

محركه‌های الكتريكي پيشرفته
تحليل، كنترل و مدل‌سازی
با استفاده از MATLAB/Simulink

نویسنده:

ند موهان

مترجمان:

دکتر سید ابراهیم افجه‌ای

(هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی)

دکتر علیرضا سیادتان

(هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی)

نیاز دانش

Mohan, Ned

موهان، ند

سرشناسه

محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: تحلیل، کنترل و مدلسازی

عنوان و نام پدیدآور

(با استفاده از MATLAB/Simulink)

تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۴

مشخصات نشر

۱۶۰ ص، مصوره، جدول، نمودار

مشخصات ظاهری

978-600-7724-13-2

شابک

فیبای مختصر

وضعیت فهرستنویسی

فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: <http://opac.nlai.ir> قابل دسترسی است.

یادداشت

ADVANCED ELECTRIC DRIVES Analysis, Control,

یادداشت

and Modeling Using MATLAB/Simulink

افجه‌ای، سید ابراهیم، ۱۳۳۸، مترجم.

شناسه افزوده

سیادتان، علیرضا، ۱۳۵۷، مترجم.

شناسه افزوده

۳۸۲۹۸۹۴

شماره کتابشناسی ملی



نیاز دانش

محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: تحلیل، کنترل و مدلسازی

نام کتاب

(با استفاده از MATLAB/Simulink)

ند موهان

نویسنده

دکتر سید ابراهیم افجه‌ای (هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی)

مترجمان

دکتر علیرضا سیادتان (هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی)

حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس

نیاز دانش

مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ

واحد تولید انتشارات نیاز دانش

ناشر

اول - ۱۳۹۴

صفحه‌آرا

۵۰۰ نسخه

نوبت چاپ

۱۲۰۰۰۰ ریال

شمارگان

قیمت

ISBN:978-600-7724-13-2

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۳-۲

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

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۲۱

www.Niaz-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۲۱۰۶۷۰۹ - ۰۹۱۲

فهرست مطالب

فصل ۱ / کاربردها: کنترل سرعت و گشتاور.....	۹
۱-۱ تاریخچه.....	۹
۲-۱ پیش زمینه.....	۱۰
۳-۱ انواع درایوهای AC بحث شده و نرم افزار شبیه سازی.....	۱۰
۴-۱ ساختار این کتاب.....	۱۱
۵-۱ موتور القایی "لست".....	۱۱
۶-۱ خلاصه.....	۱۲
مراجع.....	۱۲
مسائل.....	۱۲
فصل ۲ / معادلات ماشین القایی در کمیت های فازی با کمک بردارهای فضایی.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۳
۲-۲ سیم پیچ های استاتور سینوسی توزیع شده.....	۱۴
۱-۲-۲ سیم پیچ های استاتور سینوسی توزیع شده ی سه فاز.....	۱۵
۳-۲ اندوکتانس های استاتور (روتور مدار باز).....	۱۵
۱-۳-۲ اندوکتانس مغناطیس کنندگی تک فاز استاتور $L_{m,1-phase}$	۱۶
۲-۳-۲ اندوکتانس متقابل استاتور L_{mutual}	۱۷
۳-۳-۲ اندوکتانس مغناطیس کنندگی فاز L_m	۱۸
۴-۳-۲ اندوکتانس استاتور L_s	۱۸
۴-۲ سیم پیچ های معادل در یک روتور قفس سنجایی.....	۱۹
۱-۴-۲ اندوکتانس های سیم پیچ روتور (استاتور مدار باز).....	۲۰
۵-۲ اندوکتانس های متقابل بین سیم پیچ های فاز استاتور و روتور.....	۲۰
۶-۲ مروری بر بردارهای فضایی.....	۲۱
۱-۶-۲ رابطه ی بین فازورها و بردارهای فضایی در حالت ماندگار سینوسی.....	۲۲
۷-۲ شارهای پیوندی.....	۲۳
۱-۷-۲ شار پیوندی استاتور (روتور مدار باز).....	۲۳
۲-۷-۲ شار پیوندی روتور (استاتور مدار باز).....	۲۴
۳-۷-۲ شارهای پیوندی استاتور و روتور (جریان های هم زمان استاتور و روتور).....	۲۵
۸-۲ معادلات ولتاژ استاتور و روتور بر حسب بردارهای فضایی.....	۲۶
۹-۲ ساختن یک مورد برای تحلیل یک سیم پیچ dq	۲۶
۱۱-۲ خلاصه.....	۲۹
مراجع.....	۲۹
مسائل.....	۲۹

۳۳	فصل ۳ / تحلیل دینامیک ماشین‌های القایی بر حسب سیم‌پیچ‌های dq
۳۳	۱-۳ مقدمه
۳۳	۲-۳ نمایش سیم‌پیچ dq
۳۳	۱-۲-۳ نمایش سیم‌پیچ dq ی استاتور
۳۶	۲-۲-۳ سیم‌پیچ‌های dq روتور (در راستای محوره‌های dq شباهت با استاتور)
۳۷	۳-۲-۳ اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های dq بر روی استاتور و روتور
۳۷	۳-۲-۳ روابط ریاضی سیم‌پیچ‌های dq (در سرعت دلخواه ω_r)
۳۹	۱-۳-۳ مرتبط کردن متغیرهای سیم‌پیچ dq به متغیرهای سیم‌پیچ فاز
۴۰	۲-۳-۳ شارهای پیوندی سیم‌پیچ‌های dq بر حسب جریان هایشان
۴۱	۳-۳-۳ معادلات ولتاژ سیم‌پیچ dq
۴۴	۴-۳-۳ به دست آوردن شارها و جریان‌ها با در نظر گرفتن ولتاژ به عنوان ورودی
۴۴	۴-۳ انتخاب سرعت ω_r ی سیم‌پیچ dq
۴۵	۵-۳ گشتاور الکترومغناطیسی
۴۵	۱-۵-۳ گشتاور روی سیم‌پیچ محور d ی روتور
۴۷	۲-۵-۳ گشتاور روی سیم‌پیچ محور q ی روتور
۴۷	۳-۵-۳ گشتاور الکترومغناطیسی خالص T_{em} روی روتور
۴۸	۶-۳ الکترو دینامیک
۴۸	۷-۳ مدارهای معادل محوره‌های d و q
۴۹	۸-۳ رابطه‌ی بین سیم‌پیچ‌های dq و مدار معادل حوزه‌ی فازور هر فاز در حالت ماندگار سینوسی متعادل
۵۰	۹-۳ شبیه‌سازی کامپیوتری
۵۱	۱-۹-۳ محاسبه‌ی شرایط اولیه
۵۸	۱۰-۳ خلاصه
۵۸	مراجع
۵۸	مسائل
۶۱	فصل ۴ / کنترل برداری درایوهای موتور القایی: بررسی کیفی
۶۱	۱-۴ مقدمه
۶۱	۲-۴ تقلید عملکرد درایو dc و درایو dc بدون جاروبک
۶۳	۱-۲-۴ کنترل برداری درایوهای موتور القایی
۶۴	۳-۴ تمثيل یک ترانسفورماتور تحریک شده با جریان با یک بخش ثانویه‌ی اتصال کوتاه شده
۶۷	۱-۳-۴ استفاده از مدار معادل ترانسفورماتور
۶۷	۴-۴ نمایش سیم‌پیچ محور d و محور q
۶۸	۵-۴ کنترل برداری با محور d ی هم‌تراز شده با شار روتور
۶۸	۱-۵-۴ افزایش شار اولیه قبل از $t = 0^-$
۶۹	۲-۵-۴ تغییر پله در گشتاور در $t = 0^+$
۷۲	۶-۴ کنترل گشتاور، سرعت و موقعیت
۷۳	۱-۶-۴ جریان مرجع $i_{sq}^*(t)$
۷۳	۲-۶-۴ جریان مرجع $i_{sd}^*(t)$
۷۴	۳-۶-۴ تبدیل و تبدیل معکوس جریان‌های استاتور

۷۴	۴-۶-۴ مدل تخمینی موتور برای کنترل برداری
۷۵	۷-۴ واحد پردازش توان (PPU)
۷۶	۸-۴ خلاصه
۷۷	مراجع
۷۷	مسائل
۷۹	فصل ۵ / توصیف ریاضی کنترل برداری در ماشین‌های القایی
۷۹	۱-۵ مدل موتور با محور d ی هم راستا با شار پیوندی روتور $\vec{\lambda}_r$
۸۱	۱-۱-۵ محاسبه ω_{dd}
۸۱	۲-۱-۵ محاسبه T_{em}
۸۲	۳-۱-۵ دینامیک‌های شار پیوندی محور d روتور
۸۲	۴-۱-۵ مدل موتور
۸۴	۲-۵ کنترل برداری
۸۵	۱-۲-۵ حلقه‌های کنترل سرعت و موقعیت
۸۷	۲-۲-۵ راه‌اندازی اولیه
۸۸	۳-۲-۵ محاسبه ولتاژهایی که به استاتور اعمال می‌شوند
۸۹	۴-۲-۵ طراحی کنترلرهای PI
۹۲	۳-۵ خلاصه
۹۳	مراجع
۹۳	مسائل
۹۵	فصل ۶ / تاثیرات detuning در کنترل برداری موتور القایی
۹۵	۱-۶ تاثیر detuning ناشی از ثابت زمانی نادرست روتور T_r
۹۹	۲-۶ تحلیل حالت ماندگار
۱۰۲	۱-۲-۶ حالت ماندگار i_{sd} / i_{sd}^*
۱۰۲	۲-۲-۶ حالت ماندگار i_{sq} / i_{sq}^*
۱۰۲	۳-۲-۶ حالت ماندگار θ_{err}
۱۰۳	۴-۲-۶ حالت ماندگار T_{em} / T_{em}^*
۱۰۴	۳-۶ خلاصه
۱۰۴	مراجع
۱۰۴	مسائل
۱۰۵	فصل ۷ / تحلیل دینامیک ژنراتورهای القایی دویل تغذیه شونده و کنترل برداری آنها
۱۰۶	۱-۷ درک عملکرد DFIG
۱۱۲	۲-۷ تحلیل دینامیک DFIG
۱۱۲	۳-۷ کنترل برداری DFIG
۱۱۲	۴-۷ خلاصه
۱۱۲	مراجع
۱۱۲	مسائل

فصل ۸	اینورترهای مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری (SV-PWM).....	۱۱۵
۱-۸	مقدمه.....	۱۱۵
۲-۸	سنتز بردار فضایی ولتاژ استاتور $\vec{V}_s^a$	۱۱۵
۳-۸	شیب‌سازی کامیوتری اینورتر SV-PWM.....	۱۱۹
۴-۸	حد دامنه‌ی $\vec{V}_s$ بردار فضایی ولتاژ استاتور $\vec{V}_s^a$	۱۲۰
۵-۸	خلاصه.....	۱۲۳
	مراجع.....	۱۲۳
	مسائل.....	۱۲۴
فصل ۹	کنترل مستقیم گشتاور (DTC) و عملکرد بدون انکودر درایوهای موتور القایی.....	۱۲۵
۱-۹	مقدمه.....	۱۲۵
۲-۹	کلیت سیستم.....	۱۲۵
۳-۹	اصول کاری DTC بدون انکودر.....	۱۲۶
۴-۹	محاسبه‌ی $\vec{\lambda}_r$ ، $\vec{\lambda}_r$ ، T_{em} و ω_m	۱۲۷
۱-۴-۹	محاسبه‌ی شار استاتور $\vec{\lambda}_s$	۱۲۷
۲-۴-۹	محاسبه‌ی شار روتور $\vec{\lambda}_r$	۱۲۷
۳-۴-۹	محاسبه‌ی گشتاور الکترومغناطیسی T_{em}	۱۲۸
۴-۴-۹	محاسبه‌ی سرعت روتور ω_m	۱۲۹
۵-۹	محاسبه‌ی بردار فضایی ولتاژ استاتور.....	۱۳۰
۶-۹	کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از محورهای dq	۱۳۲
۷-۹	خلاصه.....	۱۳۳
	مراجع.....	۱۳۳
	مسائل.....	۱۳۳
	ضمیمه‌ی ۹- الف.....	۱۳۴
فصل ۱۰	کنترل برداری درایوهای موتور سنکرون آهنربای دائمی.....	۱۳۷
۱-۱۰	مقدمه.....	۱۳۷
۲-۱۰	تحلیل dq ماشین‌های سنکرون آهنربای دائمی (غیر قطب برجسته).....	۱۳۷
۱-۲-۱۰	شارهای پیوندی.....	۱۳۸
۲-۲-۱۰	ولتاژهای سیم‌پیچ dq ی استاتور.....	۱۳۸
۳-۲-۱۰	گشتاور الکترومغناطیسی.....	۱۳۹
۴-۲-۱۰	الکترو دینامیک.....	۱۳۹
۵-۲-۱۰	رابطه‌ی بین مدارهای dq و مدار معادل حوزه‌ی فازور هر فاز در حالت ماندگار سینوسی متعادل.....	۱۳۹
۶-۲-۱۰	کنترلر دینامیک مبتنی بر dq برای درایوهای DC بدون جاروبک.....	۱۴۰
۳-۱۰	ماشین‌های سنکرون قطب برجسته.....	۱۴۳
۱-۳-۱۰	اندوکتانس‌ها.....	۱۴۳
۲-۳-۱۰	شارهای پیوندی.....	۱۴۶
۳-۳-۱۰	ولتاژهای سیم‌پیچ.....	۱۴۶

۱۴۷	۴-۳-۱۵ گشتاور الکترومغناطیسی
۱۴۷	۵-۳-۱۵ مدارهای معادل محور dq
۱۴۷	۶-۳-۱۵ دیاگرام بردار فضایی در حالت ماندگار
۱۴۸	۴-۱۵ خلاصه
۱۴۸	مراجع
۱۴۹	مسائل
۱۵۱	فصل ۱۱ / درایوهای موتور رلوتکنسی سونیچ شونده (SRM)
۱۵۱	۱-۱۱ مقدمه
۱۵۱	۲-۱۱ موتور رلوتکنسی سونیچ شونده
۱۵۳	۱-۲-۱۱ گشتاور الکترومغناطیسی T_{em}
۱۵۴	۲-۲-۱۱ نیروی ضد محرکه مغناطیسی القایی e_a
۱۵۵	۳-۱۱ شکل موج‌های لحظه‌ای
۱۵۶	۴-۱۱ نقش اشباع مغناطیسی
۱۵۸	۵-۱۱ واحدهای پردازش توان برای درایوهای SRM
۱۵۸	۶-۱۱ تعیین موقعیت روتور برای عملکرد بدون انکودر
۱۵۹	۷-۱۱ کنترل در حالت موتوری
۱۵۹	۸-۱۱ خلاصه
۱۶۰	مراجع
۱۶۰	مسائل

فهرست علائم

۱. متغیرهایی که تابعی از زمان هستند v, i, λ

۲. مقادیر پیک (متغیرهای متغیر با زمان) $\hat{V}, \hat{I}, \hat{\lambda}$

۳. فازورها $\vec{V} = \hat{V} \angle \theta_v, \vec{I} = \hat{I} \angle \theta_i$

۴. بردارهای فضایی

$$\vec{H}(t), \vec{B}(t), \vec{F}(t), \vec{v}(t) = \hat{V} e^{j\theta}, \vec{i}(t) = \hat{I} e^{j\theta}, \vec{\lambda}(t) = \hat{\lambda} e^{j\theta}$$

برای بردارهای فضایی، از رابطه‌ی نمایی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$e^{j\theta} = 1 \angle \theta = \cos \theta + j \sin \theta \quad e^{-j\theta} = 1 \angle -\theta = \cos \theta - j \sin \theta$$

توجه کنید که هم فازورها هم بردارهای فضایی که دو کمیت مجزا هستند مقادیر پیک خودشان را دارند که با " $\wedge$ " نشان داده می‌شود.

زیروندها

فازهای استاتور a, b, c فازهای روتور a, b, c سیم پیچ های d, q و dq استاتور s روتور r مغناطیس کنندگی m مکانیکی m (در θ_m, ω_m)مکانیکی $mech$ (در θ_m, ω_m)

نشی ۱

بالاوندها

محور به کار رفته به عنوان مرجع برای تعریف یک بردار فضایی را نشان می دهد (نداشتن بالاوند به این معنی است که محور d به عنوان مرجع استفاده می شود).

× مقدار مرجع

نمادها

 p تعداد قطب ها ($p \geq 2$, عدد زوج)

θ تمام زاویه ها از جمله θ_m و جهت محور (برای مثال $e^{j2\pi/p}$), به رادیان الکتریکی هستند (رادیان الکتریکی برابر با $p/2$ برابر رادیان مکانیکی است).

ω تمام سرعت ها، از جمله $\omega_{syn}, \omega_d, \omega_{dA}, \omega_m$ و ω_{slip} (به جز ω_{mech}) به رادیان الکتریکی بر ثانیه هستند.

ω_{mech} سرعت روتور به رادیان واقعی (مکانیکی) بر ثانیه: $\omega_{mech} = (2/p)\omega_m$

θ_{mech} زاویه ی روتور به رادیان واقعی (مکانیکی) بر ثانیه: $\theta_{mech} = (2/p)\theta_m$

fl : شارهای پیوندی با fl در مثال های MATLAB و Simulink نشان داده می شوند.

پارامترهای موتور القایی که به جای یکدیگر به کار می روند

$$R'_r = R_r$$

$$L'^l_{\ell r} = L_{\ell r}$$