

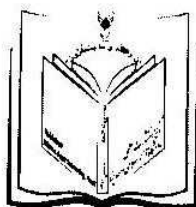
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مدلسازی و شبیه‌سازی دینامیکی ماشین‌های الکتریکی در فضای حقیقی

تألیف:

دکتر حمیدرضا اکبری

(عضو هیأت علمی و استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورد)



۱۳۹۶

«الف»

سرشناسه	: اکبری، حمیدرضا، ۱۳۹۵.
عنوان و نام پدیدآور	: مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی ماشین های الکتریکی در فضای حقیقی / حمیدرضا اکبری.
مشخصات نشر	: یزد: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۳۲۳ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۴۰۰۰۰۰ ریال: ۶-۴۶۳۵-۱۰-۹۶۴-۹۷۸.
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا.
یادداشت	: عنوان دیگر: مدل سازی و شبیه سازی ماشین های الکتریکی در فضای حقیقی.
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۳۱۶-۳۲۳.
عنوان دیگر	: مدل سازی و شبیه سازی ماشین های الکتریکی در فضای حقیقی.
موضوع	: ماشین آلات برقی -- الگوهای ریاضی.
موضوع	: Electric machinery -- Mathematical models
شناسه افزوده	: دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۴ م ۴۷ الف / TK۲۱۸۹
رده بندی دیویی	: ۴۲ ۶۲۱/۳
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۶۳۵
شماره ثبت کتاب	: ۶۳۰۰۰



مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی ماشین های الکتریکی در فضای حقیقی

نویسنده	: دکتر حمیدرضا اکبری
ناشر	: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی یزد
ناظر چاپ	: حمید صادقی
ویراستار ادبی	: فاطمه نهاری یزدی
نوبت چاپ	: اول ۱۳۹۶
شمارگان	: ۲۰۰۰ نسخه
طرح جلد	: سیدابوالفضل میرخلیلی
صفحه آرای	: محمدمهدی صادقی نژاد
قیمت	: ۴۰۰۰۰۰ ریال
شابک	: ۶-۴۶۳۵-۱۰-۹۶۴-۹۷۸
ISBN: 978-964-10-4635-6	

انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

E-mail: entesharat_elmi@iauyazd.ac.ir

یزد- صفاییه- دانشگاه آزاد اسلامی- انتشارات ۳۱۸۷۲۲۸۰-۳۸۲۱۴۸۱۳-۳۵

حق چاپ برای دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد محفوظ است.

تلفن مرکز پخش: ۳۱۸۷۲۲۸۰-۳۸۲۱۴۸۱۳-۳۵

پیشگفتار

یکی از روش‌های کارآمد مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین‌های الکتریکی در شرایط مختلف خطای ماشین، روش تابع سیم‌پیچ است. در این روش، ماشین در فضای حقیقی مدل‌سازی می‌شود و مبنای آن محاسبه اندوکتانس‌های ماشین و استفاده از آن‌ها در تشکیل معادلات تزویج الکترومغناطیسی بین رتور و استاتور است. با توجه به این که در روش تابع سیم‌پیچ، هیچ محدودیتی در نحوه سیم‌بندی استاتور و رتور وجود ندارد، تمام هارمونیک‌های فضایی حاصل از توزیع سیم‌بندی و شیارها در مدل‌سازی وارد می‌شود. با استفاده از تئوری تابع سیم‌پیچ، تابع واقعی فاصله هوایی موثر حاصل از پدیده‌های نایک‌انگیز مانند گشایش فاصله هوایی و تابع واقعی نیروی محرکه مغناطیسی در مدل‌سازی ماشین وارد می‌شود. بنابراین، هارمونیک‌های فضایی حقیقی حاصل از توزیع نیروی محرکه مغناطیسی و رزونانس‌های شیار در سیگنال‌های خروجی ظاهر می‌شود. در نتیجه، هر گونه عدم تقارن در ساختار چهارپایه می‌توان مدل کرد.

روش‌های دیگری نیز برای تحلیل ماشین‌های الکتریکی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر تبدیلات ریاضی است. این روش‌ها قادر به تحلیل دقیق ماشین‌های الکتریکی به ویژه در شرایط خلاء نیستند. در مقابل، روش‌های تحلیل میدان مغناطیسی مانند روش اجزاء محدود، رفتار غیر خطی میدان مغناطیسی ماشین و اثرات شیارهای استاتور و رتور را به خوبی مدل می‌کنند. این روش‌ها با داشتن دقت قابل قبول، دارای سرعت بسیار کم و حافظه مورد نیاز بسیار بالایی هستند و به راحتی نمی‌توان از آن‌ها در تحلیل حالات گذرا استفاده کرد. یکی دیگر از روش‌های تحلیل ماشین‌های الکتریکی، روش مدار معادل مغناطیسی است. در این روش برای تمامی قسمت‌های ماشین مدار معادل مغناطیسی ارائه می‌شود. تعداد اجزای به کار رفته در این روش به مراتب کمتر از روش اجزاء محدود است. در نتیجه دقت و حجم محاسبات کمتر است.

این کتاب به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین‌های الکتریکی در شرایط مختلف خطا با استفاده از روش تابع سیم‌پیچ می‌پردازد. به منظور مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی در فضای حقیقی، احتیاج به اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی و متقابل کلیه مدارهای ماشین داریم. به این منظور، روابط محاسبه اندوکتانس‌های ماشین نسبت به موقعیت رتور ارائه می‌شود. در ادامه، نحوه مدل‌سازی و شبیه‌سازی خطاهای شکستگی میله رتور و انواع خروج از مرکزیت در ماشین‌های القایی سه فاز ارائه می‌شود. به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی ماشین‌های سنکرون قطب برجسته، روابط تحلیلی برای محاسبه اندوکتانس‌های

ماشین سنکرون قطب برجسته ارائه می‌شود. روابط ارائه شده به راحتی قابل استفاده برای ماشین‌های سنکرون قطب صاف و ماشین‌های القایی نیز می‌باشد. استفاده از روش تابع سیم پیچ در تحلیل ماشین در شرایط کاری مختلف نظیر انواع خطاهای الکتریکی و مکانیکی و حالات گذرا، بسیار مفید خواهد بود. می‌توان از این روش در کاربردهای مختلفی نظیر طراحی سیستم‌های محرکه، تخمین سرعت، تشخیص خطا و سیستم‌های حفاظتی استفاده کرد.

اولین فصل از این کتاب به محاسبه اندوکتانس‌های ماشین به روش تابع سیم پیچ با ارائه مدل مدارهای مزدوج چندگانه جهت شبیه‌سازی دینامیکی ماشین‌های الکتریکی در شرایط مختلف می‌پردازد. در فصل دوم به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی ماشین القایی قفس سنجابی پرداخته می‌شود. ابتدا معادلات دیفرانسیل الکتریکی و مکانیکی توصیف‌کننده رفتار ماشین، نحوه محاسبه و بکارگیری توابع مقاومت و اندوکتانس و چگونگی تعیین تابع نیروی محرکه مغناطیسی، تابع فاصله هوایی مؤثر بالای شیارهای استاتور و رتور در ماشین نمونه، بیان می‌گردند. سپس، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین نمونه با در نظر گرفتن شیارهای استاتور و رتور و توربیلن‌های رتور انجام می‌گردد. خطای شکستگی میله‌های رتور و تاثیر جریان‌های بین میله‌ای در ماشین‌های القایی در فصل سوم بررسی می‌شود. در ادامه در فصل چهارم، روش منظور نمودن خطاهای شکسته در معادلات ماشین ارائه گشته، توسط آن شبیه‌سازی شرایط خطای رتور و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود. انواع خروج از مرکزیت در ماشین‌های الکتریکی، اثرات این نوع خطا بر رفتار ماشین و روش‌های تشخیص آن در فصل پنجم بررسی می‌شود. مدل‌سازی شبیه‌سازی دینامیکی انواع خروج از مرکزیت و انواع پدیده‌هایی که باعث عدم تقارن در راستای طول ماشین القایی می‌شوند به ترتیب در فصل‌های ششم و هفتم بررسی می‌شوند. در فصل هشتم نیز مدل‌سازی انواع خروج از مرکزیت در ماشین‌های سنکرون قطب برجسته ارائه می‌شود.

در پایان، از دکتر جعفر میلی منفرد، استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکتر همایون مشگین‌کلک به خاطر در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاه تحقیقاتی، کمال تشکر را دارم. هر چند مطالب کتاب بارها ویرایش شده است، اما خالی از ایراد نیست. از خوانندگان محترم کتاب تقاضا دارم اشکالات احتمالی کتاب و پیشنهادهای ارزنده خود را از طریق ایمیل زیر برای مولف کتاب ارسال نمایند.

دکتر حمیدرضا اکبری

h.akbari@iauyazd.ac.ir

فهرست مطالب

فصل اول: محاسبه اندوکتانس‌های ماشین به روش تابع سیم پیچ.....	۳
۱-۱. مقدمه.....	۳
۲-۱. روش تابع سیم پیچ اولیه.....	۵
۱-۲-۱. تابع دور و تابع سیم پیچ.....	۵
۲-۲-۱. محاسبه اندوکتانس به روش تابع سیم پیچ با فرض فاصله هوایی	
یکنواخت.....	۱۰
۳-۱. متغیر اندوکتانس با فرض فاصله هوایی نایکنواخت.....	۱۴
۴-۱. احتساب عدد تقارن در راستای طولی.....	۱۹
۱-۴-۱. تعیین نیرو محرکه مغناطیسی.....	۱۹
۲-۴-۱. روابط اندوکتانس با احتساب عدد تقارن طولی.....	۲۳
فصل دوم: مدل مدارهای متغیر و مدارهای متغیر.....	۲۷
۱-۲. مقدمه.....	۲۷
۲-۲. معادلات مدل مدارهای متغیر چند تانه.....	۲۸
۳-۲. به کارگیری معادلات به منظور شبیه سازی.....	۲۹
۴-۲. به دست آوردن ماتریس‌های مدل.....	۳۱
۵-۲. معادلات ماشین بر اساس ولتاژ خط.....	۳۵
۶-۲. اثر دندانه ها و شیارها.....	۳۷
۷-۲. نیروی محرکه مغناطیسی.....	۴۱
۸-۲. تورب میله های رتور.....	۴۴
۹-۲. شبیه سازی دینامیکی موتور القایی سالم.....	۴۶
۱۰-۲. محاسبه چگالی فوران مغناطیسی شکاف هوایی.....	۵۲
فصل سوم: خطای شکستگی میله‌ها و حلقه انتهایی رتور.....	۵۷
۱-۳. مقدمه.....	۵۷
۲-۳. علل ایجاد شکستگی میله رتور.....	۵۹
۳-۳. مولفه‌های فرکانسی جریان موتور در شرایط خطای میله شکسته.....	۶۰
۴-۳. جریان‌های بین میله‌ای.....	۶۲

۶۳	۱-۴-۳. اندازه امیدانس بین میله‌ای
۶۳	۲-۴-۳. تاثیر جریانهای بین میله‌ای بر شار محوری و جریان میله‌ها
۶۸	۳-۴-۳. توزیع جریان بین میله‌ای در شرایط خطای میله شکسته
۷۴	۴-۴-۳. کاهش دامنه مولفه‌های فرکانسی خطا در اثر جریان بین میله‌ای
۷۶	۵-۴-۳. ایجاد نیروهای محوری در اثر جریان بین میله‌ای
۷۶	۱-۵-۴-۳. مولفه‌های فرکانسی نیروهای محوری
۸۱	۲-۵-۴-۳. طیف نیروی محوری
۸۷	فصل چهارم: مدل سازی و شبیه سازی خطای شکستگی میله‌ها
۸۷	۱-۴. مقدمه
۸۷	۲-۴. مدل سازی شکستگی میله‌ها
۹۱	۳-۴. شبیه سازی
۹۶	۴-۴. احتساب مقادیر تدریجی بین میله‌ای
۹۷	۱-۴-۴. مدل چند لایه سین
۹۸	۲-۴-۴. محاسبه ماتریسهای مدل مدارهای مزدوج چندگانه
۱۰۲	۳-۴-۴. مدل سازی شکستگی میله با استفاده از مدل چند لایه
۱۰۵	۴-۴-۴. نتایج شبیه سازی
۱۰۹	۵-۴. نتایج آزمایشگاهی
۱۱۳	۶-۴. نتیجه گیری
۱۱۷	فصل پنجم: انواع خروج از مرکزیت در ماشین های الکتریکی
۱۱۷	۱-۵. مقدمه
۱۱۸	۲-۵. تعریف خروج از مرکزیت رتور
۱۲۰	۳-۵. عوامل ایجاد خروج از مرکزیت در ماشینهای الکتریکی
۱۲۱	۴-۵. خطای بلبرینگها
۱۲۵	۵-۵. اثرات خروج از مرکزیت بر عملکرد ماشین
	فصل ششم: مدل سازی و شبیه سازی انواع خروج از مرکزیت در ماشین های
۱۳۳	القایی
۱۳۳	۱-۶. مقدمه
۱۳۳	۲-۶. مدل سازی انواع خروج از مرکزیت

۱۳۴.....	۱-۲-۶. خروج از مرکزیت ایستا.....
۱۳۵.....	۲-۲-۶. خروج از مرکزیت پویا.....
۱۳۷.....	۳-۲-۶. خروج از مرکزیت مرکب.....
۱۴۰.....	۳-۶. محاسبه اندوکتانس‌های ماشین در شرایط انواع خروج از مرکزیت.....
۱۴۷.....	فصل هفتم: مدل‌سازی و شبیه‌سازی انواع عدم تقارن طولی.....
۱۴۷.....	۱-۷. مقدمه.....
۱۴۷.....	۲-۷. انواع خروج از مرکزیت مورب محور رتور.....
۱۴۸.....	۲-۷. خروج از مرکزیت مورب ایستا.....
۱۵۴.....	۲-۱-۷. خروج از مرکزیت مورب پویا.....
۱۵۵.....	۳-۲-۷. خروج از مرکزیت مورب مرکب.....
۱۵۹.....	۳-۷. انحنای محور رتور.....
۱۵۹.....	۴-۷. محاسبه اندوکتانس‌های ماشین.....
۱۶۵.....	۵-۷. شبیه‌سازی دینامیکی.....
۱۷۱.....	۶-۷. نتایج آزمایشگاهی.....
۱۷۷.....	فصل هشتم: مدل‌سازی ماشین‌های سنگین از قطب برجسته در شرایط خروج از مرکزیت.....
۱۷۷.....	۱-۸. مقدمه.....
۱۷۸.....	۲-۸. محاسبه اندوکتانس‌های ماشین سالم.....
۱۷۸.....	۱-۲-۸. اندوکتانس‌های استاتور.....
۱۸۲.....	۲-۲-۸. اندوکتانس‌های رتور.....
۱۸۶.....	۳-۲-۸. اندوکتانس‌های متقابل بین رتور و استاتور.....
۱۸۸.....	۳-۸. مدل‌سازی انواع خطای خروج از مرکزیت در ماشین سنکرون قطب برجسته.....
۱۸۸.....	۱-۳-۸. خطای خروج از مرکز ایستا.....
۱۸۹.....	۲-۳-۸. خطای خروج از مرکزیت پویا.....
۱۹۰.....	۳-۳-۸. خطای خروج از مرکز مرکب.....
۱۹۲.....	۴-۸. محاسبه اندوکتانس‌ها.....
۱۹۲.....	۱-۴-۸. اندوکتانس‌های استاتور.....
۱۹۹.....	۲-۴-۸. اندوکتانس‌های رتور.....

۲۰۵.....	۸-۴-۳. اندوکتانس های متقابل بین رتور و استاتور.....
۲۰۹.....	پیوست ها.....
۲۱۱.....	پیوست ۱.....
۲۱۱.....	مشخصات موتور القایی قفس سنجایی.....
۲۱۲.....	پیوست ۲.....
۲۱۲.....	الف: آرایش سیم بندی استاتور ماشین سنکرون قطب برجسته.....
۲۱۲.....	ب: آرایش سیم بندی رتور ماشین سنکرون قطب برجسته.....
۲۱۲.....	ج: مشخصات ماشین سنکرون قطب برجسته.....
۲۱۴.....	مراجع.....