

# ماشین‌های الکتریکی

بخش اول

## تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی

مؤلف:

دکتر محمد رضا فیضی

استاد دانشگاه تبریز

نیاز دانش

سروشانه	: فیضی، محمد رضا، -۱۳۳۱
عنوان و نام پدیدآور	: ماشینهای الکتریکی: بخش اول تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی / مولف محمدرضا فیضی
مشخصات نشر	: مشخصات نشر: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	: مشخصات ظاهری: ۳۷۸ ص
شابک	: شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۹۰۶-۷۲-۵
وضعیت فهرست‌نویسی	: وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
یادداشت	: درس ماشینهای الکتریکی
عنوان دیگر	: تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی.
موضوع	: ماشین آلات برقی
موضوع	: Electric machinery
موضوع	: مبدل‌های مغناطیسی
موضوع	: Transducers
ردیبندی کنگره	: TK۲۱۸۱
ردیبندی دیوی	: ۶۲۱/۳۱۰۴۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۶۰۲۹۹۱۶



نام کتاب	: ماشین‌های الکتریکی، بخش اول، تحلیل مدارهای مغناطیسی و مبدل‌های الکترومکانیکی
مؤلف	: دکتر محمدرضا فیضی - استاد دانشگاه تبریز
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا احمد شیرازی - محمد شمس
ناشر	: نیاز دانش
صفحه‌آرا	: واحد تولید انتشارات نیازدانش
نوبت چاپ	: اول - ۱۳۹۹
شمارگان	: ۱۵۰ نسخه
قیمت	: ۱۱۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-8906-73-5

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۹۰۶-۷۳-۵

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

آدرس انتشارات: تهران، میدان انقلاب، خیابان ۱۲ فروردین، تقاطع وحید نظری، پلاک ۲۵۵، طبقه ۱، واحد ۲  
۰۲۱-۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵

[www.Niaze-Danesh.com](http://www.Niaze-Danesh.com)

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

## تقدیر و تشکر

کلیه کارهای مدوین، تریم شگل ها و دیرایش این کتاب، و در نهایت صفحه آرایی آن توسط این جانب  
و در خارج از اوقات اشتغال رسمی انجام شد و غالباً می از سه سال به طول انجامید. در نتیجه، طی این مدت  
قسمت زیادی از اوقات فراغت خود را که متعلق به خانواده ام بود، در پشت میز کار یا کامپیوتر گذراندم.  
لذا، ضمن شکر از همسر عزیزم مهنا، یافت صبر و حوصله ای که به خرج دادم، این کتاب را صیانه به ایشان  
تقدیم می دارم.

محمد رضا فخری



## پیشگفتار

مبدل‌های الکتروموکانیکی، مانند انواع عملگرها و ماشین‌های الکتریکی، نیروی محرکه صنعت امروز و نیز اساس کار اتوماسیون صنعتی هستند و استفاده بهینه از این مبدل‌ها مستلزم درک اصول کار آن‌ها است. با وجوداین، اکثر قریب بهاتفاق کتاب‌های متعددی که امروزه در زمینه ماشین‌های الکتریکی به زبان‌های مختلف منتشر شده‌است، بخش محدودی از کتاب را به این موضوع اختصاص داده‌اند؛ و یا اصلاً بحثی از آن به میان نیاورده‌اند. این در حالی است که در مورد انواع ماشین‌های الکتریکی مرسوم، از جمله ماشین‌های DC، ماشین‌های القابی و ماشین‌های سنکرون، کتاب‌های متعدد چاپ و منتشر شده است که ویژگی‌های هرکدام از آن‌ها، از مرحله ساختمان تا طراحی، و نیز تحلیل آن‌ها در شرایط ماندگار و گذرا، بسیار موشکافانه مورد بحث قرار گرفته‌است.

مسئله فوق، این‌جانب را بر آن داشت که پس از چهل سال تجربه تدریس و تحقیق در زمینه انواع مبدل‌های الکتروموکانیکی و ماشین‌های الکتریکی، یک جلد کتاب مجزا را، که به‌طور اختصاصی در مورد تحلیل مدارهای مغناطیسی و تبدیل الکتروموکانیکی بحث می‌کند، تألیف نمایم. در این کتاب، فرض بر این نهاده شده است که خوانندگان آن، در کنار برخورداری از اطلاعات پایه ریاضی، با چند اصل و قانون فیزیک، از جمله اصل بقا ابرزی، قوانین ولتاژ<sup>۱</sup> و جریان<sup>۲</sup> کیرشهوف و نیز قوانین فارادی و آمپر، آشنایی کافی دارند.

کتاب حاضر شامل شش فصل است. در فصل اول مقدمات مربوط به پارامترهای میدان مغناطیسی بحث شده و آمادگی لازم برای ورود به مباحث مدارهای مغناطیسی با تحریک DC، که در فصل دوم آورده شده‌است، را فراهم می‌سازد. فصل سوم ادامه فصل قبلی است و در آن، مدارهای مغناطیسی با تحریک AC به همراه مدارهای تزویج‌شده مغناطیسی و نیز تلفات هسته مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، فصل‌های چهارم تا ششم از مقدمات محاسبه ابرزی در میدان مغناطیسی تا محاسبات مربوط به نیرو و گشتاور در مبدل‌های الکتروموکانیکی را به‌طور مشروح پوشش می‌دهد. در فصل‌های اشاره شده، بالغ بر هفتاد مثال کلیدی حل شده مرتبط با هر مبحث گنجانده شده‌است و علاوه بر آن، تعدادی تمرین در متن هر فصل و به تعداد کافی مسئله تشریحی در انتهای آن قرار داده شده‌است. به‌دبیال فصول اشاره شده، تعداد شصت تست چهارگزینه‌ای به‌صورت جداگانه به همراه کلید آن‌ها آورده شده‌است که می‌تواند تمرین خوبی جهت افزایش آمادگی دانشجویان برای آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد

---

1. KVL  
2. KCL

باشد. یادآوری می‌شود که بیش از ۹۵٪ مثال‌ها، مسائل تشریحی و تست‌های چهارگزینه‌ای داده شده در این کتاب توسط شخص مؤلف طراحی شده و تعدادی از آن‌ها، بالاخص تست‌های چهارگزینه‌ای، در آزمون‌های مختلف ورودی دانشگاه‌ها، از جمله آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد در بیست‌وپنج سال اخیر، مورد استفاده قرار گرفته‌است.

مباحث مطرح شده در این کتاب از نظر سرفصل، تقریباً نیمی از سرفصل‌های فعلی درس ماشین‌های الکتریکی یک دوره کارشناسی را شامل می‌شود، ولی حجم مطالب به مراتب بیش از آن است که در نصف یک نیمسال تحصیلی به طور کامل قابل تدریس باشد و درنتیجه، استاد درس به سلیقه خود ممکن است قسمت‌هایی از مطالب را به صورت خلاصه‌تر ارائه کند. در این کتاب بیان شده‌است، تدریس نماید. به علاوه، با توجه به عمق مطالب، این کتاب درصد بالایی از فصل مرتبط با تبدیل انرژی درس تئوری جامع ماشین‌های الکتریکی دوره کارشناسی ارشد را نیز پوشش می‌دهد.

روش بیان مطالب و مثال‌های حل شده متعدد به نحوی تنظیم شده‌است که یک فرد علاقه‌مند با اطلاعات اولیه لازم می‌تواند به صورت خودآموز مطالب کتاب را فرابگیرد. به علاوه، چند مثال نمونه با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB آورده شده است و خوانندگان علاقه‌مند و آشنا به این نرم‌افزار یا هر نرم‌افزار مشابه می‌توانند اغلب مثال‌ها و مسائل تشریحی انتهایی فصل‌ها را با استفاده از آن‌ها حل نمایند. یادآوری می‌شود که کدهای پیشنهادی الزاماً بهترین نیستند و بر حسب سلیقه و مهارت افراد ممکن است تغییر کنند.

این کتاب، علاوه بر یک کتاب درسی، می‌تواند به عنوان یک مرجع مناسب برای آمادگی آزمون ورودی کارشناسی ارشد و بالاخص المپیاد دانشجویی مورد استفاده قرار گیرد.

از همکار محترم جناب آقای دکتر سجاد توحیدی، که نقش به سزایی در ویرایش علمی و نگارشی این کتاب داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

علیرغم آنکه این جانب نهایت سعی خود را در بیان هرچه روشن‌تر مطالب به کاربردها، طبعاً کار حاضر را بدون نقص نمی‌دانم و از خوانندگان این کتاب تقاضا دارم هرگونه اشتباہ تاییی، نارسانی مطالب بیان شده و یا هرگونه پیشنهاد را که می‌تواند در جهت بهبود این کتاب باشد، به نحو مقتضی، از جمله ایمیل [feyzi@tabrizu.ac.ir](mailto:feyzi@tabrizu.ac.ir)، به این جانب اطلاع دهنده تا در ویرایش‌های بعدی اعمال شود.

دکتر محمدرضا فیضی

استاد دانشگاه تبریز

دی ماه ۱۳۹۸

## فهرست

عنوان.....	شماره صفحه
فصل ۱: مواد و مدارهای مغناطیسی .....	۱
۱.....	۱
۱-۱ چند نمونه ساده از مبدل‌های الکترومکانیکی .....	۲
۱-۱-۱ تبدیل الکترومکانیکی در میدان الکتریکی .....	۲
۱-۱-۲ تبدیل الکترومکانیکی در میدان مغناطیسی .....	۴
۲-۱ مروری بر پارامترهای یک میدان مغناطیسی .....	۵
۲-۱-۱ یادآوری چند تعریف و پارامتر میدان‌های مغناطیسی .....	۶
۲-۱-۲ شدت میدان مغناطیسی .....	۶
۲-۱-۳ اندوکسیون مغناطیسی .....	۸
۲-۱-۴ میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت .....	۹
۲-۱-۵ مقدار متوسط چگالی شار .....	۱۰
۲-۱-۶ خواص مغناطیسی مواد .....	۱۳
۲-۱-۷ مسائل فصل ۱ .....	۱۴
۲-۱-۸	۲۰
فصل ۲: مدارهای مغناطیسی با تحریک DC .....	۲۳
۲-۲ مقدمه .....	۲۳
۲-۲-۱ مدار مغناطیسی .....	۲۳
۲-۲-۲ مدار مغناطیسی ساده .....	۲۶
۲-۲-۳ مدار مغناطیسی واقعی .....	۲۸
۲-۲-۴ مدار الکتریکی معادل یک مدار مغناطیسی .....	۳۶
۲-۲-۵ پدیده نشت شار در مدارهای مغناطیسی .....	۳۹
۲-۲-۶ پدیده پراکندگی یا شکفتگی شار در فواصل هوایی .....	۴۴
۲-۲-۷ مشخصه مغناطیسی مواد فرومغناطیسی .....	۴۷
۲-۲-۸	۴۹

۵۲	۱-۲-۲ مشخصه خطی
۵۳	۲-۲-۲ مشخصه غیرخطی
۶۵	۳-۲-۲ پدیده هیسترزیس
۶۹	۴-۲-۲ فولاد الکتریکی
۷۱	مسائل فصل ۲
۸۱	فصل ۳: مدارهای مغناطیسی با تحریک AC
۸۱	مقدمه
۸۱	۱-۳ سیم‌پیچ تغذیه شده از منبع ولتاژ سینوسی
۸۷	۱-۱-۳ بررسی شکل موج حریان در مدار مغناطیسی غیرخطی
۹۸	۲-۳ شار پیوندی یک سیم‌پیچ
۱۰۱	۳-۳ اندوکتانس یا ضریب خودالقابی یک سیم‌پیچ
۱۰۴	۱-۳-۳ استخراج مشخصه ( $i$ ) یک سیم‌پیچ
۱۰۷	۲-۳-۳ استخراج اندوکتانس با استفاده از مشخصه‌های ( $i$ )
۱۱۰	۳-۳-۳ اندوکتانس تفاضلی
۱۱۴	۴-۳ سیم‌پیچ‌های کوپله شده مغناطیسی
۱۱۶	۱-۴-۳ تعریف اندوکتانس خودی و متقابل
۱۲۳	۵-۳ مقدمه‌ای بر ترانسفورماتور
۱۲۳	۱-۵-۳ اصول کار
۱۲۵	۲-۵-۳ ترانسفورماتور در حالت بی‌باری
۱۲۶	۳-۵-۳ چگونگی انتقال توان توسط عمل ترانسفورماتور
۱۲۸	۶-۳ تلفات هسته آهنی در میدان متغیر با زمان
۱۲۸	۱-۶-۳ تلفات فوکو
۱۳۰	۲-۶-۳ محاسبه تلفات فوکو در یک ورقه هادی
۱۳۷	۳-۶-۳ تلفات هیسترزیس
۱۴۰	۴-۶-۳ تلفات آهن
۱۴۸	مسائل فصل ۳
۱۶۱	فصل ۴: اصول تبدیل الکترومکانیکی
۱۶۱	مقدمه
۱۶۱	۱-۴ نیرو و گشتاور در میدان مغناطیسی

۱۶۱	۱-۱-۴ نیروی وارد بر محیط حامل جریان.....
۱۶۴	۲-۱-۴ نیروی وارد بر بدنه ماده مغناطیسی غیرحامل جریان.....
۱۶۸	<b>۲-۴ مبدل‌های الکترومکانیکی.....</b>
۱۷۱	۳-۴ معادله تعادل انرژی در یک مبدل الکترومکانیکی در حالت کلی.....
۱۷۴	۴-۳-۴ معادله حالت یک سیستم.....
۱۷۵	۴-۳-۴ مکانیزم تبدیل انرژی در میدان مغناطیسی.....
۱۷۷	۴-۴ محاسبه انرژی میدان مغناطیسی.....
۱۸۰	۴-۴-۴ انرژی ذخیره شده در میدان با مدار مغناطیسی خطی.....
۱۸۴	۴-۴-۴ انرژی در میدان با مدار مغناطیسی غیرخطی.....
۱۹۰	۴-۵ چگالی حجمی انرژی ذخیره شده در یک میدان.....
۱۹۹	<b>مسائل فصل ۳.....</b>
۲۰۵	<b>فصل ۵: نیرو و گشتاور در مبدل‌های الکترومکانیکی یک تحریکه.....</b>
۲۰۵	<b>مقدمه.....</b>
۲۰۵	۱-۵ محاسبه نیرو در مبدل‌های یک تحریکه.....
۲۱۰	۲-۵ محاسبه گشتاور.....
۲۱۳	۳-۵ استفاده از تابع کوانرژی برای محاسبه نیرو یا گشتاور.....
۲۱۵	۴-۳-۵ محاسبه کوانرژی.....
۲۱۹	۴-۵ محاسبه چگالی حجمی کوانرژی در یک میدان مغناطیسی.....
۲۲۲	۵-۵ محاسبه نیرو در مبدل با مدار مغناطیسی غیرخطی.....
۲۲۴	۶-۵ روش کار مجازی.....
۲۳۲	۷-۵ مقدار متوسط نیرو.....
۲۳۳	۱-۷-۵ مقدار متوسط مکانی نیرو.....
۲۳۸	۲-۷-۵ مقدار متوسط زمانی.....
۲۴۴	۸-۵ بررسی رفتار یک مبدل الکترومکانیکی با تغذیه AC.....
۲۴۹	۹-۵ نیروی حرکه القا شده در سیم پیچ یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۲	۱۰-۵ معادله دینامیکی یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۶	۱۰-۵ تعادل پایدار و ناپایدار در یک مبدل الکترومکانیکی.....
۲۵۹	۱۱-۵ چند مثال حل شده تکمیلی.....
۲۷۱	<b>مسائل فصل ۵.....</b>

۲۷۹	فصل ۶: مبدل‌های الکترومکانیکی چندتحریکه
۲۷۹	مقدمه
۲۸۰	۶-۱ تحلیل مبدل‌های چندتحریکه
۲۸۰	۶-۱-۱ تعادل انرژی در سیستم‌های چندتحریکه
۲۸۱	۶-۲-۱ محاسبه نیرو و گشتاور
۲۸۲	۶-۳-۱ محاسبه انرژی در یک سیستم چندتحریکه
۲۸۶	۶-۴-۱ معادله انرژی در یک سیستم دوتحریکه با مدار مغناطیسی خطی
۲۸۶	۶-۵-۱ معادله نیرو و گشتاور در یک مبدل دوتحریکه با مدار مغناطیسی خطی
۲۸۸	۶-۲-۱ استفاده ازتابع کوانرژی برای محاسبه نیرو و گشتاور
۲۸۹	۶-۲-۲ محاسبه تابع کوانرژی
۲۹۱	۶-۲-۳ بررسی یک سیستم چندتحریکه با مدار مغناطیسی خطی با استفاده ازتابع کوانرژی
۲۹۳	۶-۳ تحلیل مبدل الکترومکانیکی با تغییر مکان زاویه‌ای
۲۹۷	۶-۳-۱ مفاهیم گشتاور رلوکتانسی و تقابلی
۳۰۰	۶-۳-۲ بررسی رفتار مبدل دوتحریکه با تغییر مکان زاویه‌ای با تحریک DC
۳۰۹	۶-۳-۳ بررسی اثر ساختار هندسی مبدل بر روی مؤلفه‌های گشتاور
۳۱۲	۶-۳-۴ بررسی رفتار مبدل با تحریک متغیر با زمان
۳۱۴	۶-مسائل فصل
۳۱۸	نمونه سوالات تستی چهارگزینه‌ای
۳۴۶	کلید سوالات تستی چهارگزینه‌ای
۳۴۷	ضمیمه الف: پاسخ دینامیکی سیستم جرم-فنر-دمپر به یک ورودی متغیر با زمان
۳۴۷	مقدمه
۳۴۷	الف-۱ سیستم مکانیکی جرم-فنر-دمپر با یک درجه آزادی
۳۵۰	الف-۱-۱ پاسخ عمومی سیستم
۳۵۲	الف-۱-۲ پاسخ خصوصی سیستم
۳۵۸	الف-۲ تعریف تکانه یا اندازه حرکت
۳۶۱	مراجع
۳۶۳	واژه‌نامه
۳۶۵	فهرست الفبایی

## لیست نمایه‌ها

نام نمایه	نمایه	نام کمیت	واحد
اندوكسیون یا چگالی شار	$B$	تسلا یا ویر بر مترمربع	$T$ or $Wb/m^2$
چگالی شار در قاصله هوائی	$B_g$		
چگالی شار در قاصله هسته	$B_c$		
مقدار متوسط چگالی شار	$B_{av}$		
مقدار پیک چگالی شار	$B_m$		
نیروی الکترومغناطیسی میدان	$f_e$	نیوتون	$N$
مقدار متوسط نیرو	$F_{av}$		
شدت میدان مغناطیسی	$H$	آمپر بر متر	$A/m$
شدت میدان در قاصله هوائی	$H_g$		
شدت میدان در قاصله هسته	$H_c$		
ضریب انباشتگی	$k_s$	بدون واحد	---
اندوكتانس	$L$	هانری	$H$
اندوكتانس تفاضلی	$L_{diff}$		
اندوكتانس متقابل بین دو سیم پیچ $p$ و $q$	$L_{pq}$		
چگالی حجمی تلفات فوکو	$P_e$	وات بر مترمکعب	$W/m^3$
چگالی حجمی تلفات هیسترزیس	$P_h$		
گشتاور الکترومغناطیسی میدان	$T_e$	نیوتون-متر	$Nm$
نیروی محرکه مغناطیسی	$\mathcal{F}$	آمپر دور	AT or At

		رلوکتانس	$\mathcal{R}$
		رلوکتانس قاصله هوائی	$\mathcal{R}_g$
		رلوکتانس هسته	$\mathcal{R}_c$
$J$	ژول	انرژی ذخیره شده در میدان	$W_f$
		کوانرژی	$W_c$
$J/m^3$	ژول بر مترمکعب	چگالی حجمی انرژی	$w_f$
		چگالی حجمی کوانرژی	$w_c$
$m$	متر	تغییر مکان خطی	$x$
$m/H$	متر بر هانری	سوسپیتیبیلیته یا پذیرفتاری	$\chi$
$Wb$	وبر	شار نشتی	$\varphi_l$
$Wb-T$	وبر-دور	شار پیوندی	$\lambda$
$H/m$	هانری بر متر	نفوذپذیری، یا ضریب نفوذ مغناطیسی	$\mu$
		نفوذپذیری خلا	$\mu_0$
---	بدون واحد	نفوذپذیری نسبی	$\mu_r$
Rad	رادیان	تغییر مکان زاویه‌ای	$\theta_m$