

اسم

دانشکده فنی
گروه مهندسی برق
گرایش قدرت

کنترل مستقیم گشتاور برای موتورهای القایی نامتعادل

از
علیرضا دلزنده مقدم

استاد راهنما
دکتر اسماعیل فلاح چولابی

استاد مشاور
دکتر سید حمید شاه‌عالمی

اسفند ۱۳۹۱

تقدیم به :

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلائی مشکلات و ناملایمات کردند تا من شکوه زندگی را از آنها داشته باشم،

تقدیم به کسانی که

همواره مشوق و امیدبخش من در انجام امورم بودند. به آنانکه پندهایشان راهنمای انتخاب هایم و محبتشان امیدبخش زندگیم است.

تقدیر و تشکر

شکر و سپاس خدای را که توفیق انجام این پایان‌نامه را نصیبم گردانید و صبرم افزون ساخت تا در تلاطم ایام، استوار بمانم.

و با تشکر و قدردانی از همکاری صمیمانه استادان بزرگوارم

«جناب آقای دکتر اسماعیل فلاح»

و

«جناب آقای دکتر حمید شاه عالمی»

که شخصیت منحصر به فرد و دلسوزانه شان در تمامی مراحل این پایان‌نامه راهبرم بود.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
چ	فهرست جدول‌ها
ح	فهرست شکل‌ها
د	فهرست علائم و نشانه‌ها
ر	چکیده فارسی
ز	چکیده لاتین
۱	فصل ۱- مقدمه
۱	۱-۱- پیشگفتار
۳	۲-۱- تاریخچه و شیوه‌های نوین
۹	۳-۱- نوآوری تحقیق
۱۰	۴-۱- ساختار گزارش
۱۱	فصل ۲- انواع ساختار مداری مبدل‌های تک‌فاز
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- انواع ساختار مداری مبدل تک‌فاز
۱۲	۱-۲-۲- برشگرهای ac/ac تک‌فاز
۱۴	۲-۲-۲- سیکلوکانورتر ac/ac تک‌فاز
۱۵	۳-۲-۲- راه‌انداز اینورتری PWM پل کامل تک‌فاز
۱۵	۴-۲-۲- یکسوساز نیم‌پل به همراه اینورتر PWM پل کامل
۱۶	۵-۲-۲- یکسوساز نیم‌پل کنترل شده به همراه اینورتر PWM پل کامل
۱۷	۶-۲-۲- یکسوساز نیم‌پل همراه با اینورتر PWM نیم پل
۱۷	۷-۲-۲- یکسوساز کنترل شده نیم‌پل همراه با اینورتر PWM نیم پل
۱۸	۸-۲-۲- اینورتر PWM پل کامل دوفاز
۱۹	۹-۲-۲- اینورتر PWM نیم‌پل دوفاز
۱۹	۱۰-۲-۲- اینورتر PWM شبه پل کامل دوفاز
۲۰	۱۱-۲-۲- اینورتر PWM دوفاز با یکسوساز کنترل شده
۲۰	۳-۲- مقایسه بین انواع ساختارها
۲۲	فصل ۳- کاربرد SVM در انواع توپولوژی تک‌فاز

۲۳	مقدمه	۱-۳
۲۳	مدل دینامیکی موتور القایی تکفاز	۲-۳
۲۷	مدولاسیون SVM	۳-۳
۲۷	SVM در ساختار مداری دوشاخه	۱-۳-۳
۲۹	SVM در ساختار مداری سه شاخه	۲-۳-۳
۳۰	SVM در اینورتر چهارشاخه پیشنهادی	۳-۳-۳
۳۲	آنالیز SVPWM در انواع ساختار مداری تکفاز	۴-۳
۳۳	SVPWM در اینورتر سه شاخه	۱-۴-۳
۳۶	SVPWM در اینورتر دوشاخه تکفاز	۲-۴-۳
۳۹	SVPWM در اینورتر چهارشاخه تکفاز	۳-۴-۳
۴۱	شبیه سازی SVPWM	۵-۳
۴۵	مقایسه	۱-۵-۳
۴۵	جمع بندی فصل	۶-۳
۴۶	روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) برای موتورهای تکفاز	فصل ۴
۴۷	مقدمه	۱-۴
۴۷	کنترل DTC برای اینورتر دوشاخه تکفاز	۲-۴
۴۷	کنترل مستقیم شار	۱-۲-۴
۵۰	کنترل مستقیم گشتاور	۲-۲-۴
۵۱	تشکیل جدول کلیدزنی برای اینورتر دوشاخه تکفاز	۳-۲-۴
۵۲	کنترل DTC برای اینورتر سه شاخه تکفاز	۳-۴
۵۲	کنترل مستقیم شار در اینورتر سه شاخه	۱-۳-۴
۵۴	کنترل مستقیم گشتاور در اینورتر سه شاخه	۲-۳-۴
۵۴	تشکیل جدول کلیدزنی برای اینورتر سه شاخه تکفاز	۳-۳-۴
۵۵	اصلاح جدول کلیدزنی اینورتر سه شاخه	۴-۴
۵۹	تشکیل جدول کلیدزنی جدید برای اینورتر سه شاخه	۱-۴-۴
۶۰	کنترل DTC برای اینورتر چهارشاخه پیشنهادی تکفاز	۵-۴
۶۲	کنترل سرعت همراه با کنترل مستقیم گشتاور	۶-۴
۶۲	مروری گذرا بر انواع روش های تنظیم ضرایب PI	۱-۶-۴
۶۴	تنظیم ضرایب PI به کمک الگوریتم ژنتیک	۲-۶-۴
۶۶	تنظیم ضرایب PI به کمک الگوریتم رقابت استعماری	۳-۶-۴
۶۷	معرفی تابع هزینه	۴-۶-۴

۶۸	..... فصل	۷-۴
۶۹	..... نتایج شبیه‌سازی	فصل ۵-۵
۷۰	..... مقدمه	۱-۵
۷۱	..... انتخاب الگوریتم و تابع هزینه مناسب	۲-۵
۷۸	..... مقایسه شکل موج شار موتور برای هر ساختار کنترلی	۳-۵
۸۰	..... مقایسه دینامیک و لختی سیستم در پاسخ سرعت	۴-۵
۸۱	..... مقایسه جریان شاخه‌ها و سیم‌پیچ‌ها	۵-۵
۸۲	..... مقایسه پاسخ گشتاور سیستم‌ها	۶-۵
۸۴	..... جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی	۷-۵
۸۵	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادات	فصل ۶-۶
۸۶	..... نتیجه‌گیری	۱-۶
۸۶	..... پیشنهادات	۲-۶
۸۷	..... فهرست مراجع	

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مقایسه بین انواع توپولوژی‌ها..... ۲۱
- جدول ۱-۳: خروجی‌های اینورتر دوشاخه به ازای حالت‌های مختلف کلیدزنی..... ۲۸
- جدول ۲-۳: خروجی‌های اینورتر سه‌شاخه به ازای حالت‌های مختلف کلیدزنی..... ۲۹
- جدول ۳-۳: خروجی‌های اینورتر چهارشاخه به ازای حالت‌های مختلف کلیدزنی..... ۳۱
- جدول ۴-۳: چگونگی انتخاب U_1 و U_2 در هر سکتور..... ۳۵
- جدول ۵-۳: چگونگی انتخاب U_1 و U_2 در هر سکتور در اینورتر چهارشاخه..... ۴۰
- جدول ۶-۳: خروجی‌های اینورترها..... ۴۴
- جدول ۱-۴: تاثیر انتخاب بردارهای ولتاژ در صورتی که شار استاتور در سکتور k باشد..... ۵۰
- جدول ۲-۴: جدول ارجاع کلیدزنی در DTC برای اینورتر دوشاخه..... ۵۱
- جدول ۳-۴: جدول ارجاع کلیدزنی در DTC برای اینورتر سه‌شاخه..... ۵۵
- جدول ۴-۴: جدول پیشنهادی ارجاع کلیدزنی در DTC برای اینورتر سه‌شاخه..... ۵۹
- جدول ۵-۴: جدول پیشنهادی ارجاع کلیدزنی در DTC برای اینورتر چهارشاخه..... ۶۱
- جدول ۱-۵: مشخصات موتور..... ۷۰
- جدول ۲-۵: پارامترهای موتور..... ۷۰
- جدول ۳-۵: مقادیر پارامترهای برنامه الگوریتم رقابت استعماری..... ۷۰
- جدول ۴-۵: مقادیر پارامترهای برنامه الگوریتم ژنتیک..... ۷۱
- جدول ۵-۵: مشخصه‌های منحنی سرعت موتور با تنظیم دستی ضرایب PI..... ۷۲
- جدول ۶-۵: نتایج بهینه‌سازی برای دو الگوریتم GA و ICA..... ۷۳
- جدول ۷-۵: مشخصه‌های منحنی سرعت و گشتاور موتور با تنظیم ضرایب به کمک ICA..... ۷۴
- جدول ۸-۵: نتایج بهینه‌سازی با دو الگوریتم GA و ICA برای اینورتر چهارشاخه..... ۷۵
- جدول ۹-۵: مشخصه‌های منحنی‌های سرعت و گشتاور موتور با اینورتر چهارشاخه..... ۷۷
- جدول ۱۰-۵: نتایج بهینه‌سازی برای تمام اینورترها با دو الگوریتم GA و ICA..... ۷۸
- جدول ۱۱-۵: جدول مقایسه بین اینورترها در سیستم DTC..... ۸۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: انواع روش‌های کنترل موتورهای القایی [3]..... ۴
- شکل ۲-۱: نمودار سیستم کنترلی DFOC..... ۶
- شکل ۳-۱: نمودار سیستم کنترلی IFOC..... ۷
- شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی FLC [2]..... ۸
- شکل ۱-۲: مبدل باک AC/AC برای کنترل موتورهای تک‌فاز همراه با خازن [9]..... ۱۳
- شکل ۲-۲: مبدل‌های AC/AC [10]..... ۱۳
- شکل ۳-۲: سیکلوکانورتر ac/ac تک‌فاز [11]..... ۱۴
- شکل ۴-۲: موتور تک‌فاز تغذیه شده با برشگر dc [13]..... ۱۵
- شکل ۵-۲: اینورتر PWM تک‌فاز همراه با یکسوساز پل کامل [14]..... ۱۶
- شکل ۶-۲: اینورتر PWM تک‌فاز همراه با یکسوساز نیم‌پل [14]..... ۱۶
- شکل ۷-۲: یکسوساز نیم‌پل کنترل شده به همراه اینورتر PWM پل کامل [14]..... ۱۷
- شکل ۸-۲: یکسوساز نیم‌پل همراه با اینورتر PWM نیم‌پل [14]..... ۱۷
- شکل ۹-۲: یکسوساز کنترل شده نیم‌پل همراه با اینورتر PWM نیم‌پل [14]..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲: اینورتر PWM پل کامل دوفاز [15]..... ۱۸
- شکل ۱۱-۲: اینورتر PWM نیم‌پل دوفاز [14]..... ۱۹
- شکل ۱۲-۲: اینورتر PWM شبه‌پل کامل دوفاز [16]..... ۲۰
- شکل ۱۳-۲: اینورتر PWM دوفاز با یکسوساز کنترل شده [18]..... ۲۰
- شکل ۱-۳: توپولوژی اینورتر دوشاخه تک‌فاز [22]..... ۲۸
- شکل ۲-۳: بردارهای فضایی اینورتر دوشاخه..... ۲۸
- شکل ۳-۳: توپولوژی اینورتر سه‌شاخه تک‌فاز [22]..... ۲۹
- شکل ۴-۳: بردارهای فضایی اینورتر سه‌شاخه تک‌فاز..... ۳۰
- شکل ۵-۳: توپولوژی اینورتر چهارشاخه تک‌فاز..... ۳۰
- شکل ۶-۳: بردارهای فضایی اینورتر چهارشاخه تک‌فاز..... ۳۲
- شکل ۷-۳: شکل بردار فضایی اینورتر تک‌فاز سه‌شاخه و مکان‌های هندسی مربوطه..... ۳۳
- شکل ۸-۳: چگونگی انتخاب بردارهای U_1 و U_2 در هر سکتور..... ۳۴
- شکل ۹-۳: چگونگی عملکرد هر یک از کلیدهای Q_1 و Q_3 و Q_5 در یک دوره T_{pwm} در سکتور اول..... ۳۶
- شکل ۱۰-۳: شکل بردار فضایی اینورتر تک‌فاز دوشاخه و مکان‌های هندسی مربوطه..... ۳۷
- شکل ۱۱-۳: تعیین زمان‌های کلیدزنی در روش SVPWM اینورتر تک‌فاز [25]..... ۳۷
- شکل ۱۲-۳: شکل بردار فضایی اینورتر تک‌فاز چهارشاخه و مکان‌های هندسی مربوطه..... ۴۰
- شکل ۱۳-۳: خروجی‌های اینورتر دوشاخه..... ۴۲
- شکل ۱۴-۳: خروجی‌های اینورتر سه‌شاخه..... ۴۳
- شکل ۱۵-۳: خروجی‌های اینورتر چهارشاخه..... ۴۴

- شکل ۴-۱: بردارهای ولتاژ برای افزایش یا کاهش شار استاتور ۴۸
- شکل ۴-۲: مقایسه گر هیستریزیس دو سطحی کنترل شار [23] ۴۹
- شکل ۴-۳: شکل موج‌های شار استاتور و خطای آن و پاسخ مقایسه گر هیستریزیس [23] ۴۹
- شکل ۴-۴: نمای کلی روش DTC برای موتورهای تک‌فاز [27] ۵۲
- شکل ۴-۵: سکتور اول و چگونگی انتخاب بردارها در آن ۵۳
- شکل ۴-۶: مقایسه گر هیستریزیس سه سطحی کنترل گشتاور [23] ۵۴
- شکل ۴-۷: انتخاب بردار صحیح در سکتور سوم ۵۶
- شکل ۴-۸: دلیل چگونگی تغییر بردارها در سکتور سوم ۵۶
- شکل ۴-۹: چگونگی اصلاح بردارها در سکتور ششم ۵۷
- شکل ۴-۱۰: چگونگی اصلاح بردارها در سکتور سوم برای حالت $dT=-1$ و $d\psi = 1$ ۵۷
- شکل ۴-۱۱: چگونگی اصلاح بردارها در سکتور سوم برای حالت $dT=-1$ و $d\psi = -1$ ۵۸
- شکل ۴-۱۲: چگونگی اصلاح بردارها در سکتور ششم برای حالت $dT=-1$ و $d\psi = 1$ ۵۸
- شکل ۴-۱۳: چگونگی اصلاح بردارها در سکتور ششم برای حالت $dT=-1$ و $d\psi = -1$ ۵۹
- شکل ۴-۱۴: سکتورهای اینورتر چهارشاخه ۶۰
- شکل ۴-۱۵: بلوک دیاگرام کنترل DTC به همراه حلقه کنترلی سرعت [31] ۶۲
- شکل ۴-۱۶: حلقه کنترلی سرعت [23] ۶۳
- شکل ۴-۱۷: فلوجارت الگوریتم ژنتیک ۶۵
- شکل ۴-۱۸: فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری ۶۷
- شکل ۵-۱: نمودار سرعت موتور با تنظیم دستی ضرایب PI ۷۱
- شکل ۵-۲: منحنی همگرایی تابع هزینه برای GA ۷۲
- شکل ۵-۳: منحنی همگرایی تابع هزینه برای ICA ۷۳
- شکل ۵-۴: خروجی‌های موتور ۷۴
- شکل ۵-۵: منحنی همگرایی تابع هزینه جدید با استفاده از GA ۷۵
- شکل ۵-۶: منحنی همگرایی تابع هزینه جدید با استفاده از ICA ۷۶
- شکل ۵-۷: خروجی‌های موتور با تنظیمات بهینه PI به دست آمده از GA ۷۶
- شکل ۵-۸: منحنی گشتاور بار مکانیکی موتور ۷۷
- شکل ۵-۹: شکل موج شار موتور در انواع اینورترهای کنترل شده با سیستم DTC ۷۹
- شکل ۵-۱۰: مقایسه منحنی‌های سرعت ۸۰
- شکل ۵-۱۱: منحنی‌های جریان سیم‌پیچ‌های اصلی ۸۱
- شکل ۵-۱۲: منحنی‌های جریان سیم‌پیچ‌های کمکی ۸۲
- شکل ۵-۱۳: منحنی جریان سیم مشترک ۸۲
- شکل ۵-۱۴: مقایسه‌ی منحنی‌های پاسخ گشتاور سیستم‌ها ۸۳
- شکل ۵-۱۵: مقایسه‌ی پاسخ گشتاور سیستم‌ها ۸۳

عنوان	علامت اختصاری
اندکتانس خودی سیم پیچ اصلی استاتور	L_{ss}
اندکتانس خودی سیم پیچ کمکی استاتور	L_{SS}
اندکتانس خودی سیم پیچ رتور	L_r
اندکتانس مغناطیس‌کنندگی سیم پیچ اصلی استاتور	L_{ms}
اندکتانس مغناطیس‌کنندگی سیم پیچ کمکی استاتور	L_{mS}
اندکتانس مغناطیس‌کنندگی سیم پیچ رتور	L_{mr}
اندکتانس نشتی سیم پیچ اصلی استاتور	L_{Ls}
اندکتانس نشتی سیم پیچ کمکی استاتور	L_{LS}
اندکتانس نشتی سیم پیچ رتور	L_{Lr}
اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ اصلی استاتور و رتور	L_{sr}
اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ کمکی استاتور و رتور	L_{Sr}
سرعت زاویه‌ای رتور	ω_r
تعداد جفت قطب	P
گشتاور الکترومغناطیسی	T_e
گشتاور مکانیکی	T_m
گشتاور رفرنس	T_{ref}
تعداد دور سیم پیچ اصلی	N_s
تعداد دور سیم پیچ کمکی	N_S
ثابت اینرسی	J
ویسکوسیته	B
تعداد دور سیم پیچ رتور	N_r
ولتاژ استاتور در راستای محور d	V_{ds}
ولتاژ استاتور در راستای محور q	V_{qs}
جریان استاتور در راستای محور q	i_{qs}
جریان استاتور در راستای محور d	i_{ds}
جریان رتور در راستای محور q	i_{qr}
جریان رتور در راستای محور d	i_{dr}
شار استاتور در راستای محور q	φ_{qs}
شار استاتور در راستای محور d	φ_{ds}

φ_{qr}	شار رتور در راستای محور q
φ_{dr}	شار رتور در راستای محور d
R_s	مقاومت سیم پیچ اصلی
R_S	مقاومت سیم پیچ کمکی
R_r	مقاومت سیم پیچ رتور
Q_1	فرمان گیت کلید اول
V_{dc}	ولتاژ لینک dc
V_{ref}	ولتاژ رفرنس
ψ_{ref}	شار رفرنس
ω_{ref}	سرعت رفرنس
δ	زاویه بین بردار جریان استاتور و شار رتور
γ_{sr}	زاویه شار رتور
θ_{sr}	زاویه بین شار استاتور و رتور

چکیده

کنترل مستقیم گشتاور برای موتورهای القایی نامتعادل

علیرضا دلزنده مقدم

با افزایش نگرانی در مورد قیمت تمام شده برای سیستم‌های محرک الکتریکی و استفاده بهینه از انرژی و به‌طور خاص در وسایل خانگی، بدلیل عدم وجود منبع برق سه فاز، کاربرد موتورهای القایی تکفاز بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل برای بهبود عملکرد آنها تحت سرعت و بار متغیر، تاکنون ساختار مداری و روش‌های کنترلی مختلفی ارائه شده‌اند. در این پایان‌نامه ابتدا مروری بر انواع ساختار مداری و روش‌های کنترل برداری موتورهای تک فاز انجام می‌شود سپس ساختار مداری چهار شاخه معرفی شده و مدولاسیون SVM بر این اینورترها اعمال می‌شود. پس از آن کنترل DTC بر ساختار مداری دو شاخه و سه شاخه اعمال می‌شود. برای هر کدام یک جدول کلیدزنی به دست می‌آید. جدول کلیدزنی اینورتر سه شاخه بهبود داده شده و سپس کنترل DTC بر اینورتر چهار شاخه اعمال شده و جدول کلیدزنی مربوطه به دست آورده می‌شود. مروری بر انواع روش‌های تنظیم ضرایب PI در کنترل‌کننده‌های سرعت انجام شده و سپس این ضرایب به کمک الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری تنظیم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی از SVPWM و کنترل DTC نشان می‌دهد که از نظر جریان کلیدها، THD جریان، پاسخ سرعت و ریپل شار و گشتاور، اینورتر سه شاخه با جدول بهبود یافته و اینورتر چهار شاخه عملکرد بهتری نسبت به مدارهای قبلی دارند.

کلید واژه— موتور تک فاز، کنترل مستقیم گشتاور، مدولاسیون بردار فضایی، تنظیم ضرایب PI، الگوریتم ژنتیک،

الگوریتم رقابت استعماری

Abstract

Direct Torque Control for asymmetrical induction motor

Alireza Delzendeh Moghadam

In recent years, with the growing concern about low-cost operation and efficient use of energy, the advance in motor drive control technology made it possible to use these motors in residential and industrial applications more efficiency.

Different inverter topologies like two-legs and three-legs inverters have been proposed to drive single-phase induction motors, providing ways to save energy. Beside these efforts for developing more efficient driving topologies many strategies to control these motors have been proposed, such as rotor-flux-oriented control, stator-flux-oriented control and direct torque control.

In this thesis, at first some kind of vector control strategies and inverter topologies for single-phase induction motors have been investigated and reviewed, Four-legs inverters have been introduced for the first time and SVM modulation method has been applied to it. In next chapter Direct Torque Control strategies have been used to control these topologies. The look-up switching table for three-legs inverters have been modified.

For tuning PI Speed-controller the Genetic Algorithem and Imperialist Competitive Algorithm have been used. A comparison have been done between them .

Simulation results are presented to demonstrate the advantagesof proposed systems

Key words –Single Phase Induction Motor Drive, Direct Torque Control, Space Vector Modulation, PI Speed controller Tunings, Genetic Algorithem, Imperialist Competitive Algorithm

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار (اهمیت کنترل موتور القایی)

درایوهای کنترل سرعت (ADS)^۱ به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند. بیشتر این درایوها که در ماشین‌های AC به کار می‌روند به طور معمول موتورهای القایی هستند. به تازگی استفاده از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نیز در این درایوها رایج شده است. درایوهای کنترل سرعت بطور گسترده در تجهیزاتی همانند پمپ، فن، سیستم بالابر، خودروهای الکتریکی، سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC)^۲، روبات‌ها، سیستم‌های توربین بادی و ... به کار می‌روند.[1]

در گذشته ماشین‌های DC برای درایوهای کنترل سرعت ترجیح داده می‌شدند، با این وجود این ماشین‌ها معایبی مانند هزینه و اینرسی بالا در روتور و مشکلات مربوط به نگهداری از جاروبک‌ها و کموتاتورها را دارند. به علاوه این موتورها را نمی‌توان در محیط‌های کثیف و قابل انفجار به کار برد. موتورهای AC معایب این موتورها را ندارند. در سه دهه اخیر با پیشرفت در ساخت ادوات نیمه هادی و به‌طور خاص ترانزیستورهای قدرت (IGBT) و تکنولوژی DSP^۳، موتورهای DC جای خود را به درایوهای AC دادند.

به موازات آن موتورهای تک‌فاز نیز جای خود را به طور گسترده در بارهای کوچک خانگی و تجاری باز کردند. پیش از این این موتورها معمولاً در درایوهای سرعت ثابت استفاده می‌شدند ولی به مرور، احساس نیاز به سرعت متغیر و پیوسته در این موتورها ایجاد شد. همچنین با این عمل افزایش قابل توجهی در راندمان و عملکرد این وسایل حاصل شد که حضور درایو سرعت متغیر را طلب می‌کرد.[2]

موتورهای تک‌فاز القایی به طور معمول دارای دو سیم پیچ اصلی و کمکی هستند که با اختلاف ۹۰ درجه و به صورت نامتقارن نسبت بهم قرار گرفته اند تا گشتاور راه‌انداز موتور حاصل شود. در واقع این موتورها را می‌توان به صورت یک موتور دوفاز در نظر گرفت. تاکنون انواع گوناگونی از ساختار مداری^۴ برای تغذیه موتورهای تک‌فاز ارائه شده است.

¹ Adjustable Speed Drive

² Heating, ventilating, and air-conditioning

³ Digital Signal Processor

⁴ Topology

۱-۲- تاریخچه و شیوه‌های نوین

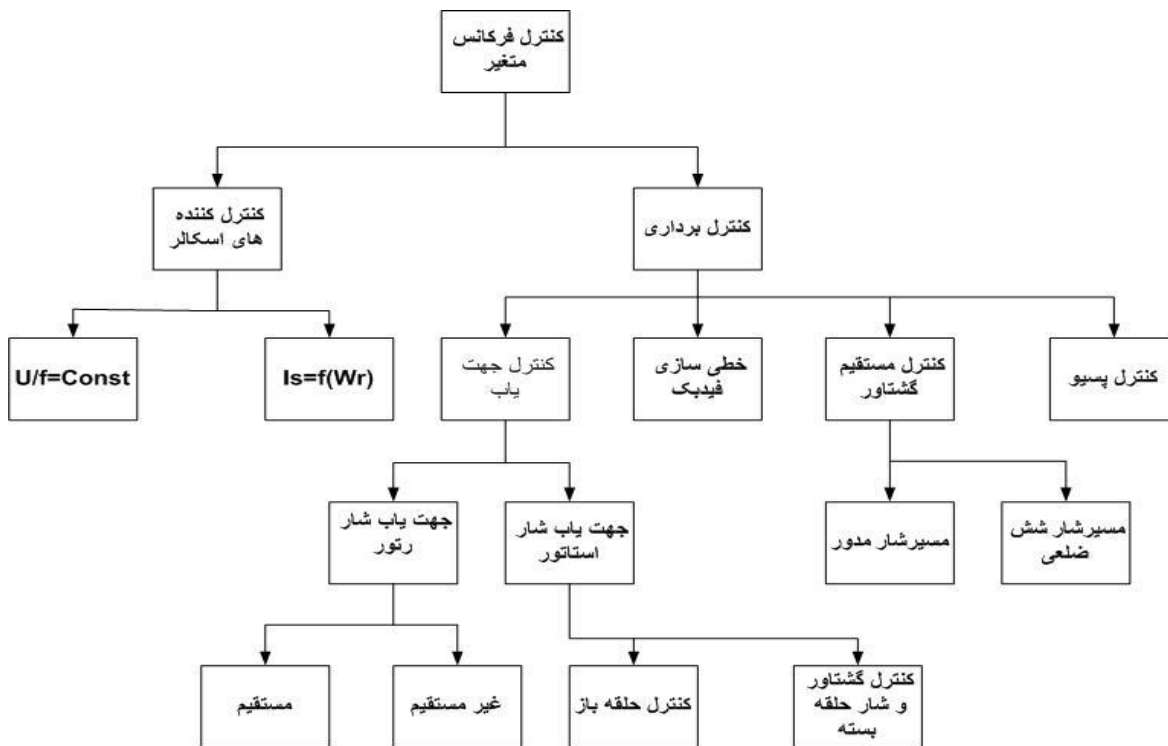
با افزایش میل به پائین آوردن هزینه کاری موتورهای القایی و همچنین بهبود ضریب قدرت برای تضمین مصرف کم انرژی در آنها، انواع روش‌های کنترلی پیشنهاد شده است.

با صرفه‌ترین روش کنترل سرعت موتور القایی استفاده از مبدل‌های فرکانسی است. توپولوژی‌های مختلفی از این مبدل‌ها عرضه شده‌اند که معروف‌ترین آنها، استفاده از یکسوسازهای دیودی به همراه منابع AC و اینوتور ولتاژ همراه با مدولاسیون پهنای باند (PWM) در صنعت است. این اینورتورها باید دارای مشخصه‌هایی مانند زیر باشند که حصول به آنها بستگی به استراتژی کنترلی به کار رفته دارد:

- پاسخ گشتاور و شار سریع
- داشتن گشتاور خروجی بالا در دامنه وسیع از سرعت
- فرکانس سوئیچ زنی ثابت
- ریپل کم در گشتاور و شار
- مقاوم در برابر تغییرات پارامترهای ماشین

. هدف اصلی از به کارگیری یک روش کنترلی داشتن یک درایو با مشخصات خوب و قیمت مناسب و سادگی الگوریتم‌ها و تنظیمات آن است.

انواع روش‌های مبتنی بر کنترل فرکانس برای موتورهای القایی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [3]. این روش‌ها می‌توانند به دو گروه "اسکالر" و برداری" تقسیم شوند.



شکل ۱-۱: انواع روش‌های کنترل موتورهای القایی [3]

از معروف‌ترین روش‌های کنترلی اسکالر در صنعت، روش کنترلی "نسبت ولتاژ بر فرکانس ثابت ($\frac{U}{f} = const$)" است. با وجود ساختار ساده و پیاده‌سازی آسان این روش، به دلیل اینکه گشتاور و شار، هر دو تابعی از فرکانس و ولتاژ هستند پس با هم توزیع داشته و این باعث کندی پاسخ در این روش می‌شود. در روش‌های مبتنی بر کنترل برداری علاوه بر کنترل اندازه فرکانس و ولتاژ، مکان لحظه‌ای بردار ولتاژ، شار و جریان نیز کنترل می‌شود که این باعث بهبود در پاسخ دینامیکی درایو می‌شود. با این وجود موتورهای القایی دارای ساختار غیرخطی هستند و همچنین یک وابستگی بین شار و گشتاور الکترومغناطیسی وجود دارد. به همین دلیل روش‌های متعددی برای مجزا کردن شار و گشتاور پیشنهاد شده‌اند.

اولین روش در کنترل برداری موتور القایی "کنترل جهت یاب" یا FOC¹ است که در اوایل دهه هفتاد معرفی شد، که خود به دو روش مستقیم (DFOC)² معرفی شده توسط K.Hasse - و غیر مستقیم (IFOC)³ معرفی شده توسط F.Blaschke - تقسیم می‌شود [4]. این روش‌ها طی دهه‌ها بهبود یافته و اینک بعنوان یکی از استانداردهای رایج در صنعت نیز به کار می‌روند. این روش در اساس مشابه با روش کنترل موتور DC تحریک مستقل است.

¹ Field Oriented Control

² Direct FOC

³ Indirect FOC

الگوریتم‌های کنترلی با کمک رگولاتورهای ساده همانند PI اعمال می‌شوند. در ماشین‌های القایی، کنترل مستقل شار و گشتاور، در سیستم مختصاتی که به شار رتور متصل است ممکن می‌شود. پس در این روش معادلات موتور به یک سیستم مختصات که با بردار شار رتور می‌چرخد منتقل می‌شوند. روش FOC دیکوپله شدن شار و گشتاور را تضمین می‌کند با این وجود معادلات موتور هنوز غیرخطی بوده و دیکوپله شدن کامل تنها تحت شار ثابت اتفاق می‌افتد.

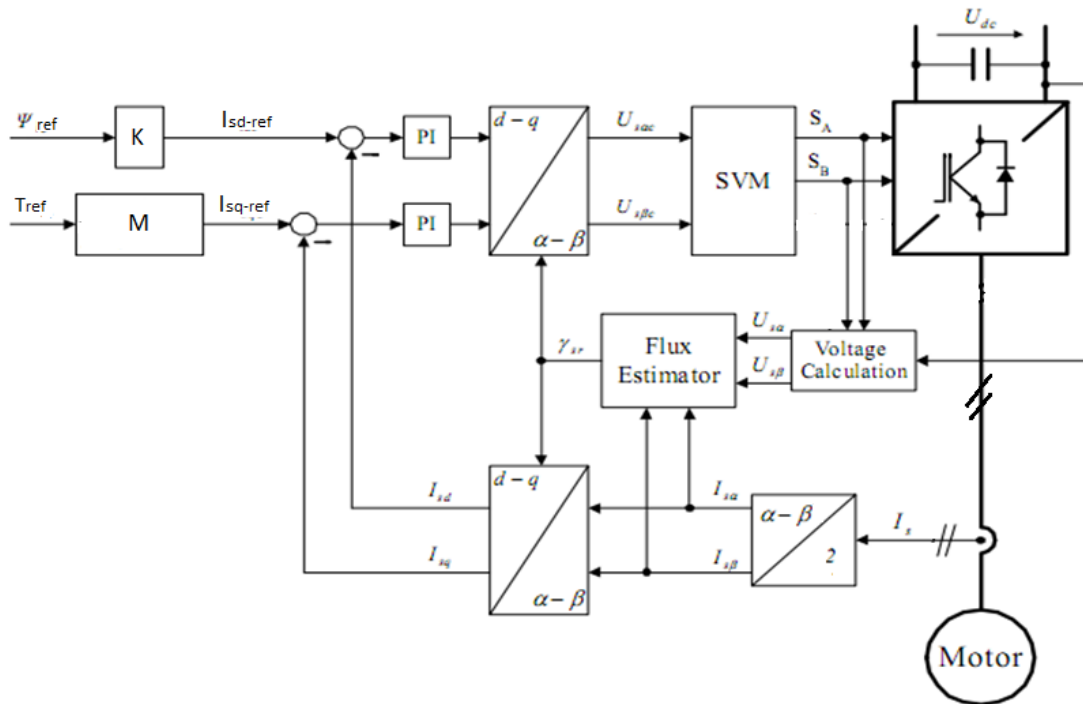
در یک سیستم کنترل برداری نیاز به داشتن پارامترهای دقیق ماشین امری ضروری است و هرگونه عدم هماهنگی بین پارامترهای موتور و پارامترهای مورد استفاده در محاسبات سیستم کنترل برداری، موجب اختلال در کار سیستم می‌شود. با فرض ثابت بودن موقعیت زاویه‌ای شار رتور نسبت به قاب مرجع گردان، فازور جریان استاتور به دو مؤلفه همسو با شار رتور وعمود بر آن تجزیه می‌شود. مؤلفه همسو با شار، جریان تولید کننده میدان و مؤلفه عمود بر آن، جریان تولید کننده گشتاور است. در واقع گشتاور با تغییر زاویه و اندازه جریان استاتور نسبت به شار رتور کنترل می‌شود.

$$T_e = K\psi_r I_s \sin \delta \quad (1-1)$$

ψ_r شار رتور، I_s جریان استاتور، δ زاویه بین بردار جریان استاتور و شار رتور و K ثابتی است که به اندوکتانس‌های مغناطیسی و نشتی رتور وابسته است.

در کنترل برداری، جریان استاتور در قاب ثابت α - β اندازه‌گیری می‌شود. بهمین دلیل مولفه‌های آن باید به سیستم گردان d - q متصل به شار رتور منتقل شوند. این انتقال نیازمند اطلاع از موقعیت شار رتور است. این زاویه شار می‌تواند به طور مستقیم در روش DFOC اندازه‌گیری شود (شکل ۱-۲)، یا به طور غیرمستقیم در روش IFOC محاسبه شود (شکل ۱-۳). در کنترل برداری مستقیم، یک تخمین‌گر و سنسور زاویه شار رتور را محاسبه می‌کند. ورودی‌های سنسور در این حالت جریان و ولتاژ استاتور هستند. در روش کنترل برداری غیرمستقیم، زاویه شار تنها با کمک جریان استاتور و سرعت رتور بدست می‌آید. عدم نیاز به سنسورهای زاویه شار و امکان کار در سرعت‌های پایین، کنترل برداری غیرمستقیم را در مقایسه با کنترل برداری مستقیم کاربردی‌تر کرده است. عمده‌ترین مشکلی که در این نوع کنترل وجود دارد تغییر پارامترهای ماشین در شرایط کاری است. با توجه به اینکه در طراحی سیستم کنترل برداری از پارامترهای ثابت موتور استفاده می‌شود، ولی در عمل به خاطر شرایط کاری و تغییر دما و عامل اشباع مغناطیسی هسته، این پارامترها دچار تغییر می‌شوند و این باعث عدم هماهنگی بین پارامترهای موتور و پارامترهای مورد استفاده در محاسبات سیستم کنترل برداری شده و موجب اختلال در کار سیستم می‌شود.

در سیستم تک‌فاز بدلیل نامتقارن بودن دو سیم پیچ استاتور در مقایسه با سیستم سه فاز، باید در تعریف کنترل برداری تغییراتی لحاظ شود [2] تا قابل استفاده در این سیستم شود (در بخش ۳-۲ از فصل سوم با آن اشاره شده است). این نامتقارنی در ساختار سیم پیچ‌ها - حتی اگر جریان‌های دو سیم پیچ کاملاً سینوسی باشد- در شکل موج گشتاور حس شده و در آن اعوجاج ایجاد می‌کند. همچنین در [2]، دیگر روش‌های کنترلی مثل کنترل شار رتور یا استاتور نیز ذکر و مقایسه شده‌اند.



شکل ۱-۲: نمودار سیستم کنترلی DFOC

γ_{sr} زاویه شار رتور و K و M ضرایبی ثابت و وابسته به ساختار فیزیکی سیم پیچ‌ها مثل مقاومت و اندوکتانس مغناطیسی و خودی آنها هستند. $I_{s\alpha}$ و $I_{s\beta}$ جریان سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی در قاب ثابت و I_{sd} و I_{sq} همان جریان‌ها در قاب متصل به شار رتور هستند. همانطور که در شکل ۱-۲ دیده می‌شود از دو مولفه جریان، I_{sd} برای کنترل شار رتور و I_{sq} برای کنترل گشتاور موتور استفاده می‌شوند در واقع به کمک این سیستم، کنترل شار و گشتاور تا حدودی مستقل از هم انجام می‌شود (شبیه به موتورهای dc تحریک مستقل).