

# تئوری، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی مخصوص

تألیف:

جواد سلیمانی

عبدالحمید اجلائی

ناشر: انتشارات نهر دانش

(چاپ اول: زمستان ۱۳۹۳)

|                      |   |                                                                                          |
|----------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه              | : | سلیمانی، جواد، ۱۳۶۴ -                                                                    |
| عنوان و نام پدیدآور  | : | تئوری، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی مخصوص /<br>تالیف جواد سلیمانی، عبدالحسین اجلائی. |
| مشخصات نشر           | : | تهران: نهر دانش، ۱۳۹۳.                                                                   |
| مشخصات ظاهری         | : | ۳۱۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.                                                              |
| شابک                 | : | ۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۴-۱۸-۰                                                                        |
| وضعیت فهرست نویسی:   | : | فیبا                                                                                     |
| یادداشت              | : | کتابنامه.                                                                                |
| موضوع                | : | ماشین‌آلات برقی                                                                          |
| شناسه افزوده         | : | اجلائی، عبدالحسین، ۱۳۶۶ -                                                                |
| رده بندی کنگره       | : | TK۲۰۰۰/۹ س ۱۳۹۳                                                                          |
| رده بندی دیویی       | : | ۶۲۱/۳۱۰۴۲                                                                                |
| شماره کتابشناسی ملی: | : | ۳۷۳۱۵۰۷                                                                                  |

انتشارات نهر دانش

عنوان: تئوری، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی مخصوص

تالیف: جواد سلیمانی، عبدالحسین اجلائی

ناشر: انتشارات نهر دانش

نوبت چاپ: اول، زمستان ۱۳۹۳

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

قیمت: ۱۶۵۰۰۰ ریال

تلفن مرکز پخش: ۰۹۱۲۲۶۸۷۷۴۵

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۷۱۴-۱۸-۰

حق چاپ برای انتشارات نهر دانش محفوظ است.

## فهرست

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: کلیات                                                          | ۳  |
| ۱-۱- مقدمه                                                              | ۳  |
| ۲-۱- مقایسه ماشینهای متداول با ماشینهای PMSM                            | ۴  |
| ۳-۱- ملاحظات و مطلوبات در طراحی ماشین                                   | ۶  |
| ۱-۳-۱- گشتاور بر حسب آمپر بالا                                          | ۸  |
| ۱-۱-۳-۱- معرفی گشتاور دندانه‌های                                        | ۱۰ |
| ۲-۱-۳-۱- روشهای محاسبه‌ی گشتاور دندانه‌های                              | ۱۱ |
| ۳-۱-۳-۱- روشهای کمیته‌سازی گشتاور دندانه‌های                            | ۱۲ |
| ۲-۳-۱- بازده و ضریب توان بالا و تلفات مسی و آهنی کم                     | ۱۲ |
| ۳-۳-۱- چگالی قدرت بالا (حجم و وزن کم)                                   | ۱۳ |
| ۴-۳-۱- CPSR بالا و محدوده توان ثابت خوب                                 | ۱۴ |
| ۵-۳-۱- قابلیت کارکرد با گشتاور نامی در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی     | ۱۴ |
| ۶-۳-۱- قابلیت کار با وجود اعمال اضافه بار در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی | ۱۵ |
| ۷-۳-۱- تهویه مطبوع و دمای پایین                                         | ۱۶ |
| ۸-۳-۱- ساختار مستحکم                                                    | ۱۷ |
| ۹-۳-۱- تعمیر و نگهداری کمتر و عمر بالاتر و هزینه پایین ماشین            | ۱۷ |
| ۱۰-۳-۱- ریبیل کم                                                        | ۱۷ |
| فصل دوم: ماشین‌های آهنربای دائم سیلندری                                 | ۱۹ |
| ۱-۲- مقدمه                                                              | ۱۹ |
| ۲-۲- ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم سیلندری شار شعاعی                     | ۱۹ |
| ۳-۲- ماشینهای مغناطیس دائم سطحی                                         | ۲۰ |
| ۴-۲- ماشینهای مغناطیس دائم داخلی                                        | ۲۲ |
| ۵-۲- ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم سیلندری شار محیطی                     | ۲۵ |
| ۶-۲- تحلیل ماشینهای سنکرون آهنربای دائم سیلندری                         | ۲۷ |
| ۱-۶-۲- مدار معادل ماشین سنکرون آهنربای دائم در قاب مرجع سنکرون          | ۳۰ |
| ۲-۶-۲- مدلسازی دینامیکی آهنربا                                          | ۳۶ |
| ۷-۲- طراحی ماشین سنکرون مغناطیس دائم                                    | ۴۰ |

|    |                                                           |
|----|-----------------------------------------------------------|
| ۴۱ | ۲-۷-۱- محاسبات طراحی                                      |
| ۴۴ | ۲-۷-۲- ابعاد اصلی                                         |
| ۴۴ | ۲-۷-۳- طول فاصله هوایی                                    |
| ۴۵ | ۲-۷-۴- طراحی استاتور                                      |
| ۴۵ | ۲-۷-۴-۱- شیارهای استاتور                                  |
| ۴۷ | ۲-۷-۴-۲- هسته و دندانه های استاتور                        |
| ۴۸ | ۲-۷-۴-۳- محاسبات سیم بندی استاتور                         |
| ۵۰ | ۲-۷-۵- طراحی رتور                                         |
| ۵۱ | ۲-۷-۶- تلفات موتور                                        |
| ۵۱ | ۲-۷-۶-۱- تلفات مس                                         |
| ۵۲ | ۲-۷-۶-۲- تلفات آهن                                        |
| ۵۲ | ۲-۷-۶-۳- تلفات آهنربا                                     |
| ۵۳ | ۲-۷-۶-۴- تلفات اضافی                                      |
| ۵۳ | ۲-۷-۷- بازده                                              |
| ۵۷ | ۲-۸-۱- موتورهای آهنربای دائم ترکیبی سیلندری:              |
| ۵۹ | ۲-۸-۱-۱- محاسبات تقریبی شار                               |
| ۶۲ | ۲-۸-۲- مدل سازی دینامیکی موتور هیستریزیس با آهنربای دائم: |
| ۶۲ | ۲-۸-۳- مدار معادل موتور سنکرون هیستریزیس با آهنربای دائم  |
| ۶۴ | ۲-۸-۴- مدار معادل مغناطیسی بر روی محور های $d$ و $q$ :    |
| ۶۵ | ۲-۸-۵- تحلیل برداری                                       |
| ۶۷ | ۲-۸-۶- طراحی ماشین سنکرون آهنربای دائم ترکیبی             |
| ۷۱ | ۲-۸-۷- طراحی رتور (طراحی رینگ هیستریزیس)                  |
| ۷۴ | ۲-۹-۱- موتورهای آهنربای دائم قفسی                         |
| ۷۷ | ۲-۹-۱-۱- مشکلات موتور آهنربای دائم قفسی                   |
| ۸۱ | ۲-۹-۲- سنکرونیزاسیون                                      |
| ۸۳ | ۲-۹-۳- ساخت موتور LSPM                                    |
| ۸۳ | ۲-۹-۴- مدل سازی دینامیکی                                  |
| ۸۹ | ۲-۹-۵- طراحی ماشین LSPM                                   |
| ۹۵ | فصل سوم: ماشین های دیسکی                                  |
| ۹۵ | ۳-۱- تاریخچه                                              |
| ۹۵ | ۳-۲- مقدمه                                                |
| ۹۸ | ۳-۳- دستهبندی ماشینهای شارمحوری از نظر نوع                |

|     |                                                                     |
|-----|---------------------------------------------------------------------|
| ۹۸  | ۴-۳- ماشینهای شارمحموری مغناطیس دائم                                |
| ۱۰۰ | ۳-۴-۱- ماشین شارمحموری از نظر ساختار                                |
| ۱۰۰ | ۳-۴-۱-۱- ساختار یکطرفه                                              |
| ۱۰۲ | ۳-۴-۱-۲- طراحی ماشینهای آهنربای دائم شارمحموری یکطرفه               |
| ۱۰۶ | ۳-۵- تحلیل ماشین دیسکی شارمحموری PM (قابل تعمیم برای کلیه ساختارها) |
| ۱۰۶ | ۳-۵-۱- مدار مغناطیسی معادل                                          |
| ۱۱۱ | ۳-۵-۲- محاسبه شارهای ناشی آهنربای دائم                              |
| ۱۱۲ | ۳-۵-۳- مدل تحلیلی برای توزیع چگالی شار فاصله هوایی                  |
| ۱۱۹ | ۳-۵-۴- محاسبه ولتاژ فاز بیباری                                      |
| ۱۲۱ | ۳-۵-۵- گشتاور دندانهای                                              |
| ۱۲۳ | ۳-۵-۶- محاسبه مقاومت فاز                                            |
| ۱۲۴ | ۳-۵-۷- محاسبه تلفات مسی                                             |
| ۱۲۹ | ۳-۵-۸- تلفات جریان گردابی در آهنرباهای دائم و آهن روتور             |
| ۱۲۹ | ۳-۵-۹- تلفات مکانیکی                                                |
| ۱۳۰ | ۳-۵-۱۰- محاسبه اندوکتانسها برای بدست آوردن مدل d-q                  |
| ۱۳۳ | ۳-۵-۱۱- محاسبه زاویه بار ماشین                                      |
| ۱۳۴ | ۳-۵-۱۲- بازده و ضریب توان                                           |
| ۱۳۵ | ۳-۶- ساختار دوطرفه                                                  |
| ۱۳۶ | ۳-۶-۱- ماشین دو طرفه با روتور دیسکی PM داخلی                        |
| ۱۳۸ | ۳-۶-۲- مراحل طراحی ساختار دو طرفه تک روتور                          |
| ۱۳۸ | ۳-۶-۲-۱- هسته‌های استاتور                                           |
| ۱۳۸ | ۳-۶-۲-۱- ابعاد اصلی                                                 |
| ۱۴۰ | ۳-۶-۳- ماشین دو طرفه با یک استاتور                                  |
| ۱۴۲ | ۳-۶-۴- ساختار چند صفحه‌ای                                           |
| ۱۴۳ | ۳-۶-۵- موتورهای شارمحموری نوع NS و NN                               |
| ۱۴۴ | ۳-۶-۷- روشهای قرارگیری مغناطیس دائم بر روی روتور                    |
| ۱۴۵ | ۳-۶-۸- وجود شیارهای آرمیچر                                          |
| ۱۴۶ | ۳-۶-۹- وجود هسته                                                    |
| ۱۶۴ | ۳-۱۰- قیود مکانیکی برای ماشینهای شار شعاعی و محوری                  |
| ۱۶۵ | ۳-۱۰-۱- ثابت نمودن استاتور                                          |
| ۱۶۵ | ۳-۱۰-۲- ضخامت یوغ استاتور                                           |
| ۱۶۶ | ۳-۱۰-۳- عرض دندانها                                                 |

|     |                                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۶۶ | ۳-۱۰-۴- ضخامت مورد نیاز برای دیسک روتور ماشین شار محوری.....                  |
| ۱۶۷ | ۳-۱۰-۵- محدودیتهای مکانیکی ناشی از نیروهای گریز از مرکز.....                  |
| ۱۷۱ | <b>فصل چهارم: ماشین های شار متقاطع.....</b>                                   |
| ۱۷۱ | ۴-۱- مقدمه.....                                                               |
| ۱۸۰ | ۴-۲- طراحی ماشین شار متقاطع.....                                              |
| ۱۸۱ | ۴-۲-۱- طراحی تحلیلی TFPM سه فاز با هسته C شکل.....                            |
| ۱۸۵ | ۴-۲-۲- طراحی تحلیلی TFPM سه فاز با هسته U شکل و آهنربای درونی.....            |
| ۱۸۸ | ۴-۳- تحلیل عملکرد ماشین شار متقاطع.....                                       |
| ۱۹۰ | ۴-۴- طراحی مدار مغناطیسی ماشین سه فاز شار متقاطع (TFM).....                   |
| ۱۹۶ | ۴-۴-۱- اندوکتانس فاز $L_s$ .....                                              |
| ۱۹۷ | ۴-۴-۲- مقاومت فاز و ناحیه شیار.....                                           |
| ۱۹۷ | مثال طراحی.....                                                               |
| ۲۰۱ | ۴-۴-۳- مدل dq و حالت ماندگار.....                                             |
| ۲۰۴ | ۴-۴-۴- طراحی بخش الکترونیکی.....                                              |
| ۲۰۹ | <b>فصل پنجم: ماشین های شار برگشتی.....</b>                                    |
| ۲۰۹ | ۵-۱- مقدمه.....                                                               |
| ۲۱۱ | ۵-۲- اصول عملکرد ماشین شار برگشتی.....                                        |
| ۲۱۶ | ۵-۳- طراحی مدار مغناطیسی و الکتریکی ماشین سه فاز آهنربای دائم شار برگشتی..... |
| ۲۲۲ | ۵-۴- تحلیل اجزای محدود برای ماشین FRM با PM قطبی در بیباری.....               |
| ۲۲۶ | ۵-۵- تحلیل اجزای محدود تحت بار در حالت ماندگار.....                           |
| ۲۳۱ | ۵-۶- محاسبه اندوکتانس با استفاده از FEM.....                                  |
| ۲۳۳ | ۵-۷- اندوکتانسها و مدل مداری ماشین شار برگشتی.....                            |
| ۲۳۴ | ۵-۸- مدل dq-d برای ماشین شار برگشتی.....                                      |
| ۲۴۰ | ۵-۹- ماشین FRM با تمرکز شار PM استاتور (مثال طراحی ۳).....                    |
| ۲۴۴ | ۵-۱۰- ماشین شار برگشتی دو استاتوره (مثال طراحی ۴).....                        |
| ۲۵۱ | <b>فصل ششم: ماشین های شار سوئیچ شونده.....</b>                                |
| ۲۵۱ | ۶-۱- مقدمه.....                                                               |
| ۲۵۵ | ۶-۲- اصول عملکرد FSPM و پارامترهای مهم.....                                   |
| ۲۶۰ | ۶-۲-۱- توالی کلیدزنی شار.....                                                 |
| ۲۶۱ | ۶-۲-۲- تعداد قطبهای استاتور.....                                              |
| ۲۶۱ | ۶-۲-۳- فرکانس پایه.....                                                       |
| ۲۶۱ | ۶-۲-۴- نیروهای شعاعی.....                                                     |

|     |                                                                                         |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۶۲ | ۵-۲-۶- گشتاور دندانه‌های و مورب سازی                                                    |
| ۲۶۲ | ۶-۲-۶- روابط گشتاور                                                                     |
| ۲۶۳ | ۳-۶- بهینه‌سازی ترکیب تعداد قطب استاتور و روتور                                         |
| ۲۶۶ | ۴-۶- بررسی پارامترهای هندسی مهم ماشین آهنربای دائم شار سویچ شونده                       |
| ۲۶۶ | ۱-۴-۶- عرض قطب روتور                                                                    |
| ۲۶۶ | ۲-۴-۶- نسبت جداسازی (split ratio)                                                       |
| ۲۶۷ | ۳-۴-۶- بهینه‌سازی کلی نسبت جداسازی و نسبت دهانه شیار به ضخامت آهنربا                    |
| ۲۶۶ | ۴-۴-۶- عرض دندانه کناری هسته E شکل استاتور، ضخامت آهنربا و ضخامت بخش پستی استاتور       |
| ۲۷۱ | ۵-۴-۶- عرض دندانه میانی هسته E شکل استاتور                                              |
| ۲۷۲ | ۶-۴-۶- تعداد دندانه‌های روتور و استاتور                                                 |
| ۲۷۴ | ۵-۶- بررسی مدل ریاضی ماشین FSPM                                                         |
| ۲۷۹ | ۶-۶- ساختار ماشین سنکرون مخاطیس دائم شار سویچ شونده و الگوریتم تعیین اندازه ابعاد هندسی |
| ۲۸۱ | ۷-۶- تحلیل تلفات ماشین                                                                  |
| ۲۸۴ | ۸-۶- ملاحظات در ساخت ماشین‌های شار سویچ شونده آهنربای دائم                              |
| ۲۸۴ | ۱-۸-۶- استاتور                                                                          |
| ۲۸۶ | ۲-۸-۶- روتور                                                                            |
| ۲۸۶ | ۹-۶- بررسی انواع نامتعارف و پیچیده ماشین‌های شار سویچ شونده آهنربای دائم                |
| ۲۸۶ | ۱-۹-۶- ماشین شار سویچ شونده محوری                                                       |
| ۲۸۸ | ۲-۹-۶- تحلیل گشتاور دندانه‌های در AFFSPMM                                               |
| ۲۹۰ | ۳-۹-۶- ماشین شار سویچ شونده با آهنربای دوگانه (توپلوری ماشین‌های SSFPM)                 |
| ۲۹۳ | ۴-۹-۶- ماشین شار سویچ شونده دو طرفه محوری (DRAFFSPM)                                    |
| ۲۹۴ | ۱۰-۶- طراحی ماشین DRAFFSPM                                                              |
| ۲۹۴ | ۱-۱۰-۶- روابط توان خروجی و گشتاور                                                       |
| ۲۹۶ | ۲-۱۰-۶- ابعاد مکانیکی                                                                   |
| ۲۹۷ | ۱۱-۶- ماشین شار سویچ شونده روتور بیرونی                                                 |
| ۲۹۸ | ۱-۱۱-۶- روابط تحلیلی تعیین اندازه                                                       |

## پیشگفتار مؤلفین

پس از حمد و ثنای پروردگار عالمیان و سلام و صلوات بر بهترین خلق او و وصی وحی او محمد (ص) پیامبر عشق و آزادی و عقلانیت و خاندان پاک و منتخب او، آنچه ما را بر آن داشت تا اقدام به نگارش کتابی کنیم در معرفی، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی مخصوص سه‌فازی که امروزه سهم قابل توجهی را در تکنولوژی روز دنیا در کاربردهایی نظیر تولید انرژی پاک، صنایع هوایی، دریایی و حفاری، از آن خود کرده‌اند، فقدان منبعی برای بررسی آنها به زبان فارسی است. ماشین‌هایی که در این کتاب بررسی شده‌اند همگی دارای یک ویژگی مشترک هستند، این ماشین‌ها از دسته ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم سه‌فاز یا نیرو محرکه القایی بازگشتی سینوسی می‌باشند که مشکلی در تهیه مواد و تجهیزات و فناوری ساخت آنها در ایران وجود ندارد، اما ناشناخته ماندن آنها که ناشی از نبودن دروس طراحی ماشین‌های الکتریکی و تئوری جامع ماشین‌های الکتریکی در دانشگاه‌هاست، باعث ابهام در ماهیت ساختار ساده و بزرگ‌نمایی در نحوه نگرش به این ماشین‌ها در میان طراحان و دانشجویان شده است.

دروس ذکر شده در دانشگاه‌های ایران غالباً محدود هستند به طراحی ترانسفورماتورهای سه‌فاز، ماشین‌های جریان مستقیم، القایی و نهایتاً ماشین‌های سنکرون سه‌فاز که در کارخانجات فعال کشور در زنجار و تبریز در سطوح انبوه و در انواع مختلف تولید می‌شوند، اما تحقیق در مورد ماشین‌های خاص و تئوری و طراحی آنها تنها به دانشجویان علاقمند واگذار می‌شود.

بنا به نیاز کشور، برخی سازمان‌های پژوهشی وابسته به ارگان‌های دولتی در سالیان اخیر اقدام به پژوهش، طراحی و ساخت نمونه‌هایی از برخی ماشین‌های بررسی شده در این اثر کرده‌اند که ساده‌ترین و قدیمی‌ترین دسته از ماشین‌های این خانواده هستند. هدف نگارندگان عمومی کردن این دانش برای ایران عزیز، و فرو ریختن دیوار ابهام در ساختار این ماشین‌هاست.

طبیعتاً این اثر بمانند هر اثر علمی دیگری خالی از اشکال و اشتباه نیست، به ویژه اینکه نگارندگان برای بر جای گذاشتن این اثر از حجم انبوهی از منابع مانند پایان‌نامه‌های دکترها، کتب و مقالات معتبری استفاده نموده‌اند که رعایت پیوستگی مطالب را



دشوار نموده است. از این رو در جهت رفع این اشتباهات احتمالی دست یاری بسوی تمامی اساتید و دانشگاهیان دراز خواهیم کرد.  
بنابه رسم ادب، از اساتید خود در تحصیل این دانش سپاسگزاری کرده و این اثر را تقدیم می‌کنیم به:

محضر مقدس یار که عمریست او را چشم در راهیم،

و پدران و مادرانمان

و به مهندسی که دیروز باهوش‌ترین و سختکوش‌ترین دانش‌آموزان و دانشجویان این سرزمین بودند و امروز با سختی روزگار می‌گذارند و یا در غربت چشم به‌راه فردای آباد ایرانند و در یک کلام تقدیم به همه آنان که قلبشان برای عزت و پیشرفت این سرزمین می‌تپد.

عبدالحسین اجلالی

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی

و انستیتوی مهندسی برق و الکترونیک

(IEEE)

Ejlali.h@gmail.com

جواد سلیمانی

عضو انجمن اسلامی مهندسی

و انستیتوی مهندسی برق و الکترونیک

(IEEE)

Javad.Soleimani@gmail.com