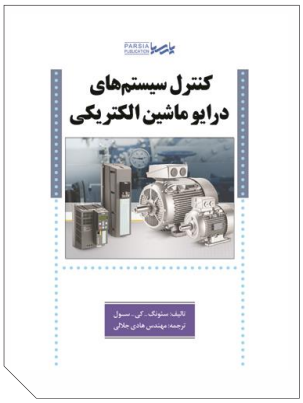
کنترل سیستم‌های درایو ماشین الکتریکی



تالیف:
سئونگ ـ کی ـ سول
ترجمه:
مهندس هادی جلالی

سرشناسه: سول، سیونگ-کی -- Sul, Seung-Ki
عنوان و نام پدیدآور: کنترل سیستم‌های درایو ماشین الکتریکی/ تالیف سئونگ کی‌سول ؛ ترجمه هادی جلالی.
مشخصات نشر: تهران: پارسیا، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۳۹۴ ص.
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۵۸۸۳۵-۲
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: عنوان اصلی: .Control of Electric Machine Drive Systems
موضوع: ماشین‌آلات برقی -- Electric machinery
موضوع: محرک‌های برقی -- Electric driving
شناسه افزوده: جلالی، هادی، ۱۳۶۴ -، مترجم
رده بندی کنگره: ۲۱۸۱TK
رده بندی دیویی: ۳۱۰۴۲/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی: ۶۲۱۳۶۹۳

کنترل سیستم‌های درایو ماشین الکتریکی

تألیف: سئونگ ـ کی ـ سول
ترجمه: مهندس هادی جلالی
ناشر: پارسیا
شمارگان: ۲۰۰ نسخه
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۵۸۸۳-۵-۲

مرکز پخش:

تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶ تلفن: ۹۲ـ ۶۶۴۸۴۱۹۱ www.noavarpub. com

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر پارسیا می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی‌دی، دی‌وی‌دی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر پارسیا ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فـهرست مطالب

پیشگفتار مولف..... ۱۱
پیشگفتار مترجم..... ۱۵

فصل اول / مقدمه..... ۱۷
۱-۱. مقدمه..... ۱۷
۱-۱-۱. سیستم درایو ماشین الکتریکی..... ۲۰
۱-۱-۲. سیر تکامل سیستم درایو ماشین الکتریکی..... ۲۱
۱-۱-۳. سیر تکامل نیمه هادی قدرت..... ۲۲
۱-۱-۴. سیر تکامل الکترونیک کنترل..... ۲۳
۱-۲. مبانی مکانیک..... ۲۴
۱-۲-۱. قوانین پایه..... ۲۴
۱-۲-۲. گشتاور و نیرو..... ۲۴
۱-۲-۳. گشتاور لختی جسم دوار..... ۲۶
۱-۲-۴. معادلات حرکت جسم سخت..... ۲۸
۱-۲-۵. انرژی و توان..... ۳۱
۱-۲-۶. پیوستگی متغیرهای فیزیکی..... ۳۲
۱-۳. منحنی گشتاور سرعت بارهای مکانیکی نوعی..... ۳۳
۱-۳-۱. فن، پمپ و دمنده..... ۳۳
۱-۳-۲. بالابر، جرثقیل و آسانسور..... ۳۴
۱-۳-۳. بار کششی (خودرو برقی، قطار برقی)..... ۳۵
۱-۳-۴. بار کنترل کشش..... ۳۷
مسائل..... ۳۸
مراجع..... ۴۹

فصل دوم / ساختار پایه و مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی و مبدل‌های توان..... ۵۰
۲-۱. مقدمه..... ۵۰
۲-۱. ساختار و مدل سازی ماشین DC..... ۵۰
۲-۲. تحلیل عملکرد حالت ماندگار..... ۵۵
۲-۲-۱. ماشین شنت تحریک مستقل..... ۵۵
۲-۲-۲. ماشین DC تحریک سری..... ۵۹
۲-۳. تحلیل حالت‌گذاری ماشین DC..... ۶۰
۲-۳-۲. ماشین شنت تحریک مستقل..... ۶۰
۲-۴. مدار الکترونیک قدرت برای راه‌اندازی ماشین DC..... ۶۳
۲-۴-۱. سیستم وارد لئونارد استاتیکی..... ۶۴
۲-۴-۲. سیستم برشگر چهار ربعی..... ۶۵

۲-۵. نیروی محرکه مغناطیسی دوار ۶۶
۲-۶. تحلیل حالت ماندگار ماشین سنکرون ۷۱
۲-۷. ماشین الکتریکی خطی ۷۴
۲-۸. منحنی قابلیت ماشین سنکرون ۷۵
۲-۸-۱. ماشین سنکرون روتور قطب صاف با سیم‌پیچ میدان ۷۵
۲-۸-۲. ماشین سنکرون مغناطیس دائم ۷۷
۲-۹. تغییر پارامتر ماشین سنکرون ۷۸
۲-۹-۱. مقاومت سیم‌پیچ میدان و استاتور ۷۸
۲-۹-۲. اندوکتانس سنکرون ۷۸
۲-۹-۳. ثابت EMF مخالف (ثابت نیروی ضد محرکه) ۸۰
۲-۱۰. تحلیل حالت ماندگار ماشین القایی ۸۱
۲-۱۰-۱. مدار معادل حالت ماندگار ماشین القایی ۸۳
۲-۱۰-۲. عملکرد شار ثابت فاصله هوایی ۸۸
۲-۱۱. عملکرد ژنراتوری ماشین القایی ۹۰
۲-۱۲. تغییر پارامترهای ماشین القایی ۹۱
۲-۱۲-۱. تغییر مقاومت روتور، Rr ۹۲
۲-۱۲-۲. تغییر اندوکتانس نشتی روتور (L_{lr}) ۹۲
۲-۱۲-۳. تغییر مقاومت استاتور (R_s) ۹۳
۲-۱۲-۴. تغییر اندوکتانس نشتی استاتور (L_{lr}) ۹۳
۲-۱۲-۵. تغییر اندوکتانس تحریک(L_m) ۹۴
۲-۱۲-۶. تغییر مقاومت تلفات هسته(R_m) ۹۴
۲-۱۳. طبقه‌بندی ماشین‌های القایی براساس مشخصه‌های گشتاور - سرعت ۹۵
۲-۱۴. تحلیل حالت شبه گذرا ۹۷
۲-۱۵. منحنی قابلیت ماشین القایی ۹۸
۲-۱۶. مقایسه‌ی ماشین AC و DC ۱۰۰
۲-۱۶-۱. مقایسه‌ی ماشین القایی قفس سنجابی و ماشین DC تحریک مستقل ۱۰۰
۲-۱۶-۲ مقایسه ماشین AC مغناطیس دائم و ماشین DC تحریک مستقل ۱۰۲
۲-۱۷. کنترل سرعت متغیر ماشین القایی براساس مشخصه‌های حالت ماندگار ۱۰۳
۲-۱۷-۱. کنترل سرعت متغیر ماشین القایی براساس کنترل ولتاژ ترمینال ۱۰۳
۲-۱۷-۲. کنترل‌سرعت متغیر ماشین‌القایی براساس‌کنترل‌شار ثابت فاصله هوایی ($\approx \frac{V}{F}$) ۱۰۴
۲-۱۷-۳. کنترل سرعت متغیر ماشین القایی براساس فیدبک سرعت واقعی ۱۰۵
۲-۱۷-۴. بهبود کنترل شار ثابت فاصله هوایی با استفاده از فیدبک اندازه جریان استاتور ۱۰۶
۲-۱۸. مدل سازی مبدل‌های توان ۱۰۶

۲-۱۸-۱. یکسوساز دیودی/تریستوری سه فاز ۱۰۷
۲-۱۸-۲. یکسوساز افزاینده‌ی PWM ۱۰۸
۲-۱۸-۳. مبدل DC/DC دوجهته‌ی دو ربعی ۱۱۱
۲-۱۸-۴. مبدل DC/DC چهار ربعی ۱۱۲
۲-۱۸-۵. اینورتر PWM سه فاز ۱۱۳
۲-۱۸-۶. مبدل ماتریس ۱۱۴
۲-۱۹. تبدیل پارامتر با استفاده از روش پریونیت ۱۱۶
مسائل ۱۱۸
مراجع ۱۲۵

فصل سوم / تبدیل قاب مرجع و تحلیل گذرای ماشین‌های AC سه فاز ۱۲۷
۳-۱. بردار مختلط ۱۲۸
۳-۲. مدل سازی d-q-n ماشین القایی براساس بردار فضای مختلط ۱۳۰
۳-۲-۱. مدار معادل ماشین القایی در محور d-q-n ۱۳۰
۳-۲-۲. گشتاور ماشین القایی ۱۳۶
۳-۳. مدل سازی d-q-n ماشین سنکرون براساس بردار فضای مختلط ۱۳۸
۳-۳-۱. مدار معادل ماشین سنکرون در محور d-q-n ۱۳۸
۳-۳-۲. گشتاور ماشین سنکرون ۱۴۶
۳-۳-۳. مدار معادل و گشتاور ماشین سنکرون مغناطیس دائم ۱۴۸
۳-۳-۳-۱. ماشین سنکرون مغناطیس دائم نصب سطحی (SMPMSM) ۱۴۸
۳-۳-۳-۲. ماشین سنکرون مغناطیس دائم داخلی (IPMSM) ۱۵۰
۳-۴. ماشین رلوکتانس سنکرون ۱۵۲
مسائل ۱۵۴
مراجع ۱۶۲

فصل چهارم / طراحی تنظیم‌کننده‌های (رگولاتورها) ماشین‌های الکتریکی و مبدل‌های توان ۱۶۳
۴-۱. میرایی فعال ۱۶۶
۴-۲. تنظیم‌کننده جریان ۱۶۷
۴-۲-۱. اندازه‌گیری جریان ۱۶۷
۴-۲-۱-۱. اندازه‌گیری جریان با استفاده از مقاومت ۱۶۷
۴-۲-۱-۲. اندازه‌گیری جریان با استفاده از ترانسفورماتور جریان (CT) ۱۶۸
۴-۲-۱-۳. اندازه‌گیری جریان با استفاده از سنسور اثر هال ۱۶۹
۴-۲-۲. تنظیم‌کننده جریان یکسوساز کنترل شده سه فاز ۱۷۰

۴-۲-۲-۱. تنظیم‌کننده تناسبی انتگرالی(PI) ۱۷۰
۴-۲-۲-۲. تنظیم‌کننده جریان پیش بین ۱۷۳
۴-۲-۳. تنظیم‌کننده جریان برای راه‌اندازی ماشین DC با استفاده از برشگر PWM ۱۷۴
۴-۲-۳-۱. تنظیم‌کننده جریان تناسبی انتگرالی(PI) ۱۷۵
۴-۲-۳-۲. مشکلات پیاده‌سازی ۱۷۶
۴-۲-۴. آنتی ویندآپ(Anti-Wind-up) ۱۷۸
۴-۲-۵. تنظیم‌کننده جریان AC ۱۸۰
۴-۲-۵-۱.تنظیم‌کننده جریان مدار سه فاز متعادل ۱۸۱
۴-۲-۵-۲. ماشین القایی ۱۸۳
۴-۲-۵-۳. ماشین سنکرون ۱۸۴
۴-۲-۵-۴. تنظیم‌کننده جریان بردار مختلط ۱۸۵
۴-۳. تنظیم‌کننده سرعت ۱۸۶
۴-۳-۱. اندازه‌گیری سرعت موقعیت روتور ماشین الکتریکی ۱۸۶
۴-۳-۱-۱. تاکو ژنراتور ۱۸۶
۴-۳-۱-۲. انکودر ۱۸۷
۴-۳-۱-۳. تحلیل گر ۱۸۸
۴-۳-۲. تخمین سرعت با استفاده از انکودر افزایشی ۱۸۹
۴-۳-۲-۱. افزایش تعداد پالس در دور (P_{PR}) ۱۸۹
۴-۳-۲-۲. روش M ۱۹۱
۴-۳-۲-۳. روش T ۱۹۳
۴-۳-۲-۴. روش M/T ۱۹۳
۴-۳-۳. تخمین سرعت با استفاده از رویتگر حالت ۱۹۵
۴-۳-۳-۱. رویتگر مرتبه کامل ۱۹۵
۴-۳-۳-۲. تخمین سرعت از زاویه اندازه‌گیری شده انکودر با استفاده از رویتگر مرتبه کامل ۱۹۷
۴-۳-۳-۳. فهم فیزیکی رویتگر مرتبه کامل ۱۹۹
۴-۳-۳-۴. رویتگر اغتشاش ۲۰۲
۴-۳-۳-۵. پیاده‌سازی رویتگر در حوزه زمانی گسسته ۲۰۳
۴-۳-۴. تنظیم‌کننده سرعت PI/IP ۲۰۴
۴-۳-۴-۱. تنظیم‌کننده سرعت PI ۲۰۴
۴-۳-۴-۲. تنظیم‌کننده انتگرالی تناسبی(IP) ۲۰۷
۴-۳-۴-۳. ترکیب تنظیم‌کننده PI و IP: تنظیم کننده با دو درجه آزادی ۲۰۸
۴-۳-۵. بهبود عملکرد کنترل سرعت با اطلاعات شتاب ۲۱۰
۴-۳-۵-۱. جبران پیشرو مرجع شتاب ۲۱۰
۴-۳-۵-۲. فیدبک شتاب ۲۱۱

۴-۳-۶. تنظیم‌کننده سرعت با کنترلر آنتی ویندآپ ۲۱۲
۴-۴. تنظیم‌کننده موقعیت ۲۱۳
۴-۴-۱. تنظیم‌کننده تناسبی- تناسبی انتگرالی (P-PI) ۲۱۳
۴-۴-۲. پیشرو مرجع سرعت و مرجع شتاب ۲۱۵
۴-۵. آشکارسازی زاویه فاز ولتاژ AC ۲۱۵
۴-۵-۱. آشکارسازی زاویه فاز قاب مرجع سنکرون ۲۱۶
۴-۵-۲. آشکارسازی زاویه فاز با استفاده از ولتاژ توالی مثبت در قاب مرجع سنکرون ۲۱۹
۴-۶. تنظیم‌کننده ولتاژ ۲۲۱
۴-۶-۱. تنظیم‌کننده ولتاژ لینک DC یکسوساز افزاینده PWM ۲۲۱
۴-۶-۱-۱. مدل‌سازی سیستم کنترل ۲۲۱
۴-۶-۱-۲. تنظیم‌کننده ولتاژ لینک DC ۲۲۲
مسائل ۲۲۵
مراجع ۲۳۶

فصل پنجم / کنترل‌برداری ۲۳۹
۵-۱. کنترل گشتاور لحظه‌ای ۲۴۰
۵-۱-۱. ماشین‌های DC تحریک مستقل ۲۴۰
۵-۱-۲. موتور سنکرون مغناطیس دائم نصب سطحی (SMPMSM) ۲۴۱
۵-۱-۳. موتور سنکرون مغناطیس دائم داخلی(IPMSM) ۲۴۳
۵-۲. کنترل برداری ماشین القایی ۲۴۴
۵-۲-۱. کنترل برداری مستقیم ۲۴۵
۵-۲-۱-۱. اصول کنترل برداری مستقیم ۲۴۵
۵-۲-۱-۲. پیاده‌سازی کنترل برداری مستقیم ۲۴۸
۲. اندازه‌گیری ولتاژ فاصله هوایی با استفاده از سیم‌پیچ‌های حسگر ۲۴۹
۵-۲-۲.کنترل برداری غیرمستقیم ۲۵۱
۵-۲-۲-۱. اصول کنترل برداری غیرمستقیم ۲۵۱
۵-۲-۲-۲. پیاده‌سازی کنترل برداری غیرمستقیم ۲۵۲
۵-۳. تخمین‌گر شار پیوندی روتور ۲۵۳
۵-۳-۱. مدل ولتاژ براساس معادله ولتاژ استاتور ماشین القایی ۲۵۳
۵-۳-۲. مدل جریان براساس معادله ولتاژ روتور ماشین القایی ۲۵۳
۵-۳-۳. تخمین گر هیبریدی شار پیوندی روتور ۲۵۴
۵-۳-۴.تخمین گر هیبریدی بهبود یافته ۲۵۵
۵-۴.کنترل تضعیف شار ۲۵۶
۵-۴-۱. محدودیت‌های ولتاژ و جریان ماشین AC ۲۵۶

۵-۴-۱-۱. محدودیت‌های ولتاژ..... ۲۵۷
۵-۴-۱-۲. محدودیت جریان..... ۲۵۷
۵-۴-۲. ناحیه عملکرد ماشین AC مغناطیس دائم در صفحه جریان قاب مرجع روتور..... ۲۵۸
۵-۴-۲-۱. ناحیه عملکرد با محدودیت‌های ولتاژ و جریان..... ۲۵۸
۵-۴-۲-۲. ناحیه عملکرد براساس پارامترهای ماشین AC مغناطیس دائم..... ۲۶۰
۵-۴-۳. کنترل تضعیف شار ماشین سنکرون مغناطیس دائم..... ۲۶۴
۵-۴-۳-۱. کنترل تضعیف شار با جبران پیشرو..... ۲۶۴
۵-۴-۳-۲.کنترل تضعیف شار با جبران فیدبک..... ۲۶۴
۵-۴-۳-۳. روش تضعیف شار شامل ناحیه مدولاسیون غیرخطی..... ۲۶۵
۵-۴-۴. کنترل تضیف شار ماشین القایی..... ۲۶۸
۵-۴-۴-۱. معادلات ولتاژ..... ۲۶۸
۵-۴-۴-۲. جریان بهینه برای حداکثر کردن گشتاور..... ۲۶۹
۵-۴-۴-۳. ناحیه گشتاور ثابت($\omega_e \le \omega_b$)..... ۲۷۰
۵-۴-۴-۴. ناحیه تضعیف شار ۱ ($\omega_{base} < \omega_e \le \omega_1$)..... ۲۷۱
۵-۴-۴-۵. ناحیه تضعیف شار ۲ ($\omega_e \ge \omega_1$)..... ۲۷۲
۵-۴-۵. تنظیم کننده شار ماشین القایی..... ۲۷۳
مسائل..... ۲۷۵
مراجع..... ۲۸۹

فصل ششم / کنترل بدون سنسور موقعیت سرعت ماشین‌های AC..... ۲۹۱
۶-۱. کنترل بدون سنسور ماشین القایی..... ۲۹۴
۶-۱-۱. سیستم تطبیقی مدل مرجع (MARS)..... ۲۹۴
۶-۱-۱-۱.تخمین شار پیوندی روتور..... ۲۹۴
۶-۱-۱-۲. محاسبه زاویه شار پیوندی روتور..... ۲۹۶
۶-۱-۲. رویتگر تطبیقی سرعت (ASO)..... ۲۹۸
۶-۱-۲-۱. معادله حالت ماشین القایی..... ۲۹۸
۶-۱-۲-۲. رویتگر حالت..... ۳۰۱
۶-۱-۲-۳. ماتریس بهره(G)..... ۳۰۲
۶-۲. کنترل بدون سنسور ماشین سنکرون مغناطسی دائم نصب سطحی..... ۳۰۳
۶-۳. کنترل بدون سنسور ماشین سنکرون مغناطیس دائم داخلی(IPMSM)..... ۳۰۶
۶-۴. کنترل بدون سنسور با استفاده از تزریق سیگنال فرکانس بالا..... ۳۰۸
۶-۴-۱. ماشین روتور قطب برجسته ذاتی..... ۳۱۰
۶-۴-۲. ماشین AC روتور غیربرجسته..... ۳۱۱
۶-۴-۲-۱.ماشین القایی..... ۳۱۱

۶-۴-۲-۲. ماشین سنکرون مغناطیس دائم نصب سطحی(SMPMSM) ۳۱۳
۶-۴-۲-۳.تخمین موقعیت شار پیوندی روتور/موقعیت روتور ۳۱۴
مسائل ۳۲۱
مراجع ۳۲۵

فصل هفتم / مشکلات عملی ۳۳۰
۷-۱. اعوجاج ولتاژ خروجی ناشی از زمان مرده و جبران آن ۳۳۰
۷-۱-۱. جبران اثر زمان مرده ۳۳۱
۷-۱-۲. جهش جریان صفر (ZCC) ۳۳۳
۷-۱-۳. اعوجاج ولتاژ ناشی از خازن هرزگرد سوئیچ‌های نیمه هادی ۳۳۳
۷-۱-۴. پیش بینی لحظه کلیدزنی ۳۳۶
۷-۲. اندازه‌گیری جریان فاز ۳۳۹
۷-۲-۱. مدل سازی تأخیر زمانی سیستم اندازه‌گیری جریان ۳۳۹
۷-۲-۲. خطاهای مقیاس و انحراف در اندازه‌گیری جریان ۳۴۲
۷-۲-۲-۱. انحراف ۳۴۳
۷-۲-۲-۲. مقیاس ۳۴۴
۷-۳. مشکلات ناشی از پردازش سیگنال دیجیتال حلقه تنظیم جریان ۳۴۶
۷-۳-۱. مدل‌سازی و جبران خطای تنظیم جریان ناشی از تأخیر دیجیتال ۳۴۷
۷-۳-۲. خطا در نمونه‌برداری جریان ۳۵۱
مسائل ۳۵۵
مراجع ۳۵۹

پیوست ۱ / اندازه‌گیری و تخمین پارامترهای ماشین الکتریکی ۳۶۰
پ۱-۱. تخمین پارامتر ۳۶۰
پ۱-۱-۱. ماشین DC ۳۶۰
پ۱-۱-۱-۱. مقاومت سیم پیچ آرمیچر(R_a) ۳۶۰
پ۱-۱-۱-۲. اندوکتانس آرمیچر(L_a) ۳۶۱
پ۱-۱-۱-۳. مقاومت سیم پیچ میدان(R_f) ۳۶۱
پ۱-۱-۱-۴. اندوکتانس سیم پیچ میدان(L_f) ۳۶۱
پ۱-۱-۱-۵. ثابت گشتاور($K = K_T \lambda_f$) ۳۶۲
پ۱-۱-۲. تخمین پارامترهای ماشین القایی ۳۶۳
پ۱-۱-۲-۱. مقدار نامی شار پیوندی روتور(λ_{dr}^e) ۳۶۳
پ۱-۱-۲-۲. اندوکتانس گذرای استاتور(σL_s) ۳۶۳
پ۱-۱-۲-۳. اندوکتانس متقابل(L_m) ۳۶۶

پ۱-۲. تخمین پارامتر ماشین‌های الکتریکی با استفاده از تنظیم‌کننده‌های سیستم درایو ۳۶۶
پ۱-۲-۱. سیستم کنترل فیدبک ۳۶۷
پ۱-۲-۲. ثابت EMF مخالف ماشین DC(K) ۳۶۸
پ۱-۲-۳. مقاومت سیم پیچ استاتور ماشین AC سه فاز(R_s) ۳۶۸
پ۱-۲-۴.پارامترهای ماشین القایی ۳۷۰
پ۱-۲-۴-۱. ثابت زمانی روتور($\tau_r = L_r / R_r$) ۳۷۰
پ۱-۲-۴-۲. تخمین اندوکتانس خود القایی استاتور(L_s) و اندوکتانس گذرای استاتور(σL_s) ۳۷۱
پ۱-۲-۵. ماشین سنکرون مغناطیس دائم ۳۷۴
پ۱-۲-۵-۱. ماشین سنکرون مغناطیس دائم نصب سطحی(SMPMSM) ۳۷۴
پ۱-۲-۵-۱-۱. موقعیت روتور(θ_r) ۳۷۴
پ۱-۲-۵-۱-۲. اندوکتانس سنکرون(L_s) ۳۷۷
پ۱-۲-۵-۱-۳. شار پیوندی آهنربای دائم($\lambda_f = L_m i_f$) ۳۷۷
پ۱-۲-۵-۲. ماشین سنکرون مغناطیس دائم داخلی (IPMSM) ۳۷۸
پ۱-۳. تخمین پارامترهای مکانیکی ۳۷۸
پ۱-۳-۱. تخمین بر پایه معادله مکانیکی ۳۷۸
پ۱-۳-۲.تخمین با استفاده از فرایند انتگرال ۳۸۰
مراجع ۳۸۴

پیوست ۲ / مدل سازی d-q با استفاده از معادلات ماتریس ۳۸۵
پ۲-۱. قاب مرجع و ماتریس تبدیل ۳۸۵
پ۲-۲. مدل سازی d-q ماشین القایی با استفاده از ماتریس تبدیل ۳۸۹
پ۳-۳. مدل سازی d-q ماشین سنکرون با استفاده از ماتریس تبدیل ۳۹۳

پیشگفتار مولف

تکنولوژی مدرن که امروزه **فناوری اطلاعات** نامیده می‌شود بر پایه عرضه پایدار انرژی، به خصوص انرژی الکتریکی که به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، می‌باشد. بسیاری از افراد در جوامع مدرن بر این باورند که انرژی الکتریکی را تا هر وقت ما بخواهیم می‌توان تولید کرد. اما به دلیل این که آب و هوای پاک رو به کمیاب شدن است، انرژی الکتریکی برای ما به صورت منبعی محدود شده است. با توسعه جوامع مدرن، انرژی الکتریکی بیشتری مورد نیاز است. اما تولید و انتقال انبوه و استفاده از انرژی‌های سازگار با محیط زیست تبدیل به مشکل بزرگی شده است. انرژی الکتریکی در زمان تولید تا هنگام مصرف از مراحل مختلف تبدیل عبور می‌کند. انرژی مکانیکی که از منابع اولیه انرژی مثل نفت و گاز و انرژی هسته‌ای و انرژی آب بدست می‌آید را می‌توان از طریق تبدیل انرژی مکانیکی- الکتریکی به صورت الکتریکی در آورد. به طور دقیق‌تر هنگامی که انرژی مکانیکی از منابع مختلف توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، برای اهداف مناسب، ولتاژ و فرکانس مورد کنترل قرار می‌گیرد و در کشورهای پیشرفته بیش از ۶۰ درصد از انرژی برای کاربردهای بعدی مجددا به صورت انرژی مکانیکی در می‌آید. بنابراین در تمام فرایند تولید و مصرف انرژی الکتریکی مهمترین بحث مهندسی، کنترل موثر ولتاژ / جریان و فرکانس و کنترل مناسب ماشین‌های الکتریکی است. سی سال است که علاقه آکادمیک من، کنترل ماشین‌های الکتریکی است و شخصا خود را وقف مطالعه و توسعه در این زمینه نموده‌ام. این کتاب را به رشته تحریر در آورده‌ام تا این تجارب را با همکارانم به اشتراک بگذارم.

حتی تحقیقات کوچک هم به تنهایی نتیجه نمی‌دهد و من این کتاب را مدیون افراد بسیاری هستم. ابتدا از پروفسور مینهو پارک[1] مشاور آکادمیک خودم در دوره فوق لیسانس و دکترای دانشگاه ملی سئول نام می‌برم که راه را برای من در زمینه الکترونیک قدرت و کنترل ماشین‌های الکتریکی باز نمود. در ثانی از افتخار خودم، و در عین حال ناپدری خودم پرفسور جانگسو وون[2] نام می‌برم. او مطالب ماشین‌های الکتریکی را آموزش می‌داد و من کتاب‌های بسیار خوب مرجع روزمره در ارتباط با آن موضوع را از او به ارث بردم. سوم از پروفسور توماس لیپو[3] تشکر می‌کنم که بنده را به عنوان یک محقق میهمان در دانشگاه ویسکانسین[4] در مدیسن[5] پذیرفت. در طی دو سال در دانشگاه ویسکانسین درک من از کنترل ماشین‌های الکتریکی با سرعت کوانتوم افزایش یافت. همچنین از همکاران و امکانات دانشگاه ویسکانسین و از بسیاری از اساتید و دانشجویان دانشگاه ملی سئول و سایر دانشگاه‌هایی که به آنها رفتم و به خاطر مباحثی که منجر به نوشتن این کتاب شد، تشکر می‌کنم. به واسطه آن بحث‌ها و گفتگوها، اکنون قاطعانه‌تر مسائل و راه‌حل‌های کنترل ماشین‌های الکتریکی را درک می‌کنم. همچنین این کتاب بدون کار فوق‌العاده سخت

1. Minho. Park
2. Jongsoo. Won
3. Thomas. Lipo
4. Wisconsin
5. Madison

دانش‌آموزان سابق فوق لیسانس و دکترایم امکان‌پذیر نبود. این تلاش‌ها و زمان‌های ارزشمند در این کتاب با یکدیگر ترکیب شده‌اند که نتایج ۲۰سال تحقیقات آکادمیک گذشته ما را خلاصه و سامان دهی می‌کند. خصوصا مقالات فوق لیسانس و دکترای زیادی، پایه‌های این کتاب را تشکیل می‌دهد. مسائل فصل‌های ۶،۵،۴،۱ و ۷ و پیوست ۱ از نتایج تحقیقات من در همکاری با صنعت بدست آمده است و من از شرکت‌های بسیار و افراد آن شرکت‌ها سپاسگذارم.

این کتاب به ترتیب زیر سازمان یافته است. فصل ۱ ویژگی‌های سیستم درایو الکتریکی و سیر تکامل در تکنولوژی‌های مربوطه را توضیح می‌دهد. علاوه بر این فصل ۱ اطلاعات پایه در مورد مکانیک را که در کل این کتاب مورد استفاده قرار گرفته است، شرح می‌دهد، همچنین حاوی یک توصیف از مشخصه‌های کلی بارهایی است که توسط ماشین‌های الکتریکی به حرکت در می‌آید. مسائل زیاد انتهای فصل، مثال‌های بسیاری از سیستم‌های درایو که طراحی و تست کرده‌ام، می‌باشد. با حل مسائل، مطالب بسیاری در مورد صنعت واقعی می‌تواند منتشر شود.

فصل ۲ ساختار پایه و اصول کار ماشین‌های الکتریکی که در حالت ژنراتوری انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی و در حالت موتوری انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند، را شرح می‌دهد. مدارات معادل حالت ماندگار چند ماشین برای فهم مشخصه‌های حالت ماندگار و کنترل ماشین‌ها معرفی شده است. همچنین مثال‌های بسیاری از کنترل ماشین‌ها از دیدگاه موتوری با ویژگیهای کنترلی مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این مبدل‌های قدرت بر مبنای نیمه هادی‌ها که انرژی الکتریکی را به شکل دیگری از انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، به صورت مدار معادل، مدل سازی شده‌اند. در فصل ۳ تبدیل متغیرهای فیزیکی ماشین AC با استفاده از تئوری قاب مرجع آورده شده است. این تبدیل درک و تحلیل ماشین‌های AC را با تبدیل معادلات دیفرانسیل متغیر با زمان به معادلات دیفرانسیل نا متغیر با زمان، ساده‌تر می‌کند. متغیرهای الکتریکی مانند ولتاژ و جریان و شار در فازهای c,b,a یک سیستم سه فاز را می‌توان به متغیرهای d-q-n (طولی، عرضی و خنثی) محور متعامد که در آن تزویج مغناطیسی بین محورها صفر است، انتقال داد. سیستم سه فاز را می‌توان به راحتی با فرض عملکرد سه فاز متعادل تنها با مولفه d-q نشان داد. مولفه d-q که بر همدیگر عمودند را می‌توان به آسانی با یک عدد مختلط منفرد که در آن بخش حقیقی مولفه محور d و بخش موهومی مولفه محور q است، نشان داد. تبدیل از فازهای c,b,a به محورهای متعامد را می‌توان به آسانی با جبر برداری مختلط انجام داد. این مفهوم برداری مختلط در این کتاب استفاده شده است. فصل۴، به دلیل این که چندین الگوریتم کنترل ماشین‌های الکتریکی و مبدل‌های قدرت مورد بحث قرار داده است، ماهیت اصلی این کتاب است. در ابتدا مفهوم میرایی فعال که نوعی کنترل فیدبک حالت است، معرفی شده است. سپس روش تنظیم جریان، سرعت، موقعیت در روش فیدبک توضیح داده شده است. به منظور تنظیم متغیرهای فیزیکی، سنسورهای اندازه‌گیری متغیرهایی مانند سنسورهای جریان و سنسورهای سرعت/موقعیت معرفی شده است. اگر متغیرها قابل اندازه‌گیری نباشد، اصول رویتگر حالت معرفی شده است و برای تنظیم سرعت ماشین الکتریکی استفاده شده است. علاوه بر این چند ترفند برای بهبود

عملکرد کنترل ماشین‌های الکتریکی معرفی شده است. در نهایت الگوریتم تشخیص زاویه فـازی منبع AC و کنترل ولتاژهای لینک DC مبدل‌های قدرت مورد بحث قرار گرفتـه اسـت. بسـیاری از مسائل آخر فصل در این فصل از همکاری با صنعت آمده است و حل این مسائل، درک این بخـش را ارتقاء می‌بخشد.

فصل ۵ مبحث کنترل برداری را تشریح می‌کند. ماشین‌های الکتریکی اساسا جریان را بـه گشـتاور (یا برعکس) تحت شار تحریک تبدیل می‌کنند. در بسیاری از سیستم‌های کنترل حرکت بـا دقـت بالا، که شتاب، سرعت و موقعیت همگی به صورت لحظه‌ای طبق مرجع‌هایشان تنظـیم مـی‌شـوند، کنترل گشتاور لحظه‌ای شرط لازم است. گشتاور لحظه‌ای ماشین الکتریکـی ناشـی از حاصلضـرب متقابل بردار شار پیوندی و بردار خطی که جریان عبور می‌کند، مـی‌باشـد. بنـابراین بـرای کنتـرل لحظه‌ای گشتاور لحظه ای، شار پیوندی و بردار خطی باید به طور همزمان کنترل شود. بنابراین نه تنها اندازه جریان و شار پیوندی، بلکه زاویه نسبی بین دو بردار باید به طور لحظه‌ای کنترل شـود. نام "کنترل برداری" از همین حقیقت نشات گرفتـه اسـت. در ایـن فصـل اصـول کنتـرل گشـتاور لحظه‌ای در مورد چندین ماشین الکتریکی توضیح داده شده است. در فصل ۶ الگوریتم‌های کنترل بـرای درایـو بـدون سنسـور سـرعت/موقعیت ماشـین‌هـای AC در صـنعت معرفـی شـده اسـت. الگوریتم‌های کنترل بدون سنسور بر مبنای EMF مخالف به طور گسـترده‌ای مـورد بررسـی قـرار گرفته و بعضی از آنها تجاری شده‌اند. این فصل درباره مزایا و معایب آن توضیح می‌دهد. بـه دلیـل این که اندازه EMF مخالف با افزایش سرعت، کاهش می‌یابد، عملکـرد کنتـرل بـدون سنسـور بـر مبنای EMF در سرعت‌های پایین، به سرعت کاهش می‌یابـد. در سـرعت صـفر یـا در عملکـرد بـا فرکانس صفر، ماشین‌های AC نمی‌تواننـد در عملکـرد بـدون سنسـور کـه گشـتاور قابـل کنتـرل است،کار کنند. برای فرار از این مشکل ذاتی، الگوریتم‌های کنترل بدون سنسور که در ماشین‌هـای AC مهم به کار رفته است در این بخش معرفی شده است. با تزریق سیگنال‌هایی بـه ماشـین AC، تغییر اندوکتانس براساس موقعیت شار روتور را می‌توان اندازه‌گیری کرد. از این تغییر، موقعیت شار پیوندی روتور یا موقعیت روتور را می‌توان تخمین زد. یک مبدل چند منظوره مجهـز بـه الگـوریتم تزریق سیگنال ولتاژ فرکانس بالا نوسانی به ماشین AC مغناطیس دائم به بازار روانه شده است. در فصل ۷ چندین مشکل عملی که برای پیـاده‌سـازی الگـوریتم‌هـای کنتـرل توضـیح داده شـده در فصل‌های قبلی مورد اشاره قرار گرفته و راه‌حل‌های احتمالی پیشنهاد شده است، ارایه شـده اسـت. ابتدا مسائل مربوط به زمان مرده یا زمان خالی مورد بحث قرار گرفته است. برای کاهش مشکلات تدابیری ارایه شده است. برای اندازه‌گیری دقیـق جریـان، خطـای انحـراف و مقیـاس سنسـورهای جریان و تاخیرهای سیستم اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنـین روش هـایی برای کاهش اثرات منفی در عملکرد کنترل سیستم‌های درایو توضیح داده شده است. در نهایت بـه دلیل پیاده سازی دیجیتال الگوریتم کنترل، تاخیر می‌تواند از نمونه‌برداری و نگهداری، زمان اجرای الگوریتم و PWM مربوط به مبدل قدرت باشد. این تاخیرها ممکن است عملکـرد کنتـرل سیسـتم درایو را به شدت محدود کند. چند راه چاره برای حل مشکل تاخیر در پردازش سیگنال دیجیتـال

در این فصل مورد بحث قرار گرفته است. در پیوست ۱ چندین روش برای تعیین پارامترهای ماشین‌های الکتریکی معرفی شده است. برای اعمال الگوریتم‌های کنترل این کتاب برای کنترل ماشین‌های الکتریکی، پارامترهای ماشین‌های الکتریکی برای تنظیم بهره تنظیم‌کننده‌ها، مقادیر محدود محدودکننده‌های کنترلر، مرجع و مقادیر پیشرو در تنظیم کننده‌ها، باید تعیین شود. پارامترهای ماشین‌های الکتریکی را می‌توان از اطلاعات طراحی یا از اطلاعات آزمایش عمکرد سازنده محاسبه یا تخمین زد. بسیاری از روش هایی که در این پیوست معرفی شده است نیاز به ابزار اندازه‌گیری خاصی ندارند اما متکی بر کنترل‌کننده سیستم درایو می‌باشد. در پیوست ۲ برای مدل‌سازی ماشین‌های AC سه فاز در محور d-q-n، جبر ماتریسی به اختصار توضیح داده شده است. جبر ماتریسی ممکن است نسبت به روش بردار مختلط که در فصل ۲ ذکر شد، برای شبیه سازی کامپیوتری و برنامه نویسی کنترل بدون وقفه آسان‌تر باشد.

برای درک جامع این کتاب، اطلاعات پایه فیزیک تحصیلی و تئوری کنترل خطی مدرن مورد نیاز است. تئوری مدارات الکتریکی و تئوری کنترل پایه مورد نیاز است، علاوه بر این الکترونیک قدرت و تئوری ماشین‌های الکتریکی برای کمک به خواننده در آن لحاظ شده است. این کتاب به عنوان یک کتاب تحصیلی یا به عنوان یک مرجع برای مهندسینی که در زمینه‌های مرتبط هستند مناسب است. در مقام یک کتاب درسی، فصل‌های ۱ تا ۵ برای یک نیم ترم تحصیلی مناسب است. به طور دقیق‌تر فصل‌های ۱، ۳ و ۴ باید با جزییات بیشتر توضیح داده شود. پس از فهم فصل ۳ و ۴ ، فائق آمدن بر فصل ۵ آسان‌تر است. فصل ۶ یک خلاصه خوب و یک نقطه شروع برای فهم کنترل بدون سنسور ماشین‌های AC است. فصل ۷ و پیوست ۱ برای دانش آموزان و مهندسینی که الگوریتم‌های کنترل را پیاده سازی می‌کنند، مفید خواهد بود. به عنوان یک کتاب مرجع در سایت‌های صنعتی، نه تنها تئوری‌های پایه بلکه بسیاری از مسائل در فصل‌های ۱،۴،۵،۶ و ۷ الگوریتم‌های پیوست ۱ مفید خواهد بود. بسیاری از مسائل در این کتاب در امتحانات میان ترم یا پایان ترم یا به عنوان تکلیف در طی ۲۰ سال تدریس من در دانشگاه ملی سئول[1] مورد استفاده قرار گرفته است. از دانش آموزانی تشکر می‌کنم که وقتی با من درس داشتند زحمت حل این مسائل را به دوش گرفتند. همچنین بعضی قسمت‌ها و موقعیت‌های مسائل از تحقیقات مختلف که در بسیاری شرکت‌ها انجام شد بدست آمده است. این مسائل بسیار عملی هستند. برای درک محتوی این کتاب، مطالعات تجربی با ماشین‌های الکتریکی واقعی و مبدل‌های قدرت را توصیه می‌کنم. اگر امکان آن وجود نداشت حداقل شبیه‌سازی کامپیوتری با در نظر گرفتن موقعیت میدان واقعی لازم است.

خطاب به دو دخترم: یوجین[2] و هیوجین[3] – این را بدانید که این کتاب مدیون شماست زیرا شما پدر پر مشغله‌تان را می‌فهمید. به علاوه مراقبت‌های مادرم مرا آنچه امروز هستم ساخت. در نهایت تشکر ویژه و عشق به همسرم می‌یان[4] که همواره کنار من خواهد بود و حداقل نیمی از آنچه دارم متعلق به اوست.

Seung-Ki-Sul

1. Seoul. National. University
2. Yoojin
3. Hyojin
4. Miyun

پیشگفتار مترجم

سپاس بیکران خداوند بی همتا را سزاست که به من قدرت تعلیم و تعلم ارزانی داشت. خداوند را شاکرم که به من توفیق داد که قدمی کوچک در راه اعتلای فرهنگ و خدمت به دانش پژوهان این مرز و بوم بردارم.

امروزه ماشین‌های الکتریکی نقش عمده‌ای در زندگی بشر دارند. مقوله الکترونیک قدرت نیز در تغذیه، بهره‌برداری و کنترل ماشین‌های الکتریکی از اهمیت بسیار برخوردار است. از آنجایی که قریب ۶۰ درصد انرژی الکتریکی در موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود، تعجبی ندارد که با کنترل مناسب آن‌ها، صرفه‌جویی بسیاری در انرژی می‌شود. استفاده بهینه از درایوهای الکتریکی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف نظیر اتوماسیون کارخانه‌ها، رباتیک، حمل و نقل پاک، خودروهای الکتریکی- هیبریدی و غیره دارد.

کتاب حاضر ترجمه کتاب Control of Electric Machine Drive Systems است که در سال ۲۰۱۰ توسط پروفسور سئونگ کی سول(Seung-Ki-Sul) در دانشگاه ملی سئول کره جنوبی به رشته تحریر در آمده است.

در ترجمه این اثر تا جای ممکن سعی شده است ضمن پایبندی به شکل و محتوای متن اصلی، سادگی، روانی و رسایی ترجمه نیز حفظ شود. امید است ترجمه گویا و رسا باشد و توانسته باشم با ترجمه این کتاب، خدمت ناچیزی را به جامعه علمی و صنعتی کشور عرضه کرده باشم.

در خاتمه خطاب به فرزندم که در مدت ترجمه این کتاب پدر پر مشغله‌اش را درک کرد *و سپاس فراوان از پدر و مادرم که ناتوان شدند تا من به توانایی برسم، موهایشان سفید شد تا من رو سفید شوم * و در نهایت تشکر ویژه و عشق به همسرم که همواره کنار من خواهد بود و حداقل نیمی از آنچه دارم متعلق به اوست.

هادی جلالی

فراخوان مساعدت فرهنگی و علمی

خوانندهٔ فرهیخته و بزرگوار

نشر پارسیا ضمن ارج نهادن و قدردانی از اعتماد شما به کتاب‌های این انتشارات، به استحضارتان می‌رساند که همکاران این انتشارات، اعم از مؤلّفان و مترجمان و کارگروه‌های مختلف آماده‌سازی و نشر کتاب، تمامی سعی و همّت خود را برای ارائهٔ کتابی درخور و شایستهٔ شما فرهیختهٔ گرامی به‌کار بسته‌اند و تلاش کرده‌اند که اثری را ارائه نمایند که از حدّاقل‌های استاندارد یک کتاب خوب، هم از نظر محتوایی و غنای علمی و فرهنگی و هم از نظر کیفیّت شکلی و ساختاری آن، برخوردار باشد.

بااین‌وجود، علی‌رغم تمامی تلاش‌های این انتشارات برای ارائهٔ اثری با کمترین اشکال، باز هم احتمال بروز ایراد و اشکال در کار وجود دارد و هیچ اثری را نمی‌توان الزاماً مبرّا از نقص و اِشکال دانست. ازسوی‌دیگر، این انتشارت بنابه تعهّدات حرفه‌ای و اخلاقی خود و نیز بنابه اعتقاد راسخ به حقوق مسلّم خوانندگان گرامی، سعی دارد از هر طریق ممکن، به‌ویژه از طریق فراخوان به خوانندگان گرامی، ازهرگونه اشکال احتمالی کتاب‌های منتشرهٔ خود آگاه شده و آن‌ها را در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی رفع نماید.

لذا دراین راستا، از شما فرهیختهٔ گرامی تقاضا داریم درصورتی‌که حین مطالعهٔ کتاب با اشکالات، نواقص و یا ایرادهای شکلی یا محتوایی در آن برخورد نمودید، اگر اصلاحات را بر روی خود کتاب انجام داده‌اید پس از اتمام مطالعه، کتاب ویرایش‌شدهٔ خود را با هزینهٔ انتشارات پارسیا، پس از هماهنگی با انتشارات، ارسال نمایید، و نیز چنانچه اصلاحات خود را بر روی برگهٔ جداگانه‌ای یادداشت نموده‌اید، لطف کرده عکس یا اسکن برگهٔ مزبور را با ذکر نام و شمارهٔ تلفن تماس خود به ایمیل انتشارات پارسیا ارسال نمایید، تا این موارد بررسی شده و در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی کتاب اِعمال و اصلاح گردد و باعث هرچه پربارترشدن محتوای کتاب و ارتقاء سطح کیفی، شکلی و ساختاری آن گردد.

نشر پارسیا، ضمن ابراز امتنان از این عمل متعهّدانه و مسئولانهٔ شما خوانندهٔ فرهیخته و گرانقدر، به‌منظور تقدیر و تشکّر از این همدلی و همکاری علمی و فرهنگی، درصورتی‌که اصلاحات درست و بجا باشند، متناسب با میزان اصلاحات، به‌رسم ادب و قدرشناسی، نسخهٔ دیگری از همان کتاب و یا چاپ اصلاح‌شدهٔ آن و نیز از سایر کتب منتشرهٔ خود را به‌عنوان هدیه، به انتخاب خودتان، برایتان ارسال می‌نماید، و درصورتی‌که اصلاحات تأثیرگذار باشند در مقدّمهٔ چاپ بعدی کتاب نیز از زحمات شما تقدیر می‌شود.

همچنین نشر پارسیا و پدیدآورندگان کتاب، از هرگونه پیشنهادها، نظرات، انتقادات و راه‌کارهای شما عزیزان در راستای بهبود کتاب، و هرچه بهتر شدن سطح کیفی و علمی آن صمیمانه و مشتاقانه استقبال می‌نمایند.

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱
www.noavarpub.com
info@noavarpub.com

فصل اول

مقدمه

۱-۱. مقدمه

همان طورکه انسان‌ها ازگونه‌های شبه انسان که چندین میلیون سال قبل درآفریقا زندگی می‌کردند، تکامل یافته‌اند، رفع نیازهای اساسی مانند غذا، پوشاک و سرپناه دغدغه اصلی برای همه گونه‌های بشری بوده است و با افزایش کیفیت زندگی انسان، میزان این نیازها هم افزایش می‌یابد. همه این نیازها با تولید از منابع طبیعی یا بازیافت منابع موجود بدست آمده‌اند که در آن فرایندها انرژی ضروری است. تمدن فرهنگ بشر بر مبنای منبع و شکل انرژی تکامل یافته است. فرهنگ کشاورزی به دلیل قدرت و نیروی حیوانات امکان‌پذیر گردید. انقلاب صنعتی با اختراع موتور بخار در قرن هجدهم میلادی آغاز شد. از زمان اختراع موتور احتراقی داخلی[1] (ICE) در قرن نوزدهم میلادی، بهره‌وری تولید تا حد زیادی افزایش یافته است. در قرن نوزدهم میلادی، زمانی که ماشین الکتریکی اختراع شد، توان مکانیکی ماشین الکتریکی بهترین منبع توان مکانیکی بود که بشر تا کنون داشته است. این منبع به غیر از حوزه حمل و نقل، در حوزه‌های دیگر به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. اگر چه راندمان کلی برق، از منبع انرژی اصلی تا مرحله نهایی در بهترین حالت برابر با ۴۰ درصد است، برق مناسب‌ترین منبع انرژی برای کنترل و تبدیل به شکل دیگر انرژی می‌باشد. بنابراین، توان الکترومکانیکی بر پایه ماشین الکتریکی، منبع اصلی توان مکانیکی برای حمایت از جامعه صنعتی امروزی است. اخیرا، حتی در حوزه حمل و نقل، که موتور احتراق داخلی در ۱۰۰ سال گذشته به عنوان منبع توان مکانیکی غالب بوده است، ماشین‌های الکتریکی به عنوان منبع اصلی نیروی کششی در خودرو برقی، خودرو هیبریدی، و کشتی‌های الکتریکی به کار می‌رود. با تداوم این روند، قبل از پایان نیمه اول قرن بیست و یکم میلادی، بیشترین توان مکانیکی را می‌توان از تبدیل نیروی الکترومکانیکی بدست آورد.

ماشین‌های الکتریکی در مقایسه با ICE و توربین گازی دارای مزایای زیر می‌باشد[۱]:

۱. از ماشین الکتریکی برای راه‌اندازی ساعت الکتریکی، تا راه‌اندازی پمپ هیدرولیک استفاده شده است که محدوده توان می‌تواند از چند میلی وات تا صدها مگاوات گسترش یابد.

۲. از ماشین جداسازگریز از مرکز با سرعت بالا با بیش از صد هزار دور در دقیقه تا ماشین نورد بزرگ در خط تولید فولاد با بیش از چندین ده مگانیوتن متر، محدوده عملکرد سرعت و گشتاور بسیار گسترده می‌باشد.

۳. ماشین الکتریکی به راحتی می‌تواند با هر نوع محیط خارجی مانند خلا، آب و شرایط بد آب و هوایی مطابقت کند. در مقایسه با موتور احتراق داخلی، صدا و لرزش کمتری دارد و سازگار با محیط

1. Internal. Combustion. Engine

زیست می‌باشد.

۴. پاسخ ماشین الکتریکی در مقایسه با موتور احتراق داخلی و توربین گازی حداقل ۱۰ برابر سریعتر است.

۵. راندمان راه‌اندازی بالاتر است، و تلفات بی باری یا حالت آماده به کار[1] کمتر می‌باشد.

۶. جهت نیرو (گشتاور) و حرکت (چرخش) را می‌توان به راحتی تغییر داد.

۷. نیرو (گشتاور) صرفه نظر از جهت حرکت (چرخش) به راحتی می‌تواند کنترل شود.

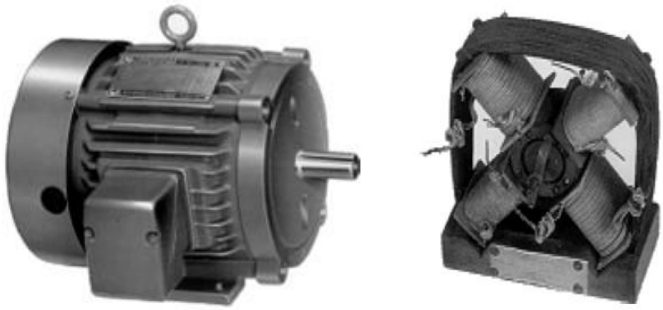
۸. ماشین الکتریکی با شکل‌های مختلفی مانند نوع دیسک نازک، نوع استوانه‌ای بلند، نوع دوار، نوع حرکت خطی می‌تواند طراحی شود، و به راحتی می‌تواند در محل مورد نظر که توان مکانیکی باید اعمال شود نصب شود.

۹. ورودی ماشین برق است و سیستم کنترل ماشین الکتریکی به راحتی با دستگاه‌های پردازش اطلاعات مدرن سازگار می‌شود.

مزایای فوق الذکر ماشین الکتریکی نسبت به ICE و توربین گازی با پیشرفت صنایع الکترونیک قدرت، مواد مغناطیسی و عایق‌ها، و فناوری اطلاعات شدت یافته است. بویژه در مورد پیشرفت‌های اخیر در زمینه آهنربای نادر زمین مانند آهنربای نیودیوم-آهن-بور، چگالی نیرو (گشتاور) ماشین الکتریکی با سیستم هیدرولیک قابل مقایسه است. بسیاری از سیستم‌های کنترل حرکت مبتنی بر فشار هیدرولیک با ماشین الکتریکی جایگزین می‌شوند. علاوه بر این، با پیشرفت الکترونیک قدرت، سیستم درایو ماشین الکتریکی بدون سخت افزار اضافی، به آسانی و مستقل از سیستم پردازش اطلاعات می‌تواند کنترل شود. بنابراین، صرفه نظر از این مزیت‌های ذکر شده ماشین الکتریکی، به دلیل اتصال مداوم به خطوط برق این امر تا حد زیادی محدود به نیروی کشش سیستم انتقال می‌شود. اخیرا، برای کاهش مشکل آلودگی مناطق شهری، خودرو برقی مورد توجه قرار گرفته است، ولی به دلیل محدودیت درعملکرد باتری به عنوان منبع ذخیره انرژی، زمان قابل توجهی برای استفاده گسترده از خودروی کاملا برقی صرف خواهد شد. در چنین شرایطی وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی که بعد از دریافت توان مکانیکی از ICE، آن را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند تا ماشین الکتریکی راه‌اندازی شود، ساخته شده و عملا در خیابان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

بعد از اینکه ژاکوبی[2] در سال ۱۸۳۰ میلادی ماشین DC، و فراریز[3] و تسلا[4] ماشین القایی را اختراع کردند، ماشین الکتریکی برای ۱۵۰ سال گذشته منبع اصلی توان مکانیکی بوده است. در جامعه صنعتی مدرن، بیش از ۶۰ درصد از برق برای راه‌اندازی ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شود. در میان آن‌ها، بیش از ۸۰ درصد در ماشین‌های القایی استفاده می‌شود[۲]. ماشین القایی بر پایه نیروی محرکه مغناطیسی دوار[5] ابتدایی در شکل ۱-۱ و نوع مدرن ماشین القایی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

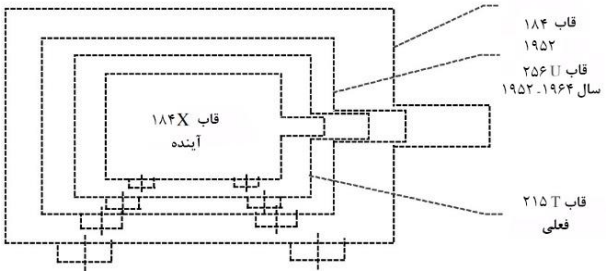
1. standby
2. Jacobi
3. Ferraris
4. Tesla
5. rotating. magnetic. motive. force



شکل ۱-۱: ماشین القایی در مراحل اولیه پیشرفت شکل ۱-۲: ماشین القایی امروزی

به دلیل پیشرفت‌های مواد عایقی و مواد مغناطیسی، چگالی نیرو، که به صورت نسبت بین توان خروجی و وزن تعریف شده است، و قیمت به طور قابل توجهی بهبود یافته است. در سال ۱۸۹۰، وزن و قیمت ماشین القایی ۵Hp برابر با ۴۵۴Kg و قیمت آن ۹۰۰ دلار، در سال ۱۹۵۷، وزن ۶۰Kg و قیمت آن ۱۱۰ دلار و در سال ۱۹۹۶ وزن ۴۵۴Kg و قیمت آن ۵۰ دلار بود.

در شکل ۱-۳، چندین اندازه خارجی ماشین القایی ۱۰Hp و ۴ قطب کاملا بسته براساس سال آمده است[۴]. این روند با اندازه کوچکتر و وزن سبک‌تر همچنان ادامه خواهد داشت، و راندمان ماشین برای صرفه جویی در برق برای یک محیط بهتر به طور مداوم بهبود می‌یابد.



قطر رایج استاتور (mm)	قاب
۳۴۳	۳۲۴
۲۶۷	۲۵۶
۲۲۲	۲۱۵
۱۹۱	۱۸۴

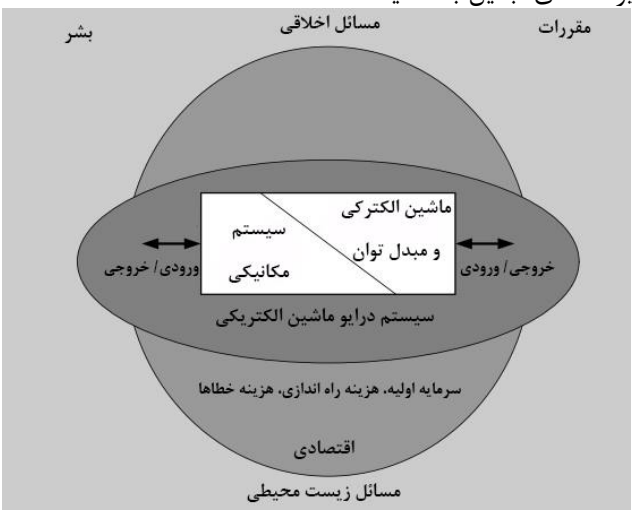
شکل ۱-۳: اندازه‌های خارجی ماشین‌های القایی همه منظوره ۱۰Hp و ۴ قطب، کاملا بسته[۴]

از زمان اختراع ماشین القایی در ۸۰ سال قبل، ماشین القایی توسط خط برق ۵۰ هرتز یا ۶۰ هرتز کار می‌کرده است و سرعت چرخش آن هم تقریبا ثابت بوده است. درحالی که بعد از اختراع تریستور در سال ۱۹۶۰ میلادی، ولتاژ و فرکانس ورودی ماشین به طور وسیعی تغییر می‌یابد، و ماشین برای سازگاری با منابع متغیر ولتاژ- فرکانس[1] (VVVF)طراحی شده است[۵].

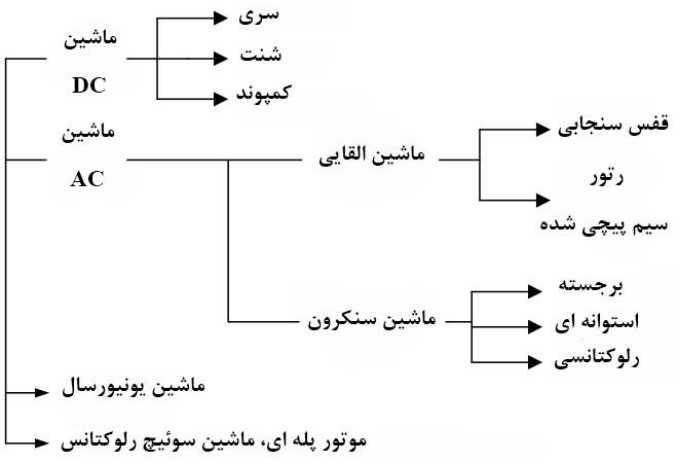
1. variable. voltage. variable. frequency

۱-۱-۱. سیستم درایو ماشین الکتریکی[۶]

سیستم درایو ماشین الکتریکی معمولا شامل چندین بخش مانند سیستم مکانیکی، ماشین الکتریکی، مبدل توان الکتریکی، سیستم کنترل، و غیره می‌باشد. همانطور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، برای طراحی سیستم درایو چندین بخش دیگر از جمله ماشین الکتریکی باید در نظر گرفته شود. به طور معمول طراحی مهندسی سیستم درایو با همان عملکرد به شیوه‌های مختلف پیاده سازی می‌شود. معیار نهایی برای بهترین طراحی نه تنها به دلایل اقتصادی مانند سرمایه اولیه، هزینه راه‌اندازی، و غیره وابسته می‌باشد بلکه به دلایل غیراقتصادی مانند سازگاری با محیط زیست، مسائل اخلاقی، و مقررات نیز وابسته می‌باشد. اخیرا، به دلیل مشغله و کار مهندسی با مسئولیت پذیری اجتماعی، دلایل غیراقتصادی تبدیل به اهمیت شده است.



شکل ۱-۴. نقاط مورد نظر در طراحی سیستم درایو ماشین الکتریکی

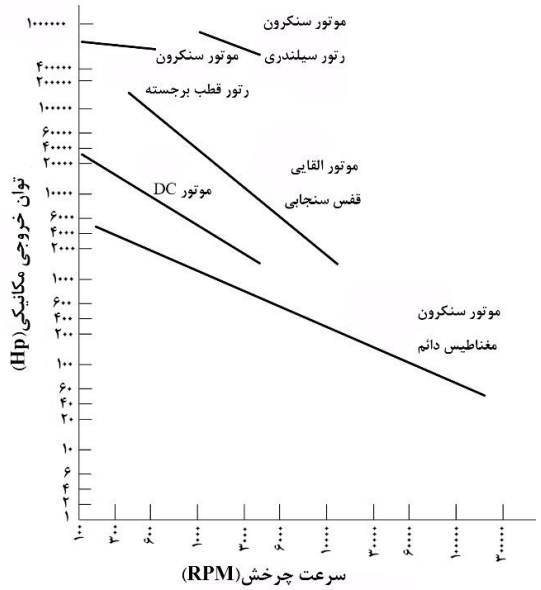


شکل ۱-۵. طبقه‌بندی ماشین الکتریکی براساس منبع تغذیه و اصول عملکرد

در طول صد سال پیشرفت، ماشین‌های الکتریکی شکل‌های متنوعی دارند و یک شکل مناسب برای یک محل خاص مطابق با هدف استفاده از ماشین‌های الکتریکی به کار می‌رود. ماشین‌ها با توجه به حرکت روتور(قسمت متحرک) به دو دسته حرکت دوار و حرکت خطی تقسیم بندی می‌شوند. همچنین، طبقه بندی ماشین‌ها با توجه به منبع تغذیه و اصول عملکرد در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. در ماشین با حرکت دورانی، محدوده توان خروجی و سرعت چرخش رابطه‌ای مطابق با شکل ۱-۶ دارد[۶]. اگر توان خروجی ماشین بزرگتر شود، اندازه بویژه شعاع روتور ماشین و نیروی گریز از مرکز بزرگتر می‌شود. بنابراین، ساخت یک ماشین با توان و سرعت بالا به دلیل استقامت محدود مواد تشکیل دهنده روتور کار فوق‌العاده دشواری است. اخیرا، با پیشرفت تکنیک‌های طراحی کامپیوتری و پیشرفت مواد، بویژه مواد آهنربای دائم، ماشین با سرعت و توان بالا در برخی کاربردهای خاص مانند کمپرسور توربو[۷]، ذخیره انرژی چرخان، و غیره ظاهر شده است، و محدوده توان خروجی و سرعت ماشین سنکرون مغناطیس دائم بیشتر افزایش خواهد یافت.

۱-۱-۲. سیر تکامل سیستم درایو ماشین الکتریکی

در گذشته، ماشین DC به دلیل راحتی کنترل گشتاور و سرعت، به طور گسترده‌ای برای درایو سرعت قابل تنظیم[1] یا ASD استفاده می‌شد. اخیرا با پیشرفت تکنولوژی الکترونیک قدرت، سیستم درایو ماشین AC مانند ماشین القایی و ماشین سنکرون که با اینورتر ولتاژ متغیر و فرکانس متغیر VVVFراه‌اندازی می‌شود، به طور گسترده‌ای استفاده شده است. اینورتر به جای کموتاتور و جاروبک ماشینDC که نیاز به نگهداری دائمی دارند و از نقاط ضعف ماشین‌های DC محسوب می‌شود، استفاده می‌شود.



شکل ۱-۶: محدوده سرعت و قدرت خروجی ماشین‌های دوار

1. adjustable. speed. drive