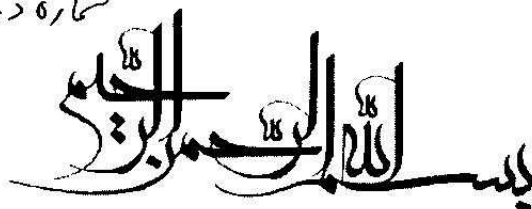


شماره درخواست

۵۷۵۴۷۲



محورک‌های الکتریکی پیشرفته

آنالیز، کنسراس و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK®

تألیف:

دکتر جواد شکرالهی

ترجمه:

دکتر جواد شکرالهی

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)

مهندس محمد محمدی

دانشجوی دکتری مهندسی برق - قدرت دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)

تابستان ۱۳۹۷

سرشناسه
عنوان و نام پدیدآور

مohan, Ned ند، موهان :

: محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: آنالیز، کنترل و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار
MATLAB/SIMULINK®/تألیف ند موهان

مشخصات نشر
مشخصات ظاهری
شابک

ترجمه جواد شکرالهی مغانی، محمد محمدی
تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، سال ۱۳۹۶
: ۱۹۳ ص: مصور، جدول، نمودار
: 978-964-463-709-4

وضعیت فهرست‌نویسی

فیفا :

Advanced electric drives: Analysis, control, and modeling usin..., 2014

یادداشت

modeling usin..., 2014

MATLAB، متلب :

موضوع

SIMULINK، سیمولینک :

موضوع

: محرکه‌های برقی -- شبیه‌سازی کامپیوتری

موضوع

Electric driving--Computer simulation

: روبروهای برقی -- الگوهای ریاضی

موضوع

Electric driving--Mathematical models

: محمدی محمد، ۱۳۶۱

شناسه افزوده

: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

شناسه افزوده

TK ۰۵۸ م ۳۰۳۹۶ پ :

رده‌بندی کنگره

۶۲/۴۶۰۲۸۵۵۳ :

رده‌بندی دیویی

۵۰۶۳۸۹۸ :

شماره کتابشناسی ملی

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۹۶/۹/۱۹ شورای چاپ و
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسیده است.



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

: محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: آنالیز، کنترل و مدل‌سازی با استفاده از

نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK®

عنوان کتاب

: ند موهان

تألیف

: دکتر جواد شکرالهی مغانی - مهندس محمد محمدی

ترجمه

: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

ناشر

: تابستان ۱۳۹۷

چاپ اول

: ۱۰۰ نسخه

تیراژ

: ۱۵۰۰۰ تومان

قیمت

ISBN: 978-964-463-709-4

۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۷۰۹-۴ :

شابک

آدرس مرکز پخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸

وبسایت: <http://publication.aut.ac.ir>

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

پیش‌گفتار مترجمان

سیستم‌های الکترومکانیکی فراوانی وجود دارند که کنترل دقیق گشتاور، سرعت و موقعیت در آنها بسیار مهم است. امروزه این گونه کاربردهای محرکه‌های الکتریکی به‌وفور در صنعت و نیز در زندگی روزمره، مانند آسانسورها، به چشم می‌خورند. در این کاربردها، روش‌های متداول کنترل محرکه‌های الکتریکی، مثل روش V/f ، دقت کنترل را تضمین نمی‌کنند. در محرکه‌های الکتریکی پیشرفته، با استفاده از کنترل برداری و روش‌های مختلف دیگر، تلاش می‌شود دقت عملکرد این محرکه‌ها بهبود یابد. علی‌رغم وجود منابع فراوان در زمینه کنترل برداری محرکه‌های الکتریکی، پیچیدگی مباحث ریاضیاتی باعث شده درک فیزیکی محرکه‌های الکتریکی پیشرفته دشوار باشد.

در کتاب حاضر، تألیف پرانسون، استاد دانشگاه مینه‌سوتا، تلاش شده مباحث کنترل برداری به‌صورت مفهومی با استفاده از مثال‌های شبیه‌سازی‌شده تشریح شوند. ارتباط روابط ریاضی با فیزیک محرکه‌ها، تشریح آنها به کمک مفاهیم باعث می‌شود درک کنترل برداری برای خواننده آسان شود. همچنین با استفاده از مثال‌های شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار MATLAB و فایل‌های شبیه‌سازی‌شده، خواننده می‌تواند موضوع بحث‌شده را بهتر فرا گیرد. جهت راحتی خواننده، فایل‌های شبیه‌سازی در صفحه اینترنتی کتاب واقع در وبسایت انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر به آدرس زیر قرار داده شده است:

<http://publication.amirkbir/fa/book/show/29025>

مطالعه این کتاب می‌تواند برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی مهندسی برق- قدرت و مهندسان شاغل در زمینه محرکه‌های الکتریکی و ماشین‌های الکتریکی مفید باشد و حجم مطالب این کتاب نیز به گونه‌ای است که می‌تواند در قالب یک واحد درسی دوره تحصیلات تکمیلی ارایه شود.

ترجمه این کتاب مرهون تعامل علمی با اساتید گروه مهندسی برق- قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) است که از ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. نهایت تلاش مترجمان آن بوده که در عین حفظ محتوای علمی اثر، ترجمه‌ای سلیس ارایه شود؛ با این حال هیچ اثری خالی از اشکال نیست و از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود نظرات

خود را در این باره با ما در میان بگذارند.

در نهایت از مجموعه انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، که با حسن همکاری خود در نشر کتاب، فرآیند چاپ را سرعت بخشید، صمیمانه تشکر می‌شود.

دکتر جواد شکرالهی مغانی

دانشیار دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمد محمدی

دانشجوی دکتری مهندسی برق - قدرت

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

www.ketab.ir

پاراگراف ابتدایی نسخه اول این کتاب در سال ۲۰۰۱ چنین بود:

چرا باید یک کتاب را برای درسی بنویسم که تقریباً در برنامه تحصیلی بسیاری از دانشگاه‌ها وجود ندارد؟ تنها پاسخ، امید به احیای این درس (که در دانشگاه مینه‌سوتا توان انجام آن را داریم) به‌خاطر فرصت‌های عظیم آینده، شامل کاربردهای پزشکی از جمله ساخت پمپ‌های قلب، بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله باد، خودکارسازی کارخانه‌ها با استفاده از رباتیک و حمل‌ونقل پاک در قالب خودروهای هیبریدی-الکتریکی است که در انتظار ما هستند.

حال، بیش از یک دهه گذشته است و متأسفانه شرایط تغییر نکرده‌اند و امید است که در زمان چاپ نسخه‌های بعدی کتاب طی چند سال آینده تغییر کنند.

این کتاب دنبال بحث سین‌ها و محرکه‌های الکتریکی در کتاب اخیر من، *Electric Machines and Drives: A First Course*، است که انتشارات وایلی^۱ آن را منتشر کرده است.

در این کتاب سعی کرده‌ام تحویل مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی را تا حد امکان ساده و به‌اختصار بیان کنم تا بتوان به‌راستی آن را در طول یک نیم‌سال دوره تحصیلات تکمیلی آرایه داد. بدین منظور یک روش دوسره‌ای را برگزیده‌ام: ابتدا آرایه یک تصویر فیزیکی برای شرحی ساده از طرح، بدون بیان هر گونه رابطه ریاضی، و سپس تایید آن به‌صورت ریاضیاتی.

تصویر فیزیکی گفته‌شده در بالا نیازمند جزئیات است. اکثر کتاب‌ها مقالات در این زمینه تبدیل dq مقادیر فازهای a ، b و c را به‌صورت کاملاً ریاضیاتی بیان و از دسویساری و ربط دادن این تبدیلات به مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌ها، هر چند به‌صورت فرضی، صرف‌نظر کرده‌اند. به همین دلیل، ما مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌های فرضی dq را در راستای مجموعه‌ای از محورهای عمود بر هم مصور کرده‌ایم و سپس ولتاژ و جریان آنها را به مقادیر فازهای a ، b و c نسبت داده‌ایم.

برای توصیف تمام موضوعات این کتاب، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای ضرورت دارند. به این منظور، نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK، به دلایلی که در ادامه ذکر می‌شوند، انتخاب شده است: نسخه دانشجویی این نرم‌افزار، که برای دستیابی به اهداف موردنظر مناسب و نیز

مقرون به صرفه است، دردسترس است. از طرف دیگر، در زمانی بسیار کم می توان طرز استفاده از آن را به خوبی یاد گرفت. همچنین این نرم افزار ساخت یک کنترل کننده زمان- واقعی برای محرکه ها را در آزمایشگاه، برای آزمایش های دانشجویی، بسیار ساده می کند. چنین آزمایشگاهی، که در آن از ماشین های ۴۲ ولت استفاده می شود، با استفاده از کنترل دیجیتال ساخته شده و دانشگاه مینه سوتا آن را توسعه داده است. فایل های MATLAB و SIMULINK استفاده شده در مثال های این کتاب در ضمیمه همراه کتاب آورده شده اند.

در پایان، باید متذکر شد که هدف این کتاب پوشش دادن نظریه کنترل و الکترونیک قدرت نیست؛ بلکه این کتاب برای تحلیل ماشین های الکتریکی به شیوه ای که بتوان آنها را به مبدل های شناخته شده الکترونیک قدرت متصل و با استفاده از هر طرح کنترلی آنها را کنترل کرد نوشته شده است. ساده ترین نوع کنترل کنترل تناسبی انتگرالی است که در این کتاب از آن استفاده شده است.

ند موهان

دانشگاه مینه سوتا^۱

نشانه‌ها..... ش

فصل اول..... ۱

کاربردها: کنترل سرعت و گشتاور..... ۱

- ۱-۱- تاریخچه..... ۱
- ۲-۱- پیش‌زمینه..... ۲
- ۳-۱- انواع، محرک‌های بحث‌شده و نرم‌افزار شبیه‌سازی..... ۲
- ۴-۱- ساختار کتاب..... ۳
- ۵-۱- موتور القایی - مرد آ: مایش..... ۳
- ۶-۱- خلاصه فصل..... ۴
- مراجع..... ۴
- مسئله‌ها..... ۵

فصل دوم..... ۷

معادلات ماشین‌های القایی بر حسب کمیت‌های فاز، با استفاده از بردارهای

فضایی..... ۷

- ۱-۲- مقدمه..... ۷
- ۲-۲- سیم‌پیچ‌های استاتور با توزیع سینوسی..... ۸
- ۱-۲-۲- سیم‌پیچ‌های سه‌فاز استاتور با توزیع سینوسی..... ۹
- ۳-۲- اندوکتانس استاتور (با روتور مداربازشده)..... ۱۰
- ۱-۳-۲- اندوکتانس مغناطیس‌کننده استاتور تک‌فاز $L_{m,1-phase}$ ۱۰
- ۲-۳-۲- اندوکتانس متقابل استاتور L_{mutual} ۱۲
- ۳-۳-۲- اندوکتانس مغناطیس‌کننده برفاز L_m ۱۲
- ۴-۳-۲- اندوکتانس استاتور L_s ۱۳
- ۴-۲- سیم‌پیچ‌های معادل در یک روتور قفس سنجابی..... ۱۳
- ۱-۴-۲- اندوکتانس‌های سیم‌پیچ روتور (استاتور مدارباز)..... ۱۴
- ۵-۲- اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های فاز استاتور و روتور..... ۱۵

۶-۲	مروری بر بردارهای فضایی	۱۵
۶-۲-۱	رابطه فازورها و بردارهای فضایی در حالت ماندگار سینوسی	۱۷
۷-۲	شار پیوندی	۱۸
۷-۲-۱	شار پیوندی استاتور (روتور مدار باز)	۱۸
۷-۲-۲	شار پیوندی روتور (استاتور مدار باز)	۱۹
۷-۲-۳	شارهای پیوندی استاتور و روتور (وجود جریان‌های هم‌زمان در استاتور و روتور)	۲۰
۸-۲	معادلات ولتاژ استاتور و روتور برحسب بردارهای فضایی	۲۱
۹-۲	بستر سازی برای تحلیل سیم‌پیچ dq	۲۱
۱۰-۲	خلاصه	۲۴
	مراجع	۲۴
	مسئله‌ها	۲۵
۲۷	فصل سوم	
۲۷	تحلیل دینامیکی ماشین القایر بر سیم‌پیچ‌های dq	
۱-۳	مقدمه	۲۷
۲-۳	نمایش سیم‌پیچ dq	۲۷
۲-۳-۱	نمایش سیم‌پیچ dq استاتور	۲۸
۲-۳-۲	سیم‌پیچ‌های dq روتور (در راستای محورهای dq مشابه با استاتور)	۳۰
۲-۳-۳	اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های dq استاتور و روتور	۳۱
۳-۳	روابط ریاضیاتی سیم‌پیچ‌های dq (در سرعت اختلاص)	۳۲
۱-۳-۳	ارتباط متغیرهای سیم‌پیچ dq به متغیرهای سیم‌پیچ ab	۳۴
۲-۳-۳	شار پیوندی سیم‌پیچ‌های dq برحسب جریان آنها	۳۵
۳-۳-۳	معادله‌های ولتاژ سیم‌پیچ dq	۳۵
	سیم‌پیچ‌های استاتور	۳۵
۳-۳-۴	به دست آوردن شارها و جریان‌ها با ورودی‌های ولتاژ	۳۹
۴-۳	انتخاب سرعت سیم‌پیچ dq , ω_d	۴۰
۵-۳	گشتاور الکترومغناطیسی	۴۱
۱-۵-۳	گشتاور در سیم‌پیچ محور d روتور	۴۱
۲-۵-۳	گشتاور در سیم‌پیچ محور q روتور	۴۲
۳-۵-۳	گشتاور الکترومغناطیسی خالص T_{em} در روتور	۴۳

۴۳	۳-۶- الکترو دینامیک
۴۴	۳-۷- مدارهای معادل محور d و q
	۳-۸- رابطه سیم پیچ های dq و مدار معادل فازوری در حالت ماندگار سینوسی
۴۵	متعادل
۴۶	۳-۹- شبیه سازی رایانه ای
۴۷	۳-۹-۱- محاسبه شرایط اولیه
۵۴	۳-۱۰- خلاصه
۵۴	مراجع
۵۴	مسئله ها

فصل چهارم

کنترل برداری محرکه های موتور القایی: بررسی کیفی

۵۷	۴-۱- مقدمه
۵۸	۴-۲- عملکرد همسان با محرکه موتور DC و موتور DC بدون جاروبک
۵۹	۴-۲-۱- کنترل برداری محرکه ای موتور القایی
۶۰	۴-۳- شباهت به ترانسفورمر تحریک شده با جریان و با ثانویه اتصال کوتاه شده
۶۳	۴-۳-۱- استفاده از مدار معادل ترانسفورمر
۶۴	۴-۴- نمایش سیم پیچ های محور dq
۶۵	۴-۵- کنترل برداری با محور d هم راستا با شار روتور
۶۵	۴-۵-۱- ایجاد شار اولیه قبل از $t = 0$
۶۶	۴-۵-۲- تغییر پله ای در گشتاور در زمان $t = 0^+$
۷۰	۴-۶- کنترل گشتاور، سرعت و موقعیت
۷۰	۴-۶-۱- جریان مرجع $i_{sq}^*(t)$
۷۱	۴-۶-۲- جریان مرجع $i_{sd}^*(t)$
۷۱	۴-۶-۳- تبدیل و عکس تبدیل جریان های استاتور
۷۲	۴-۶-۴- مدل تخمینی موتور برای کنترل برداری
۷۳	۴-۷- واحد پردازش توان (PPU)
۷۴	۴-۸- خلاصه
۷۴	مراجع
۷۴	مسئله ها

فصل پنجم ۷۷

تشریح ریاضیاتی کنترل برداری ماشین‌های القایی ۷۷

۷۸ ۱-۵- مدل موتور با محور d هم‌راستا با محور شار پیوندی روتور λ_r

۷۹ ۱-۱-۵- محاسبه ω_{dA}

۷۹ ۲-۱-۵- محاسبه T_{em}

۸۰ ۳-۱-۵- دینامیک شار پیوندی محور d روتور

۸۰ ۴-۱-۵- مدل موتور

۸۲ ۲-۵- کنترل برداری

۸۳ ۱-۲-۵- حلقه‌های کنترل موقعیت و سرعت

۸۶ ۲-۲-۵- اندازی ولج

۸۶ ۳-۲-۵- محاسبه ولتاژهای اعمالی به استاتور

۸۷ ۴-۲-۵- طراحی کنترلرهای PI

۹۰ ۳-۵- خلاصه

۹۱ مراجع

۹۱ مسئله‌ها

فصل ششم ۹۳

اثر بدتنظیمی در کنترل برداری موتور القایی ۹۳

۹۳ ۱-۶- اثر بدتنظیمی ناشی از ثابت زمانی τ_r نادرست

۹۸ ۲-۶- تحلیل حالت ماندگار

۹۹ ۱-۲-۶- i_{sd}/i_{sd}^* حالت ماندگار

۹۹ ۲-۲-۶- i_{sq}/i_{sq}^* حالت ماندگار

۱۰۰ ۳-۲-۶- θ_{err} حالت ماندگار

۱۰۱ ۴-۲-۶- T_{em}/T_{em}^* حالت ماندگار

۱۰۲ ۳-۶- خلاصه

۱۰۲ مراجع

۱۰۲ مسئله‌ها

فصل هفتم ۱۰۳

تحلیل دینامیکی ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه و کنترل برداری آنها ۱۰۳

۱-۷- توضیح عملکرد DFIG ۱۰۴

۲-۷- تحلیل دینامیکی DFIG ۱۱۰

۳-۷- کنترل برداری DFIG ۱۱۰

۴-۷- خلاصه ۱۱۱

مراجع ۱۱۱

مسئله‌ها ۱۱۱

فصل هشتم ۱۱۳

اینورترهای مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SV-PWM) ۱۱۳

۱-۸- مقدمه ۱۱۳

۲-۸- بیان بردار فضایی ولتاژ استاتور v_{sa} ۱۱۳

۳-۸- شبیه‌سازی رایتری اینورتر SV-PWM ۱۱۷

۴-۸- محدودیت در دامنه ولتاژ بردار فضایی ولتاژ استاتور v_{sa} ۱۲۰

۵-۸- خلاصه ۱۲۲

مراجع ۱۲۲

مسئله‌ها ۱۲۲

فصل نهم ۱۲۳

کنترل مستقیم گشتاور (DTC) و عملکرد بدون حسگر دیجیتال محاسباتی موتور ۱۲۳

القایی ۱۲۳

۱-۹- مقدمه ۱۲۳

۲-۹- بازنگری سیستم ۱۲۳

۳-۹- اصول عملکرد DTC بدون حسگر دیجیتال ۱۲۴

۴-۹- محاسبه λ_r ، λ_s و T_{em} و ω_m ۱۲۵

۹-۴-۱- محاسبه شار استاتور λ_s ۱۲۵

۹-۴-۲- محاسبه شار روتور λ_r ۱۲۶

۹-۴-۳- محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی T_{em} ۱۲۷

۹-۴-۴- محاسبه سرعت روتور ω_m ۱۲۸

۱۲۹	۵-۹- محاسبه بردار فضایی ولتاژ.....
۱۳۲	۶-۹- کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از محور dq
۱۳۲	۷-۹- خلاصه.....
۱۳۲	مراجع.....
۱۳۲	مسئله‌ها.....

فصل دهم..... ۱۳۵

کنترل برداری محرکه‌های موتور سنکرون مغناطیس دائم..... ۱۳۵

۱۳۵	۱-۱۰- مقدمه.....
۱۳۵	۱-۱۰- تحلیل dm ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم (روتور استوانه‌ای).....
۱۳۶	۱-۲-۱۰- شارهای پیوندی.....
۱۳۶	۲-۲-۱۰- رمانتایسم پیم‌های dq استاتور.....
۱۳۷	۳-۲-۱۰- گشتاور الکترومغناطیسی.....
۱۳۷	۴-۲-۱۰- الکترو دینامیک.....
۱۳۷	۵-۲-۱۰- رابطه مدارهای dq مدارهای معادل فازوری در حالت ماندگار متعادل سینوسی.....
۱۳۷	۶-۲-۱۰- کنترل کننده دینامیکی بر مبنای d^+ برای محرکه‌های DC بدون جاروبک.....
۱۴۳	۳-۱۰- ماشین‌های سنکرون قطب برجسته.....
۱۴۳	۱-۳-۱۰- اندوکتانس‌ها.....
۱۴۴	۲-۳-۱۰- شارهای پیوندی.....
۱۴۴	۳-۳-۱۰- ولتاژهای سیم‌پیچی.....
۱۴۵	۴-۳-۱۰- گشتاور الکترومغناطیسی.....
۱۴۵	۵-۳-۱۰- مدارهای معادل با محور dq
۱۴۵	۶-۳-۱۰- دیاگرام بردار فضایی در حالت ماندگار.....
۱۴۷	۴-۱۰- خلاصه.....
۱۴۷	مراجع.....
۱۴۷	مسئله‌ها.....

فصل یازدهم..... ۱۴۹

محرکه‌های موتور سوییچ رلوکتانس (SRM) ۱۴۹

۱-۱۱- مقدمه ۱۴۹

۲-۱۱- موتور سوییچ رلوکتانس ۱۴۹

۱-۲-۱۱- گشتاور الکترومغناطیسی T_{em} ۱۵۲

۲-۲-۱۱- EMF القایی بازگشتی e_a ۱۵۳

۳-۱۱- شکل موج‌های لحظه‌ای ۱۵۴

۴-۱۱- نقش اشباع مغناطیسی ۱۵۶

۵-۱۱- واحد پردازش توان برای محرکه‌های SRM ۱۵۷

۶-۱۱- تبیین موقعیت روتور در عملکرد بدون حسگر دیجیتال ۱۵۷

۷-۱۱- کنترل در حالت موتوری ۱۵۸

۸-۱۱- بارش ۱۵۸

مراجع ۱۵۹

مسئله‌ها ۱۵۹

واژه‌نامه ۱۶۱

نمایه ۱۷۷