

# انرژی‌های تجدیدپذیر:

## فرمان‌پذیری و کنترل مبدل

### مدولار DC

رقیه گوگ‌ساز قوچانی

هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی

محمد افکار

دانش آموخته دانشگاه شهید بهشتی



|                              |                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه                      | گوگساز قوچانی، رقیه، ۱۳۴۹ -                                                                                                                                                                                  |
| عنوان و نام پدیدآور          | انرژی‌های تجدیدپذیر: فرمان‌پذیری و کنترل مبدل مدولار DC / رقیه گوگساز قوچانی، محمد افکار.                                                                                                                    |
| مشخصات نشر                   | تهران: دانش‌نگار، ۱۴۰۰.                                                                                                                                                                                      |
| مشخصات ظاهری                 | ۱۰۲ص: مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار (رنگی).                                                                                                                                                               |
| شابک                         | ۹۷۸-۶۰۰-۳۰۸-۱۹۴-۹                                                                                                                                                                                            |
| وضعیت فهرست‌نویسی            | فیا                                                                                                                                                                                                          |
| یادداشت                      | کتابنامه.                                                                                                                                                                                                    |
| موضوع                        | پیل‌های سوختی<br>Fuel cells<br>انرژی‌های پایان‌ناپذیر<br>Renewable energy sources<br>برق - سیستم‌های فتوولتایی<br>Photovoltaic power systems<br>مبدل‌های جریان مستقیم به جریان مستقیم<br>DC-to-DC converters |
| شناسه افزوده                 | افکار، محمد، ۱۳۶۹ -                                                                                                                                                                                          |
| رده بندی کنگره               | TK۲۹۳۱                                                                                                                                                                                                       |
| رده بندی دیویی               | ۶۲۱/۳۱۲۴۲۹                                                                                                                                                                                                   |
| شماره کتابشناسی ملی          | ۸۷۱۵۰۶۶                                                                                                                                                                                                      |
| اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیا |                                                                                                                                                                                                              |

#### فرهینخته گرامی:

کپی کردن و یا تهیه فایل‌های pdf از تمام و یا قسمتی از کتاب تضییع اشکال حقوق مادی و معنوی ناشر و مولف است و انگیزه تألیف، ترجمه و نشر کتاب‌های جدید را در کشور از بین می‌برد. خواهشمندیم در زمان خرید کتاب، از اصل بودن آن مطمئن شوید.

www.daneshnegar.com



#### انرژی‌های تجدیدپذیر: فرمان‌پذیری و کنترل مبدل مدولار DC

نویسنده: رقیه گوگساز قوچانی، محمد افکار

نوبت چاپ: اول

سال چاپ: ۱۴۰۰

شمارگان: ۲۰۰ نسخه

قیمت: ۳۵۰۰۰ تومان

چاپ و صحافی: نسیم

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۳۰۸-۱۹۴-۹



تهران، انقلاب، خیابان منیری‌جاوید (اردیبهشت)، نبش وحید نظری، شماره ۱۴۲

تلفکس: ۶۶۲۰۰۲۲۰ - ۶۶۲۰۰۱۴۴

## فهرست مطالب

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| پیش‌گفتار.....                                                 | ۵  |
| فصل ۱: فرمان‌پذیری مبدل.....                                   | ۹  |
| ۱-۱ مقدمه.....                                                 | ۱۰ |
| ۲-۱ تعیین ناحیه فرمان‌پذیری مبدل دومدوله.....                  | ۱۱ |
| ۳-۱ تعیین ناحیه فرمان‌پذیری مبدل چندمدوله.....                 | ۲۳ |
| ۴-۱ اعتبارسنجی آزمایشگاهی.....                                 | ۳۷ |
| ۵-۱ نتیجه‌گیری.....                                            | ۴۲ |
| فصل ۲: اثر تغییرات بار و ولتاژ ورودی در رفتار کنترل‌کننده..... | ۴۳ |
| ۱-۲ مقدمه.....                                                 | ۴۴ |
| ۲-۲ کنترل‌کننده.....                                           | ۴۴ |
| ۱-۲-۲ روابط کنترلی.....                                        | ۴۴ |
| ۲-۲-۲ بلوک دیاگرام کنترل.....                                  | ۴۵ |
| ۳-۲ نتایج شبیه‌سازی.....                                       | ۴۶ |
| ۱-۳-۲ تغییرات مقاومت بار.....                                  | ۴۶ |
| ۲-۳-۲ تغییرات ولتاژ ورودی.....                                 | ۴۹ |
| ۴-۲ نتیجه‌گیری.....                                            | ۵۸ |
| فصل ۳: افزودن کنترل‌کننده ولتاژ خروجی.....                     | ۵۹ |
| ۱-۳ مقدمه.....                                                 | ۶۰ |
| ۲-۳ کنترل‌کننده.....                                           | ۶۰ |
| ۳-۳ نتایج شبیه‌سازی.....                                       | ۶۳ |
| ۱-۳-۳ رگولاسیون.....                                           | ۶۴ |

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۶۹  | ۲-۳-۳ ردیابی                                   |
| ۷۶  | ۴-۳ نتیجه‌گیری                                 |
| ۷۷  | فصل ۴: اثر پرازیتی مقاومت سری سلف در طراحی     |
| ۷۸  | ۱-۴ مقدمه                                      |
| ۷۸  | ۲-۴ محاسبه‌های تئوری                           |
| ۷۸  | ۱-۲-۴ روابط حاکم بر سیستم                      |
| ۷۹  | ۲-۲-۴ فرض‌ها                                   |
| ۷۹  | ۳-۲-۴ رابطه بین چرخه‌های وظیفه در حالت ماندگار |
| ۸۰  | ۴-۲-۴ نحوه محاسبه بهره ولتاژ                   |
| ۸۱  | ۵-۲-۴ نقاط اکسترمم بهره ولتاژ                  |
| ۸۲  | ۳-۴ شکل موج‌ها                                 |
| ۸۸  | ۴-۴ نتیجه‌گیری                                 |
| ۸۹  | فصل ۵: عملکرد در حالت خطا                      |
| ۹۰  | ۱-۵ مقدمه                                      |
| ۹۱  | ۲-۵ سیستم در حالت خطا                          |
| ۹۲  | ۳-۵ نتایج                                      |
| ۹۴  | ۱-۳-۵ سناریوی اول                              |
| ۹۷  | ۲-۳-۵ سناریوی دوم                              |
| ۱۰۰ | ۴-۵ نتیجه‌گیری                                 |
| ۱۰۱ | مراجع                                          |

## با نام و یاد بینا تر از هر بینا

### پیش گفتار

انرژی خورشیدی یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدپذیر است. این منبع ارزان، در دسترس همگان است. سیستم فتوولتائیک با تبدیل انرژی خورشیدی به برق، یکی از روش‌های مهم تولید انرژی به‌شمار می‌آید. پیل سوختی نیز یکی از سیستم‌های پر کاربرد در انرژی‌های تجدیدپذیر است. این سیستم، به دلیل قابل حمل بودن و کاربرد آن به‌ویژه در بحث خودروهای برقی در دهه‌های گذشته بسیار مورد توجه بوده است. به کارگیری سیستم‌های فتوولتائیک و پیل سوختی با برخی چالش‌ها روبه‌رو است.

در سیستم‌های فتوولتائیک، عواملی مانند سایه‌اندازی، گردوغبار، جهت‌گیری متفاوت و اختلاف دمایی پنل‌ها به‌خصوص در حالت بهره‌برداری در منازل و کاربردهای شهری می‌تواند سبب ایجاد پدیده عدم هماهنگی در تولید توان پنل‌ها شود. این امر می‌تواند باعث به وجود آمدن خطا در الگوریتم پیدا کردن نقطه بیشینه توان (MPPT) شود. به عبارت دیگر، امکان دارد الگوریتم MPPT نتواند حداکثر توان مطلق سیستم را پیدا کند و یک نقطه حداکثر محلی را با حداکثر مطلق اشتباه بگیرد. یکی از راه‌کارها برای کاهش خطا، به کارگیری مبدل‌های DC-DC است، به گونه‌ای که هر پنل، مبدل اختصاصی خود را داشته باشد و کنترل MPPT از طریق آن صورت گیرد. در این صورت الگوریتم MPPT دچار خطا نخواهد شد.

یکی از چالش‌های موجود در سیستم پیل سوختی پدیده‌ای به نام اثر گلوله‌برفی است. در این پدیده به دنبال واکنش‌های پی‌درپی، امکان دارد پیل سوختی از بین رفته و غیرقابل کاربرد شود. در این فرآیند، خشک شدن غشا یکی از پارامترهای موثر در از دست رفتن سلول است. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی، تنظیم آب به عنوان یکی از محصولات خروجی پیل سوختی است. با تنظیم جریان پیل سوختی به کمک مبدل DC-DC، می‌توان میزان آب تولیدشده و در نتیجه رطوبت غشا را کنترل کرد. بنابراین، به کارگیری مبدل‌های DC-DC جداگانه برای هر سلول می‌تواند راه کار مناسبی برای مدیریت رطوبت در پیل سوختی و جلوگیری از پدیده گلوله‌برفی باشد.

از سوی دیگر، در سیستم‌های پیل سوختی و فتوولتائیک، ولتاژ تولیدی پایین است. بنابراین مبدل‌های

DC-DC به کار گرفته شده در این دو سیستم، باید از نوع افزایشنده باشد. برای افزایش بیشتر ولتاژ خروجی، می توان این مبدل ها را با یکدیگر سری کرد.

هر سلول فتوولتاییک یا پیل سوختی با توجه به شرایطی که در آن قرار دارد، به صورت مستقل عمل می کند. بنابراین، در ساختار مبدل های جداگانه سری شده، مشکل جدیدی به وجود می آید. این مشکل، عدم تعادل ولتاژ در پایانه های خروجی این مبدل هاست، که از تولید نابرابر سلول ها ناشی می شود. متعادل نبودن ولتاژ، در هر دو سیستم می تواند تنش در کلیدها و المان های قدرت را افزایش دهد. همچنین، در سیستم پیل سوختی منجر به کاهش عمر سلول ها و در سیستم فتوولتاییک منجر به افزایش خطای الگوریتم MPPT شود.

برای ایجاد تعادل ولتاژ DC، یک ساختار مدولار بر اساس مبدل بوست سه سطحی مورد مطالعه قرار می گیرد. وجود دو خازن در این مبدل، امکان به کارگیری یک ایده ابتکاری در اتصال چند منبع و مبدل بوست سه سطحی را ممکن می سازد. دومین خازن مدول اول با خازن اول مدول بعدی به اشتراک گذاشته می شود. به کمک این ساختار و کنترل کننده مناسب، می توان از مزایای مبدل بوست سه سطحی بهره مند شد و تعادل ولتاژ را در سیستم ایجاد کرد.

امروزه علاوه بر حوزه انرژی های تجدیدپذیر مانند سیستم های فتوولتاییک و پیل سوختی که پیش تر به آن اشاره شد، سیستم هایی که از وجود مبدل ها بهره می برند به سرعت گسترش یافته اند. در این راستا، دانستن تمام جنبه های مبدل ضروری است. از جمله این موارد می توان به مدهای عملیاتی، مدل سازی مانند مدل متوسط، آنالیز بازدهی، بهره ولتاژ، فرمان پذیری و بخش کنترلی اشاره کرد.

یکی از موارد مهمی که برای مبدل باید مورد بررسی قرار گیرد، تعیین مناطقی است که در آن مبدل فرمان پذیر است. در فصل اول، به بررسی نواحی فرمان پذیری مبدل مورد مطالعه پرداخته می شود. یکی از چالش های موجود در سیستم های فتوولتاییک و پیل سوختی مسئله عدم تعادل ولتاژ است. برای رفع این مشکل، یک ساختار مدولار بر اساس مبدل بوست سه سطحی پیشنهاد شده است. ابتدا مبدل دومدوله مورد بررسی قرار می گیرد. به کمک روابط حاکم بر سیستم، چرخه های وظیفه محاسبه می شود. سپس با در نظر گرفتن اینکه آنها در محدوده صفر و یک باید قرار گیرند، نواحی فرمان پذیر و فرمان ناپذیر مشخص می شود. پس از بررسی نواحی مبدل دومدوله، این امر برای مبدل سه مدوله و N-مدوله انجام می شود.

در گام بعدی عملکرد کنترل کننده های پیشنهادی مورد مطالعه قرار می گیرد. در فصل دوم، این مطالعه با در نظر گرفتن کنترل جریان ورودی هر مدول انجام می شود. در این فصل، به بررسی رفتار سیستم در برابر تغییرات مقاومت بار و همچنین تغییرات ولتاژ ورودی پرداخته می شود.

در بسیاری از کاربردها کنترل ولتاژ AC و DC بسیار مهم است، زیرا بارها در بازه مشخصی از ولتاژ

می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند. هم‌چنین در برخی از کاربردها، مانند پیل سوختی، یا سیستم‌های فتوولتائیک کنترل ولتاژ خروجی هدف نهایی است. بنابراین، یک کنترل‌کننده بیرونی مناسب جهت کنترل ولتاژ خروجی می‌تواند مراجع جریان را تعیین کند. بنابراین، در فصل سوم، یک کنترل‌کننده بیرونی بر اساس انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها معرفی می‌شود. پس از معرفی روابط مورد نیاز جهت شبیه‌سازی، عملکرد آن از نظر ردیابی و رگولاسیون و هم‌چنین اثر آن در روی تعادل ولتاژ خازن‌های خروجی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در موارد عملی، افت ولتاژ ناشی از عناصر پارازیتی می‌تواند دامنه تغییرات چرخه‌های وظیفه را و در نتیجه تعداد مدول‌هایی را که می‌تواند با توپولوژی پیشنهادی به هم مرتبط شوند محدود کند. در فصل چهارم، به مطالعه بهره ولتاژ با در نظر گرفتن عناصر پارازیتی مبدل پرداخته می‌شود.

شناخت و تحلیل رفتار یک سیستم در زمان وقوع خطا بسیار مهم است. مبدل‌های DC-DC نیز از این قاعده مستثنی نیستند. یکی از پارامترهای مهم در مبدل‌ها که منجر به نقص سیستم می‌شود، خطاهای اجزای مدار مبدل مانند خازن الکترولیتی است. فصل پنجم به بررسی رفتار مبدل دومدوله پس از وقوع خطا در یکی از خازن‌های سیستم می‌پردازد.

پروردگار را سپاسگزاریم که توفیق کمال گروهی دیگری را به ما عطا کرد تا بتوانیم این دستاورد را تقدیم شما خوبان کنیم.

این کتاب به علاقمندان به سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و مطالعه کنترل و رفتار مبدل‌های الکترونیک قدرت در حل چالش‌های سیستم‌هایی مانند فتوولتائیک و پیل سوختی در سراسر سرزمین مان تقدیم می‌شود.

بی‌تردید با ایده‌های خلاقانه و همت والا می‌توانیم آینده‌ای زیبا را برای هستی ترسیم کنیم. در پیمودن این مسیر، بازخوردهای شما عزیزان را در راستای بهبود این دستاورد گروهی صمیمانه پذیرا هستیم و پیشاپیش، کمال تشکر را داریم.

رقیه گوگ‌ساز قوچانی<sup>۱</sup> - محمد افکار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی - گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی تهران  
r\_gavagsaz@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته ارشد دانشگاه شهید بهشتی تهران  
mo.afkar@mail.sbu.ac.ir

بهمن ۱۴۰۰