بسم الله الرحمن الرحيم

٣٩٨٠٥

۱۳۸۰ /۱۲/ ۱۹
مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی برق

شبیه‌سازی و ساخت مدل آزمایشگاهی کنترل‌برداری موتور القایی با استفاده از شبکه‌های عصبی و کنترل فازی جهت خودروهای هیبرید

016483

اکبر رهیده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی برق – قدرت

استاد راهنما:

دکتر حسن مقبلی

استاد مشاور:

دکتر محسن کلانتر

آذرماه ۱۳۸۰

۳۹۸۰۵

تقدیم به:

مادر عزیزم ، همسر مهربانم

و

روح بزرگ پدرم

چکیده

از میـان انـواع موتورهـای الکتریکی مورد استفاده در خودروهای برقی و هیبرید، موتورهای القایی بویژه نوع روتـور قفـس سـنجابی بخاطـر برخی مزایای خاص نسبت به موتورهای *dc* کاربرد وسیعتری دارند. روشهای کنترل موتورهای القایی بطورکلی به دو دستهٔ کنترل اسکالر و کنترل‌برداری تقسیم می‌شوند. با توجه به مزایای کنـترل موتورهـای *dc* ، در روش کنـترل‌برداری، موتورهای *ac* همانند موتورهای *dc* با تحریک مستقل کنترل می‌شوند.

در ایـن پایـان‌نامه با توجه به کاربرد موتور القایی در خودروهای هیبرید، ابتدا انواع سیستم‌های هیبرید بررسی شـده و سپس شبیه‌سازی موتور القایی و اعمال کنترل اسکالر و برداری روی موتور انجام شده و در نهایت از سیسـتم‌هـای هوشـمند (شبکه عصبی و منطق فازی) بعنوان کنترلر، جهت مقاوم‌تر نمودن سیستم استفاده شده است.

لازم بـه ذکـر اسـت کـه در ایـن پایـان‌نامـه از سـه نوع شبکه عصبی پرسپترون چند لایه[1] (*MLP*) ، توابع پایه شـعاعی[2] (*RBF*) و ویونـت[3] اسـتفاده شـده کـه نـتایج حاصـله از نظر عملکردی، حجم محاسباتی و زمانی با یکدیگـر مقایسـه شـده‌اند. از طرف دیگر در بکارگیری کنترلر فازی یکی از اهداف، استفاده از ساختار کنترلر فازی با حداقل محاسبات و با دقت مناسب بوده که این کار نیز انجام شده است.

پـس از بررسـی نـتایج شبیه‌سازی و مقایسه آنها، ساخت مدل آزمایشگاهی مربوطه برای کنترل برداری موتور القـایی بـا اسـتفاده از پردازشگر سیگنال دیجیتال (*DSP*) انجام شده است. در نهایت نتایج شبیه سازی و نتایج حاصـل از مـدل آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده‌اند و با توجه به هدف اصلی یعنی بکارگیری این سیستم درایو بعنوان سیستم محرکه الکتزیکی در خودروهای هیبرید، بررسی‌های لازم انجام شده است.

---

1 - Multilayer Perceptron
2 -Radial Basis Function
3 -Wavenet

سپاس و نیایش

پـروردگارا تـرا شـکر مـی‌گویـم کـه در ایـن مرحله از زندگی نیز همانند گذشته یاریم فرمودی و از لطف و مـرحمت خـود بهره‌مندم نمودی. بار خدایا ما بندگان ناچیز تو قادر به شکر این همه نعمت نبوده و به خیر و صـلاح خود آگاه نیستیم پس ما را ببخش و هر چه به صلاحمان است برایمان مقدر فرما. خداوندا این خسته شکسته را از درگاه خویش مران و این بیچاره درمانده را بر خاک ناامیدی منشان، در گرفتاریها دست مرا بگیر و مـرا از لغزشـها نگه‌دار. خدایا مرا کمک کن تا در آینده بتوانم از آموخته‌هایم در جهت صحیح استفاده نمایم و هـر روز بـر دانش اندکم افزوده گردانم و بتوانم حق این آموخته‌ها را ادا نمایم بار الها تو می‌دانی که در دلم چه می‌گذرد پس

خدایا چنان کن سرانجام کار　　تو خشنود باشی و ما رستگار

قدردانی

از زحمات جناب آقای **دکتر مقبلی** که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند و از هیچ راهنمایی و کمکی دریغ ننمودند و از استاد مشاور گرامی جناب آقای **دکتر کلانتر** سپاسگذاری می‌نمایم. همچنین از زحمات و کمک‌های ارزنده جناب آقای **دکتر عرب خابوری** که در ساخت مدل آزمایشگاهی با صرف وقت زیاد بسیار مرا یاری نمودند، جناب آقای **دکترصفوی** که در زمینه شناخت شبکه‌های عصبی و ویونت کمکهای شایان توجهی نمودند، جناب آقای **دکتر فرخی** بخاطر راهنماییهای فراوانی در مباحث شبکه عصبی و کنترل فازی، جناب آقای **دکتر واحدی** بسبب راهنماییهای ایشان در شبیه‌سازی‌ها، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

چکیده ..... ح

۱) فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱) معرفی موضوع ۱

۱-۲) تاریخچه خودروهای برقی و هیبرید ۲

۱-۳) مقالات مروری ۵

۱-٤) معرفی فصول پایان نامه ٦

۲) فصل دوم : تشریح تکنولوژی خودروهای هیبرید ۷

۲-۱) مقدمه ۷

۲-۲) خودروهای برقی ۷

۲-۲-۱) مزایای خودروهای برقی ۱۰

۲-۲-۲) معایب خودروهای برقی ۱۰

۲-۳) خودروهای هیبرید ۱۱

۲-۳-۱) خودروهای الکتریکی هیبرید سری ۱۲

۲-۳-۱-۱) سیستم سری ایده‌آل ۱۳

۲-۳-۱-۲) سیستم سری جبران‌ساز توان مصرفی ۱۳

۲-۳-۱-۳) سیستم سری جبران‌ساز میزان شارژ باتری ۱٤

۲-۳-۱-٤) ویژگیهای سیستم‌های هیبرید سری ۱٤

۲-۳-۲) خودروهای الکتریکی هیبرید موازی ۱۵

۲-۳-۲-۱) درجه هیبریداسیون ۱٦

۲-۳-۲-۲) سیستم موازی ایده‌آل ۱۸

۲-۳-۲-۳) سیستم موازی احتراقی اصلی- الکتریکی کمکی ۱۸

۲-۳-۲-٤) سیستم موازی احتراقی کمکی- الکتریکی اصلی ۱۹

۲-۳-۲-۵) سیستم موازی هم محور با کلاچ بین موتور الکتریکی و جعبه‌دنده ۲۰

۲-۳-۲-٦) سیستم موازی هم محور با کلاچ بین موتور الکتریکی و احتراقی ۲۱

۲-۳-۲-۷) سیستم موازی هم محور با دو کلاچ در دو طرف موتور الکتریکی ۲۲

۲-۳-۲-۸) سیستم موازی غیر هم محور با ترکیب کننده قبل از جعبه‌دنده ۲۳

۲-۳-۲-۹) سیستم موازی غیر هم محور با ترکیب کننده بعد از جعبه‌دنده ۲٤

عنوان	صفحه

۲-۳-۲-۱۰) سیستم موازی مجزا ۲۵
۲-۳-۳) خودروهای الکتریکی هیبرید سری ـ موازی (دوگانه) ۲۶
۲-٤) نتیجه‌گیری ۲۸

۳) فصل سوم : محرکه الکتریکی در خودروهای برقی و هیبرید ۳۱
۳-۱) مقدمه ۳۱
۳-۲) موتورهای الکتریکی ۳۳
۳-۲-۱) موتورهای جریان مستقیم (DC) ۳۳
۳-۲-۲) موتورهای سنکرون با آهنربای دائم (PMSM) ۳٤
۳-۲-۳) موتورهای DC بدون جاروبک آهنربای دائم (BDCM) ۳۵
۳-۲-٤) موتورهای رلوکتانسی سوئیچ‌شونده (SRM) ۳۵
۳-۲-۵) موتورهای القایی (IM) ۳٦
۳-۲-٦) مقایسه اجمالی موتورهای الکتریکی مورد استفاده در خودروهای هیبرید ۳٦
۳-۲-۷) علل انتخاب موتور القایی بعنوان محرکه الکتریکی یک خودروی برقی ۳۷
۳-۳) استراتژیهای بکارگیری موتورهای الکتریکی در خودروهای برقی و هیبرید ۳۸
۳-۳-۱) سیستم محرکه با یک موتور ۳۸
۳-۳-۲) سیستم محرکه با دو موتور و دو کنترلر(موتورهای داخل چرخ) ۳۸
۳-٤) سوئیچ‌های نیمه هادی ۳۹
۳-۵) اینورتر ٤۱
۳-۵-۱) اینورتر مدولاسیون عرض پالس ٤۱
۳-۵-۲) مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ٤۲
۳-٦) کنترلرهای الکترونیکی ٤۵
۳-۷) نتیجه‌گیری ٤٦

٤) فصل چهارم : کنترل برداری ماشینهای القایی ٤۷
٤-۱) مقدمه ٤۷
٤-۲) کنترل ماشین القایی تغذیه شده با اینورتر ولتاژ ٤۹
٤-۳) معادلات ولتاژ استاتور در مختصات فلوی روتور ٤۹
٤-٤) مدارات مجزا سازی در مختصات فلوی روتور ۵۱

عنوان	صفحه

٤-٥) معادلات ولتاژ روتور در مختصات فلوی روتور ٥٢

٤-٦) معادلات ولتاژ روتور برای مدل فلو در مختصات ساکن ٥٣

٤-٦-١) مدل فلوی روتور با استفاده از مقادیر سرعت روتور و جریان استاتور ٥٤

٤-٦-٢) مدل فلوی روتور با استفاده از مقادیر سرعت روتور، ولتاژ و جریان استاتور ٥٦

٤-٦-٣) مدل فلوی روتور با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان استاتور ٥٨

٤-٧) معادلات گشتاور الکترومغناطیسی در حالت پایدار ٥٩

٤-٨) کنترل سرعت موتور القایی از طریق امتدادیابی میدان روتور ٦١

٤-٩) نتیجه‌گیری ٦٥

٥) فصل پنجم : بکارگیری هوش مصنوعی در کنترل‌برداری موتور القایی ٦٩

٥-١) هوش مصنوعی ٦٩

٥-٢) تئوری منطق فازی ٧٠

٥-٣) کنترل برداری موتور القایی با استفاده از منطق فازی ٧٤

٦) فصل ششم : بکارگیری شبکه‌های عصبی در کنترل برداری موتور القایی ٧٧

٦-١) شبکه‌های عصبی مصنوعی ٧٧

٦-٢) انتخاب نوع و طراحی ساختار شبکه عصبی ٧٨

٦-٣) شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) ٧٩

٦-٤) شبکه با تابع پایه شعاعی (RBF) ٧٩

٦-٥) روشهای یادگیری در شبکه‌های عصبی ٨٠

٦-٥-١) الگوریتم تعلیم پس انتشار ٨١

٦-٥-٢) الگوریتم تعلیم پس انتشار با ترم لحظه‌ای ٨٢

٦-٦) شبکه ویونت ٨٢

٦-٦-١) ویولت‌ها و آنالیز چند وضوحی ٨٣

٦-٦-٢) ساختار ویولت‌های چند بعدی ٨٤

٦-٦-٣) الگوریتم ویولت‌ها ٨٥

٦-٦-٤) روند طراحی ویونت ٨٦

٦-٦-٥) ساختاری برای محل توابع پایه ٨٧

٦-٦-٦) الگوریتم یادگیری ٨٨

عنوان | صفحه

٦-٧) کنترل برداری موتور القایی با کنترلر مبتنی بر شبکه عصبی ٩١

٧) فصل هفتم : شبیه‌سازی موتور القایی، کنترل اسکالر و برداری موتور القایی و استفاده از شبکه عصبی و کنترل فازی ٩٣

٧-١) مقدمه ٩٣

٧-٢) شبیه‌سازی موتور القایی سه فاز در مختصات ساکن ٩٣

٧-٣) شبیه‌سازی کنترل اسکالر یک موتور القایی سه فاز ١٠٠

٧-٤) شبیه‌سازی کنترل برداری یک موتور القایی سه فاز ١٠٦

٧-٥) شبیه‌سازی کنترل برداری موتور القایی با کنترلر مبتنی بر شبکه عصبی MLP ١١٥

٧-٦) شبیه‌سازی کنترل برداری موتور القایی با کنترلر مبتنی بر شبکه عصبی RBF ١٢١

٧-٧) شبیه‌سازی کنترل برداری موتور القایی با کنترلر مبتنی بر شبکه عصبی Wavenet ١٢٤

٧-٨) مقایسه بکارگیری سه شبکه عصبی MLP ، RBF و Wavenet ١٣٢

٧-٩) شبیه‌سازی کنترل برداری موتور القایی با کنترلر مبتنی بر منطق فازی ١٣٢

٧-١٠) نتیجه‌گیری ١٣٨

٨) فصل هشتم : طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی درایو القایی برای خودروهای هیبرید ١٤١

٨-١) مقدمه ١٤١

٨-٢) ویژگیهای درایو مورد استفاده در خودروهای برقی و هیبرید ١٤١

٨-٣) پیاده سازی کنترل برداری موتور القایی ١٤٢

٨-٣-١) سوییچ نیمه‌هادی و مدار قدرت ١٤٤

٨-٣-١-١) IGBT تکمیل کننده MOSFET قدرت ١٤٤

٨-٣-٢) سنسور جریان ١٤٥

٨-٣-٢-١) سنسور جریان مقاومت شنت ١٤٥

٨-٣-٢-٢) سنسور جریان اثر هال ١٤٧

٨-٣-٣) سنسور سرعت ١٤٩

٨-٣-٣-١) تاکومتر ١٤٩

٨-٣-٣-٢) سنسور سرعت اثر هال ١٥٠

٨-٣-٣-٣) شفت انکودر ١٥٠

٨-٣-٣-٤) انکودر پالس الکترومکانیکی ١٥٢

عنوان	صفحه

۸-۳-٤) مدار واسط ۱۵۳
۸-۳-۵) منبع تغذیه ۱۵۵
۸-۳-٦) پردازنده‌های ویژه کنترل موتورهای الکتریکی ۱۵۷
۸-۳-٦-۱) معرفی مختصری از پردازنده TMS320X240 ..... ۱٦۰
۸-۳-٦-۲) کارت طراحی شده برای کنترل موتور و ویژگیهای آن ۱٦۱
۸-۳-٦-۳) روند نرم‌افزار بکار رفته برای کنترل برداری موتور القایی ۱٦۳
۸-٤) عملکرد کلی درایو ۱٦۵
۸-۵) نتیجه‌گیری ۱۷٦

۹) نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۷۹
۹-۱) نتیجه‌گیری ۱۷۹
۹-۲) پیشنهادات ۱۸۳

ضمیمه ۱ : مدار واسط مبتنی بر 316j ۱۸۵

ضمیمه ۲ : باتریهای ذخیره کننده انرژی ۱۹۰
ض۲-۱) مقدمه ۱۹۰
ض۲-۲) پارامترهای اصلی باتری ۱۹۱
ض۲-۲-۱) انرژی مشخصه ۱۹۱
ض۲-۲-۲) قدرت مشخصه ۱۹۱
ض۲-۲-۳) عمر عملکرد ۱۹۱
ض۲-۲-٤) قیمت باتری ۱۹۱
ض۲-۳) مقایسه انواع باتریها ۱۹۱
ض۲-۳-۱) باتری سرب اسید ۱۹۱
ض۲-۳-۲) باتری نیکل کادمیوم ۱۹۲
ض۲-۳-۳) باتری نیکل آهن ۱۹۲
ض۲-۳-٤) باتری نیکل منگنز ۱۹۲
ض۲-۳-۵) باتری سدیم سولفور ۱۹۳
ض۲-۳-٦) باتری روی برم ۱۹۳

عنوان | صفحه

ض۲-٤) شارژ باتری ۱۹۳
ض۲-٥) انتخاب باتریها ۱۹٤
ض۲-٥-۱) پارامترهای موثر در انتخاب باتریهای محرک ۱۹٤
ض۲-٦) انواع شارژر ۱۹٥
ض۲-۷) انواع شارژ ۱۹٦
ض۲-۸) انتخاب باتری شارژر ۱۹٦

ضمیمه ۳ : ساختار سیلیکونی و مدار معادل IGBT ۱۹۷

ضمیمه ٤ : شکل پایه‌های پردازنده TMS320X240 و بلوک دیاگرام داخلی آن ۱۹۹

منابع و ماخذ ۲۰۱

فهرست شکلها

شکل (۱-۱) نمایی از اولین خودروی الکتریکی ۳
شکل (۱-۲) نمایی از خودروی الکتریکی EV1 ..... ٤
شکل (۱-۳) نمایی از خودروی هیبرید پریوس ٤
شکل (۱-٤) خودروی هیبرید نیسان تینو ٤
شکل (۱-٥) خودروی هیبرید هوندا اینسایت ٤
شکل (۱-٦) خودروی هیبرید دورانگو ٤
شکل (۱-۷) خودروی هیبرید فورد اسکیپ ٤
شکل (۱-۸) خودروی هیبرید فورد پرادیجی ٥
شکل (۱-۹) خودروی هیبرید DC ESX3 ..... ٥
شکل (۱-۱۰) خودروی هیبرید ولوو ECC ٥
شکل (۱-۱۱) خودروی پیکان برقی ٥
شکل (۱-۲) بلوک دیاگرام یک خودروی برقی ۸
شکل (۲-۲) ساختار محرک تک موتوری (الف)، و دو موتوری (ب) ۹
شکل (۲-۳) بلوک دیاگرام خودروی هیبرید سری ۱۳
شکل (۲-٤) بلوک دیاگرام کلی یک خودروی هیبرید موازی ۱٦
شکل (۲-٥) نمایش گرافیکی درجه هیبریداسیون ۱۷
شکل (۲-٦) نقشه راندمان یک موتور احتراق داخلی ٦٦ کیلووات ۱۸
شکل (۲-۷) سیستم موازی هم محور با یک کلاچ در بین موتور الکتریکی و جعبه دنده ۲۰
شکل (۲-۸) سیستم موازی هم محور با یک کلاچ در بین موتور الکتریکی و موتور احتراقی ۲۱
شکل (۲-۹) سیستم موازی هم محور با دو کلاچ در دو طرف موتور الکتریکی ۲۲
شکل (۲-۱۰) سیستم موازی غیرهم محور با ترکیب‌کننده قبل از جعبه دنده ۲٤
شکل (۲-۱۱) سسیتم موازی غیرهم محور با ترکیب کننده بعد از جعبه دنده ۲٤
شکل (۲-۱۲) بلوک دیاگرام سیستم موازی مجزا ۲٥
شکل (۲-۱۳) بلوک دیاگرام خودروی هیبرید سری ـ موازی ۲٦
شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام یک سیستم محرکهٔ خودروی برقی ۳۲
شکل (۳-۲) انواع موتورهای الکتریکی ۳۲
شکل (۳-۳) استراتژیهای بکارگیری موتورهای الکتریکی در خودروهای برقی و هیبرید(سری) ۳۹
شکل (۳-٤) مدار قدرت یک اینورتر مدولاسیون عرض پالس ٤۱
شکل (۳-٥) اصول مدولاسیون پهنای پالس سینوسی،تولید سیگنالهای کنترل ٤۳
شکل (۳-٦) الف: شکل موج حامل و مرجع ب: شکل موج خروجی فاز a اینورتر و مولفه اول آن ٤۳
شکل (۳-۷) شکل موج خروجی فاز b , c اینورتر و مولفه اول آنها ٤٤

شکل (۸-۳) شکل موج ولتاژهای خط خروجی اینورتر و مولفه اول آنها ٤٤
شکل (۱-٤) مدارمجزاکننده جهت محاسبه مؤلفه‌های ولتاژ u_{dy} و u_{dx} ٥١
شکل (۲-٤) مدار مجزاکننده جهت محاسبه ولتاژهای u_{dy} و $-u_{dx}$ ٥٢
شکل (۳-٤) مدل فلو در مختصات فلوی روتور ٥٥
شکل (٤-٤) مدل فلو در مختصات ساکن با ورودیهای $\omega_r, i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}$ ٥٥
شکل (٥-٤) مدل فلو در مختصات ساکن با ورودیهای ولتاژ و جریان استاتور و سرعت روتور ٥٧
شکل (٦-٤) مدل فلو در مختصات ساکن با ورودیهای جریان و ولتاژ استاتور ٥٨
شکل (۷-٤) مدار معادل حالت پایدار ماشین القائی ٦٠
شکل (۸-٤) بلوک دیاگرام کنترل موتور القایی با استفاده از امتدادیابی میدان روتور ٦٣
شکل (۱-٥) بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل شامل کنترلر فازی ٧٢
شکل (۲-٥) یک نمونه سیستم درایو ac ٧٥
شکل (۳-٥) ساختار کنترلر سرعت فازی برای یک سیستم درایو القایی ٧٦
شکل (۱-٦) ساختار یکی از پرکاربردترین عصب‌های مصنوعی ٧٨
شکل (۲-٦) تکنیک‌های مختلف اتصال عصب‌های مصنوعی به یکدیگر ٧٩
شکل (۳-٦) شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) ٨٠
شکل (٤-٦) شبکه با تابع پایهٔ شعاعی ٨٠
شکل (٥-٦) مثالهای نمونه‌ای از ویولت‌ها و توابع مقیاس مربوطه ٨٥
شکل (٦-٦) ساختار نمونه‌ای از یک "ویونت" ٨٧
شکل (۷-٦) ساختار گرید پیشنهاد شده برای ویونت‌ها بوسیلهٔ بکشی و استفانپلوس (۱۹۹۳) ٨٧
شکل (۸-٦) چهار عضو از خانواده ویولت هار ٨٨
شکل (۹-٦) ساختار گرید سازگار با MRA ٨٧
شکل (۱-۷) بلوک دیاگرام کلی شبیه‌سازی یک موتور القایی سه فاز در مختصات مرجع ساکن ٩٥
شکل (۲-۷) بلوک دیاگرام داخلی *abc2qds* ٩٥
شکل (۳-۷) بلوک دیاگرام داخلی *qds2abc* ٩٥
شکل (٤-۷) بلوک دیاگرام داخلی *Induction machine* ٩٦
شکل (٥-۷) بلوک دیاگرام داخلی Qaxis از *Induction machine* ٩٦
شکل (٦-۷) بلوک دیاگرام داخلی *Daxis* از *Induction machine* ٩٧
شکل (۷-۷) بلوک دیاگرام داخلی *Rotor* از *Induction machine* ٩٧
شکل (۸-۷) شکل موج ولتاژ فاز a اعمالی به استاتور موتور بر حسب ولت ٩٧
شکل (۹-۷) شکل موج جریان فاز a استاتور بر حسب آمپر ٩٨
شکل (۱۰-۷) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب نیوتن متر ٩٨
شکل (۱۱-۷) شکل موج سرعت روتور بر حسب رادیان بر ثانیه ٩٨

شکل (۱۲-۷) شکل موج شار روتور بر حسب ولت ۹۹
شکل (۱۳-۷) شکل موج گشتاور مکانیکی اعمال شده به موتور بر حسب نیوتن متر ۹۹
شکل (۱٤-۷) شکل موج سرعت-گشتاور الکترومغناطیسی ۹۹
شکل (۱۵-۷) شکل موج سرعت-جریان استاتور ۱۰۰
شکل (۱٦-۷) شکل موج سرعت-توان تولیدی ۱۰۰
شکل (۱۷-۷) شکل موج سرعت-راندمان ۱۰۰
شکل (۱۸-۷) بلوک دیاگرام کنترل اسکالر بروش *v/f* ثابت برروی موتور القایی سه فاز ۱۰۲
شکل (۱۹-۷)رابطهٔ بین ولتاژ و فرکانس در روش *v/f* ثابت ۱۰۲
شکل (۲۰-۷) نمودار سرعت واقعی و مرجع روتور در روش کنترل اسکالر ۱۰٤
شکل (۲۱-۷) نمودار ولتاژ فاز a استاتور در روش کنترل اسکالر ۱۰٤
شکل (۲۲-۷) نمودار جریان فاز a استاتور در روش کنترل اسکالر ۱۰٤
شکل (۲۳-۷) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی در روش کنترل اسکالر ۱۰۵
شکل (۲٤-۷) نمودار شار روتور در روش کنترل اسکالر ۱۰۵
شکل (۲۵-۷) نمودار گشتاور مکانیکی اعمالی به موتور در روش کنترل اسکالر ۱۰۵
شکل (۲٦-۷) بلوک دیاگرام کلی کنترل برداری غیر مستقیم یک موتور القایی سه فاز با امتدادیابی در راستای شار روتور ۱۰۹
شکل (۲۷-۷) بلوک دیاگرام مدار مجزا کننده ۱۰۹
شکل (۲۸-۷) بلوک دیاگرام *xy2qd2abc* ۱۱۰
شکل (۲۹-۷) بلوک دیاگرام *abc2qd2xy* ۱۱۰
شکل (۳۰-۷) بلوک دیاگرام مدل شار ۱۱۰
شکل (۳۱-۷) بلوک دیاگرام فرمان کلیدزنی اینورتر ۱۱۱
شکل (۳۲-۷) نمودار سرعت واقعی و مرجع روتور در روش کنترل برداری ۱۱۱
شکل (۳۳-۷) نمودار ولتاژ فاز a استاتور در روش کنترل برداری ۱۱۱
شکل (۳٤-۷) نمودار جریان فاز a استاتور در روش کنترل برداری ۱۱۲
شکل (۳۵-۷) نمودار جریان استاتور روی محور قائم در روش کنترل برداری ۱۱۲
شکل (۳٦-۷) نمودار جریان استاتور روی محور مستقیم در روش کنترل برداری ۱۱۲
شکل (۳۷-۷) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی در روش کنترل برداری ۱۱۳
شکل (۳۸-۷) نمودار گشتاور مکانیکی اعمالی به موتور در روش کنترل برداری ۱۱۳
شکل (۳۹-۷) نمودار شار روتور در روش کنترل برداری ۱۱۳
شکل (٤۰-۷) تغییرات مقاومت روتور ۱۱٤
شکل (٤۱-۷) نتایج حاصل از تغییر پارامتر در سرعت موتور ۱۱٤
شکل (٤۲-۷) بلوک دیاگرام کلی کنترل برداری موتور القایی با کنترلر سرعت مبتنی بر شبکه MLP ۱۱٦