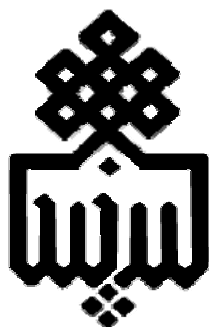


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

طراحی و ساخت کنترل گشتاور مستقیم موتور القایی با استفاده از مدولاسیون فضای برداری

نگارش:

علی اسماعیلی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی شمسی نژاد

زمستان ۱۳۹۰

تأییدیه هیأت داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

تقدیم بہ خوبان خوب و یادگارن، ہمیشہ جاوید؛

معلمان دوران ابتدائی تا بہ امروزم

تقدیم بہ فریختہ استاد مہربان و دلسوزم؛

دکتر محمد علی شمسی نژاد

تشکر و قدردانی

ستایش خداوند لایزالی که پیشانی خضوع جز بر خاک درگاهش نتوان سایید. اکنون که با الطاف بی‌منت‌هایش، قطره‌ای از دریای بی‌کران علمش نصیبم شد سجده شکر به درگاهش می‌نهم و از بزرگواری که در به بار نشستن این پایان‌نامه مرا یاری نمودند تشکر می‌نمایم. این پایان‌نامه ثمره تلاش و راهنمایی خردمندانه جناب آقای دکتر محمد علی شمسی نژاد است که از صمیم قلبم از ایشان تشکر می‌نمایم.

از اساتید گران‌قدر؛ جناب آقای دکتر حمید رضا نجفی و جناب آقای دکتر سید محمد رضوی، به عنوان اساتید محترم دآوری، نهایت تشکر و قدردانی را دارم. در ضمن بر خود واجب می‌دانم که از کلیه اساتید و کارمندان دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند علی‌الخصوص گروه قدرت به خاطر همه زحماتشان در طول دوره تحصیل تشکر و قدردانی ویژه بنمایم. صمیمانه‌ترین سپاسگزاری خود را نثار خانواده عزیزم می‌کنم، که دلسوزانه در این راه مرا یاری نموده‌اند.

در پایان از کلیه دوستان ارجمند دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد؛ که مرا همراهی نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم و از درگاه خداوند متعال آینده‌ای پر از موفقیت برایشان آرزومندم.

چکیده

امروزه به خاطر پیشرفت در عناصر نیمه‌هادی قدرت و به طبع پیشرفت در روش‌های کنترل درایوهای سرعت متغیر، ماشین‌های القایی (IM)^۱ جایگزین ماشین‌های جریان مستقیم (DC)^۲ در صنعت شده‌اند. در دهه اخیر روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)^۳ بر خلاف روش‌های کنترل برداری^۴، به خاطر سادگی ساختار، پیاده‌سازی آسان، همراه با پاسخ دینامیکی سریع مورد توجه فراوان قرار گرفته است. DTC، روش کنترلی است که موتور و مبدل^۵ را به صورت یک سیستم یکپارچه در نظر می‌گیرد و در یک رفتار بهینه هر دو را کنترل می‌کند. DTC کلاسیک^۶ (CDTC) دارای دو مشکل اساسی (الف) ریپل بالای شار و گشتاور (ب) فرکانس کلید زنی متغیر است. موضوع اصلی این پایان‌نامه رفع مشکلات نهاده شده در تکنیک DTC کلاسیک، ولی با حفظ مزایای آن می‌باشد. در این پایان‌نامه مدولاسیون بردار فضایی (SVM)^۷ که به کلید زنی ثابت مبدل منجر می‌شود، معرفی شده است، سپس روش نسبتاً جدیدی به نام DTC-SVM که در دهه اخیر معرفی شده است، ارائه می‌شود. در ادامه با بررسی رویکردهای مختلف روش‌های موجود DTC-SVM، روشی را که از دو کنترل کننده PI بهره می‌برد برای مقایسه با DTC کلاسیک انتخاب شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده در محیط سیمولینک MATLAB، نشان داده خواهد شد که در روش کنترلی DTC-SVM ریپل‌های شار و گشتاور، به طور چشم‌گیری کاهش یافته، و عملکرد DTC کلاسیک در حالت ماندگار بهبود می‌یابد. در نهایت، نتایج آزمایشگاهی برای تایید کارایی الگوریتم، ارائه خواهند شد. پیاده‌سازی سخت‌افزاری شامل یک پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP)^۸ شرکت تگزاس اینسترومنت (TI)^۹، موتور القایی و یک مبدل IGBT، 10KW است.

کلید واژه‌ها: شار استاتور، کنترل مستقیم گشتاور، گشتاور الکترومغناطیسی، مبدل منبع ولتاژ، مدولاسیون بردار فضایی، موتور القایی

¹ Induction machine

² Direct current

³ Direct Torque control

⁴ Vector control

⁵ Inverter

⁶ Classic DTC

⁷ Space Vector Modulation

⁸ Digital Signal Processor

⁹ Texas Instrument

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
و.....	چکیده
ه.....	فهرست علائم و نشانه‌ها
ح.....	فهرست جدول‌ها
ط.....	فهرست شکل‌ها
۱.....	فصل ۱- مقدمه
۱.....	۱-۱- پیشگفتار
۱.....	۱-۲-۱ تاریخچه
۱.....	۱-۲-۱ روند تاریخی کنترل ماشین‌های AC (القایی)
۴.....	۳-۱- مروری بر مطالعات انجام شده جهت بهبود عملکرد DTC کلاسیک IM
۶.....	۴-۱- هدف از انجام پایان‌نامه
۶.....	۵-۱- نوآوری پایان‌نامه
۷.....	۶-۱- ساختار پایان‌نامه
۸.....	فصل ۲- مدل دینامیکی موتور القایی و مبدل منبع ولتاژ
۸.....	۱-۲- مقدمه
۸.....	۲-۲- مدل ریاضی موتور القایی
۸.....	۱-۲-۲ معادلات در سیستم سه فاز
۱۰.....	۲-۲-۲ معادلات در مختصات مرجع dq دلخواه (تبدیل پارک)
۱۴.....	۳-۲-۲ شکل فضایی معادلات ماشین القایی
۱۷.....	۱-۳-۲-۲ تعریف بردارهای فضایی در سیستم مختصات ساکن
۱۸.....	۳-۲- مبدل منبع ولتاژ (VSI)
۱۹.....	۱-۳-۲- VSI سه فاز
۲۰.....	۲-۳-۲ مدولاسیون پهنای پالس بر مبنای موج حامل در VSI سه فاز
۲۱.....	۳-۳-۲ مدولاسیون بردار فضایی (SVM)
۲۱.....	2-3-3-1- اصول اولیه SVM
۳۰.....	2-3-3-2- پیاده سازی SVM
۳۶.....	۴-۲- نتیجه‌گیری
۳۷.....	فصل ۳- روش‌های کنترل برداری موتورهای القایی سه فاز
۳۷.....	۱-۳- مقدمه
۳۷.....	۲-۳- بررسی نواحی سه‌گانه‌ی کنترل سرعت موتور القایی
۳۹.....	۳-۳- تخمین شار و گشتاور

۴۰	تخمین شار روتور و گشتاور با استفاده از جریان استاتور و سرعت	۱-۳-۳
۴۰	تخمین شار فاصله هوایی و گشتاور با استفاده از ولتاژ و جریان استاتور	۲-۳-۳
۴۱	کنترل برداری	۴-۳
۴۲	اجرای کنترل برداری موتورهای القایی	۱-۴-۳
۴۳	جهت یابی شار	۲-۴-۳
۴۳	شار فاصله هوایی	۱-۲-۴-۳
۴۳	شار روتور	۲-۲-۴-۳
۴۴	شار استاتور	۳-۲-۴-۳
۴۴	رابطه گشتاور در شرایط تحقق کنترل برداری	۳-۴-۳
۴۵	شرایط جهت یابی شار روتور	۱-۳-۴-۳
۴۵	شرایط جهت یابی شار فاصله هوایی	۲-۳-۴-۳
۴۶	شرایط جهت یابی شار استاتور	۳-۳-۴-۳
۴۷	محاسبه سیگنال مجزا کننده شارهای استاتور	۴۷
۴۹	انواع روش های کنترل برداری	۴-۴-۳
۴۹	کنترل کننده برداری مستقیم با جهت یابی شار استاتور	۱-۴-۴-۳
	کنترل برداری غیر مستقیم با استفاده از جهت یابی شار روتور و اینورتر PWM با جریان کنترل شده	۲-۴-۴-۳
۵۰	شده	۵۰
۵۲	روش های مجزا سازی غیر خطی	۵-۳
۵۳	نتیجه گیری	۶-۳
۵۴	کنترل مستقیم شار و گشتاور	فصل ۴
۵۴	مقدمه	۱-۴
۵۴	اصول پایه تکنیک کنترل مستقیم گشتاور	۲-۴
۵۶	کنترل مستقیم گشتاور کلاسیک (CDTC) - شار با مسیر دایره ای	۳-۴
۵۹	کنترل کننده هیستریزیس در سیستم های آنالوگ و دیجیتال	۴-۴
۶۲	خود کنترل مستقیم (DSC) - شار با مسیر شش ضلعی	۵-۴
۶۵	نتایج شبیه سازی طرح CDTC	4-6-
۶۸	کنترل سرعت در CDTC	۱-۶-۴
۷۰	اصلاحات در CDTC	4-7-
۷۰	بهبود عملکرد در شرایط راه اندازی و سرعت های پایین	۱-۷-۴
۷۱	کاهش ریپل گشتاور با افزایش تعداد حالات کلید زنی اینورتر	۲-۷-۴
۷۱	کنترل اندازه شار روتور	۳-۷-۴
۷۱	نتیجه گیری	4-8-
۷۲	کنترل مستقیم گشتاور با مدولاسیون بردار فضایی DTC-SVM	فصل ۵
۷۲	مقدمه	5-1-
۷۳	ساختارهای DTC-SVM با بهره گیری از کنترل کننده های PI	۲-۵

۷۳	۱-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته شار استاتور.....
۷۴	۲-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته گشتاور (کنترل شده با زاویه شار استاتور).....
۷۵	۳-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته گشتاور (کنترل شده با زاویه شار روتور).....
۷۷	۱-۳-۲-۵	تخمینگر شار.....
۷۸	۴-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته گشتاور (با اندازه و زاویه شار استاتور مجزا شده).....
۷۹	۱-۴-۲-۵	کنترل گشتاور.....
۸۰	۲-۴-۲-۵	طراحی کنترل کننده PI.....
۸۲	۳-۴-۲-۵	کنترل مستقیم شار استاتور:.....
۸۳	۵-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته شار و گشتاور در مختصات قطبی.....
۸۳	۶-۲-۵	طرح DTC-SVM با کنترل حلقه بسته گشتاور و شار در مختصات شار استاتور.....
۸۴	۱-۶-۲-۵	کنترل شار استاتور.....
۸۵	۲-۶-۲-۵	کنترل گشتاور الکترومغناطیسی.....
۸۶	۳-۶-۲-۵	کنترل کننده‌های PI.....
۸۸	۳-۵	نتیجه گیری.....
۹۰	۶	فصل ۶- نتایج شبیه‌سازی DTC-SVM
۹۰	۱-۶	مقدمه.....
۹۰	۲-۶	تعیین سطح اشباح کنترل کننده‌های شار و گشتاور.....
۹۰	۳-۶	تنظیم ضرایب کنترل کننده.....
۹۲	۱-۳-۶	کنترل مستقیم گشتاور.....
۹۲	۱-۱-۳-۶	گشتاور مرجع ثابت، شار مرجع ثابت.....
۹۶	۲-۱-۳-۶	تغییرات پله‌ای گشتاور مرجع با شار مرجع ثابت.....
۹۷	۳-۱-۳-۶	تغییرات پله‌ای شار مرجع با گشتاور مرجع ثابت.....
۹۸	۲-۳-۶	کنترل سرعت.....
۹۹	۱-۲-۳-۶	سرعت و شار مرجع ثابت.....
۱۰۱	۲-۲-۳-۶	شار مرجع ثابت، همراه با تغییرات پله‌ای در سرعت مرجع.....
۱۰۳	۳-۲-۳-۶	کنترل سرعت در سرعت‌های پایین.....
۱۰۶	۷	فصل ۷- ملاحظات عملی و پیاده سازی آزمایشگاهی
۱۰۶	۱-۷	مقدمه.....
۱۰۶	۲-۷	تخمین شار.....
۱۱۱	۳-۷	تخمین مقاومت استاتور.....
۱۱۲	۱-۳-۷	جبران کننده PI مقاومت استاتور.....
۱۱۳	۴-۷	پیکر بندی درایو IM بر مبنای DTC-SVM.....
۱۱۴	۱-۴-۷	برد مدار کنترلی.....
۱۱۵	7-4-1-1-	مدار واسط برد DSP.....
۱۱۶	۲-۱-۴-۷	برد eZdsp™320F28335.....
۱۲۴	۵-۷	نتیجه‌گیری.....

فصل ۸ - نتایج آزمایشگاهی	۱۲۵
فصل ۹ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۲۶
۹-۱ - نتیجه‌گیری	۱۲۶
۹-۲ - پیشنهادات	۱۲۷
ضمیمه أ - تجهیزات آزمایشگاهی	۱۲۸
ضمیمه ب - الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)	۱۳۳
فهرست مراجع	۱۳۵
واژه نامه فارسی به انگلیسی	۱۳۸
واژه نامه انگلیسی به فارسی	۱۴۱

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ولتاژ لحظه‌ای فاز استاتور و روتور	V_{abcs}, V_{abcr}
جریان لحظه‌ای فاز استاتور و روتور	I_{abcr}, I_{abcs}
شار لحظه‌ای استاتور و روتور	Ψ_{abcs}, Ψ_{abcr}
مقاومت استاتور و روتور	R_r, R_s
ماتریس اندوکتانس استاتور و روتور	\bar{L}_r, \bar{L}_s
ماتریس انتقال مولفه‌های استاتور و روتور	\bar{K}_r, \bar{K}_s
سرعت چرخش دستگاه مرجع	ω
فرکانس برق تغذیه، و یا سرعت چرخش حوزه دوار	ω_e
سنکرون بر حسب رادیان بر ثانیه	ω_r
سرعت چرخش الکتریکی روتور	ω_{mr}
سرعت چرخش مکانیکی روتور	θ
زاویه بین محور d مختصات مرجع نسبت به مبنا، یعنی محل محور فاز a استاتور	θ_r
زاویه بین محور روتور (محور منطبق بر فاز a روتور) نسبت به محور استاتور	
اندوکتانس مغناطیسی، روتور و استاتور	L_r, L_s
راکتانس روتور، مغناطیسی و استاتور	X_r, X_M, X_s
ولتاژ استاتور روی محور d و q	V_{qs}, V_{ds}
ولتاژ استاتور روی محور α و β	$V_{\beta s}, V_{\alpha s}$
جریان استاتور روی محور d و q	I_{qs}, I_{ds}
جریان استاتور روی محور α و β	$I_{\beta s}, I_{\alpha s}$
جریان روتور روی محور d و q	I_{qr}, I_{dr}
جریان روتور روی محور α و β	$I_{\beta r}, I_{\alpha r}$
شار استاتور روی محور d و q	Ψ_{qs}, Ψ_{ds}
شار روتور روی محور d و q	Ψ_{qr}, Ψ_{dr}
شار استاتور روی محور α و β	$\Psi_{\alpha s}, \Psi_{\beta s}$
شار روتور روی محور α و β	$\Psi_{\alpha r}, \Psi_{\beta r}$
گشتاور الکتریکی، گشتاور بار	T_e, T_l
تعداد قطب	P
بردار واحد مختلط	a

\vec{V}_s	بردار فضایی ولتاژ استاتور
\vec{V}_r	بردار فضایی ولتاژ روتور
\vec{I}_s	بردار فضایی جریان استاتور
\vec{I}_r	بردار فضایی جریان روتور
$\vec{\psi}_s$	بردار فضایی شار استاتور
$\vec{\psi}_r$	بردار فضایی شار روتور
$\theta_{Vs\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی ولتاژ استاتور در مختصات $\alpha\beta$
$\theta_{Vr\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی ولتاژ روتور در مختصات $\alpha\beta$
$\theta_{Is\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی جریان استاتور در مختصات $\alpha\beta$
$\theta_{Ir\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی جریان روتور در مختصات $\alpha\beta$
$\theta_{\psi s\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی شار استاتور در مختصات $\alpha\beta$
$\theta_{\psi r\alpha\beta}$	زاویه بردار فضایی شار روتور در مختصات $\alpha\beta$
v_m, v_c	سیگنال مدولاسیون و حامل
V_m, V_c	پیک سیگنال مدولاسیون و حامل
f_m, f_c	فرکانس سیگنال مدولاسیون و حامل
$\vec{S}_7, \vec{S}_6, \vec{S}_5, \vec{S}_4, \vec{S}_3, \vec{S}_2, \vec{S}_1, \vec{S}_0$	حالات کلید زنی
E	ولتاژ منبع DC
n, N	نقطه خنثی بار و منبع DC
T_s	پریود نمونه‌گیری
\vec{V}_{ref}, ϕ	بردار مرجع و زاویه فاز
T_0, T_1, \dots, T_7	سیکل وظیفه بردارهای فضایی
m, m^*	شاخص مدولاسیون در SVM, CBPWM
n	شماره قطاع
$\vec{V}_7, \vec{V}_6, \vec{V}_5, \vec{V}_4, \vec{V}_3, \vec{V}_2, \vec{V}_1, \vec{V}_0$	بردارهای فضایی ولتاژ در دستگاه دو بعدی
T_R	ثابت زمانی روتور
$\sin \theta_e, \cos \theta_e$	بردارهای یکه
$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$	سرعت زاویه‌ای لغزش
S	عملگر لاپلاس
δ	ضریب نشتی
i_{dq}	مولفه مجزا ساز جریان
δ	زاویه بین بردارهای شار و جریان استاتور
δ_ψ	زاویه بین بردارهای شار استاتور و روتور
e_ϕ, e_T	خطاهای شار و گشتاور
d_ϕ, d_T	مقادیر خروجی دیجیتال شده باند هیستریزس

S_A, S_B, S_C	سیگنال‌های تریگر
H_T	پهنای باند هیستریزیس گشتاور
H_ψ	پهنای باند هیستریزیس شار
$\gamma_{\psi s}$	زاویه بردار شار استاتور
$\gamma_{\psi r}$	زاویه بردار شار روتور
ε_{T_e}	متوسط خطای گشتاور
$\varepsilon_{\psi s}$	متوسط خطای شار
ψ_{sN}	بردار نامی شار استاتور
T_{eN}	گشتاور نامی
d_A, d_B, d_C	متغیرهای دیجیتال شده مقایسه‌گر شار
$\Delta\delta_\varphi$	نمو تغییرات زاویه
$\Delta\vec{\psi}_s$	نمو تغییرات شار استاتور
ω_n	فرکانس طبیعی
ξ	ضریب میرایی
K_P, K_I	ضرایب تناسبی و انتگرال گیر
T_i	زمان انتگرال گیری
$\Delta\gamma_{sd}$	بخش دینامیکی نمو زاویه شار استاتور
$\Delta\gamma_{ss}$	بخش استاتیک نمو زاویه شار استاتور
$E_{ds}(s)$	اغتشاش کنترلر شار
$G_{\psi s}(s)$	تابع تبدیل شار
$E_{qs}(s)$	اغتشاش کنترلر گشتاور
$G_{T_e}(s)$	تابع تبدیل گشتاور
ω_s	سرعت زاویه ای شار استاتور
emf	نیرو محرکه الکتریکی

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۹	جدول ۱-۲: حالت‌های معتبر کلید زنی در VSI سه فاز
۲۷	جدول ۲-۲: ۸ حالت کلید زنی و ۸ بردار ولتاژ متناظر
۳۹	جدول ۱-۳: انواع روش‌های کنترل عددی موتورهای القایی
۵۹	جدول ۱-۴: جدول کلید زنی بهینه در CDTC
۸۹	جدول ۱-۵: مقایسه روش‌های کنترلی IM
۱۱۶	جدول ۱-۷: میکرو میکروکنترلرهای سری ۲۸۳۳۵ و ۲۸۱۲
۱۲۱	جدول ۲-۷: مالتی پلکس کردن پین (از بین ۸۸ پین فقط کارکرد ۵ پین نشان داده شده است)
۱۲۸	جدول ۱-أ: داده‌های موتور القایی 5HP
۱۲۸	جدول ۲-أ: پارامترهای موتور القایی 5HP
۱۲۸	جدول ۳-أ: داده‌های موتور القایی
۱۲۸	جدول ۴-أ: پارامترهای موتور القایی
۱۳۱	جدول ۵-أ: مشخصه پل سه فاز IGBT
۱۳۴	جدول ۶-۹: محدوده ضرایب کنترل کننده‌های شار، سرعت و گشتاور

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: طبقه بندی روش‌های کنترل IM (NFO- جهت یابی میدان طبیعی).....	۲
شکل ۱-۲: شمای سیم پیچ‌های یک موتور القایی سه فاز.....	۹
شکل ۲-۲: انتقال مختصات abc به مختصات dq.....	۱۱
شکل ۳-۲: انتقال متغیرها از محورهای abc روتور به محورهای dq.....	۱۲
شکل ۴-۲: ساختار بردار فضایی مطابق با (۲-۳۴).....	۱۵
شکل ۵-۲: تجزیه بردار فضایی در قاب مرجع اختیاری.....	۱۶
شکل ۶-۲: توپولوژی اینورتر منبع ولتاژ سه فاز.....	۱۹
شکل ۷-۲: شکل موج VSI سه فاز با SPWM ($m = 0.8$) (a) سیگنال‌های مدولاسیون و کریر (b) وضعیت کلید S1 (c) وضعیت کلید S3 (d) ولتاژ خروجی ac (e) طیف فرکانسی ولتاژ خروجی.....	۲۱
شکل ۸-۲: حالات سوئیچینگ اینورتر منبع ولتاژ سه فاز.....	۲۲
شکل ۹-۲: بردار فضایی ولتاژ ومولفه های آن در دستگاه $\alpha\beta$	۲۳
شکل ۱۰-۲: نحوه اتصال فاز ها به منبع در حالت کلیدزنی S1.....	۲۴
شکل ۱۱-۲: توزیع بردار ولتاژها در دستگاه $\alpha\beta$	۲۵
شکل ۱۲-۲: بردار ولتاژ های اکتیو و غیر اکتیو در دستگاه $\alpha\beta$ برای ولتاژ های فاز و خط.....	۲۷
شکل ۱۳-۲: فضای حالت برداری ولتاژ.....	۲۹
شکل ۱۴-۲: نمای بلوک دیاگرام مدولاتور فضای برداری.....	۳۰
شکل ۱۵-۲: مقایسه مکان هندسی ماکزیمم ولتاژ کنترل خطی در Sine PWM, SVPWM.....	۳۳
شکل ۱۶-۲: سیگنال‌های گیت فاز در SVM1.....	۳۴
شکل ۱۷-۲: سیگنال‌های گیت فاز در SVM2.....	۳۵
شکل ۱۸-۲: سیگنال‌های گیت در SVM3.....	۳۵
شکل ۱۹-۲: تولید سیگنال‌های گیت در تکنیک CBPWM.....	۳۶
شکل ۱-۳: مشخصه‌ی جریان، فرکانس لغزش، گشتاور و ولتاژ تغذیه موتور القایی بر حسب سرعت.....	۳۸
شکل ۲-۳: نمایش بردار شار منطبق بر محور d^e مختصات مرجع دوار.....	۴۲
شکل ۳-۳: اجرای کنترل برداری در موتور القایی.....	۴۲
شکل ۴-۳: نمایش بردار شار فاصله هوایی منطبق بر محور d^e مختصات مرجع دوار.....	۴۶
شکل ۵-۳: نمایش بردار شار استاتور منطبق بر محور d^e مختصات مرجع دوار.....	۴۷
شکل ۶-۳: بلوک دیاگرام سیگنال مجزا ساز شار استاتور.....	۴۹
شکل ۷-۳: بلوک دیاگرام کنترل کننده برداری مستقیم با استفاده از جهت یابی شار استاتور.....	۵۰
شکل ۸-۳: دیاگرام برداری مؤلفه‌های شار روتور در حالت کنترل برداری غیر مستقیم.....	۵۱
شکل ۹-۳: بلوک دیاگرام کنترل برداری غیر مستقیم با جهت یابی شار روتور.....	۵۲

- شکل ۴-۱: دیاگرام برداری موتور القایی..... ۵۵
- شکل ۴-۲: بردار فضایی ولتاژهای خروجی مبدل دو سطحی..... ۵۵
- شکل ۴-۳: شکل گیری مسیر حرکت شار استاتور با انتخاب بردار ولتاژ مقتضی..... ۵۶
- شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور کلاسیک..... ۵۷
- شکل ۴-۵: کنترل کننده‌های هیستریزیس (a) دو سطحی شار (b) سه سطحی گشتاور..... ۵۷
- شکل ۴-۶: تقسیم بندی صفحه مختصات..... ۵۸
- شکل ۴-۷: عملکرد کنترل کننده های هیستریزیس (a) آنالوگ (b) دیجیتال..... ۶۰
- شکل ۴-۸: نتایج شبیه سازی برای CDTC (a) فرکانس کلید زنی (b) خطای گشتاور بر حسب تابعی از باند هیستریزیس گشتاور در فرکانس 20KHz [۳]..... ۶۱
- شکل ۴-۹: نتایج شبیه سازی برای CDTC (a) فرکانس کلید زنی (b) خطای گشتاور بر حسب تابعی از باند هیستریزیس گشتاور در فرکانس 80KHz [۳]..... ۶۲
- شکل ۴-۱۰: بلوک دیاگرام روش خود کنترل مستقیم..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱: عملکرد حالت ماندگار در روش DSC (a) ولتاژ خط (b) جریان (c) مؤلفه‌های شار استاتور (d) گشتاور الکترو مغناطیسی (e) مؤلفه‌های شار استاتور در صفحه مختلط [۳]..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲: پاسخ گشتاور در CDTC با گشتاور مرجع 15NM ۶۵
- شکل ۴-۱۳: پاسخ شار در CDTC با مرجع 8Wb ۶۶
- شکل ۴-۱۴: پاسخ گشتاور در CDTC با مقادیر مرجع $15, 10, 5$ (NM)..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵: پاسخ شار در CDTC با مقدار مرجع 8Wb . به زای تغییرات پله‌ای گشتاور..... ۶۷
- شکل ۴-۱۶: جریان فاز a موتور..... ۶۷
- شکل ۴-۱۷: بلوک کنترل سرعت در CDTC..... ۶۸
- شکل ۴-۱۸: پاسخ سرعت در CDTC با تغییرات پله‌ای سرعت مرجع..... ۶۹
- شکل ۴-۱۹: گشتاور مرجع تولیدی و پاسخ گشتاور در CDTC با تغییرات پله‌ای سرعت مرجع..... ۶۹
- شکل ۴-۲۰: جریان فاز موتور به ازای تغییر پله‌ای در سرعت..... ۷۰
- شکل ۵-۱: DTC-SVM با کنترل حلقه بسته شار..... ۷۴
- شکل ۵-۲: دیاگرام برداری..... ۷۴
- شکل ۵-۳: DTC-SV، کنترل حلقه بسته گشتاور با زاویه شار استاتور..... ۷۵
- شکل ۵-۴: DTC-SVM با کنترل حلقه بسته گشتاور..... ۷۶
- شکل ۵-۵: دیاگرام برداری شار..... ۷۷
- شکل ۵-۶: دیاگرام بلوکی تخمین گر شار..... ۷۸
- شکل ۵-۷: دیاگرام بلوکی DTC-SVM..... ۷۸
- شکل ۵-۸: بردار شارهای استاتور و روتور..... ۷۹
- شکل ۵-۹: بلوک کنترل گشتاور..... ۸۰
- شکل ۵-۱۰: طرح DTC-SVM پیاده شده در مختصات قطبی شار استاتور..... ۸۳
- شکل ۵-۱۱: کنترل حلقه بسته شار استاتور..... ۸۴

- شکل ۵-۱۲: کنترل حلقه بسته گشتاور..... ۸۵
- شکل ۵-۱۳: طرح DTC-SVM پیاده شده در مختصات کارترین شار استاتور..... ۸۶
- شکل ۵-۱۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده PI..... ۸۷
- شکل ۵-۱۵: حلقه کنترل شار و گشتاور با مدل ساده شده موتور..... ۸۸
- شکل ۵-۱۶: بلوک دیاگرام حلقه کنترل سرعت..... ۸۸
- شکل ۶-۱: همگرایی الگوریتم PSO..... ۹۱
- شکل ۶-۲: گشتاور الکترومغناطیسی در DTC-SVM و DTC کلاسیک..... ۹۲
- شکل ۶-۳: پاسخ حالت گذرا گشتاور..... ۹۳
- شکل ۶-۴: مولفه هارمونی ولتاژ کلید قدرت..... ۹۳
- شکل ۶-۵: اندازه شار استاتور (a) اندازه شار بر حسب زمان (b) قسمت زوم شده شار در مختصات دو بعدی (c) پاسخ حالت گذرای شار..... ۹۴
- شکل ۶-۶: جریان استاتور (a) جریان سه فاز در DTC-SVM (b) مقایسه جریان فاز a در دو روش (c) مقایسه مولفه هارمونیکی جریان فاز a..... ۹۵
- شکل ۶-۷: سرعت ماشین در DTC-SVM و DTC..... ۹۵
- شکل ۶-۸: خطای گشتاور..... ۹۵
- شکل ۶-۹: خطای شار..... ۹۶
- شکل ۶-۱۰: گشتاور خروجی با تغییر پله‌ای در گشتاور مرجع در DTC-SVM (a) پاسخ گشتاور در سه ناحیه (b) قسمت زوم شده در پله اول..... ۹۶
- شکل ۶-۱۱: شار استاتور (a) بر حسب زمان (b) مختصات دوبعدی در دستگاه ساکن..... ۹۷
- شکل ۶-۱۲: جریان استاتور (a) جریان فاز a (b) قسمت زوم شده جریان در تغییر پله گشتاور مرجع..... ۹۷
- شکل ۶-۱۳: شار استاتور (a) پاسخ شار به تغییرات پله‌ای (b) قسمت زوم شده شار استاتور در پله اول..... ۹۸
- شکل ۶-۱۴: گشتاور خروجی موتور با تغییرات پله‌ای شار استاتور..... ۹۸
- شکل ۶-۱۵: جریان فاز a موتور با تغییر پله‌ای در شار استاتور..... ۹۸
- شکل ۶-۱۶: (a) سرعت موتور (b) گشتاور الکترومغناطیسی..... ۹۹
- شکل ۶-۱۷: نمودار گشتاور بر حسب سرعت DTC-SVM..... ۹۹
- شکل ۶-۱۸: شار استاتور در DTC-SVM (a) اندازه شار (b) شکل زوم شده شار..... ۱۰۰
- شکل ۶-۱۹: جریان فاز a استاتور در DTC-SVM..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲۰: خطای سرعت در CDTC و DTC-SVM (a) خطای سرعت (b) شکل زوم شده خطای سرعت..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲۱: سرعت موتور با تغییر پله‌ای سرعت مرجع..... ۱۰۱
- شکل ۶-۲۲: گشتاور خروجی (a) بر حسب زمان (b) بر حسب سرعت موتور..... ۱۰۱
- شکل ۶-۲۳: جریان استاتور (a) جریان فاز a (b) تغییر جریان به ازای پله اول سرعت (c) تغییر جریان به ازای پله دوم سرعت..... ۱۰۲

- شکل ۶-۲۴: (a) شار استاتور (b) شکل زوم شده شار استاتور ۱۰۲
- شکل ۶-۲۵: سرعت موتور (a) سرعت موتور به ازای تغییر پله‌ای سرعت مرجع (b) بخش زوم شده سرعت در پله (c) مقایسه پاسخ سرعت DTC-SVM با DTC کلاسیک ۱۰۳
- شکل ۶-۲۶: (a) گشتاور الکترومغناطیسی در DTC-SVM و DTC کلاسیک (b) نمودار گشتاور سرعت در DTC-SVM در سرعت‌های پایین ۱۰۴
- شکل ۶-۲۷: (a) شار استاتور (b) شار استاتور زوم شده با تغییر در سرعت مرجع ۱۰۴
- شکل ۶-۲۸: جریان فاز a استاتور ۱۰۵
- شکل ۶-۲۹: جریان فاز a استاتور در سرعت 10RPM (a) CDTC (b) DTC-SVM ۱۰۵
- شکل ۷-۱: طرح کلی انتگرال اصلاح شده ۱۰۷
- شکل ۷-۲: بلوک دیاگرام الگوریتم انتگرال‌گیری تخمین شار ۱۰۸
- شکل ۷-۳: مقایسه شکل موج‌های تخمین زده شده با الگوریتم‌های متفاوت انتگرال‌گیری ۱۱۰
- شکل ۷-۴: مقایسه شکل موج‌های تخمین زده شده با الگوریتم‌های متفاوت انتگرال‌گیری ۱۱۰
- شکل ۷-۵: تخمین شار با الگوریتم جدید همراه با آفست dc در emf ورودی ۱۱۱
- شکل ۷-۶: دیاگرام شماتیکی جبران گر PI مقاومت استاتور ۱۱۲
- شکل ۷-۷: شماتیک پیاده سازی آزمایشگاهی ۱۱۳
- شکل ۷-۸: تجهیزات آزمایشگاهی ۱۱۴
- شکل ۷-۹: (a) موتور القایی (b) موتور dc (c) مبدل 10KW ۱۱۴
- شکل ۷-۱۰: برد کنترلی اصلی ۱۱۵
- شکل ۷-۱۱: (a) پردازنده TMS320F28335 برد (b) شرکت eZdspTM320F28335 Digital Spectrum ۱۱۶
- شکل ۷-۱۲: بلوک دیاگرام eZdspTMF28335 ۱۱۷
- شکل ۷-۱۳: بلوک دیاگرام زیر مازول‌های واحد ePWM ۱۱۹
- شکل ۷-۱۴: بلوک دیاگرام تابعی پردازنده 28335 ۱۲۳
- شکل ۱-۱: سنسور جریان AC/DC ۱۲۹
- شکل ۱-۲: سنسور ولتاژ AC/DC ۱۲۹
- شکل ۱-۳: منبع تغذیه جهت تأمین توان سنسورهای ولتاژ، جریان و مدار واسط برد DSP ۱۳۰
- شکل ۱-۴: (a) پل سه فاز IGBT شرکت SEMIKRON (b) درایور IR2130 ۱۳۱
- شکل ۱-۵: نمای بیرونی مبدل 10KW ۱۳۲

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

امروزه درایوهای سرعت قابل تنظیم (ADS)^۱ به طور وسیع در صنعت به بکاربرده شده‌اند، که در اکثریت درایوها از موتورهای ac استفاده شده است. در سه دهه گذشته موتورهای DC به طور چشم‌گیری با موتورهای ac جایگزین شده‌اند، که دلیل عمده آن توسعه و رشد قطعات نیمه هادی^۲ مدرن، علی‌الخصوص ترانزیستورهای دوقطبی با گیت عایق شده (IGBT)^۳ و پیشرفت پردازنده‌های سیگنال دیجیتال (DSP) است. در این میان موتورهای القایی، به خاطر مزایای شناخته شده‌شان از جمله ساختار ساده، قابلیت اطمینان بالا، استحکام و هزینه پایین، کاربردهای صنعتی وسیعی پیدا کرده‌اند. درایوهای سرعت متغیر به طور گسترده‌ای در کاربردهایی از جمله، پمپ‌ها، آسانسورها، فن‌ها، وسایل نقلیه الکتریکی، گرمایش، سرمایه‌ش، سیستم تهویه مطبوع، رباتیک و ... مورد استفاده فراوان قرار گرفته‌اند [۱]. در گذشته، ماشین‌های DC برای درایوهای سرعت متغیر ترجیح داده می‌شدند. به هر حال، موتورهای DC دارای معایبی از جمله، هزینه بالا، اینرسی بالای روتور و مسایل نگهداری مربوط به کموتاتور^۴ و جاروبک^۵ هستند. در مقابل موتورهای DC کموتاسیونی، موتورهای القایی از آنجایی که هیچ گونه جرقه^۶ و خوردگی در آنها وجود ندارد می‌توانند در محیط‌های فرار و شیمیایی مورد استفاده قرار گیرند. اما استفاده از IM در درایوهای صنعتی با کارایی بالا، مشکلات کنترلی خاص خود را به همراه دارد. در فصل‌های ۳، ۴، ۵، به تفصیل در مورد انواع روش درایو موتور القایی بحث و بررسی خواهد شد.

۱-۲- تاریخچه

۱-۲-۱- روند تاریخی کنترل ماشین‌های AC (القایی)

به واسطه ساختار غیر خطی با تزویج^۷ بالا، کنترل کارآمد IM یک چالش به حساب می‌آید. از لحاظ اقتصادی بیشتر روش‌های کنترل سرعت IM با استفاده از مبدل‌های فرکانس پیاده‌سازی شده‌اند. تعداد توپولوژی‌های متفاوتی از مبدل فرکانس پیشنهاد شده‌اند، که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عملکرد ایده‌آل مورد نیاز از مبدل‌های فرکانس - تغذیه کننده درایو IM را می‌توان، به صورت زیر بیان کرد:

- پاسخ سریع گشتاور و شار
- حداکثر گشتاور خروجی موجود در محدوده وسیعی از ناحیه عملکردی سرعت

¹ Adjustable speed drive

² Semiconductor device

³ Insulated gate bipolar transistor

⁴ Commutator

⁵ Brush

⁶ Spark

⁷ Coupling

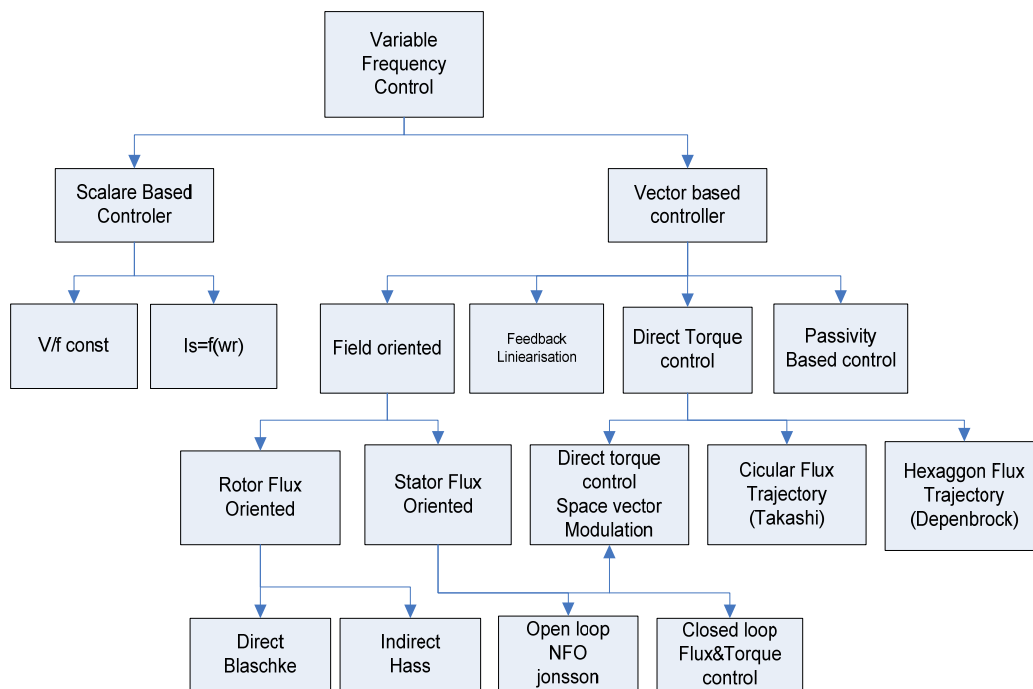
- فرکانس کلید زنی ثابت
- PWM ولتاژ تک قطبی
- مقاوم در برابر تغییرات پارامتر موتور
- عملکرد چهار ربعی

مشخصات ذکر شده به استراتژی کنترلی به بکاربرده شده، بستگی دارد. از جمله مشخصات یک استراتژی کنترلی خوب می‌توان به الگوریتم کنترلی ساده و عملکرد صحیح سیستم با ابعاد کنترلی کوچک در جهت کاهش قیمت تولید نهایی اشاره کرد.

یک طبقه‌بندی کلی از روش‌های کنترل IM در شکل ۱-۱ [۲] ارائه شده است. این دسته‌بندی به دو گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شود: عددی^۱، برداری^۲.

روش‌های عددی در پیاده‌سازی ساده می‌باشند. شناخته‌شده‌ترین روش عددی در صنعت، کنترل V/f ^۳ ثابت است. ولی در مقابل سادگی، کارایی بالایی را مهیا نمی‌کند. روش‌های کنترل برداری علاوه بر کنترل اندازه ولتاژ و فرکانس (همانند روش‌های عددی)، موقعیت لحظه‌ای بردارهای ولتاژ، جریان و شار را کنترل می‌کنند. که به طور چشم‌گیری رفتار دینامیکی درایو را بهبود می‌بخشد.

به هر حال، به دلیل ساختار غیر خطی موتور القایی، بین گشتاور الکترومغناطیسی و شار موتور تزویج وجود دارد. از این حیث چندین روش برای مجزا نمودن گشتاور و شار پیشنهاد شده‌اند. بنابراین الگوریتم‌های کنترلی بسته به نوع روش در نظر گرفته شده، ایده‌ها و تحلیل‌های متفاوتی را پوشش می‌دهند.



شکل ۱-۱: طبقه بندی روش‌های کنترل IM (NFO- جهت یابی میدان طبیعی)

¹ Scalar
² Vector
³ Voltage/frequency