بسم الله الرحمن الرحيم

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمدجواد اخلاقی مهر معتهد میشوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع ومأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضاء

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

شبیه‌سازی موتور القایی سه فاز قفس سنجابی و کنترل دور آن با استفاده از دو روش FOC و DTC جهت کاربرد در وسایل حمل و نقل ریلی

نگارش:

محمدجواد اخلاقی مهر

استاد راهنما: دکتر رضا قندهاری

استاد مشاور: مهندس مهران کاویانی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش کنترل

اسفند ماه۱۳۹۱

بسمه تعالی

شماره: ۱۲۰/۱۲۰۸
تاریخ: ۹۲/۶/۱۶
پیوست: دارد

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

صورتجلسهٔ دفاع پایان‌نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آقای محمدجواد اخلاقی‌مهر رشتهٔ: مهندسی برق- کنترل با عنوان: شبیه‌سازی موتور القایی سه فاز قفس سنجابی و کنترل دوره آن بااستفاده از دو رروش،DTC,FOC جهت کاربرد در وسایل حمل و نقل ریلی، که در تاریخ ۹۱/۱۲/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

☐ قبول (بادرجه خوب ...امتیاز ۱۷/۸۰) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود.

۱ ـ عالی (۲۰ – ۱۹)

۲ ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ – ۱۸)

۳ ـ خوب (۱۷/۹۹ – ۱۶)

۴ ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ – ۱۴)

۵- غیرقابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر رضا قندهاری	استادیار	
استاد مشاور	مهندس مهران کاویانی	مربی	
استاد داور داخلی	دکترسید زین العابدین موسوی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر مهدی علیاری	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهسا توکلی	استادیار	

دکترشهریار شیروانی‌مقدم
سرپرست دانشکده مهندسی برق‌وکامپیوتر

۹۲/۶/۱۶

تهران، لویزان، کد پستی:۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸
صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۸۵
تلفن: ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۲۳
Email:sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

تشکر و قدردانی :

این پروژه بدون کمک و مساعدت بسیاری از افراد هرگز آماده نمی‌شد، گرچه هیچ کلامی نمی‌تواند گویای نقش آنها در به نتیجه رسیدن پروژه و جبران محبت‌هایشان باشد، لیکن بر خود لازم می‌دانم که از صمیم قلب از ایشان تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد گرامی جناب آقای دکترقندهاری به دلیل راهنمایی‌ها و سعه صدرشان در مراحل مختلف، از همسر مهربان و فداکارم برای مساعدت‌های بی‌دریغ و تحمل بار مضاعف زندگی بدلیل اشتغال بیش از حد من به این پروژه، پدر و مادر عزیزم و جناب آقای مهندس کاویانی صمیمانه تشکر می‌نمایم و خود را مدیون مساعدت‌های همهٔ آنان می‌دانم.

چکیده

در این پایان نامه ابتدا به معرفی روش‌های کنترل موتورهای القایی و سپس به بررسی اصول کار و ویژگی‌های روش‌های کنترلی مدرن FOC و DTC پرداخته می‌شود . در برخی موارد برای کنترل موتور القایی نیاز به سرعت روتور آن می‌باشد. این کار یا از طریق سنسور سرعت انجام می‌پذیرد و یا از طریق تخمین آن میسر می‌گردد. بنابراین برخی از روش‌های کنترلی بدون حسگر به طور مختصر بررسی می‌شود. سپس دو روش کنترلی مدرن FOC و DTC برای نمونه موتور ترکشن القایی لوکوموتیو دیزل الکتریک AD43-C، موجود در سیستم حمل و نقل ریلی جمهوری اسلامی ایران، شبیه‌سازی‌ها انجام شده و عملکرد این دو روش در پاسخ‌های جریان و سرعت و گشتاور و پاسخ حالت گذرا به تغییرات بار سرعت بررسی می‌شوند. در نهایت به کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به مقایسه و تحلیل عملکرد این دو روش جهت کاربرد در موتورهای ترکشن حمل و نقل ریلی پرداخته می‌شود. نتایج حاصله نشان می‌دهد که عملکرد هر دو روش دقت خوبی دارد اما پاسخ شار و گشتاور در روش FOC نسبت به روشDTC ضربان کمتری دارد. به عبارت دیگر پاسخ FOC نرم‌تر است.

کلمات کلیدی: موتور القایی ، FOC ، DTC ، موتور ترکشن ، کنترل بدون سنسور

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- روش‌های کنترلی موتورهای القایی ۴
۱-۲-۱- مقدمه ۴
۱-۲-۲- مقایسه‌ی روش های کنترل اسکالر و برداری ۵
۱-۲-۳- درایوهای مبتنی بر روش کنترل برداری یا کنترل با جهت‌دهی میدان ۶
۱-۲-۴- درایوهای مبتنی بر روش کنترل مستقیم گشتاور ۸
۱-۳- سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی AC ۱۲
۱-۳-۱- مقایسه‌ی موتورهای جریان مستقیم و موتورهای القایی حمل ونقل ریلی ۱۳
۱-۴- اهداف پایان نامه ۱۵

فصل دوم: روش‌های کنترل دور موتور القایی ۱۶

۲-۱- روش‌های کنترل سرعت موتورهای القایی ۱۷
۲-۱-۱- مقدمه ۱۷
۲-۱-۲- روش‌های کنترل اسکالر ۱۸
۲-۱-۲-۱- مقدمه ۱۸
۲-۱-۲-۲- کنترل حلقه باز ولت بر هرتز ۱۸
۲-۱-۲-۳- کنترل سرعت با تنظیم لغزش ۲۰
۲-۱-۲-۴- کنترل سرعت همراه با کنترل شار و گشتاور ۲۱
۲-۱-۲-۵- اینورتر منبع ولتاژ با کنترل جریان ۲۲
۲-۱-۳- روش‌های کنترلی نوین ۲۳
۲-۱-۳-۱- مقدمه ۲۳
۲-۱-۳-۲- مدل دینامیکی موتور القایی ۲۴
۲-۱-۳-۲-۱- معادلات ولتاژ در دستگاه abc ۲۴
۲-۱-۳-۲-۲- مدل ماشین در دستگاه مرجع گردان qd0 ..... ۲۵
۲-۱-۳-۲-۳- معادلات شار دور ماشین در دستگاه qd0 ..... ۲۷
۲-۱-۳-۲-۴- معادله‌ی گشتاور در دستگاه qd0 ..... ۲۹

۲-۱-۳-۲-۵- معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه qd0 بر حسب راکتانس و شار دور ۲۹
۲-۱-۳-۲-۶- معادلات ولتاژ در دستگاه qd0 ..... ۳۰
۲-۱-۳-۲-۷- معادلات شار دور بر ثانیه در دستگاه qd0 ..... ۳۱
۲-۱-۳-۲-۸- معادله‌ی گشتاور در دستگاه qd0 بر حسب راکتانس و شار دور بر ثانیه ۳۱
۲-۱-۳-۳- کنترل برداری موتور القایی (FOC) ۳۱
۲-۱-۳-۳-۱- روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI ۳۵
۲-۱-۳-۳-۲- روش غیرمستقیم کنترل برداری ۴۰
۲-۱-۳-۴- کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی(DTC) ۴۳
۲-۱-۳-۴-۱- مقدمه ۴۳
۲-۱-۳-۴-۲- مقایسه‌ی روش کنترل برداری و روش کنترل مستقیم گشتاور ۴۴
۲-۱-۳-۴-۳- کنترلرهای هیسترزیس شار و گشتاور..... ۴۴
۲-۱-۳-۴-۴- چگونگی تغییر شار بوسیله بردارهای ولتاژ ۴۶
۲-۱-۳-۴-۵- چگونگی تغییر گشتاور بوسیله بردارهای ولتاژ ۴۹
۲-۱-۳-۴-۶- جدول کلیدزنی اینورتر در روش DTC ۵۰
۲-۱-۳-۴-۷- تخمین مقادیر واقعی شار و گشتاور ۵۱
۲-۱-۳-۴-۸- تحقیقات انجام شده جهت اصلاح روش DTC ۵۳

فصل سوم: روش‌های کنترل بدون سنسور موتور القایی ۵۴

۳-۱- مقدمه ۵۵
۳-۲- مو ارد کاربرد تخمین سرعت در سیستم کنترل موتور القایی بدون سنسور..... ۵۶
۳-۲-۱- به منظور کنترل عملکرد دقیق موتور القایی ۵۶
۳-۲-۲- به منظور اجام عملیات ویژه مثلا تخمین موقعیت شار رتور ۵۶
۳-۳- روش‌های حلقه باز تخمین سرعت ۵۶
۳-۳-۱- تخمین سرعت بر مبنای شار رتور..... ۵۸
۳-۳-۲- تخمین سرعت بر مبنای شار روتور با استفاده از انتگرال گیر..... ۵۸
۳-۴- روش‌های مدل مرجع ۵۸
۳-۴-۱- تخمین سرعت بر مبنای مدل مرجع شار..... ۶۰

۳-۴-۲- تخمین سرعت بر مبنای مدل حاصلضرب جریان – ولتاژ ۶۲
۳-۵- مشاهده‌گرها ۶۴
۳-۵-۱- فیلتر کالمن ۶۴
۳-۵-۲- تخمین سرعت با استفاده از هوش مصنوعی ۷۱
۳-۵-۳- مشاهده‌گر حالت تطبیقی مرتبه کامل ۷۵

فصل چهارم: شبیه سازی روش‌های کنترلی FOC و DTC برای نمونه موتور ترکشن لوکوموتیو دیزل الکتریک AD43-C ۸۲

۴-۱- مقدمه ۸۳
۴-۲- سیستم ترکشن الکتریکی ۸۴
۴-۲-۱- منحنی سرعت بر حسب زمان ۸۵
۴-۲-۲- مشخصه گشتاور- سرعت موتورهای کششی ۸۷
۴-۲-۳- عملکرد موازی ۸۸
۴-۲-۴- نوسان‌های ولتاژ ۸۸
۴-۲-۵- محدودیت وزن و حجم ۸۸
۴-۳- معرفی لوکوموتیو دیزل الکتریک AD43-C ۸۹
۴-۴- بررسی پاسخ سرعت روش‌های FOC و DTC به تغییرات پله‌ای بار و سرعت ۹۲
۴-۴-۱- مقدمه ۹۲
۴-۴-۲- توضیحات مربوط به بلوک‌های شبیه سازی شده ۹۲
۴-۴-۳- بررسی عملکرد این دو روش با تغییر پارامترهای ماشین ۱۱۱

فصل پنجم: نتیجه گیری ۱۱۲

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۳
۵-۲- مقایسه‌ی دو روش FOC و DTC ۱۱۴
۵-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۱۵

مراجع ۱۱۶

فهرست شکل‌ها

لیست شکل‌ها	صفحه
شکل(۲-۱) : بلوک دیاگرام روش کنترل حلقه باز با کنترل ولت بر هرتز و اینورتر منبع ولتاژ.....	۱۹
شکل(۲-۲): منحنی‌های گشتاور- سرعت با تغییرات فرکانس، گشتاور بار و ولتاژ تغذیه	۲۰
شکل(۲-۳): بلوک دیاگرام حلقه بسته سرعت با کنترل نسبت ولتاژ به فرکانس و تنظیم لغزش	۲۱
شکل(۲-۴): کنترل حلقه بسته سرعت همراه با کنترل شار و گشتاور.....	۲۲
شکل(۲-۵): درایو اینورتر منبع ولتاژ با کنترل جریان	۲۳
شکل (۲-۶):دستگاه سه فاز **abc** و دو محوری **dq**	۲۶
شکل(۲-۷) مدار معادل مدل دینامیکی موتور القایی در دستگاه گردان **qd0** با سرعت ω	۲۹
شکل(۲-۸) مدار میدان و آرمیچرموتور **DC** تحریک مستقل	۳۲
شکل(۲-۹): بلوک دیاگرام کلی روش**FOC**	۳۳
شکل(۲-۱۰) : الف- موتور جریان مستقیم تحریک مستقل ب- کنترل برداری موتور القایی	۳۴
شکل (۲-۱۱) : بلوک دیاگرام روش کنترل برداری مستقیم	۳۶
شکل (۲-۱۲) : جهت دهی بردار شار رتور روی محور **d** دستگاه شار رتور	۳۷
شکل (۲-۱۳) : بلوک دیاگرام روش کنترل برداری مستقیم	۳۹
شکل (۲-۱۴) : جهت دهی بردار شار رتور روی محور **d** دستگاه شار رتور.....	۴۱
شکل (۲-۱۵) : بلوک دیاگرام روش کنترل برداری غیر مستقیم	۴۱
شکل (۲-۱۶) : بلوک دیاگرام دیگری از روش کنترل برداری مستقیم	۴۲
شکل (۲-۱۷):بلوک دیاگرام محاسبه‌ی فلوی رتور	۴۲
شکل (۲-۱۸): بلوک دیاگرام دیگری از کنترل برداری غیر مستقیم	۴۳
شکل (۲-۱۹) : کنترل گشتاور موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور	۴۴
شکل (۲-۲۰) : مقایسه‌گر هیسترزیس گشتاور	۴۵
شکل (۲-۲۱) : مقایسه‌گر هیسترزیس شار	۴۵
شکل (۲-۲۲) : تغییر دامنه و راستای شار استاتور	۴۷
شکل (۲-۲۳) : بردارهای فضایی ولتاژ استاتور	۴۸
شکل (۲-۲۴) : کنترل دامنه شار در محدوده باند هیسترزیس	۴۸
شکل (۲- ۲۵) تغییر زاویه‌ی α با انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب اینورتر	۵۰
شکل (۲-۲۶) : بردارهای ولتاژ	۵۰
شکل (۳-۱) : طرح کلی روش تخمین **MRAS**	۵۹

شکل (۳-۲): نمونه ای از ساختار تخمین‌گر سرعت MRAS ۵۹
شکل (۳-۳) : مکانیزم تطبیق ۵۹
شکل (۳-۴) : تخمین‌گر شار رتور ۶۰
شکل (۳-۵) : تخمین‌گر شار رتور ۶۱
شکل (۳-۶) تخمین‌گر سرعت MRAS بااستفاده از شار رتور برای تولید سیگنال تنظیم سرعت ۶۲
شکل (۳-۷): تخمین سرعت با استفاده از سیگنال تنظیم سرعت ۶۳
شکل (۳-۸) : ساختار فیلتر کالمن توسعه یافته ۶۷
شکل (۳-۹): تخمینگر عصبی بر اساس مدل MRAS ۷۲
شکل (۳-۱۰) ساختار شبکه عصبی مورد استفاده جهت تخمین سرعت ۷۳
شکل(۳-۱۱) ساختار مشاهده‌گر تطبیقی لیونبرگر ۸۰
شکل (۴-۱): توپولوژی مبدل برای کاربردهای دیزل الکتریک ۸۴
شکل (۴-۲) : منحنی سرعت قطار بر حسب زمان و نیروی محرک بر حسب سرعت قطار..... ۸۵
شکل (۴-۳): منحنی گشتاور سرعت موتور القایی ترکشن ۸۸
شکل(۴-۴): لوکوموتیو دیزل الکتریک AD43 C ۸۹
شکل(۴-۵): استاتور و روتور ترکشن موتور لوکوموتیو دیزل‌الکتریک AD43-C ۹۰
شکل (۴-۶): ساختار مداری سیستم قدرت ترکشن موتورهای دیزل‌الکتریک AD43-C ۹۱
شکل(۴-۷): شماتیک کلی کنترل موتور القایی سه فاز شبیه سازی شده با استفاده از روش FOC ۹۳
شکل(۴-۸): بلوک کنترلر سرعت ۹۴
شکل(۴-۹): بلوک شبیه سازی FOC ۹۴
شکل (۴-۱۰): شماتیک کلی کنترل موتور القایی سه فاز با استفاده از روش DTC ۹۵
شکل(۴-۱۱): بلوک شبیه سازی DTC..... ۹۵

فهرست جدول‌ها

لیست جدول‌ها صفحه

جدول (۲-۱): جدول کلیدزنی اینورتر..... ۵۱
جدول(۳-۱): نمونه های تجاری درایو بدون حسگر موتورهای AC ۸۱
جدول(۴-۱): پارامترهای موتور القایی..... ۹۲
جدول (۵-۱): بررسی ویژگی‌های دو روش FOC و DTC ۱۱۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

موتورهای القایی به دلیل استحکام ، عملکرد مناسب ، قابلیت اطمینان و قیمت کم امروزه یکی از مهمترین محرکه‌های سیستم‌های صنعتی محسوب می شوند . به همین دلیل در سیستم‌های صنعتی استفاده از روش‌های مناسب کنترل دور موتورهای القایی با کارایی خوب یکی از مهمترین مسائلی است که باید به آن پرداخته شود. مبحث کنترل موتورهای القایی از سال ۱۹۷۱ توجه محققان و مهندسان را به خود جلب کرد. از آن زمان تا کنون بیش از ۴۰۰۰ مقاله‌ی چاپ شده در ژورنال‌های معتبر راجع به کنترل موتورهای القایی به چاپ رسیده است. اما هنوز تحقیقات در حوزه موتورهای القایی بسیار فعال است. در همین راستا بیش از ۳۰۰ مقاله‌ی چاپ شده در سال ۲۰۰۸ ارائه گردیده است. همچنین در حوزه صنعت بیش از ۸۰۰۰۰ اختراع در زمینه کنترل موتور القایی ثبت شده است. در دسترس بودن پروسسورهای دیجیتال قدرتمند، کم‌هزینه و پیشرفت‌های برجسته در الکترونیک قدرت، موجب طراحی کنترل‌کننده‌های پیچیده و کارآمد برای این نوع از موتورها شده است. موتورهای جریان مستقیم به طور گسترده در کاربردهای سرعت متغیر[1] به کار می‌روند زیرا شار و گشتاور آن‌ها به طور مستقل توسط میدان و جریان آرمیچر کنترل می‌شود. با این وجود این موتورها به دلیل استفاده از کموتاتورهای مکانیکی و جاروبک‌ها دارای قابلیت اطمینان کم و عمر کوتاه هستند. به گونه‌ای که در شرایط کاری سرعت بالا و ولتاژ زیاد کاربرد آن‌ها عملاً محدود می‌شود. کنترل

[1]- Variable Speed

موتورهای القایی بسیار سخت‌تر است اما مزایای بارزی نسبت به موتورهای جریان مستقیم دارند زیرا این نوع از موتورها کموتاتور، جاروبک و در برخی از انواع آن سیم‌پیچی روتور ندارند (نوع موتورهای قفسه سنجابی). ساختار این موتورها به گونه‌ای است که می‌توانند بار اضافی را تحمل کنند. همچنین این موتورها می‌توانند گشتاورهای بالاتری را با وزن کمتر و اندازه‌ی کوچکتر و جرم در حال دوران کمتر نسبت به موتورهای جریان مستقیم تولید کند [۱].

موتور القایی بدلیل داشتن رفتار دینامیکی غیرخطی در مقابل رفتار خطی موتورDC نیازمند سیستم کنترلی بسیار پیچیده‌تر و و گران‌تر می باشد این امر باعث شد تا سال‌ها موتورهای DC در صنعت حمل و نقل ریلی به عنوان انتخاب اول مطرح باشند. در سال‌های اخیر و با توجه به پیشرفت‌های انجام شده در زمینه‌ی نیمه‌هادی، تولید قطعات و تجهیزات الکترونیکی و به بازار آمدن ریز پردازنده-های قدرتمند با قابلیت‌های کنترلی مناسب، این امکان پدید آمده است که بتوان کنترل بسیار پیچیده ماشین‌های القایی را در کاربردهای سرعت متغیر به صورت ساده‌تر و اقتصادی‌تری پیاده‌سازی نمود.

با توجه به نیاز پیشرفت روزافزون صنعت حمل ونقل ریلی و رواج هر چه بیشتر قطارهای سریع السیر و نیاز ضروری بشر به این صنعت لزوم انتخاب روشی مناسب جهت کنترل دور موتورهای القایی مورد استفاده در این وسایل روز به روز نمایان تر گردید. همانطور که گفته شد یکی از کاربردهای عمده موتورهای القایی در بحث حمل و نقل ریلی است و این موتورها به دلیل عدم استفاده از جاروبک نسبت به موتورهای جریان مستقیم برتری دارند و کم‌کم در صنعت ریلی به دلیل هزینه تعمیر و نگهداری کمتر جایگزین ماشین‌های جریان مستقیم شدند. بنابراین با توجه به کاربرد فراوان موتورهای القایی در صنعت حمل و نقل ریلی، انتخاب روش کنترلی مناسب جهت کنترل این موتورها امری ضروری به نظر می رسد. روش‌های کنترلی FOC و DTC که از روش‌های مدرن و کارامد جهت کنترلی می باشند که می توانند جهت کنترل موتورهای القایی مورد استفاده در حمل و نقل ریلی به کار گرفته شوند.

۱-۲- روش‌های کنترلی موتورهای القایی

۱-۲-۱- مقدمه:

کنترل حلقه بسته ولتاژ – فرکانس از اولین روش‌هایی است که با پیشرفت صنعت نیمه‌هادی ها در حوالی سال‌های ۱۹۶۰ با ساخت اولین اینورترها ی فرکانس متغیر به عنوان یک روش کنترلی اسکالر مطرح گردید. به تدریج تکنیک‌های اسکالر حلقه بسته دیگری به منظور افزایش کارایی سیستم بوجود آمدند. متاسفانه موتور القایی دارای مشخصات غیرخطی ، تغییرات پارامترها به علت تغییر درجه حرارت، اثر کوپلینگ در بسیاری از متغیرها و دینامیک پیچیده مرتبه بالاست. بنابراین درگیر ساختن ماشین با حلقه‌های فیدبک باعث ایجاد مشکلات فراوانی در پایداری شده و پردازش سیگنال‌های فیدبک را مشکل می سازد. منظور از روش کنترلی با کارایی بالا بدین صورت تعریف می شود که سیستم کنترلی بلافاصله به سیگنال فرمان پاسخ داده و مسیر آن را بدون تاثیر پذیری از تغییرات پارامترها ی ماشین یا بار و یا هر گونه اغتشاش احتمالی بیرونی با دقت کامل دنبال کند. همچنین سایر پارامترهای کیفی مانند بازدهی، قابلیت اطمینان ، ضریب قدرت خط، مسائل مربوط به هارمونیک و ضربان گشتاور را تامین نماید. اغلب در عمل برآورده ساختن تمامی این خواسته‌ها غیرممکن است و باعث ایجاد تداخل در روند کنترل می گردد. بنابراین یک تابع هزینه می تواند در بین محدوده‌هایی از توابع هدف بالا تعریف شود. یکی از مهم‌ترین توابع هدفی که در روند کنترل یک ماشین علاوه بر پاسخ حالت ماندگار مطرح می شود پاسخ مطلوب حالت گذرا می باشد.

به طور کلی درایوهای موتورهای القایی برای کنترل دور وگشتاور برای استفاده در کاربردهای با کارایی بالا دو نوع می باشند :

۱- درایوهای نوع اول، مبتنی بر روش کنترل برداری یا کنترل با جهت‌دهی میدان (FOC)

۲- درایو های نوع دوم، مبتنی برروش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)

ابتدا به طور مختصر روش‌های کنترل نوین و اسکالر مقایسه می شود.

۱-۲-۲- مقایسه‌ی روش های کنترل اسکالر و برداری

در مقالات متعددی به مقایسه‌ی روش‌های کنترل اسکالر و برداری پرداخته شده است. روش اسکالر روشی ساده‌تر و ارزان‌تر می‌باشد. در این روش پاسخ به ورودی‌ها بسیارکند است. در روش‌های کنترلی اسکالر صرفا دامنه متغیرها کنترل می شوند. به طور کلی روش‌های اسکالر برای کنترل درایوهایی با رفتار دینامیکی مناسب نیستند. استفاده از مقادیر دامنه ، باعث ایجاد رفتار قابل قبول سیستم در حالت ماندگار خواهد شد اما در حالت گذرا رفتار ضعیفی نشان می دهد. گرچه برخی نمونه‌های پیشرفته، مولفه فاز مقادیر کنترل شونده نیز لحاظ می شوند اما پیچیدگی و محاسبات به سیستم تحمیل می‌شد و دیگر تفاوتی با روش‌های برداری ندارد.

در مواردی که می‌بایست نکات زیر مد نظر قرارگرفته شود، پیشنهاد می‌شود که از روش کنترل برداری بجای روش کنترل اسکالر استفاده شود [۲]:

- کنترل سرعت با دقتی در حدود ٪ ۰/۱ ±
- محدودهٔ سرعتی بیشتر از ۱۰:۱
- کنترل گشتاور، تنش و یا موقعیت
- کنترل کشش نوار
- گشتاور کامل در هر فرکانس
- گشتاور کامل در سرعت صفر
- کنترل سرعت تا ۶۰۰۰ rpm همراه با کنترل بسیار دقیق
- هماهنگ‌سازی شفت موتور با قفل دیجیتالی

۱-۲-۳- درایوهای مبتنی بر روش کنترل برداری یا کنترل با جهت دهی میدان

در دو دهه اخیر تلاش‌های زیادی برای الگو گرفتن از کنترل موتورهای DC و بکارگیری آن در کنترل موتورهای AC انجام گرفته که منجر به پیدایش کنترل برداری (FOC) شده است [۳] . آقای پارک در سال ۱۹۲۹ مبحث قاب‌های مرجع چرخان را معرفی نمود. بعد از چند سال روش کنترل برداری یا FOC توسعه یافت که منجر به دکوپله‌سازی گشتاور و شار مشابه موتور DC تحریک مستقل شد. در سال ۱۹۶۸ مفهوم کنترل برداری غیرمستقیم توسط آقای هیس[۲] ارائه شد . در سال۱۹۷۱روش کنترلی FOC توسط آقای بلاشک با تاکید بر جهت‌دهی شار رتور معرفی شد [۳] و [۴]. از آن بعد تکنیک‌های مختلفی برای بهبود این روش مطرح شد .

قبل از پیدایش کنترل برداری، موتورهای AC با وجود استحکام خوب، قیمت مناسب و پایین بودن اینرسی روتور نمی توانستند با موتورهای DC که برای کاربردهای دقیق نظیر سرو موتورها ، رباتیک و ... مورد استفاده قرار می گیرند، رقابت کنند و این به خاطر راحتی کنترل موتورهای DC در مقایسه با موتورهایAC است.

با ظهور کنترل برداری، کنترل موتورهای AC با ایجاد کانال‌های مستقل کنترل شار و گشتاور، مشابه کنترل موتورهای DC گشته است. به بیان دیگر در این روش هدف این است که شار و گشتاور موتور القایی مستقل از یکدیگر و همانند موتور DC کنترل گردند. در واقع در این روش با جهت دهی مناسب بردار شار رتور یا استاتور و یا شار فاصله هوایی در راستای محور d دستگاه دو محوری dq به هدف فوق دست می‌یابیم.

با فرض ثابت بودن موقعیت زاویه‌ای شار روتور نسبت به قاب مرجع گردان، فازور جریان استاتور به دو مؤلفه همسو با شار روتور وعمود بر آن تجزیه می شود .مؤلفه همسو با شار، جریان تولید کننده میدان (i_f) و مؤلفه عمود بر آن، جریان تولید کننده گشتاور است(i_T) تجزیه جریان استاتور نیازمند اطلاع از موقعیت شار روتور است که با ρ نشان داده می شود. این زاویه‌ی شار می‌تواند مستقیماً در

2- Hasse

روش کنترل برداری مستقیم اندازه گیری شود یا در روش کنترل برداری غیر مستقیم محاسبه شود . عدم نیاز به سنسورهای زاویه‌ی شار و امکان کار در سرعت‌های پایین، کنترل برداری غیر مستقیم را در مقایسه با کنترل برداری مستقیم کاربردی‌تر کرده است .

عیب عمده این نوع کنترل وابسته بودن آن به پارامترهای ماشین است چرا که پارامترهای ماشین در محاسبه شار مورد استفاده قرار می گیرد. پارامترهای ماشین با تغییر دما، تغییر فرکانس و با اشباع هسته تغییر می‌کنند. هرگونه تغییر در پارامترهای موتور موجب عدم مطابقت پارامترهای آن با پارامترهای مورد استفاده در کنترل برداری شده و باعث تضعیف عملکرد سیستم در حالت ماندگار و ایجاد نوساناتی در حالت گذرا در شار روتور، گشتاور و سرعت موتور می شود. این امر موجب کاهش بازده می شود همچنین وجود این نوسانات در سرعت موتور برای کاربردهای دقیق مطلوب نیست.

در روش FOC یک جهت دهی مناسب بردار شار رتور با مشخصه گشتاور مناسب، زمانی حاصل می‌شود که کنترلر مقادیر پارامترها را در هر لحظه داشته باشد. روش کنترل برداری مستقیم یا DFOC نیازمند مقادیر اندوکتاس پراکندگی رتور و نسبت اندوکتانس رتور به اندوکتانس مغناطیسی است که دومین پارامتر نسبتا تحت تاثیر اشباع شار اصلی در موتور قرار می گیرد. علاوه بر این نیازمند سنسورهای شارخاص هستیم. اگر DFOC به صورت بدون سنسور بکار رود مقادیر R_s و L_r نیز نیازمندیم. مقدار R_s به تغییرات دما وابسته است. اگر سنسورها، شار را اندازه‌گیری کنند مقادیر اشتباه پارامترها بر روی عملکرد حالت دائمی موتور تاثیر می‌گذارد و اگر شار تخمین زده شود پاسخ دینامیکی کیفیت خود را از دست می‌دهد. روش کنترل برداری غیرمستقیم یا IFOC نسبت به تغییر پارامترهای موتور از روش FOC حساس‌تر است. در این روش مقدار ثابت زمانی رتور در محاسبه‌ی سرعت لغزش استفاده می‌شود. این پارامتر نیز به سطح شار و دما حساس است. نیاز به انکودر خاص نیز یکی از معایب این روش است. نظر به اهمیت موضوع حساسیت کنترل برداری مستقیم و غیرمستقیم نسبت به تغییر پارامترهای موتور تحقیقاتی چند در این زمینه انجام شده است.

در مرجع [۵] اثر تغییرات مقاومت روتور و اندوکتانس متقابل بر روی گشتاور خروجی و شار روتور، بحث و به صورت کیفی بررسی شده است. در مرجع [۶] تاثیر تغییر پارامترهای ماشین روی خروجی‌های آن با اتکا به نتایج شبیه سازی، بررسی شده و دو روش برای تخمین مقاومت روتور و حل مشکل حساسیت درایو نسبت به این پارامتر ارائه شده است. در مرجع [۷] روابطی به صورت تقریبی برای حساسیت به دست آمده است. در مراجع [۸] و [۹] و [۱۰] روش‌های جبران‌سازی تغییرات پارامترهای موتور و تاثیرات آن روی خروجی‌های ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۱] مروری بر روش‌های کنترل برداری FOC بدون سنسور شده است

در مراجع زیادی روش‌های کنترل بدون حسگرسرعت موتور القائی مانند روش‌های حلقه باز تخمین سرعت، روش‌های بر مبنای ساختار فیزیکی موتور ، روش‌های مدل مرجع (MRAS [۳]) ، استفاده از مشاهده گرها (لیونبرگر، فیلترهای کالمن، مشاهده‌گر مود لغزشی)، استفاده از هوش مصنوعی یا شبکه های عصبی مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۲]. تخمین سرعت توسط فیلترکالمن در [۱۳] صورت گرفته است. کنترل بدون حسگر، به مشاهده‌گرهای سرعت و شار ارائه شده نیاز می باشد.

۱-۲-۴- درایوهای مبتنی برروش کنترل مستقیم گشتاور

محاسبات بالا، نیاز به پردازنده قدرتمند، پیچیدگی روش، تنظیم حلقه‌های کنترل، سبب شده است که محققین بجای کنترل غیرمستقیم گشتاور و شار در روش کنترل برداری، به دنبال روش‌هایی برای کنترل مستقیم گشتاور بدون کنترل جریان باشند. روش DTC اولین بار توسط تاکاهاشی از ژاپن در سال ۱۹۸۴ و دپنبراک از آلمان در سال ۱۹۸۵ به صورت جداگانه مطرح گردید [۱۴]. گسترش روش DTC توسط محققین آلمانی و ژاپنی صورت گرفته است. از کاربردهای این روش می‌توان در قطارهای سریع السیر، آسانسورها، بالابرها و کلا بارهایی که نیاز به تغییرات سریع گشتاور

[3-] Model Refrence Adaptive System

دارند نام برد. روش DTC دارای کنترلرهای هیسترزیس هستند که نیازی به حلقه کنترلی جریان، شار استاتور و گشتاور را به طور مستقیم کنترل می‌کنند.

در کنار محدودیت‌های بالا در روش کنترل برداری مستقیم و غیرمستقیم، این روش‌ها پیچیده بوده و نیازمند میکروکنترلرهای سریع است. این محدودیت‌ها باعث جایگزین شدن یک روش شناخته شده به نام DTC شده است. این روش به خاطر سادگی الگوریتم ، عدم نیاز به تبدیل دستگاه‌ها، عدم نیاز به سنسورهای شار و موقعیت خاص، عدم نیاز به رگولاتور PI و رگولاتورهای جریان بسیار مورد توجه قرار گرفت. DTC یک روش کنترلی بهینه و در عین حال ساده است که با کلیدزنی مناسب اینورتر، شار و گشتاور به طور مستقیم کنترل می‌شوند و به خاطر عدم نیاز به سنسور شار و گشتاور هزینه ساخت کمتر می‌شود. از دیگر مزیت‌های این روش این است که این روش فقط به R_s وابسته است. بنابراین این روش نسبت به روش کنترل برداری حساسیت کمتری دارد. مقادیر ورودی اندازه گیری شده در روشDTC ، جریان‌ها و ولتاژهای موتور می‌باشند. همچنین ولتاژها را می‌توان بدون نیاز به سنسورها از طریق ولتاژ لینک DC و موقعیت‌های کلیدزنی اینورتر تعیین کرد. جریان‌ها و ولتاژها، ورودی‌های تخمین‌گرهای شار و گشتاور می‌باشند که تولید شار و گشتاور در یک دوره معین می‌کنند. مقایسه‌گرهای هیسترزیس شار و گشتاور ، مقادیر واقعی و مرجع را با یکدیگر مقایسه کرده و خروجی آن‌ها در هر دوره کلیدزنی تغییر می‌یابند و تعیین می‌کنند که نیاز به تغییر شار و یا گشتاور داریم یا خیر. وابسته بودن خروجی‌ها به مقایسه‌گرها و منطق کلیدزنی، به طور مستقیم بردار ولتاژ اینورتر بهینه را تعیین می‌کند. درکنار سادگی روش DTC این روش دارای معایبی همچون بالا بودن ضربان گشتاور و شار است.

روش DTC ابتدا در مرجع [۱۵] برای موتورهای القایی تغذیه شده توسط اینورتر ولتاژ PWM [۴] ارائه شد. این روش در [۱۶] برای تمام محرکه‌های ماشین های AC با اینورترهای ولتاژ وجریان تعمیم داده شده است.ساختار ساده و پاسخ سریع شار وگشتاور در این روش باعث شده که در سال-های اخیر مورد توجه بسیار قرار گیرد. در این روش با انتخاب بردارهای مناسب ولتاژ در هر دور نمونه

4-Pulse width Modulation