحی کنند. این حوزه، پیوندی میان تئوری و عمل است و همواره امکان نوآوری در آن وجود دارد.

با نگاهی به آینده، انتظار می‌رود مبدل‌های DC-DC به سمت طراحی‌های مجتمع‌تر و خودتنظیم‌پذیر حرکت کنند. مبدل‌هایی که بتوانند به‌صورت خودکار با تغییرات محیطی مانند دما، بار یا ولتاژ ورودی تطبیق یابند و عملکرد بهینه‌ای ارائه دهند. همچنین ترکیب مبدل‌ها با فناوری‌های ارتباطی مانند اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی، نسل جدیدی از سیستم‌های توان هوشمند را پدید خواهد آورد. این سیستم‌ها نه تنها انرژی را بهینه مصرف می‌کنند بلکه قادر به پیش‌بینی خرابی‌ها و تنظیم خودکار پارامترها برای جلوگیری از آسیب خواهند بود. طراحی و ساخت مبدل‌های جریان مستقیم تلفیقی از دانش، تجربه و خلاقیت است. مهندسی که در این مسیر گام می‌گذارد باید به جزئیات فنی و جنبه‌های انسانی استفاده از انرژی بیندیشد، زیرا هر ولتاژ تنظیم‌شده، در واقع گامی در جهت بهره‌وری بیشتر و حفظ منابع انرژی زمین است. مبدل‌های جریان مستقیم تنها مداراتی از خازن و ترانزیستور نیستند، بلکه قلب تپنده سیستم‌های مدرن انرژی‌اند که آینده پایدار بشر بر پایه آن‌ها می‌تپد.

## فصل اول:

### مبانی و اصول مبدل‌های جریان مستقیم:

مبانی و اصول مبدل‌های جریان مستقیم بر پایه تبدیل سطوح ولتاژ در مدارهای DC با استفاده از عناصر سوئیچینگ استوار است. در یک سیستم جریان مستقیم، ولتاژ ثابت ممکن است برای تغذیه همه اجزای مدار مناسب نباشد، زیرا هر بخش به ولتاژی متفاوت نیاز دارد. مبدل DC-DC این امکان را فراهم می‌سازد که بدون تبدیل انرژی به جریان متناوب، سطح ولتاژ تغییر کند و به صورت کنترل شده افزایش یا کاهش یابد. اساس کار این مبدل‌ها بر ذخیره و انتقال انرژی میان اجزایی چون سلف و خازن استوار است که با کمک کلیدهای الکترونیکی مانند ترانزیستورها انجام می‌شود. اصول عملکرد این مبدل‌ها را می‌توان با بررسی سه نوع پایه‌ای درک کرد: مبدل باک (Buck Converter) که وظیفه کاهش ولتاژ را دارد، مبدل بوست (Boost Converter) که ولتاژ را افزایش می‌دهد، و مبدل باک-بوست (Buck-Boost Converter) که می‌تواند هر دو عمل را انجام دهد. در مبدل باک، کلید الکترونیکی به صورت تناوبی باز و بسته می‌شود و به این ترتیب، متوسط ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی خواهد بود. در مبدل بوست، با قطع جریان سلف در لحظه مناسب، انرژی ذخیره شده در سلف به ولتاژ ورودی اضافه می‌شود و ولتاژ خروجی از ورودی بیشتر می‌شود. در مبدل باک-بوست، بسته به زمان بندی سوئیچ و نحوه تخلیه انرژی، خروجی می‌تواند کمتر یا بیشتر از ورودی باشد و حتی قطبیت آن تغییر کند. نیکوکار، م. (۱۳۹۸).

اصلی‌ترین عامل در کنترل سطح ولتاژ خروجی، نسبت زمان روشن بودن کلید به کل زمان سیکل است که به آن **Duty Cycle** یا ضریب وظیفه گفته می‌شود. به طور مثال در مبدل باک، ولتاژ خروجی برابر است با حاصل ضرب **Duty Cycle** در ولتاژ ورودی. بنابراین با تغییر عرض پالس‌های کنترلی (PWM)، می‌توان ولتاژ خروجی را به صورت دقیق تنظیم

کرد. کنترل این پالس ها معمولاً توسط مدارهای کنترل کننده آنالوگ یا دیجیتال انجام می شود که پارامترهایی مانند ولتاژ خروجی، جریان بار و دما را در نظر می گیرند.

در طراحی مبدل های جریان مستقیم، پدیده های گذرای الکتریکی اهمیت زیادی دارند. زمانی که کلید روشن یا خاموش می شود، تغییرات سریع جریان و ولتاژ می تواند منجر به ایجاد نوسان، تلفات و نویز شود. به همین دلیل، انتخاب فرکانس سوئیچینگ باید با دقت انجام شود؛ فرکانس بالا موجب کاهش اندازه اجزای ذخیره کننده انرژی می شود اما تلفات سوئیچینگ و نویز الکترومغناطیسی را افزایش می دهد، در حالی که فرکانس پایین موجب افزایش حجم و وزن مدار می گردد.

عنصر کلیدزنی در مبدل های جریان مستقیم نقش حیاتی دارد. در گذشته از ترانزیستورهای BJT استفاده می شد، اما امروزه MOSFET ها و IGBT ها به دلیل راندمان بالا و سرعت سوئیچینگ زیاد جایگزین آن ها شده اند. انتخاب نوع سوئیچ باید بر اساس توان خروجی، ولتاژ ورودی، و الزامات کنترلی انجام گیرد MOSFET. ها برای کاربردهای کم تا متوسط توان مناسب اند، در حالی که IGBT ها در سیستم های توان بالا مانند خودروهای برقی یا منابع تغذیه صنعتی کاربرد دارند. فراهانی، م. (۱۳۹۵).

در کنار عناصر سوئیچینگ، نقش سلف و خازن نیز در اصول عملکرد مبدل های جریان مستقیم بسیار کلیدی است. سلف به عنوان ذخیره کننده انرژی مغناطیسی عمل می کند و جریان را هموار می سازد، در حالی که خازن وظیفه صاف کردن ولتاژ خروجی و کاهش ریبیل را بر عهده دارد. اندازه گیری و انتخاب مقادیر مناسب سلف و خازن تأثیر مستقیمی بر پایداری و راندمان مدار دارد. محاسبات مربوط به مقدار سلف بر اساس حداکثر تغییر جریان مجاز و فرکانس سوئیچینگ انجام می شود و خازن ها نیز باید توان تحمل ریبیل و دمای بالا را داشته باشند.

مدارهای فیدبک در مبدل های جریان مستقیم یکی از اصول کنترل پایداری محسوب می شوند. این مدارها خروجی را پیوسته اندازه گیری کرده و در صورت انحراف از مقدار

مطلوب، سیگنال کنترلی را تغییر می‌دهند تا ولتاژ خروجی در محدوده مشخص باقی بماند. سیستم‌های فیدبک می‌توانند از نوع ولتاژمحور یا جریان‌محور باشند. در کنترل ولتاژ، خروجی مستقیماً با مقدار مرجع مقایسه می‌شود، اما در کنترل جریان، جریان سلف نیز تحت نظارت قرار می‌گیرد تا از اضافه‌جریان جلوگیری شود.

اصول طراحی حرارتی نیز جزو مبانی ضروری مبدل‌های جریان مستقیم است. هر مبدل در هنگام کار، تلفات حرارتی تولید می‌کند که در اثر مقاومت داخلی قطعات و زمان سوئیچینگ به وجود می‌آید. اگر این حرارت به‌درستی دفع نشود، دمای قطعات بالا می‌رود و موجب افت راندمان و حتی خرابی می‌شود. بنابراین در طراحی اصولی مبدل‌ها باید سیستم خنک‌کننده مناسب شامل هیت‌سینک، فن یا مواد انتقال‌دهنده حرارت پیش‌بینی گردد.

از منظر تئوری سیستم‌ها، تحلیل مبدل‌های جریان مستقیم معمولاً با استفاده از مدل‌های حالت‌متوسط (Averaged State Model) انجام می‌شود که به مهندس امکان می‌دهد رفتار دینامیکی مدار را بدون در نظر گرفتن نوسانات سریع سوئیچینگ بررسی کند. این مدل‌ها پایه تحلیل پایداری و طراحی کنترل‌کننده هستند. بر اساس این مدل‌ها می‌توان تابع تبدیل ولتاژ خروجی نسبت به ولتاژ ورودی یا Duty Cycle را استخراج کرد و از آن برای طراحی کنترل‌کننده‌های PID، فازی یا تطبیقی استفاده نمود.

یکی دیگر از اصول اساسی در طراحی مبدل‌های جریان مستقیم، توجه به راندمان است. راندمان به نسبت توان خروجی به توان ورودی گفته می‌شود و در مبدل‌های خوب معمولاً بین ۸۵ تا ۹۵ درصد است. کاهش تلفات سوئیچینگ، استفاده از دیویدهای شاتکی با افت ولتاژ پایین، طراحی مسیره‌های کوتاه در PCB و انتخاب مواد مغناطیسی مناسب، از راهکارهای افزایش راندمان محسوب می‌شوند. در مبدل‌های جدید، از تکنیک‌های Soft Switching مانند ZVS (Zero Voltage Switching) و ZCS (Zero Current Switching) استفاده می‌شود تا تلفات سوئیچینگ به حداقل برسد. رضایی، م. (۱۳۹۸).

از جنبه ایمنی، اصول طراحی ایزولاسیون در برخی مبدل ها الزامی است. در مواردی که نیاز به جداسازی الکتریکی بین ورودی و خروجی وجود دارد، از ترانسفورماتورهای فرکانس بالا استفاده می شود تا انتقال انرژی بدون اتصال مستقیم انجام گیرد. این نوع مبدل ها معمولاً در منابع تغذیه سوئیچینگ (SMPS) کاربرد دارند و طراحی آن ها نیازمند توجه ویژه به عایق بندی و تحمل ولتاژ است. ملکی، پ. (۱۳۹۶).

مبانی مبدل های جریان مستقیم ترکیبی از دانش نظری و تجربه عملی است. طراح باید همزمان مفاهیم مدار، الکترونیک قدرت، کنترل، و مواد را درک کند تا بتواند سیستمی پایدار، کارآمد و ایمن ایجاد نماید. فهم اصول بنیادی مانند ذخیره سازی انرژی در میدان مغناطیسی و الکتریکی، رفتار گذرا، و اثرات پارازیتی در فرکانس های بالا، زمینه ساز طراحی دقیق تر و نوآورانه تر خواهد بود. این مبانی، بنیان شکل گیری تمامی پیشرفت های آینده در حوزه مبدل های جریان مستقیم است که امروزه در قلب فناوری های نوین از انرژی تجدیدپذیر گرفته تا هوش مصنوعی و خودروهای الکتریکی جای دارند.

### تعریف و ضرورت استفاده از مبدل های جریان مستقیم:

مبدل های جریان مستقیم یا DC-DC Converter دستگاه هایی هستند که وظیفه تبدیل سطح ولتاژ جریان مستقیم از یک مقدار به مقدار دیگر را بر عهده دارند. در واقع، این مبدل ها واسطه ای میان منبع تغذیه و بار الکتریکی هستند تا انرژی الکتریکی با ولتاژی مناسب و پایدار در اختیار تجهیزات قرار گیرد. تعریف ساده تر آن چنین است که مبدل جریان مستقیم مداری است که انرژی را از منبع ورودی دریافت کرده، آن را به صورت کنترل شده در عناصر ذخیره کننده مانند سلف و خازن ذخیره می کند و سپس با زمان بندی دقیق سوئیچ ها، انرژی را با ولتاژ مورد نیاز به خروجی منتقل می نماید. برخلاف مبدل های AC که وظیفه تبدیل جریان متناوب را دارند، مبدل های DC تنها با جریان مستقیم کار می کنند و قادرند ولتاژ را کاهش، افزایش یا حتی قطب آن را معکوس کنند. این ویژگی باعث شده است که مبدل های جریان مستقیم در ساختار اکثر تجهیزات الکترونیکی و صنعتی جایگاه ویژه ای داشته باشند. ضرورت استفاده از مبدل های جریان مستقیم از چند

منظر قابل درک است. نخست، تنوع نیاز ولتاژی در سیستم‌های الکترونیکی است. در یک دستگاه الکترونیکی مانند لپ‌تاپ یا تلفن همراه، بخش‌های مختلف با ولتاژهای متفاوت کار می‌کنند. برای مثال، پردازنده مرکزی ممکن است به ولتاژ ۱.۲ ولت نیاز داشته باشد، در حالی که مدار نمایشگر یا سیستم صوتی به ولتاژهای بالاتری مانند ۵ یا ۱۲ ولت نیاز دارند. از آنجا که منبع اصلی انرژی معمولاً یک باتری با ولتاژ ثابت است، مبدل‌های DC-DC وظیفه تأمین این ولتاژهای گوناگون را بر عهده دارند تا کل سیستم بتواند به صورت هماهنگ و بهینه عمل کند.

دومین ضرورت استفاده از مبدل‌های جریان مستقیم در افزایش راندمان انرژی است. در گذشته برای تغییر ولتاژ از روش‌های مقاومتی یا خطی استفاده می‌شد که در آن‌ها انرژی زیادی به صورت حرارت تلف می‌شد. اما مبدل‌های سوئیچینگ جریان مستقیم با بهره‌گیری از عناصر کلیدزنی مانند MOSFET یا IGBTها، انتقال انرژی را تقریباً بدون تلفات انجام می‌دهند. این امر موجب افزایش راندمان تا بیش از ۹۰ درصد می‌شود و مصرف انرژی را به‌ویژه در وسایل قابل حمل و سیستم‌های تغذیه از باتری به شدت کاهش می‌دهد.

از دیگر دلایل ضرورت استفاده از این مبدل‌ها، کنترل دقیق ولتاژ خروجی در برابر تغییرات بار یا ولتاژ ورودی است. بسیاری از دستگاه‌های الکترونیکی به ولتاژی ثابت و پایدار نیاز دارند، در حالی که منبع تغذیه ممکن است دچار نوسانات شود. مبدل‌های جریان مستقیم با بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل فیدبک، قادرند این نوسانات را جبران کرده و ولتاژی یکنواخت در اختیار مصرف‌کننده قرار دهند. این ویژگی در سیستم‌های حساس مانند تجهیزات پزشکی، سامانه‌های مخابراتی و رایانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر نیز مبدل‌های جریان مستقیم نقش حیاتی دارند. به عنوان مثال در سیستم‌های خورشیدی، ولتاژ خروجی پنل‌های خورشیدی بسته به شدت نور و دما تغییر می‌کند. مبدل‌های DC-DC با بهره‌گیری از الگوریتم‌های ردیابی نقطه توان بیشینه (MPPT)، ولتاژ خروجی را تنظیم می‌کنند تا بیشترین توان ممکن از پنل دریافت

و به باتری یا اینورتر منتقل شود. در واقع، بدون حضور این مبدل‌ها، کارایی کل سامانه انرژی خورشیدی به شدت کاهش می‌یابد.

در حوزه خودروهای برقی، ضرورت مبدل‌های جریان مستقیم دوچندان است. این خودروها معمولاً دارای باتری‌هایی با ولتاژ بسیار بالا هستند، اما بخش‌های الکترونیکی داخلی مانند سیستم روشنایی، کنترل ترمز، یا سیستم‌های اطلاعاتی به ولتاژهای پایین‌تری نیاز دارند. مبدل‌های DC-DC انرژی باتری را به سطح ولتاژ مناسب برای هر بخش تبدیل می‌کنند. علاوه بر این، در سیستم‌های شارژ سریع نیز مبدل‌های جریان مستقیم وظیفه تنظیم دقیق ولتاژ و جریان شارژ را دارند تا از آسیب به باتری جلوگیری شود.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم ضرورت استفاده از مبدل‌های جریان مستقیم، کاهش اندازه و وزن تجهیزات است. با افزایش فرکانس سوئیچینگ، اجزای ذخیره‌کننده انرژی مانند سلف و خازن می‌توانند کوچکتر انتخاب شوند، در نتیجه کل مدار سبک‌تر و فشرده‌تر می‌شود. این ویژگی در طراحی وسایل قابل حمل، پهپادها و تجهیزات پزشکی همراه اهمیت زیادی دارد، زیرا محدودیت فضا و وزن همیشه یکی از چالش‌های اصلی است.

در صنایع مخابراتی نیز مبدل‌های جریان مستقیم برای تأمین توان پایدار ایستگاه‌های پایه، روترها و تجهیزات انتقال داده استفاده می‌شوند. این تجهیزات معمولاً باید به صورت ۲۴ ساعته و بدون قطعی فعالیت کنند، بنابراین وجود مبدلی با پایداری بالا و راندمان زیاد، تضمین‌کننده تداوم عملکرد سیستم است. ضرورت دیگر این مبدل‌ها در حفاظت از سیستم‌های الکتریکی نهفته است. بسیاری از مبدل‌های DC-DC دارای مدارهای محافظتی داخلی هستند که در برابر اضافه‌ولتاژ، اضافه‌جریان، اتصال کوتاه و افزایش دما واکنش نشان می‌دهند. این قابلیت نه تنها از خرابی تجهیزات جلوگیری می‌کند، بلکه عمر مفید سیستم را نیز افزایش می‌دهد.

در دنیای امروزی که تمرکز جهانی بر مصرف بهینه انرژی و توسعه فناوری‌های سبز است، مبدل‌های جریان مستقیم به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت توان شناخته

می‌شوند. این مبدل‌ها امکان بهره‌برداری مؤثر از منابع انرژی را فراهم می‌کنند و با کاهش تلفات، به کاهش انتشار حرارتی و افزایش پایداری محیط‌زیست کمک می‌نمایند. از این رو، توسعه فناوری‌های جدید در زمینه مبدل‌های جریان مستقیم نه تنها به پیشرفت صنعت الکترونیک بلکه به تحقق اهداف زیست‌محیطی جهانی نیز یاری می‌رساند. در نتیجه، مبدل‌های جریان مستقیم را می‌توان قلب تپنده سیستم‌های تغذیه دانست. بدون وجود آن‌ها، هماهنگی بین منبع انرژی و مصرف‌کننده ممکن نبود و بسیاری از تجهیزات امروزی از جمله خودروهای الکتریکی، سیستم‌های هوشمند، و فناوری‌های انرژی پاک قادر به عملکرد پایدار نمی‌بودند. ضرورت استفاده از این مبدل‌ها، ضرورتی فناورانه و حیاتی است که هم به بهبود کارایی سیستم‌های الکتریکی و هم به حفاظت از محیط‌زیست کمک می‌کند. احمدی، م. (۱۳۹۸).

### مروری بر انواع سیستم‌های توان DC و AC :

سیستم‌های توان الکتریکی را می‌توان به دو دسته اصلی جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) تقسیم کرد. هر یک از این سیستم‌ها ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و در کاربردهای گوناگون صنعتی، تجاری و خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جریان مستقیم، جریانی است که الکترون‌ها در آن فقط در یک جهت حرکت می‌کنند، در حالی که در جریان متناوب جهت حرکت الکترون‌ها به صورت تناوبی تغییر می‌کند. این تفاوت بنیادی سبب می‌شود که رفتار، انتقال، توزیع و تبدیل توان در هر دو سیستم از یکدیگر متمایز باشد. درک عمیق تفاوت‌ها و کاربردهای این دو نوع سیستم، اساس طراحی شبکه‌های مدرن توان و تجهیزات الکترونیکی است.

در سیستم‌های DC، ولتاژ و جریان در طول زمان ثابت باقی می‌مانند. این ویژگی باعث می‌شود که در مدارهای الکترونیکی حساس، کنترل توان و ولتاژ بسیار دقیق‌تر انجام شود. منابع اصلی جریان مستقیم شامل باتری‌ها، سلول‌های خورشیدی، مبدل‌های AC-DC و برخی ژنراتورهای خاص هستند. این نوع جریان معمولاً در سیستم‌های الکترونیکی کوچک، وسایل قابل حمل، رایانه‌ها، خودروهای برقی و تجهیزات مخابراتی به کار می‌رود.