

مبانی و تکنولوژی

کنترل موتور القایی

مسعود بهبهانی

کارشناس ارشد کنترل

علیرضا فاتحی

عضو هیات علمی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سرشناسه	: بهبهانی، مسعود، ۱۳۴۸ -
عنوان و نام پدیدآور	: مبنای و تکنولوژی کنترل موتور القایی / مولفین مسعود بهبهانی، علیرضا فاتحی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	: ۳۶۸ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۶۰۰۰ ریال ۳-۹۹-۸۷۰۳-۹۶۴-۹۷۸:
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: موتورهای برفی القایی
شناسه افزوده	: فاتحی، علیرضا، ۱۳۴۶ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۰ ب ۳۸۵/۳ TK۲۷۸۵
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۴۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۴۷۹۵۸۳

نام کتاب: مبنای و تکنولوژی کنترل موتور القایی

مولفین: مسعود بهبهانی، دکتر علیرضا فاتحی، عضو هیئت علمی دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: شهریورماه ۱۳۹۰

تیراژ: ۱۰۰۰ جلد

قیمت: ۶۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۲۸۵

ISBN: ۹۷۸-۹۶۴-۸۷۰۳-۹۹-۳

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۷۰۳-۹۹-۳

صحافی: گرانمی

لیتوگرافی: هوررنگ

چاپ: پدیدرنگ

تلفن مرکز پخش و فروش: ۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

پیشگفتار

چرخ‌های صنعت با موتورهای الکتریکی توانمند به گردش در می‌آیند به گونه‌ای که قریب به دو سوم انرژی مصرفی صنعت را به خود اختصاص می‌دهند. در این بین موتور القایی سهم فوق‌العاده و رو به تزایدی نسبت به دیگر انواع موتورها دارد چرا که نه تنها از ابتدای تولید صنعتی، تمامی کاربردهای نیازمند سرعت ثابت را در اختیار داشته بلکه در چند دهه گذشته به کمک درایوهای کنترل سرعت در حوزه کاربردهای نیازمند سرعت متغیر نیز وارد شده است.

موتور القایی در حوزه سرعت ثابت به کمک راه انداز نیمه‌هادی SSS و در حوزه سرعت متغیر به مدد درایو تنظیم فرکانس نیمه هادی - که به واسطه کثرت و اختصار درایو AC نامیده می‌شود - به جایگاهی غیر قابل تصور رسیده و به دلیل پیشرفت‌های حیرت انگیز پردازشگرهای دیجیتال در هر دو حوزه در حال ارتقاء کمی و کیفی جایگاه خویش می‌باشد. به عنوان مثال در ایران مطابق مدارک وزارت نیرو ۶۰٪ انرژی الکتریکی کشور در سیستم‌های موتوری مصرف می‌شود. این میزان در ساختمانهای مسکونی و تجاری حدود ۵۰٪، در صنعت به طور متوسط ۷۰٪ و در برخی صنایع تا ۹۰٪ نیز برآورد می‌شود. ضمن آن که سهم موتور القایی در سیستم‌های موتوری ۹۰٪ می‌باشد. از اینرو به نظر می‌رسد تناسب با این برتری عددی قابل ملاحظه، میزان مشکلات و نیاز کاربران به عناوین مربوط به موتور القایی نیز بسیار بیشتر باشد.

تلفیقی از هفده سال تجربه حضور در صنعت و دانشگاه، شناختی از نوع و سطح نیاز یک کارشناس برق به دست می‌دهد. این نیاز برای ما شاید آن موقع نمود بیشتری پیدا کرد که با داشتن پیش زمینه کارشناسی در گرایش‌های قدرت و الکترونیک ابتدا به صورت نظری و سپس در کاربردهای عملی به بحث کنترل و به ویژه کنترل موتور القایی پرداختیم. از سویی مواجهه با پروژه‌های اجرایی و پژوهشی صنعتی و از سوی دیگر تجربه آموزش دانشجویانی که باید در پایان یک دوره آموزش دانشگاهی با واقعیت‌های صنعت مواجه شوند، ما را به این باور رساند که یکی از این نیازها مراجع جامع فنی که بتواند برای علاقمندان به هر دو وجه علمی و صنعتی مفید باشد، در بسیاری از زمینه‌ها است. گرچه در دانشگاه‌ها، مبانی و مطالب پایه در کتب مرجع و دستاوردهای نوین در مقالات علمی یافت می‌شوند و در صنعت نیز تکنولوژی در قالب کاتالوگ و دستورالعمل شرکت‌های صنعتی در دسترس است، ولی نه مراجع دانشگاهی به بررسی تکنولوژیهای رایج می‌پردازند و نه در دستورالعمل یک تجهیز می‌توان نشانی از تئوری و مبانی طراحی آن تجهیز یافت. همین امر دسترسی به دانش و شناخت آلترناتیوهای تکنولوژیهای رایج را برای یک کارشناس صنعتی و یا فارغ التحصیل علاقه‌مند به صنعت مشکل می‌نماید. این درحالی

است که بدون اغراق موضوع اصلی طراحی‌های صنعتی، انتخاب درست تکنولوژی است و نه ابداع یک روش جدید یا ساخت اجزاء آن.

با این رویکرد، زمینه‌های متعددی در صنعت وجود دارد که به مراجعی جهت تلفیق دانش تئوری و تکنولوژی روز نیاز دارند، مراجعی که به مثابه یک پل، حلقه واسطه بین کتب پایه و تکنولوژی روز گردند. در گرایش برق، کنترل موتورهای القایی به دلیل گستره بسیار بالای کاربرد این موتور از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. علی‌رغم رشد کاربرد موتور القایی در صنعت، منابعی که بتوانند سیستم کنترل موتور القایی را نه برای خواننده علاقمند به طراحی و ساخت خود موتور و یا مدارهای الکترونیکی درایو آن، بلکه برای خواننده نیازمند انتخاب سیستم کنترل مناسب در جایگاه صنعتی مورد نظر راهنمایی کنند به ندرت در دسترس قرار دارند. منابع دانشگاهی عموماً به جزئیات اجزای سیستم کنترل از قبیل خود موتور، مدارهای قدرت مختلف و یا جزئیات تئوری روشهای کنترلی می‌پردازند. از طرف دیگر منابع صنعتی از قبیل کاتالوگ‌های صنعتی، بدون پرداختن به پایه‌های علمی و ویژگیهای سیستم خود را با بزرگنمایی مزایا و سکوت در مقابل کمبودها مورد توجه قرار می‌دهند. این در حالی است که همانطور که اشاره شد، کارشناسان صنعت نیازمند اطلاعاتی پایه از روشهای مختلف کنترل موتور القایی و در عین حال مقایسه این روش‌ها در کاربردهای مختلف در جهت تشخیص درست تکنولوژی مورد نیاز و انتخاب محصول مناسب هستند.

در نتیجه هدف تالیف این کتاب، تهیه مرجعی کمک‌دوسی با رویکرد فنی و در سطح کارشناسی است که در مقوله کنترل موتور القایی برای مهندسی و دانشجویان دوره کارشناسی برق مفید باشد. به گمان ما این کتاب از یک طرف می‌تواند برای کارشناسان مرتبط با موتور القایی بویژه در تصمیم‌گیری برای انتخاب بین آلترناتیوهای موجود مفید بوده و می‌تواند اطلاعات علمی اولیه مورد نیاز برای شناخت نحوه کار انواع کنترل‌کننده‌ها و مقایسه بین آنها را ارائه دهد، و از طرف دیگر دانشجویان و فارغ‌التحصیلانی که در دروس رسمی دانشگاه با جزئیات ساخت موتورهای القایی و روشهای کلی کنترل آشنا شده‌اند می‌توانند با مطالعه این کتاب با نحوه بکارگیری آنها و تکنولوژی‌های موجود در صنعت آشنا شوند. البته سطح مطالب با فرض فارغ‌التحصیلان دوره کارشناسی تهیه شده است و لذا می‌تواند در سطوح تحصیلات تکمیلی برای دانشجویان دروسی مانند الکترونیک قدرت و یا کنترل محرکه‌های الکتریکی نیز به عنوان کتاب کمک‌دوسی با رویکرد تکنولوژیکی مفید باشد.

امید وافر داریم که شما خواننده گرامی نیز با مطالعه این کتاب و شناخت جایگاه امروز موتور القایی با ما موافق باشید که:

چشم‌ها را باید شست جور دیگر باید دید

در این برگ سبز اگر نکته و ارزشی در خور یافتید بی شک مرهون فضل الهی است که اساتید و عزیزانی را همراه ما نمود که مشوق ما در امر کتابت این اثر بودند و به امر خالق هستی که "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" از همگی آنها سپاسگزاریم. جناب آقای دکتر سعید بهبهانی استادیار مکترونیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان که در تهیه مراجع و تصحیح کتاب از کمک‌های ایشان استفاده‌ها نمودیم. جناب آقای دکتر صادق واعظزاده استاد فرهیخته دانشکده برق دانشگاه تهران که با صحنه‌گذاری به نیاز صنعت به کتابی با رویکرد فنی، مایه دلگرمی جهت نشر کتاب را فراهم آوردند. همچنین جناب آقای دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی که موجبات انگیزش مضاعف جهت تکمیل و به چاپ رساندن کتاب را فراهم آوردند.

نکات ضعف و نقائص این اثر معلول ضعف قلم و یا برداشت ناصواب ما است که پیشاپیش مراتب سپاس خود را از تذکر حضرت عالی تقدیم می‌نماییم. ضمناً محدودیت‌های زبان پارسی در بحر متون فنی گاهی ارائه یک نوشته سلیس و کامل را با مشکل دچار می‌ساخت که به ناچار از بیان فارسی کلمه لاتین و یا از ترجمه‌های نارسا استفاده شده که بابت ثقل سخن پوزش می‌طلبیم. امید واثق داریم اساتید فن و سخن‌با ارائه‌واژگان معادل فنی، به تدریج امکان ارائه متون روان فارسی را فراهم نمایند تا کام خوانندگان متون فنی پارسی همچون ادبیات کهن آن شیرین گردد.

با سپاس

تکمیل ادای تشکر مشروط به سپاس از همسر ارجمند و فرزندان گرامیم یاسمن و یاسین است که با تشویق و صبر خویش امکان تخصیص وقت برای کتابت این اثر را به اینجانب دادند.

مسعود بهبهانی

کارشناس مهندسی قدرت - کارشناس ارشد مهندسی کنترل

Behbahani2006@gmail.com

تشکر و سپاس از همسر گرامیم که در تمامی مراتب زندگی همراه و مشوق من بوده و مرا در این راه یاری می‌کند.

علیرضا فاتحی

عضو هیات عملی دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

fatehi@kntu.ac.ir

شهریور ۱۳۹۰

AFD	Adjustable Frequency Drive
AFE	Active Front - End Rectifier
AIEE	American Institute of Electrical Engineer
ANSI	American National Standard Institute
ASD	Adjustable Speed Drive
BDC	Brushed DC Motor
BJT	Bipolar Junction Transistor
BLDC	Brushless DC motor
CCW	Counter Clock Wise
CEMEP	European Commission of Electric Machinery and Power Electronics anufacturers
CENELEC	European Committee for Electro Technical Standardization
CSI	Current Source Inverter
CW	Clock Wise
DFOC	Direct FOC
DOL	Direct On Line
DSC	Direct Self-Control
DTC	Direct Torque Control
FOC	Field Oriented Control
GTO	Gate Turn Off Thyristor
HVF	Harmonic Voltage Factor
IEC	International Electrotechnical Commission
IEE	International Electrical Engineering
IFOC	Indirect FOC
IGBT	Insulated Gate Bipolar Tansistor
KVL	Kirshhof Voltage Law
LCI	Load-Commutated Inverter
LSM	Linear Synchronus Motor
MCT	MOS Controlled Thyristor

MIMO	Multi-Input Multi-Output
MRAC	Model References Adaptive Control
NASA	National AeroSpace America
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
PFC	Power Factor Correction
PMDC	Permanent Magnet DC Motor
PMSM	Permanent Magnet Synchronus Motor
PWM	Pulse Width Modulation
QSW	Quasi Square Wave
ROI	Return of Investment
RSM	Reluctance Synchronous Motor
SCIM	Squirrel Cage Induction Motor
SCR	Silicon Controlled Rectifier
SISO	Single-Input Single-Output
SSS	Solid State Starter
STR	Self-Tuning Regulator
SVM	Space Vector Modulation
SVPW	Space Vector PWM
THD	Total Harmonic Distortion
VFD	Variable Frequency Drive
VSC	Variable Structure Controller
VSD	Variable Speed Drive
VSI	Voltage Source Inverter
VVVF	Variable Voltage-Variable Frequency
WRIM	Wound Rotor Induction Motor
WRSM	Wound Rotor Synchronus Motor

خلاصه فهرست

۱	فصل ۱- مقدمه
۵	فصل ۲- مفاهیم اساسی ماشین AC
۲۴	فصل ۳- مشخصات موتور القایی
۹۲	فصل ۴- راه اندازی
۱۵۳	فصل ۵- کنترل سرعت
۱۷۰	فصل ۶- ساختار درایو AC
۲۳۳	فصل ۷- الگوریتم کنترلی درایو AC
۲۹۲	فصل ۸- جایگاه موتور القایی

فهرست

۱	فصل ۱- مقدمه
۵	فصل ۲- مفاهیم اساسی ماشین AC
۶	۱-۱- میدان مغناطیسی دوار موتور
۱۴	۲-۲- ولتاژ القایی ژنراتور
۱۷	۳-۲- گشتاور القایی
۲۱	۴-۲- دیامگرم توزیع توان
۲۴	فصل ۳- مشخصات موتور القایی
۲۵	۱-۳- ساختار روتور
۲۵	۳-۱-۱- روتور قفسه‌ای
۲۸	۳-۱-۲- روتور سیم‌پیچی شده
۲۹	۳-۲- مفاهیم اصلی
۳۲	۳-۳- مدار معادل
۳۸	۴-۳- دیامگرم توزیع توان
۴۴	۵-۳- مشخصه گشتاور - سرعت
۵۸	۶-۳- پلاک مشخصات
۷۷	۷-۳- نکات کاربردی
۹۲	فصل ۴- راه اندازی
۹۵	۴-۱- حالت گذرای راه‌اندازی
۹۸	۴-۲- راه‌اندازی مستقیم DOL
۹۹	۴-۳- کنترل تابع تبدیل موتور
۱۰۰	۴-۳-۱- کنترل مقاومت استاتور

۱۰۲	۲-۳-۴- کنترل راکتانس استاتور
۱۰۲	۳-۳-۴- روش ستاره / مثلث
۱۰۹	۴-۳-۴- کنترل مقاومت روتور
۱۱۴	۵-۳-۴- تغییر پارامترهای روتور قفسه‌ای
۱۲۳	۴-۴- کنترل ولتاژ تغذیه
۱۲۳	۱-۴-۴- اتوترانس
۱۲۴	۲-۴-۴- راه‌انداز نیمه‌مادی SSS
۱۴۳	۵-۴- بررسی فنی و اقتصادی
۱۴۷	۶-۴- مدارات خاص
۱۵۳	فصل ۵- کنترل سرعت
۱۵۶	۵-۱- کنترل موتور DC
۱۵۹	۵-۲- کنترل موتور القایی با تغییر لغزش
۱۵۹	۵-۲-۱- تغییر ولتاژ تغذیه
۱۶۰	۵-۲-۲- تغییر مقاومت روتور
۱۶۲	۵-۳- کنترل موتور القایی با تغییر سرعت سنکرون
۱۶۲	۵-۳-۱- تغییر تعداد قطبها
۱۶۵	۵-۳-۲- تغییر فرکانس تغذیه
۱۷۰	فصل ۶- ساختار درایو AC
۱۷۳	۶-۱- عنصر نیمه‌مادی
۱۷۶	۶-۲- یکسوساز
۱۸۳	۶-۳- اینورتر
۱۸۴	۶-۳-۱- سوییچینگ QSW
۱۸۶	۶-۳-۲- سوییچینگ PWM
۱۹۲	۶-۴- درایو AC-DC-AC
۱۹۴	۶-۴-۱- درایو VSI-QSW

۱۹۵	CSI-QSW درایو ۲-۴-۶
۱۹۸	VSI-PWM درایو ۳-۴-۶
۱۹۹	CSI-PWM درایو ۴-۴-۶
۲۰۳	۵-۶-۰ درایو AC-AC
۲۰۳	۶-۵-۱- سیکلوکانورتر
۲۰۸	۶-۵-۲- کانورتر ماتریسی
۲۰۹	۶-۶- انتخاب درایو AC
۲۱۰	۶-۶-۲- مشخصات درایو
۲۱۱	۶-۶-۳- سخت افزار بخش کنترل
۲۲۲	۶-۶-۴- نکات کاربردی
۲۲۸	۶-۷- شاخص های کارایی
۲۳۳	فصل ۷- الگوریتم کنترلی درایو AC
۲۳۵	۷-۱- کنترل اسکالر
۲۳۷	۷-۱-۱- گشتاور ثابت CT
۲۴۱	۷-۱-۲- توان ثابت CP
۲۴۳	۷-۱-۳- گشتاور متغیر VT
۲۴۵	۷-۱-۴- ارزیابی کنترل اسکالر
۲۵۳	۷-۲- کنترل برداری
۲۵۴	۷-۲-۱- کنترل چند متغیره
۲۵۸	۷-۲-۲- مدل چند متغیره
۲۶۰	۷-۲-۳- مبانی تئوری
۲۶۲	۷-۲-۴- تاریخچه
۲۶۳	۷-۳- FOC
۲۶۷	۷-۴- DTC
۲۷۶	۷-۵- مقایسه الگوریتم های کنترلی

۲۹۲	فصل ۸- جایگاه موتور القایی
۲۹۳	۸-۱- جایگاه تاریخی
۲۹۷	۸-۲- جایگاه فنی
۲۹۹	۸-۲-۱- موتور DC کلاسیک
۳۱۲	۸-۲-۲- WRSM موتور
۳۱۴	۸-۲-۳- PMSM درایو
۳۱۶	۸-۳- افق آینده
۳۱۷	۸-۳-۱- افزایش راندمان موتور
۳۱۹	۸-۳-۲- افزایش راندمان سیستم
۳۲۰	۸-۳-۳- استفاده از ولتاژ متوسط
۳۲۱	۸-۳-۴- بهبود کارایی دینامیکی سیستم
۳۲۲	مراجع
۳۲۹	واژه‌نامه
۳۴۷	فهرست راهنما