۱۳۴۱.۹۵

محرکه‌های الکتریکی پیشرفته

تحلیل، کنترل و مدلسازی

با استفاده از MATLAB/Simulink

نویسنده:

ند موهان

www.ketab.ir

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

سرشناسه	: موهان، ند	Mohan, Ned
عنوان و نام پدیدآور	: محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: تحلیل، کنترل و مدلسازی (با استفاده از MATLAB/Simulink)	
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۴	
مشخصات ظاهری	: ۱۶۰ ص، مصور، جدول، نمودار.	
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۳-۲	
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپای مختصر	
یادداشت	: فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.	
یادداشت	: عنوان اصلی: ADVANCED ELECTRIC DRIVES Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink	
شناسه افزوده	: افجه‌ای، سید ابراهیم، ۱۳۳۸، مترجم.	
شناسه افزوده	: سیادتان، علیرضا، ۱۳۵۷، مترجم.	
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۸۲۹۸۹۴	

www.ketab.ir

نیازدانش

نام کتاب	: محرکه‌های الکتریکی پیشرفته: تحلیل، کنترل 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)	
مدیر اجرایی ـ ناظر بر چاپ	: حمیدرضا ا محمد شیرازی – محمد شمس	
ناشر	: نیاز دانش	
صفحه‌آرا	: واحد تولید انتشارات نیازدانش	
نوبت چاپ	: دوم – ۱۴۰۲	
شمارگان	: ۵۰ نسخه	
قیمت	: ۱۵۰۰۰۰۰ ریال	

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۳-۲ ISBN:۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۳-۲

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

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۲۱-۶۶۴۷۸۱۰۶

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲ – ۲۱۰۶۷۰۹

فهرست مطالب

فصل ۱ / کاربردها: کنترل سرعت و گشتاور ۹

۱-۱ تاریخچه ۹
۱-۲ پیش زمینه ۱۰
۱-۳ انواع درایوهای AC بحث شده و نرم افزار شبیه‌سازی ۱۰
۱-۴ ساختار این کتاب ۱۱
۱-۵ موتور القایی "تست" ۱۱
۱-۶ خلاصه ۱۲
مراجع ۱۲
مسائل ۱۲

فصل ۲ / معادلات ماشین القایی در کمیت‌های فازی: با کمک بردارهای فضایی ۱۳

۲-۱ مقدمه ۱۳
۲-۲ سیم‌پیچ‌های استاتور سینوسی توزیع شده ۱۳
۲-۲-۱ سیم‌پیچ‌های استاتور سینوسی توزیع شده‌ی سه فاز ۱۵
۲-۳ اندوکتانس‌های استاتور (روتور مدار باز) ۱۵
۲-۳-۱ اندوکتانس مغناطیس کنندگی تک فاز استاتور $L_{m,1-\text{phase}}$ ۱۶
۲-۳-۲ اندوکتانس متقابل استاتور L_{mutual} ۱۷
۲-۳-۳ اندوکتانس مغناطیس کنندگی فاز L_m ۱۸
۲-۳-۴ اندوکتانس استاتور L_s ۱۸
۲-۴ سیم‌پیچ‌های معادل در یک روتور قفس سنجابی ۱۹
۲-۴-۱ اندوکتانس‌های سیم‌پیچ روتور (استاتور مدار باز) ۲۰
۲-۵ اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ‌های فاز استاتور و روتور ۲۰
۲-۶ مروری بر بردارهای فضایی ۲۱
۲-۶-۱ رابطه‌ی بین فازورها و بردارهای فضایی در حالت ماندگار سینوسی ۲۲
۲-۷ شارهای پیوندی ۲۳
۲-۷-۱ شار پیوندی استاتور (روتور مدار باز) ۲۳
۲-۷-۲ شار پیوندی روتور (استاتور مدار باز) ۲۴
۲-۷-۳ شارهای پیوندی استاتور و روتور (جریان‌های هم زمان استاتور و روتور) ۲۵
۲-۸ معادلات ولتاژ استاتور و روتور بر حسب بردارهای فضایی ۲۶
۲-۹ ساختن یک مورد برای تحلیل یک سیم‌پیچ dq ۲۶
۲-۱۱ خلاصه ۲۹
مراجع ۲۹
مسائل ۲۹

www.ketab.ir

فصل ۳، تحلیل دینامیک ماشین‌های القایی بر حسب سیم‌پیچ‌های dq ۳۳
۳-۱ مقدمه ۳۳
۳-۲ نمایش سیم‌پیچ dq ۳۳
۳-۲-۱ نمایش سیم‌پیچ dq ی استاتور ۳۳
۳-۲-۲ سیم‌پیچ‌های dqی روتور (در راستای محورهای dqیی مشابه با استاتور) ۳۶
۳-۲-۳ اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های dq بر روی استاتور و روتور ۳۷
۳-۳ روابط ریاضی سیم‌پیچ‌های dq (در سرعت دلخواه ω_d) ۳۷
۳-۳-۱ مرتبط کردن متغیرهای سیم‌پیچ dq به متغیرهای سیم‌پیچ فاز ۳۹
۳-۳-۲ شارهای پیوندی سیم‌پیچ‌های dq بر حسب جریان هایشان ۴۰
۳-۳-۳ معادلات ولتاژ سیم‌پیچ dq ۴۱
۳-۳-۴ به دست آوردن شارها و جریان‌ها با در نظر گرفتن ولتاژ به عنوان ورودی ۴۴
۳-۴ انتخاب سرعت ω_dی سیم‌پیچ dq ۴۴
۳-۵ گشتاور الکترومغناطیسی ۴۵
۳-۵-۱ گشتاور روی سیم‌پیچ محور dی روتور ۴۵
۳-۵-۲ گشتاور روی سیم‌پیچ محور q ی روتور ۴۷
۳-۵-۳ گشتاور الکترومغناطیسی خالص T_{em} روی روتور ۴۷
۳-۶ الکترودینامیک ۴۸
۳-۷ مدارهای معادل محورهای q و d ۴۸
۳-۸ رابطه‌ی بین سیم‌پیچ‌های dq و مدار معادل حوزه‌ی فازور هر فاز در حالت ماندگار سینوسی متعادل ۴۹
۳-۹ شبیه‌سازی کامپیوتری ۵۰
۳-۹-۱ محاسبه‌ی شرایط اولیه ۵۱
۳-۱۰ خلاصه ۵۸
مراجع ۵۸
مسائل ۵۸

فصل ۴، کنترل برداری درایوهای موتور القایی: بررسی کیفی ۶۱
۴-۱ مقدمه ۶۱
۴-۲ تقلید عملکرد درایو dc و درایو dc بدون جاروبک ۶۱
۴-۲-۱ کنترل برداری درایوهای موتور القایی ۶۳
۴-۳ تمثیل یک ترانسفورماتور تحریک شده با جریان با یک بخش ثانویه‌ی اتصال کوتاه شده ۶۴
۴-۳-۱ استفاده از مدار معادل ترانسفورماتور ۶۷
۴-۴ نمایش سیم‌پیچ محور d و محور q ۶۷
۴-۵ کنترل برداری با محور d ی همتراز شده با شار روتور ۶۸
۴-۵-۱ افزایش شار اولیه قبل از $t = 0^-$ ۶۸
۴-۵-۲ تغییر پله در گشتاور در $t = 0^+$ ۶۹
۴-۶ کنترل گشتاور، سرعت و موقعیت ۷۲
۴-۶-۱ جریان مرجع $i^*_{sq}(t)$ ۷۳
۴-۶-۲ جریان مرجع $i^*_{sd}(t)$ ۷۳
۴-۶-۳ تبدیل و تبدیل معکوس جریان‌های استاتور ۷۴

www.kelab.ir

۴-۶-۴ مدل تخمینی موتور برای کنترل برداری ۷۴
۴-۷ واحد پردازش توان (PPU) ۷۵
۴-۸ خلاصه ۷۶
مراجع ۷۷
مسائل ۷۷

فصل ۵ / توصیف ریاضی کنترل برداری در ماشین‌های القایی ۷۹

۵-۱ مدل موتور با محور d ی هم راستا با شار پیوندی روتور $\vec{\lambda}_r$ ۷۹
۵-۱-۱ محاسبه‌ی ω_{dA} ۸۱
۵-۱-۲ محاسبه‌ی T_{em} ۸۱
۵-۱-۳ دینامیک‌های شار پیوندی محور d روتور ۸۲
۵-۱-۴ مدل موتور ۸۲
۵-۲ کنترل برداری ۸۴
۵-۲-۱ حلقه‌های کنترل سرعت و موقعیت ۸۵
۵-۲-۲ راه‌اندازی اولیه ۸۷
۵-۲-۳ محاسبه‌ی ولتاژهایی که به استاتور اعمال می‌شوند ۸۸
۵-۲-۴ طراحی کنترلرهای PI ۸۹
۵-۳ خلاصه ۹۲
مراجع ۹۳
مسائل ۹۳

فصل ۶ / تاثیرات detuning در کنترل برداری موتور القایی ۹۵

۶-۱ تاثیر detuning ناشی از ثابت زمانی نادرست روتور τ_r ۹۵
۶-۲ تحلیل حالت ماندگار ۹۹
۶-۲-۱ حالت ماندگار i_{sd} / i_{sd}^* ۱۰۲
۶-۲-۲ حالت ماندگار i_{sq} / i_{sq}^* ۱۰۲
۶-۲-۳ حالت ماندگار θ_{err} ۱۰۲
۶-۲-۴ حالت ماندگار T_{em} / T_{em}^* ۱۰۳
۶-۳ خلاصه ۱۰۴
مراجع ۱۰۴
مسائل ۱۰۴

فصل ۷ / تحلیل دینامیک ژنراتورهای القایی دوبل تغذیه شونده و کنترل برداری آنها ۱۰۵

۷-۱ درک عملکرد DFIG ۱۰۶
۷-۲ تحلیل دینامیک DFIG ۱۱۲
۷-۳ کنترل برداری DFIG ۱۱۲
۷-۴ خلاصه ۱۱۲
مراجع ۱۱۲
مسائل ۱۱۲

www.ketab.ir

فصل ۸، اینورترهای مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری (SV-PWM) ۱۱۵
۸-۱ مقدمه ۱۱۵
۸-۲ سنتز بردار فضایی ولتاژ استاتور $\vec{v}_s^a$ ۱۱۵
۸-۳ شبیه‌سازی کامپیوتری اینورتر SV-PWM ۱۱۹
۸-۴ حد دامنه‌ی $\hat{V}_s$ بردار فضایی ولتاژ استاتور $\vec{v}_s^a$ ۱۲۰
۸-۵ خلاصه ۱۲۳
مراجع ۱۲۳
مسائل ۱۲۴

فصل ۹، کنترل مستقیم گشتاور (DTC) و عملکرد بدون انکودر درایوهای موتور القایی ۱۲۵
۹-۱ مقدمه ۱۲۵
۹-۲ کلیت سیستم ۱۲۵
۹-۳ اصول کاری DTC بدون انکودر ۱۲۶
۹-۴ محاسبه‌ی $\vec{\lambda}_s$، $\vec{\lambda}_r$، T_{em} و ω_m ۱۲۷
۹-۴-۱ محاسبه‌ی شار استاتور $\vec{\lambda}_s$ ۱۲۷
۹-۴-۲ محاسبه‌ی شار روتور $\vec{\lambda}_r$ ۱۲۷
۹-۴-۳ محاسبه‌ی گشتاور الکترومغناطیسی T_{em} ۱۲۸
۹-۴-۴ محاسبه‌ی سرعت روتور ω_m ۱۲۹
۹-۵ محاسبه‌ی بردار فضایی ولتاژ استاتور ۱۳۰
۹-۶ کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از محورهای dq ۱۳۲
۹-۷ خلاصه ۱۳۳
مراجع ۱۳۳
مسائل ۱۳۳
ضمیمه‌ی ۹ – الف ۱۳۴

فصل ۱۰، کنترل برداری درایوهای موتور سنکرون آهنربای دائمی ۱۳۷
۱۰-۱ مقدمه ۱۳۷
۱۰-۲ تحلیل dqی ماشین‌های سنکرون آهنربای دائمی (غیر قطب برجسته) ۱۳۷
۱۰-۲-۱ شارهای پیوندی ۱۳۸
۱۰-۲-۲ ولتاژهای سیم‌پیچ dq ی استاتور ۱۳۸
۱۰-۲-۳ گشتاور الکترومغناطیسی ۱۳۹
۱۰-۲-۴ الکترودینامیک ۱۳۹
۱۰-۲-۵ رابطه‌ی بین مدارهای dq و مدار معادل حوزه‌ی فازور هر فاز در حالت ماندگار سینوسی متعادل ۱۳۹
۱۰-۲-۶ کنترلر دینامیک مبتنی بر dq برای درایوهای DC بدون جاروبک ۱۴۰
۱۰-۳ ماشین‌های سنکرون قطب برجسته ۱۴۳
۱۰-۳-۱ اندوکتانس‌ها ۱۴۳
۱۰-۳-۲ شارهای پیوندی ۱۴۶
۱۰-۳-۳ ولتاژهای سیم‌پیچ ۱۴۶

www.ketab.ir

۱۰-۳-۴ گشتاور الکترومغناطیسی ۱۴۷
۱۰-۳-۵ مدارهای معادل محور dq ۱۴۷
۱۰-۳-۶ دیاگرام بردار فضایی در حالت ماندگار ۱۴۷
۱۰-۴ خلاصه ۱۴۸
مراجع ۱۴۸
مسائل ۱۴۹

فصل ۱۱ / درایوهای موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده (SRM) ۱۵۱
۱۱-۱ مقدمه ۱۵۱
۱۱-۲ موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده ۱۵۱
۱۱-۲-۱ گشتاور الکترومغناطیسی T_{em} ۱۵۳
۱۱-۲-۲ نیروی ضد محرکه مغناطیسی القایی e_a ۱۵۴
۱۱-۳ شکل موج‌های لحظه‌ای ۱۵۵
۱۱-۴ نقش اشباع مغناطیسی ۱۵۶
۱۱-۵ واحدهای پردازش توان برای درایوهای SRM ۱۵۸
۱۱-۶ تعیین موقعیت روتور برای عملکرد بدون انکودر ۱۵۸
۱۱-۷ کنترل در حالت موتوری ۱۵۹
۱۱-۸ خلاصه ۱۵۹
مراجع ۱۶۰
مسائل ۱۶۰

www.ketab.ir

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 $\bar{V} = \hat{V}\angle\theta_v, \bar{I} = \hat{I}\angle\theta_i,$

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:

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

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

زیروندها

فازهای استاتور a,b,c

فازهای روتور a,b,c

سیم‌پیچ‌های d,q dq

استاتور s

روتور r

مغناطیس‌کنندگی m

مکانیکی m (در θ_m, ω_m)

مکانیکی $mech$ (در θ_m, ω_m)

نشتی ۱

بالاوندها

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

× مقدار مرجع

نمادها

p تعداد قطب‌ها ($p \geq ۲$، عدد زوج)

θ تمام زاویه‌ها از جمله θ_m و جهت محور (برای مثال $e^{j۲\pi/۳}$)، به رادیان الکتریکی هستند (رادیان الکتریکی برابر با $p/۲$ برابر رادیان مکانیکی است).

ω تمام سرعت‌ها، از جمله ω_{syn}، ω_d، ω_{dA}، ω_m و ω_{slip}(به جز ω_{mech}) به رادیان الکتریکی بر ثانیه هستند.

ω_{mech} سرعت روتور به رادیان واقعی (مکانیکی) بر ثانیه: $\omega_{mech} = (۲/p)\omega_m$

θ_{mech} زاویه‌ی روتور به رادیان واقعی (مکانیکی) بر ثانیه: $\theta_{mech} = (۲/p)\theta_m$

fl : شارهای پیوندی با fl در مثال‌های MATLAB و Simulink نشان داده می‌شوند.

پارامترهای موتور القایی که به جای یکدیگر به کار می‌روند

$$R'_r = R_r$$

$$L'_{lr} = L_{lr}$$

www.ketab.ir