



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده برق

طراحی، ساخت و شبیه‌سازی کنترل سرعت

موتور القایی سه فاز به روش VVVF

دانشجو: رضا محمدیان نمینی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق قدرت

39915

استاد راهنما: دکتر محمدعلی شرکت معصوم

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

This image shows the Basmala (Bismillah) in a stylized, bold Arabic calligraphic font. The text is written in black ink on a white background. The calligraphy is highly decorative, with thick, rounded strokes and intricate flourishes. Small arrows and numbers (1, 2, 3) are placed around the letters to indicate the correct stroke order for writing each character. The text is arranged in a slightly curved, horizontal line. The word 'Bismillah' is written in a compact, interconnected style. The letters are: B (1), S (2), M (3), L (4), L (5), H (6), R (7), H (8), M (9), A (10), N (11), A (12), R (13), H (14), I (15), M (16). The calligraphy is enclosed within a simple black rectangular border.

تقدیم بہ پدر و مادر بزرگوارم

## چکیده:

پروژه حاضر طراحی، ساخت و شبیه‌سازی یک کنترل‌کننده حلقه باز سرعت موتور القایی می‌باشد که به روش VVVF انجام پذیرفته است.

در این روش، سیستم بگونه‌ای عمل می‌کند که بتوان از حداکثر ظرفیت گشتاور موتور استفاده نمود.

بطور کلی سخت‌افزار سیستم شامل یک اینورتر ولتاژ و یک مدار فرمان جهت کنترل اینورتر می‌باشد.

قسمت شبیه‌سازی نیز با استفاده از نرم‌افزار مطلب انجام پذیرفته که خود شامل شبیه‌سازی اینورتر و شبیه‌سازی موتور القایی است.

در پایان نیز نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در کنارهم گذاشته شده و باهم مقایسه شده‌اند.

## فهرست مطالب

چکیده .....	۱
مقدمه .....	۱
فصل اول: روشهای کنترل سرعت موتور القایی .....	۱
(۱-۱) کنترل سرعت با منبع ولتاژ متغیر و فرکانس ثابت .....	۱
(۲-۱) کنترل سرعت با تغییر فرکانس .....	۳
(۱-۲-۱) عملکرد موتور در فرکانسهای کمتر از فرکانس نامی .....	۵
(۲-۲-۱) بهره‌برداری در فرکانس بالاتر از فرکانس نامی .....	۱۲
(۳-۲-۱) ظرفیت گشتاور و قدرت .....	۱۳
(۴-۲-۱) کنترل و مزایای آن .....	۱۶
(۳-۱) کنترل مقاومت رتور .....	۱۸
(۴-۱) تزریق ولتاژ در مدار رتور .....	۱۹
(۱-۴-۱) حالت موتوری زیر سنکرون ( $0 \leq S \leq 1$ ) .....	۲۵
(۲-۴-۱) حالت موتوری فوق سنکرون ( $S < 0$ ) .....	۲۶
(۳-۴-۱) ترمزی زیر سنکرون ( $0 \leq S \leq 1$ ) .....	۲۶
(۴-۴-۱) ترمزی فوق سنکرون ( $S < 0$ ) .....	۲۷
(۵-۱) کنترل سرعت از طریق بازیافت انرژی لغزش رتور .....	۲۹
(۶-۱) تغییر قطبها .....	۳۱

- ۳۲..... (۷-۱) کنترل برداری
- ۳۵..... فصل دوم: کار با یک منبع جریان
- ۳۵..... (۱-۲) کار در فرکانس ثابت
- ۴۱..... (۲-۲) کار با منبع فرکانس متغیر
- ۴۱..... (۱-۲-۲) عملکرد در زیر فرکانس نامی و در فرکانس نامی
- ۴۴..... (۲-۲-۲) عملکرد در فرکانسهای بالاتر از فرکانس نامی
- ۴۶..... فصل سوم: بررسی تلفات و گشتاور موتور القایی
- ۴۶..... (۱-۳) حداقل نمودن تلفات
- ۴۶..... (۱-۱-۳) کار با ولتاژ متغیر و فرکانس ثابت
- ۵۰..... (۲-۱-۳) کار با منبع فرکانس متغیر
- ۵۵..... (۲-۳) کار موتور القایی با منابع غیر سینوسی
- ۵۵..... (۱-۲-۳) هارمونیکهای توالی مثبت و منفی
- ۵۶..... (۲-۲-۳) مدار معادل هارمونیک
- ۵۹..... (۳-۲-۳) راندمان
- ۶۱..... (۴-۲-۳) ضربانهای گشتاور
- ۶۴..... فصل چهارم: تشریح کنترل موتور القایی با کنترل کننده های ولتاژ AC
- ۶۴..... (۱-۴) مدارهای کنترل کننده ولتاژ AC
- ۶۵..... (۱-۱-۴) کنترل کننده نیم موج سه فاز

- ۶۶.....۲-۱-۴ کنترل کننده تمام موج سه فاز
- ۶۸.....۳-۱-۴ کنترل کننده دو جهتی سه فاز با اتصال مثلث
- ۷۰.....۲-۴ کنترل چهار ناحیه‌ای و بررسی سیستمهای حلقه بسته
- ۷۲.....۱-۲-۴ محرکه‌های بارهای پمپها
- ۷۵.....فصل پنجم: محرکه‌های موتور القایی جهت کنترل فرکانس
- ۷۶.....۱-۵ اینورتر منبع ولتاژ سه فاز
- ۷۸.....۱-۱-۵ اینور شش پله
- ۷۹.....کنترل ولتاژ dc ورودی
- ۸۰.....کنترل ولتاژ خروجی با استفاده از چند اینورتر
- ۸۱.....۲-۱-۵ اینورتر مدولاسیون پهنای پالس (PWM)
- ۸۲.....کنترل ولتاژ مؤثر خروجی اینور PWM
- ۸۳.....مدولاسیون مفرد عرض پالس
- ۸۵.....مدولاسیون چندتایی عرض پالس
- ۸۷.....مدولاسیون سینوسی عرض پالس (SPWM)
- ۹۶.....۳-۱-۵ سیستمهای کنترل دور موتور القایی با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ
- ۱۰۰.....۲-۵ اینورتر منبع جریان
- ۱۰۳.....۱-۲-۵ منابع جریان
- ۱۰۵.....۲-۲-۵ سیستمهای کنترل دور موتور القایی با استفاده از اینورتر منبع جریان

فصل ششم: سخت‌افزار و نرم‌افزار سیستم ..... ۱۰۸

۱-۶ مدار فرمان ..... ۱۰۸

۱-۱-۶ بررسی میکروکنترلر خانواده (MCS-51) ..... ۱۰۸

۲-۱-۶ نمایشگر چهار رقمی ..... ۱۱۱

۳-۱-۶ تغذیه مدار ..... ۱۱۳

۲-۶ مدار قدرت ..... ۱۱۴

۱-۲-۶ اینورتر سه فاز و المانهای قدرت ..... ۱۱۴

۲-۲-۶ مدارهای راه‌انداز المانهای قدرت ..... ۱۱۸

۳-۲-۶ تغذیه مدار راه‌انداز ..... ۱۲۰

نرم‌افزار سیستم ..... ۱۲۱

۳-۶ منطق و اصول کلی نرم‌افزار ..... ۱۲۱

۱-۳-۶ قسمت‌های اصلی نرم‌افزار ..... ۱۲۲

قسمت مقداردهی اولیه ..... ۱۲۳

حلقه اصلی ..... ۱۲۳

روال تایمر صفر ..... ۱۲۴

جداول PWM ..... ۱۲۴

فصل هفتم: شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی ..... ۱۲۵

۱-۷ شبیه‌سازی اینورتر سه فاز PWM ..... ۱۲۵

۲-۷ شبیه‌سازی موتور القایی تحت تأثیر اینورتر سه فاز PWM ..... ۱۴۴



۱۵۲..... نتیجه گیری

۱۵۳..... پیشنهاد جهت ادامه پروژه

۱۵۴..... فهرست مراجع و مقالات

..... ضمیمه

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

### فصل اول

- شکل (۱-۱): کنترل سرعت با تغییر ولتاژ تغذیه ac ..... ۳
- شکل (۲-۱): مدار معادل یک فاز موتور القایی ..... ۵
- شکل (۳-۱): منحنی های سرعت گشتاور با روش کنترل فرکانس ..... ۸
- شکل (۴-۱): منحنی های سرعت گشتاور در روش کنترل فرکانس ..... ۱۳
- شکل (۵-۱): منحنی های  $V$  و  $T$  و  $P_m$  و  $I_s$  و  $\omega_{SL}$  برحسب  $a$  ..... ۱۴
- شکل (۶-۱): مشخصه های سرعت گشتاور (خط پر) و مشخصه های سرعت جریان (خط چین) در موتور القایی رتور سیم بندی ..... ۱۸
- شکل (۷-۱): مدار معادل موتور القایی با ولتاژ تزریق شده به رتور ..... ۱۹
- شکل (۸-۱): جهت متغیرهای رتور در حالت های مختلف برای  $V_r$  ثابت و بار متغیر ..... ۲۱
- شکل (۹-۱): نمودار قدرت موتور القایی با تغذیه رتور ..... ۲۴
- شکل (۱۰-۱): کنترل سرعت با تزریق ولتاژ در رتور ..... ۲۸
- شکل (۱۱-۱): بازیافت توان لغزش ..... ۳۰
- شکل (۱۲-۱): تغییر قطب های استاتور ..... ۳۲
- شکل (۱۳-۱): دیاگرام های برداری بیانگر روش امتدادیابی با میدان ..... ۳۴

## فصل دوم

شکل (۱-۲): کار موتور القایی با منبع جریان ..... ۳۸

شکل (۲-۲): رابطه جریان استاتور و سرعت لغزش در اینورتر منبع جریان ..... ۴۰

شکل (۳-۲): منحنی های سرعت گشتاور در موتور القایی سه فاز با منبع جریان فرکانس متغیر. ۴۴

## فصل سوم

شکل (۱-۳): عملکرد موتور القایی با کاهش ولتاژ ..... ۴۷

شکل (۲-۳): مدار معادل موتور القایی فرکانس متغیر با احتساب تلفات هسته ..... ۵۲

شکل (۳-۳): کنترل بهینه محرکه های فرکانس متغیر ..... ۵۴

شکل (۴-۳): مدار معادل هارمونیک  $K$  ام موتور القایی ..... ۵۷

## فصل چهارم

شکل (۱-۴): کنترل کننده نیم موج سه فاز ..... ۶۶

شکل (۲-۴): مدار کنترل کننده تمام موج سه فاز ..... ۶۷

شکل (۳-۴): مدار کنترل کننده دو جهتی سه فاز با اتصال مثلث ..... ۶۹

شکل (۴-۴): منحنی های گشتاور سرعت چهار ناحیه ..... ۷۰

شکل (۵-۴): کنترل کننده چهار ناحیه ای ..... ۷۱

شکل (۶-۴): کنترل یک ناحیه ای ..... ۷۲

شکل (۷-۴): کنترل چهار ناحیه ای ..... ۷۲

## فصل پنجم :

- شکل (۱-۵) : اینورتر منبع ولتاژ سه فاز ..... ۷۷
- شکل (۲-۵) : روشهای کنترل ولتاژ در اینورتر شش پله ..... ۸۰
- شکل (۳-۵) : تغییر ولتاژ خروجی با استفاده از دو اینورتر ..... ۸۱
- شکل (۴-۵) : محرکه های اینورتری PWM ..... ۸۲
- شکل (۵-۵) : مدولاسیون مفرد عرض پالس ..... ۸۳
- شکل (۶-۵) : وضعیت هارمونیکها در مدولاسیون مفرد عرض پالس ..... ۸۵
- شکل (۷-۵) : مدولاسیون چندتای عرض پالس ..... ۸۶
- شکل (۸-۵) : وضعیت هارمونیکها در مدولاسیون چندتایی عرض پالس ..... ۸۷
- شکل (۹-۵) : اصول مدولاسیون سینوسی عرض پالس ..... ۸۸
- شکل (۱۰-۵) : اینورتر سه فاز PWM ..... ۸۸
- شکل (۱۱-۵) : مقایسه موجهای سینوسی و موج مثلثی ..... ۸۹
- شکل (۱۲-۵) : یک ساق اینورتر ..... ۹۰
- شکل (۱۳-۵) : مقایسه موج سینوسی مرجع یک فاز با موج مثلث ..... ۹۱
- شکل (۱۴-۵) : محاسبه دامنه اصلی ..... ۹۳
- شکل (۱۵-۵) : سیستم حلقه باز کنترل سرعت ..... ۹۷
- شکل (۱۶-۵) : سیستم حلقه بسته کنترل سرعت ..... ۹۹
- شکل (۱۷-۵) : اینورتر منبع جریان ..... ۱۰۱

- شکل (۵-۱۸) : منحنی جریان و ولتاژ فاز در اینورتر منبع جریان ..... ۱۰۲
- شکل (۵-۱۹) : طرحهای مختلف منابع جریان ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۰) : مدولاسیون پهنای پالس برای اینورتر منبع جریان ..... ۱۰۵
- شکل (۵-۲۱) : سیستم کنترل سرعت با اینورتر منبع جریان جهت کنترل سرعت لغزش ..... ۱۰۶
- شکل (۵-۲۲) : سیستم کنترل دور با استفاده CSI با کنترل جریان ..... ۱۰۷

### فصل ششم

- شکل (۶-۱) : شمای کلی ساختمان میکروکنترلر MCS - 51 ..... ۱۱۰
- شکل (۶-۲) : مدار مولد پالس ساعت و Reset ..... ۱۱۱
- شکل (۶-۳) : مدار راه انداز نمایشگر چهار رقمی ..... ۱۱۳
- شکل (۶-۴) : مدار تغذیه قسمت فرمان ..... ۱۱۳
- شکل (۶-۵) : اینورتر سه فاز با سوئیچهای MOSFET ..... ۱۱۴
- شکل (۶-۶) : ساختمان MOSFET افزودنی ..... ۱۱۵
- شکل (۶-۷) : مشخصه خروجی MOSFET افزودنی ..... ۱۱۶
- شکل (۶-۸) : مدل پارازیتی MOSFET افزایشی و ساختمان داخلی آن به همراه دیود داخلی ..... ۱۱۶
- شکل (۶-۹) : مدل سوئیچینگ MOSFET ..... ۱۱۷
- شکل (۶-۱۰) : شکل موجها و زمانهای سوئیچینگ ..... ۱۱۷
- شکل (۶-۱۱) : مدار راه انداز MOSFET ها ..... ۱۱۹
- شکل (۶-۱۲) : مدار راه انداز MOSFET همراه با حفاظت MOSFET های یک ساق اینورتر ..... ۱۲۰

## فصل هفتم

- شکل (۱-۷) : اینورتر سه فاز PWM ..... ۱۲۶
- شکل (۲-۷) : تلاقی موج سینوسی و مثلثی به‌مراه ولتاژ فاز ایجاد شده ..... ۱۲۷
- شکل (۳-۷) : ولتاژ سه فاز متعادل در خروجی اینورتر ..... ۱۲۸
- شکل (۴-۷) : ولتاژ خط به خط خروجی اینورتر ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۷) : ولتاژ فاز به ازای  $m_f = 26$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۲
- شکل (۶-۷) : ولتاژ فاز به ازای  $m_f = 40$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۳
- شکل (۷-۷) : ولتاژ خط به خط به ازای  $m_f = 26$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۴
- شکل (۸-۷) : ولتاژ خط به خط به ازای  $m_f = 40$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۵
- شکل (۹-۷) : ولتاژ فاز بدست آمده از شبیه سازی به ازای  $m_f = 9$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۶
- شکل (۱۰-۷) : ولتاژ فاز بدست آمده در عمل (آزمایشگاهی) به ازای  $m_f = 9$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۷
- شکل (۱۱-۷) : ولتاژ فاز بدست آمده از شبیه سازی به ازای  $m_f = 15$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۸
- شکل (۱۲-۷) : ولتاژ فاز بدست آمده در عمل (آزمایشگاهی) به ازای  $m_f = 15$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۳۹
- شکل (۱۳-۷) : ولتاژ خط به خط بدست آمده از شبیه سازی به ازای  $m_f = 9$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۴۰
- شکل (۱۴-۷) : ولتاژ خط به خط بدست آمده در عمل (آزمایشگاهی) به ازای  $m_f = 9$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۴۱
- شکل (۱۵-۷) : ولتاژ خط به خط بدست آمده از شبیه سازی به ازای  $m_f = 15$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۴۲
- شکل (۱۶-۷) : ولتاژ خط به خط بدست آمده در عمل (آزمایشگاهی) به ازای  $m_f = 15$  و تحلیل فوریه آن ..... ۱۴۳

شکل (۷-۱۷) : ولتاژ فاز به ازای جدول PWM ۱۸۰ و ۳۶۰ ..... ۱۴۴

شکل (۷-۱۸-a) : ولتاژ فاز خروجی اینورتر بدون اعمال زمان مرده ..... ۱۴۵

شکل (۷-۱۸-b) : ولتاژ فاز خروجی اینورتر با اعمال زمان مرده ..... ۱۴۵

شکل (۷-۱۹) : منحنی سرعت رتور در حالت بی باری برحسب زمان ..... ۱۴۸

شکل (۷-۲۰) : منحنی گشتاور الکتریکی در حالت بی باری برحسب زمان ..... ۱۴۹

شکل (۷-۲۱) : جریان فاز استاتور، بدست آمده از نتایج شبیه سازی ..... ۱۵۰

شکل (۷-۲۲) : جریان فاز استاتور، بدست آمده در عمل (آزمایشگاهی) ..... ۱۵۱