

# ماشین‌های الکتریکی مخصوص

(ویراست دوم)

دکتر جعفر سلطانی

دکتر شاهرخ شجاعیان

دکتر حسین ابوترابی زارچی

نیاز دانش

## مقدمه ویراست دوم

استقبال اساتید و دانشجویان مهندسی برق در سراسر کشور باعث شد که پس از دو سال از انتشار چاپ نخست این کتاب، اکنون ویرایش جدیدی از آن با تغییرات و اضافات اساسی تقدیم جامعه صنعتی و دانشگاهی کشور شود. گرچه در ویرایش اول نیز توجه به درک عمیق فیزیکی و بیان‌های دقیق ریاضی برای نویسنده‌گان در درجه اول اهمیت قرار داشت، در ویرایش حاضر روی این جنبه‌ها با اصراری دوچندان، کار شده و توضیحات بهتر و مثال‌های بیشتری به کتاب افزوده شده است. در عین حال برخی مطالب که مربوط به ماشین‌های قدیمی و از رده خارج بوده، حذف شده‌اند. متقابلاً به ماشین‌های مدرن کمی بیشتر پرداخته شده و مثال‌های تازه‌ای در زمینه ماشین‌های پله‌ای، سنکرون و... اضافه گردیده است. برخی مطالب نیز برای آنکه توسط دانشجویان بهتر درک شوند، نظم تازه‌ای یافته‌اند. مثلاً در ابتدای بحث ماشین‌های القایی، تئوری ماشین‌های دوفاز نامتعادل بیان شده و سپس ماشین القایی تکفاز از روی آن استخراج شده است.

علیرغم ماه‌ها تلاشی که جهت بازنگری در مطلب کتاب شده، نویسنده‌گان معتقدند با انکاس دیدگاه‌های اساتید و پژوهشگران کشور خواهند توانست بازهم بر غنای کتاب بیفزایند و چاپ‌های بعدی را بی‌نقص‌تر و کامل‌تر به خوانندگان عرضه نمایند.

دکتر شاهرخ شجاعیان  
استادیار مهندسی برق  
[shojaeian@iaukhsh.ac.ir](mailto:shojaeian@iaukhsh.ac.ir)

دکتر جعفر سلطانی  
استاد مهندسی برق  
[J1234sm@cc.iut.ac.ir](mailto:J1234sm@cc.iut.ac.ir)



# فهرست مطالب

فصل ۱	تشریح میدان‌های مغناطیسی و شرایط ایجاد گشتاور ماندگار در ماشین‌های الکتریکی دوار
۱-۱	مقدمه
۱-۲	مفهوم اساسی
۱-۳	نمایش میدان‌های الکترومغناطیسی با بردار فضایی
۱-۳-۱	مفهوم فازور زمانی
۱-۳-۲	مفهوم بردار فضایی (مکانی)
۱-۳-۳	بررسی ماشین‌های دو فاز به کمک بردارهای فضایی
۱-۴	محاسبه گشتاور تداخلی در ماشین‌های الکتریکی دوار
۱-۴-۱	کلیات
۲-۴-۱	شرایط ایجاد گشتاور ماندگار در ماشین‌های الکتریکی دوار
فصل ۲	تجزیه و تحلیل موتورهای القایی دوفاز نامتعادل با منبع تغذیه دوفاز نامتقارن
۲-۱	مقدمه
۲-۲	تجزیه و تحلیل حالت ماندگار سینوسی موتور القایی دوفاز نامتعادل تغذیه شده با منبع تغذیه دوفاز نامتقارن
۲-۲-۱	تجزیه و تحلیل حالت ماندگار موتور القایی تکفاز براساس روش اول
۲-۲-۲	تجزیه و تحلیل حالت ماندگار موتور القایی تکفاز براساس روش دوم
۲-۲-۳	بررسی موارد خاص
۲-۳	تعیین گشتاور راهاندازی موتور القایی دوفاز نامتعادل تغذیه شده با منبع نامتقارن
۴-۲	ساختمان سرو موتور القایی دوفاز (Ferraris)

## فصل ۲ موتورهای القایی تکفاز

۱-۳ مقدمه	۷۳
-----	
۲-۳ شیوه‌های متداول راهاندازی موتور القایی تکفاز	۷۴
-----	
۱-۲-۳ راهاندازی فاز شکسته	۷۵
-----	
۲-۲-۳ موتور القایی از نوع خازن دار موقت	۷۶
-----	
۳-۲-۳ موتور القایی با خازن موقت و دائم	۷۸
-----	
۴-۲-۳ موتور القایی تکفاز با خازن دائم	۷۸
-----	
۳-۳ سیم‌بندی ماشین‌های القایی تکفاز	۷۹
-----	
۴-۳ تجزیه و تحلیل حالت کار ماندگار ماشین القایی تکفاز قفسه سنجابی	۸۰
-----	
۱-۴-۳ تجزیه و تحلیل کار ماندگار موتور القایی تکفاز پس از خروج فاز کمکی	۸۱
-----	
۲-۴-۳ ماکریم نمودن گشتاور راهاندازی با مناسب در موتور فاز شکسته مقاومتی	۸۴
-----	
۳-۴-۳ ماکریم نمودن گشتاور راهاندازی با انتخاب مناسب در موتور القایی تکفاز از نوع خازن دار موقت	۸۴
-----	
۴-۴-۳ ماکریم کردن نسبت گشتاور راهاندازی به جریان راهاندازی با انتخاب مناسب خازن در موتور القایی تکفاز از نوع خازن دار موقت	۸۵
-----	
۵-۳ اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی موتور القایی تکفاز	۸۹
-----	
۱-۵-۳ آزمایش رتور قفل شده	۸۹
-----	
۲-۵-۳ آزمایش بی‌باری	۹۰
-----	
۶-۳ ساختمان و نحوه کار موتور القایی قطب چاکدار	۹۴
-----	
۱-۶-۳ اصول کار	۹۴
-----	
۲-۶-۳ محاسبه میدان‌های مغناطیسی موتور القایی قطب چاکدار	۹۶
-----	
۷-۳ موتور القایی تکفاز با راهانداز رلوکتانسی (موتور قطب پله‌ای)	۹۸
-----	
۸-۳ راهاندازی ماشین القایی سه‌فاز با تغذیه تکفاز (اتصالات اشتاین‌متر)	۹۹
-----	
۱-۸-۳ آرایش ستاره‌ای اشتاین‌متر	۱۰۱
-----	
۲-۸-۳ آرایش مثلثی اشتاین‌متر	۱۰۶

## فصل ۴ موتورهای القایی خطی

۱۳۳	۱-۴ مقدمه
۱۳۴	۲-۴ تجزیه و تحلیل حالت ماندگار ماشین القایی سه خطی سه فاز
۱۳۷	۳-۴ ماشین‌های آهنربای دائم خطی سنکرون
۱۳۸	۴-۴ انواع ساختارهای ماشین‌های آهنربای دائم خطی نوع تخت
۱۳۸	۱-۴-۴ ساختار یک‌طرفه با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی
۱۳۹	۲-۴-۴ ساختار یک‌طرفه با اولیه کوتاه و آهنربای درونی
۱۳۹	۳-۴-۴ ساختار یک‌طرفه با اولیه کوتاه و آهنربای درونی عمودی
۱۴۰	۴-۴-۴ ساختارهای یک‌طرفه با ثانویه کوتاه
۱۴۱	۵-۴-۴ ساختار دوطرفه با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با هسته هوایی (ساختار دوطرفه پایه)
۱۴۲	۶-۴-۴ ساختار دوطرفه با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه یوگدار
۱۴۳	۷-۴-۴ ساختار دوطرفه با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با آهنربای دائمی درونی عمودی
۱۴۳	۸-۴-۴ ساختارهای دوطرفه با یک ثانویه بلند و دو اولیه کوتاه
۱۴۴	۹-۴-۴ ساختارهای دوطرفه با یک اولیه بلند و دو ثانویه کوتاه
۱۴۵	۱۰-۴-۴ ساختار دوطرفه با دو ثانویه کوتاه و یک اولیه دوطرفه
۱۴۶	۱۱-۴-۴ ساختار دوطرفه با یک ثانویه کوتاه و دو اولیه بلند
۱۴۷	۱۴۷ ۵-۴ ساختار لوله‌ای
۱۴۷	۶-۴ مقایسه ساختارهای مختلف ماشین آهنربای دائم خطی

## فصل ۵ سلسین‌ها و سینکروها

۱۴۹	۱-۵ مقدمه
۱۴۹	۲-۵ سلسین قدرت
۱۵۰	۱-۲-۵ محاسبه گشتاور در محور الکتریکی معادل
۱۵۱	۳-۵ سینکروها
۱۵۵	۱-۳-۵ خصوصیات ساختاری
۱۵۷	۲-۳-۵ روابط ولتاژ
۱۵۹	۳-۳-۵ کاربردها

## فصل ۶ موتورهای سنکرون مخصوص

۱۶۵	۱-۶ مقدمه
۱۶۵	۲-۶ موتورهای رلوکتانس تکفاز
۱۶۵	۱-۲-۶ اصول کار
۱۶۷	۲-۲-۶ محاسبه معادله گشتاور رلوکتانسی
۱۷۱	۳-۶ موتور رلوکتانس سه فاز
۱۷۱	۱-۳-۶ ساختمان موتور رلوکتانس سه فاز
۱۷۱	۲-۳-۶ حالت موتوری
۱۷۶	۳-۳-۶ شرح مختصری از تکنولوژی ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی سه فاز
۱۷۸	۴-۳-۶ مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورها
۱۹۱	۴-۶ ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم
۱۹۱	۱-۴-۶ معرفی
۱۹۶	۲-۴-۶ ماشین سنکرون مغناطیس دائم با شار شعاعی
۱۹۹	۳-۴-۶ ماشینهای سنکرون و مغناطیس دائم با شار محور (AFPM)
۲۰۰	۴-۴-۶ مقایسه ماشینهای سنکرون شار محوری و شار شعاعی
۲۰۴	۵-۶ تجزیه و تحلیل حالت کار ماندگار ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم
۲۰۴	۱-۵-۶ نوع سطحی روتور ( <i>SPMSM</i> )
۲۰۵	۲-۵-۶ نوع داخلی روتور ( <i>IPMSM</i> )
۲۰۸	۳-۵-۶ محاسبه توان و گشتاور الکترومغناطیسی <i>IPMSM</i>
۲۰۹	۴-۵-۶ به دست آوردن مدار معادل
۲۱۰	۶-۶ موتور سنکرون مغناطیس دائم تکفاز
۲۱۲	۷-۶ موتور هیسترزیس
۲۱۲	۱-۷-۶ ساختمان
۲۱۳	۲-۷-۶ نحوه تولید گشتاور (بیان فیزیکی)
۲۱۴	۳-۷-۶ کاربرد و سایزهای متدالو
۲۱۵	۴-۷-۶ محاسبه گشتاور موتور هیسترزیس سه فاز
۲۱۸	۵-۷-۶ محاسبه گشتاور موتور هیسترزیس تکفاز

۲۲۳-	<b>ماشین‌های کلکتوردار مخصوص AC و DC</b>	<b>فصل ۷</b>
۲۲۳-	۱-۷ مقدمه	
۲۲۴-	۲-۷ ژنراتورهای متادین و آمپلیدین	
۲۲۴-	۱-۲-۷ ژنراتور متادین	
۲۲۶-	۲-۲-۷ ژنراتور آمپلیدین	
۲۲۷-	۳-۷ انواع ولتاژهای القاء شده در سیم پیچ کموتاتور ماشین‌های AC	
۲۲۷-	۱-۳-۷ ولتاژهای القاء شده توسط میدان ضربانی	
۲۳۳-	۲-۳-۷ ولتاژهای القایی تولید شده توسط میدان دوار	
۲۳۸-	۴-۷ بررسی گشتاور در موتور کموتاتوردار تک‌فاز	
۲۴۰-	۵-۷ پدیده کموتاسیون	
۲۴۱-	۱-۵-۷ کموتاسیون در ماشین‌های کموتاتوردار تک‌فاز	
۲۴۳-	۲-۵-۷ روش‌های بهبود کموتاسیون	
۲۴۴-	۶-۷ موتورهای کموتاتوردار سری	
۲۴۵-	۱-۶-۷ موتور یونیورسال	
۲۴۸-	۲-۶-۷ تجزیه و تحلیل حالت ماندگار موتور اونیورسال	
۲۵۰-	۷-۷ موتور دفعی (رپالسیون)	
۲۵۳-	۸-۷ ماشین‌های کموتاتور سه‌فاز	
۲۵۳-	۱-۸-۷ کنترل سرعت و ضربی قدرت موتور القایی با اعمال ولتاژ به روتور	
۲۵۶-	۲-۸-۷ بررسی ولتاژ جاروبک‌های یک ماشین کموتاتوری	
۲۵۸-	۳-۸-۷ بررسی ولتاژ در انشعابات سیم پیچ کموتاتوری	
۲۵۹-	۴-۸-۷ بررسی انواع ماشین‌های کموتاتوری سه‌فاز	

۲۶۷-	<b>مоторهای پله‌ای و رلوکتانس متغیر</b>	<b>فصل ۸</b>
۲۶۷-	۱-۸ مقدمه	
۲۷۰-	۲-۸ ساختمان و عملکرد مotor پله‌ای چند تکه	
۲۷۵-	۳-۸ معادلات ولتاژ یک موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر چند تکه	
۲۸۱-	۴-۸ تجزیه و تحلیل موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر یک تکه	

۲۸۳	۵-۸ موتورهای پلهای مغناطیس دائم
۲۸۶	۶-۸ موتورهای پلهای هایبرید
۲۹۰	۷-۸ تجزیه و تحلیل موتورهای پلهای مغناطیس دائم
۲۹۲	۸-۸ تجزیه و تحلیل موتور پلهای مغناطیس دائم در چارچوب مرجع رotor
۲۹۶	۹-۸ مشخصه‌های موتورهای پلهای
۲۹۶	۱-۹-۸ مشخصه گشتاور - جایه‌جایی
۲۹۹	۲-۹-۸ مشخصه گشتاور - نرخ پالس
۳۰۲	۳-۹-۸ مدارات درایو موتورهای پلهای
۳۰۲	۴-۹-۸ مدار درایو تکقطبی برای موتور پلهای رلوکتانس متغیر (VRSM)
۳۰۳	۵-۹-۸ مدار درایو دوقطبی برای موتورهای پلهای PM و هایبرید
۳۰۳	۶-۹-۸ ظرفیت نامی و کاربردها
۳۰۴	۱۰-۸ موتورهای رلوکتانس متغیر
۳۰۵	۱-۱۰-۸ خصوصیات ساختاری
۳۰۶	۲-۱۰-۸ اصول عملکرد
۳۰۷	۳-۱۰-۸ تولید گشتاور
۳۰۸	۴-۱۰-۸ حالت‌های کاری (مودهای کاری)
۳۱۱	۱۱-۸ مدارات درایو اینورتر برای موتورهای VR
۳۱۲	۱۲-۸ کاربردها
۳۱۳	مسائل حل شده

## ضمیمه

۳۲۳	معادلات دینامیکی موتور القایی دوفاز نامتعادل تعزیه شده با منبع ولتاژ دوفاز نامتفاون
۳۲۷	منابع و مراجع

# ۱ فصل

## تشریح میدان‌های مغناطیسی و شرایط ایجاد گشتاور ماندگار در ماشین‌های الکتریکی دوار

### ۱-۱ مقدمه

در این فصل به عنوان یادآوری، مطالبی چند در مورد انواع میدان‌های مغناطیسی موجود در ماشین‌های الکتریکی دوار اعم از  $DC$  و  $AC$  ارائه خواهد شد. در مورد ماشین‌های  $AC$ ، بیان مذکور در شرایط «شبیه استاتیک» یعنی وقتی ماشین با فرکانسی کار می‌کند که می‌توان قوانین حاکم بر میدان‌های مغناطیسی ساکن را به کار برد، انجام می‌شود. علاوه بر آن، در این فصل با معرفی مفهوم بردار مکانی میدان‌های مغناطیسی، با فرض یک پخش فضایی سینوسی برای همه سیم‌بندی‌های ماشین، درک بهتری از محاسبات میدان‌های مغناطیسی دوار به دست داده می‌شود که احتمالاً برای بسیاری خوانندگان جدید است. در پایان فصل نیز در حالت کار ماندگار، شرایط ایجاد گشتاور تداخلی ماندگار در ماشین‌های دوار مورد بحث قرار می‌گیرد. چنان‌چه بعدها در فصل ۶ نیز خواهیم گفت، این شرایط به طور مشابهی برای تولید گشتاورهای لوكتانسی و هیسترزیس نیز برقرارند. برای فهم بهتر مطالب فصل، تعدادی مسئله نمونه حل شده نیز در انتهای آورده شده‌اند.

### ۲-۱ مفاهیم اساسی

با فرض یک توزیع فضایی سینوسی برای همه سیم‌بندی‌های ماشین، می‌توان توابع توزیع سیم‌پیچ‌ها را برای سه فاز  $a$ ,  $b$  و  $c$  استاتور به شرح زیر نوشت: