



دانشگاه کردستان  
دانشکده فنی مهندسی  
گروه برق

عنوان:

طراحی و ساخت یک اینورتر سه فاز برای کنترل دور موتور القایی

پژوهشگر:

داور گله‌دار

استاد راهنما:

دکتر رحمت‌ا... میرزایی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت

اسفند ماه ۱۳۸۹



دانشگاه کردستان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت

عنوان:

طراحی و ساخت یک اینورتر سه فاز برای کنترل دور موتور القایی

پژوهشگر:

داور گله‌دار

در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۱۶ توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره.....و

درجه ..... به تصویب رسید.

<u>امضاء</u>	<u>مرتبہ علمی</u>	<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیات داوران</u>
	استادیار	دکتر رحمت‌ا... میرزایی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر رضا قندهاری	۲- استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر حسن بیورانی	۳- استاد داور داخلی

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

مهر و امضاء گروه

## \*\*\* تعهد نامه \*\*\*

اینجانب داور گله‌دار دانشجوی کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت دانشگاه کردستان، دانشکده فنی مهندسی گروه برق تعهد می‌نمایم که محتوای این پایان‌نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

داور گله‌دار

۱۳۸۹/۱۲/۱۶

تقدیم به

روح پدرم، که سرشتم از اوست

و

مادر، تنها دلیل برای زنده بودن

و

خانواده مهربانم

و

استقلال، آبی ترین عشق

## سپاس و قدرانی

در پایان بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد متین و گرامیم جناب آقای دکتر رحمت‌ا... میرزایی که در تمامی مراحل این پایان‌نامه همواره از هر لحاظ اینجانب را حمایت و راهنمایی نمودند، کمال تشکر را داشته باشم و برای مهندس مجید کنزی که بی‌دریغ تمامی اطلاعات گرانبهای خود را در اختیار این حقیر گذاشت، آرزوی توفیق و سلامتی دارم. همچنین از مسئولین آزمایشگاه ماشین بخصوص آقای سبحانی به خاطر همکاری در این پروژه ساخت سپاسگذارم.

بدین وسیله از دوست دیرین فرشاد خاوری و سایر دوستانم علیپور، حمیدی، بردبار، مام‌شریفی، عباسی، خندان و امینی عزیزم که در این سال‌ها در کردستان اینجانب را تحمل نمودند، کمال تشکر را داشته و بهترین آرزوها را از بارگاه خداوند منان برای تک‌تک‌شان خواستارم.

## چکیده

امروزه با توجه به پیشرفت‌هایی که صنعت برق داشته، روز به روز تجهیزات جدید در زمینه‌های مختلف ارائه می‌شود. یکی از تجهیزات که در سال‌های اخیر پیشرفت زیادی داشته، ادوات و تجهیزات الکترونیک قدرت می‌باشد. این ادوات کاربردهای زیادی در مبدل‌ها، منابع تغذیه سوئیچینگ و دیگر تجهیزات دارند. علیرغم محاسن زیاد این تجهیزات، مشکلاتی مانند ایجاد نویز، تولید هارمونیک و ضریب قدرت پایین نیز دارا می‌باشند. بخشی از این مشکلات با ارائه روش‌های کنترلی مناسب قابل بهبود هستند. با توجه به معایب زیاد کنترلرهای آنالوگ و پیشرفت‌های علم دیجیتال، نسل جدید کنترلرهای دیجیتال مانند میکروکنترلر، FPGA و DSP نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل ادوات الکترونیک قدرت ایفا می‌کنند. کنترل و پیاده‌سازی آسان و در عین حال دقت و سرعت پردازش بالا از جمله مزایای مهم کنترلرهای دیجیتال می‌باشند. به همین دلیل در این پروژه از نسل جدید پردازنده‌های FPGA برای کنترل دور یک موتور القایی استفاده شده است. بدین منظور یک اینورتر ولتاژ به همراه مازول‌های مختلف ساخته شده است و در قسمت کنترلی نیز نیاز به پیاده‌سازی روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی مانند روش Space Vector PWM و روش موج‌مربعی یکی از انگیزه‌های دیگر این تحقیق می‌باشد. در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی ارائه شده است و تحلیل فرکانسی خروجی‌ها نیز در نرم‌افزار مطلب انجام شده است.

کلمات کلیدی: اینورتر ولتاژ، موتور القایی، کنترلر FPGA، روش SVPWM و کنترل دیجیتال

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل اول (مروری اجمالی بر ساختمان و عملکرد موتور القایی).....
۲	۱-۱- ساختمان موتور القایی.....
۴	۲-۱- عملکرد موتور القایی.....
۷	۲-۱- راه اندازی موتور القایی.....
۷	۱-۲-۱- به طور مستقیم.....
۸	۲-۲-۱- توسط کلید یا مدار ستاره- مثلث.....
۸	۳-۲-۱- توسط کمپانساتور.....
۸	۴-۲-۱- اضافه کردن مقاومت در مدار روتور.....
۹	۵-۲-۱- اضافه کردن مقاومت در مدار استاتور.....
۱۰	فصل دوم ( روشهای کنترل دور موتور القایی و ساختار اینورترها ).....
۱۲	۱-۲- اهمیت تثبیت شار فاصله هوایی در موتور القایی.....
۱۴	۲-۲- روشهای کنترل دور موتور القایی.....
۱۴	۱-۲-۲- تغییر ولتاژ استاتور.....
۱۵	۲-۲-۲- تغییر ولتاژ استاتور و تغییر فرکانس استاتور.....
۱۷	۱-۲-۲- روش موج مربعی.....
۲۱	۲-۲-۲- روش PWM.....
۳۰	۳-۲-۲- تغییر جریان استاتور و تغییر فرکانس استاتور.....
۳۲	۱-۳-۲-۲- کنترل شار و سرعت با اینورتر جریان.....
۳۳	۲-۳-۲-۲- کنترل نسبت $V/F$ ثابت با اینورتر جریان.....
۳۵	۳-۲- روشهای کنترلی مرسوم و پر کاربرد کنترل دور موتور القایی.....
۳۵	۱-۳-۲- کنترل برداری.....
۴۱	۲-۳-۲- روش کنترلی $V/F$ ثابت.....
۴۴	۳-۳-۲- کنترل حلقه بسته با تخمین شار و گشتاور.....
۴۵	۴-۳-۲- کنترل حلقه بسته با جریان سه فاز استاتور.....
۴۶	فصل سوم (مقدمه‌ای بر کنترل دیجیتال و مشخصات کنترلر FPGA).....
۴۸	۱-۳- سیگنالهای زمان گسسته.....
۴۹	۲-۳- تبدیل $Z$ و خواص آن.....
۵۱	۳-۳- ساختار و کارکرد مدارات کنترل دیجیتال.....



۵۲	.....FPGA برد ساختار برد ۴-۳
۵۳	.....FPGA پردازنده ۱-۴-۳
۵۳	.....FPGA منبع تغذیه برد ۲-۴-۳
۵۴	.....FPGA پالسهای ساعت برد ۳-۴-۳
۵۵	.....مبدل آنالوگ به دیجیتال ۴-۴-۳
۵۶	.....مبدل دیجیتال به آنالوگ ۵-۴-۳
۵۷	.....I/O پورتهای ۶-۴-۳
۵۸	.....مختصری در مورد سیستم اعداد ۵-۳
۶۲	.....فصل چهارم (مراحل طراحی و ساخت مدار اینورتر)
۶۳	.....۱-۴ مدار قدرت
۷۱	.....۲-۴ مدار کنترل
۷۴	.....فصل پنجم (شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی)
۷۶	.....۱-۵ نرم افزار کنترلر FPGA
۷۶	.....۲-۵ روش کنترلی V/F ثابت
۷۸	.....۱-۲-۵ پیاده سازی با روش PWM
۸۴	.....۲-۲-۵ پیاده سازی با روش موج مربعی و مقایسه با روش PWM
۸۸	.....۳-۵ بررسی تاثیر مساله Dead Time بر اینورترهای ولتاژ
۹۲	.....نتیجه گیری
۹۵	.....مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: تصویری از یک موتور القایی ..... ۲
- شکل ۲-۱: مدار معادل تقریبی موتور القایی ..... ۶
- شکل ۳-۱: مشخصه گشتاور- لغزش موتور القایی ..... ۷
- شکل ۱-۲: منحنی ولتاژ و فرکانس ..... ۱۲
- شکل ۲-۲: دسته منحنی های سرعت-گشتاور با شار هوایی ثابت ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: حالت های کاری مختلف موتور ..... ۱۴
- شکل ۴-۲: مدار روش تغییر ولتاژ استاتور ..... ۱۵
- شکل ۵-۲: مدار یک اینورتر ..... ۱۶
- شکل ۶-۲: مدار روش کنترلی موج مربعی ..... ۱۷
- شکل ۷-۲: پالس های روش موج مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه ..... ۱۸
- شکل ۸-۲: ولتاژ خروجی اینورتر در فرکانس های مختلف با روش موج مربعی ..... ۱۹
- شکل ۹-۲: مدار فیلتر سه فاز خروجی اینورتر ..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲: مدار فیلتر سه فاز همراه با اینورتر ولتاژ ..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲: ولتاژ خروجی (الف) ولتاژ خروجی اینورتر بدون فیلتر (ب) ولتاژ خروجی اینورتر با قرار دادن فیلتر ..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲: مدار اینورتر ولتاژ در روش PWM ..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲: روش تولید پالس برای یک فاز در روش PWM سینوسی ..... ۲۳
- شکل ۱۴-۲: شکل فضائی بردارهای Space Vector ..... ۲۵
- شکل ۱۵-۲: نواحی مختلف و ولتاژ مرجع در روش Space Vector ..... ۲۶
- شکل ۱۶-۲: ولتاژ مرجع در بخش اول ..... ۲۷
- شکل ۱۷-۲: تولید پالس های SVPWM در ناحیه های کاری مختلف ..... ۲۸
- شکل ۱۸-۲: مقایسه ولتاژ ماکسیمم دو روش PWM سینوسی و روش SVPWM ..... ۲۹
- شکل ۱۹-۲: ساده ترین مدار برای تغییر فرکانس و جریان استاتور ..... ۳۰
- شکل ۲۰-۲: مشخصه گشتاور- سرعت روش کنترل جریان و فرکانس استاتور ..... ۳۱

- شکل ۲-۲۱: بلوک دیاگرام کنترل شار و سرعت در حالت حلقه بسته با تغییرات جریان و فرکانس استاتور..... ۳۲
- شکل ۲-۲۲: روش کنترلی  $V/F$  ثابت با کنترل جریان و فرکانس استاتور..... ۳۳
- شکل ۲-۲۳: مدار معادل تقریبی موتور القایی..... ۳۵
- شکل ۲-۲۴: دیاگرام فازوری موتور القایی..... ۳۶
- شکل ۲-۲۵: بلوک دیاگرام روش کنترل برداری..... ۳۷
- شکل ۲-۲۶: دیاگرام فازوری تبدیلات جریانها به محورهای ساکن..... ۳۷
- شکل ۲-۲۷: دیاگرام فازوری تبدیل از فریم استاتور به فریم مرجع..... ۳۸
- شکل ۲-۲۸: مدار معادل محورهای موتور به صورت تفکیک شده از هم..... ۳۹
- شکل ۲-۲۹: بلوک دیاگرام کلی روش کنترل برداری..... ۴۰
- شکل ۲-۳۰: بلوک دیاگرام روش کنترلی  $V/F$  ثابت در حالت حلقه باز..... ۴۱
- شکل ۲-۳۱: مشخصه گشتاور- سرعت موتور در روش کنترلی  $V/F$  ثابت..... ۴۲
- شکل ۲-۳۲: بلوک دیاگرام روش کنترلی  $V/F$  ثابت در حالت حلقه بسته..... ۴۲
- شکل ۲-۳۳: بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته با تخمین شار و گشتاور..... ۴۳
- شکل ۲-۳۴: بلوک دیاگرام کنترل حلقه بسته با تغییرات جریانهای استاتور..... ۴۴
- شکل ۳-۱: مدار نمونه بردار و نگه دار..... ۴۷
- شکل ۳-۲: بلوک دیاگرام کلی برد FPGA..... ۵۱
- شکل ۳-۳: شبکه پالس ساعت برد FPGA..... ۵۳
- شکل ۳-۴: نحوه کد کردن یک عدد ۴ بیتی به صورت علامت دار و بدون علامت..... ۵۸
- شکل ۳-۵: نحوه کد شدن اعداد در بازه (۱, -۱)..... ۵۹
- شکل ۳-۶: نحوه کد شدن اعداد در محدوده (۱, -۱) به صورت خطی..... ۵۹
- شکل ۳-۷: بیت علامت و نحوه نمایش اعداد در محدوده (۲, ۰)..... ۶۰
- شکل ۴-۱: تصویری از PM25RSB120..... ۶۳
- شکل ۴-۲: مدار داخلی PM25RSB120..... ۶۵
- شکل ۴-۳: فیلتر خروجی در حالت تک فاز..... ۶۶

- شکل ۴-۴: شکل و ابعاد مکانیکی هسته EE110..... ۶۸
- شکل ۴-۵: مشخصه خروجی سنسور LTS25NP..... ۷۰
- شکل ۴-۶: تصویری از برد کنترلی همراه با IPM..... ۷۱
- شکل ۵-۱: مدار شبیه سازی شده در نرم افزار..... ۷۷
- شکل ۵-۲: نتایج ولتاژ و جریان شبیه سازی..... ۷۸
- شکل ۵-۳: بلوک های کنترلی پیاده سازی شده در FPGA..... ۷۸
- شکل ۵-۴: شکل موج مثلی Space Vector الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۰
- شکل ۵-۵: پالس های دو فاز مختلف اینورتر الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۰
- شکل ۵-۶: پالس های دو سوئیچ بالا و پایین با تاخیر  $2.5\mu s$  در فرکانس سوئیچینگ 9.8 KHz..... ۸۰
- شکل ۵-۷: ولتاژ خط خروجی الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۱
- شکل ۵-۸: جریان موتور الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۱
- شکل ۵-۹: تحلیل فرکانسی جریان موتور الف) فرکانس سوئیچینگ 9.8 KHz ب) فرکانس سوئیچینگ 4.9 KHz..... ۸۲
- شکل ۵-۱۰: شماتیک مداری روش موج مربعی با هدایت ۱۲۰ درجه در نرم افزار PSIM..... ۸۳
- شکل ۵-۱۱: شکل موج ولتاژ و جریان موتور در نرم افزار PSIM..... ۸۴
- شکل ۵-۱۲: پیاده سازی روش موج مربعی در کنترلر FPGA..... ۸۵
- شکل ۵-۱۳: ولتاژ خروجی الف) برای روش موج مربعی ب) برای روش SVPWM..... ۸۵
- شکل ۵-۱۴: جریان موتور الف) برای روش موج مربعی ب) برای روش SVPWM..... ۸۶
- شکل ۵-۱۵: تحلیل فرکانسی جریان موتور الف) برای روش موج مربعی ب) برای روش SVPWM..... ۸۶
- شکل ۵-۱۶: تاخیر  $3\mu s$  بین پالسها الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۸
- شکل ۵-۱۷: تاخیر  $4\mu s$  بین پالس ها الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۸
- شکل ۵-۱۸: تاخیر  $5\mu s$  بین پالس ها الف) برای فرکانس 9.8KHz ب) برای فرکانس 4.9KHz..... ۸۹
- شکل ۵-۱۹: شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر..... ۸۹

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ولتاژ فاز و خط در حالت‌های مختلف سوئیچینگ ..... ۲۵
- جدول ۱-۳: مشخصات Cyclone FPGA ..... ۵۳
- جدول ۲-۳: مشخصات مبدل آنالوگ به دیجیتال ..... ۵۶
- جدول ۳-۳: مشخصات مبدل دیجیتال به آنالوگ ..... ۵۷
- جدول ۱-۴: اطلاعات اولیه طراحی برد ..... ۶۳
- جدول ۲-۴: مشخصات کلی PM25RSB120 ..... ۶۵
- جدول ۳-۴: مشخصات سلف طراحی شده ..... ۶۸
- جدول ۴-۴: اطلاعات لازم برای طراحی سلف ..... ۶۹
- جدول ۱-۵: پارامترهای موتور القایی تحت تست ..... ۷۷
- جدول ۲-۵: پارامترهای طراحی مدار ..... ۷۸
- جدول ۲-۵: محاسبه درصد THD برای جریان موتور در دو فرکانس سوئیچینگ تست شده ..... ۸۳
- جدول ۳-۵: محاسبه درصد THD برای جریان موتور برای دور روش موج مربعی و SVPWM ..... ۸۷
- جدول ۴-۵: مقادیر THD برای تاخیرهای مختلف در فرکانس 4.9KHz ..... ۹۰
- جدول ۵-۵: مقادیر THD برای تاخیرهای مختلف در فرکانس 9.8KHz ..... ۹۰

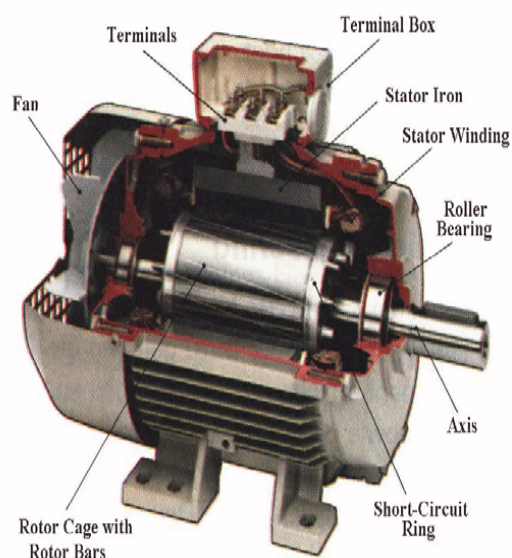
## فصل اول

مروری اجمالی بر ساختمان و عملکرد موتور القایی

## ۱-۱- ساختمان موتور القایی

موتور القایی از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:

قسمت ساکن که استاتور نامیده می‌شود و قسمت دیگر که بخش چرخان موتور است و روتور می‌باشد. استاتور موتور القایی سه‌سیم پیچی معمولی است، که درشیارهای سه فاز استاتور قرار می‌گیرد و می‌تواند براساس شرایط مدار راه‌اندازی به صورت ستاره یا مثلث بسته شود و تغذیه سه فاز ورودی نیز به استاتور موتور القایی اعمال می‌شود [۱ و ۲].



شکل ۱-۱: تصویری از یک موتور القایی

برخلاف استاتور، روتور موتور القایی دارای دو کلاس بندی می باشد:

#### (۱) روتور سیم پیچی شده

زمانی که مقاومت سر راه روتور قابل تغییر باشد، روتور را سیم پیچی شده می نامند. یکی از کاربردهای این نوع روتورها در موقعیت هایی است که به سرعت متغیر نیاز است. در این روتورها سیم پیچ روتور طوری پیچیده شده که تعداد قطبها در روتور و استاتور برابر هستند و خروجی هر فاز از روتور به طور جداگانه و به وسیله حلقه های لغزنده از موتور خارج شده است. این حلقه های لغزنده ارتباط الکتریکی خود با محور موتور را معمولاً به وسیله کربن ایجاد می کنند و پس از خارج شدن از موتور به یک مقاومت متغیر خارجی وصل می شوند.

در مقایسه با موتورهای روتور قفسی، موتورهای روتور سیم پیچی شده گران تر هستند و به علت استهلاک حلقه های لغزان دارای هزینه تعمیر و نگه داری بالاتری نیز هستند. قبل از تولید تجهیزات کنترل سرعت الکترونیکی این موتورها، بهترین راه برای کنترل سرعت بودند و همچنین این موتورها می توانند در لحظه شروع به کار گشتاور بالاتری داشته باشند. استفاده از کنترل کننده های ترانزیستوری فرکانس، راهی مناسب برای کنترل دور موتورهای جریان متناوب است و این از تمایل برای استفاده از موتورهای روتور سیم پیچی کاسته است.

#### (۲) روتور قفس سنجایی<sup>۱</sup>

بیشتر موتورهای جریان متناوب از این نوع روتورها استفاده می کنند، به طوری که می توان گفت همه موتورهای خانگی و موتورهای سبک صنعتی از این نوع روتورها استفاده می کنند. روتور قفسی یا قفس سنجایی نام خود را به خاطر شکلش گرفته، دو رینگ در دو انتهای روتور که به وسیله میله هایی به هم

---

<sup>1</sup> Squirrel Cage Rotor



وصل شده‌اند، شکلی تقریباً شبیه یک قفس تشکیل می‌دهند. این میله‌ها عموماً از جنس آلومینیوم یا مس هستند و در بین ورقه‌های لایه لایه شده فولادی ریخته شده‌است. بیشتر جریان القا شده در روتور از میان این میله‌ها عبور می‌کند چراکه ورق‌های لایه لایه فولادی به علت لاک‌زنی شدن دارای مقاومت الکتریکی زیادی هستند. ولتاژ ایجاد شده در بین حلقه‌ها بسیار پایین است، اما جریان جاری بسیار زیاد است و این به دلیل مقاومت پایین این میله‌هاست. در موتورهای که راندمان بالاتری دارند، به دلیل اینکه مقاومت الکتریکی این فلز کمتر است از مس برای تولید روتور استفاده می‌شود [۱].

## ۲-۱- عملکرد موتور القایی

وقتی که استاتور یک موتور القایی را به یک منبع ولتاژ سه فاز وصل می‌شود و جریان از سیم پیچهای استاتور عبور می‌کند شار تولید شده در سیم پیچهای استاتور باعث ایجاد یک میدان دوار در فاصله هوایی می‌شود، سرعت این میدان دوار که سرعت سنکرون نامیده می‌شود از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۳ و ۴]:

$$\omega_s = \frac{2 \omega}{p} \quad (1-1)$$

که در این رابطه  $P$  تعداد قطب‌های سیم‌پیچی به ازای هر فاز است و  $\omega_e$  فرکانس منبع تغذیه با واحد رادیان بر ثانیه می‌باشد.

با فرض اینکه ولتاژ هر فاز استاتور با رابطه زیر برابر باشد:

$$U_s = \sqrt{2} v_s \sin \omega t \quad (2-1)$$

شار تولید شده از این ولتاژ از رابطه ۱-۳ حاصل می‌شود:

$$\phi(t) = \phi_m \cos(\omega_m t + \delta - \omega_s t) \quad (3-1)$$

حال، با توجه به توزیع شار در سیم پیچی روتور، ولتاژ هر فاز روتور از رابطه زیر بدست می آید:

$$e_r = N_r \frac{d\phi}{dt} = N_r \frac{d}{dt} [\phi_m \cos(\omega_m t + \delta - \omega_s t)] \quad (4-1)$$

$$e_r = -N_r \phi_m (\omega_s - \omega_m) \sin[(\omega_s - \omega_m)t - \delta] \quad (5-1)$$

$$e_r = -s E_s \sin(s\omega_s t - \delta) \quad (6-1)$$

$$e_r = -s\sqrt{2} E_r \sin(s\omega_s t - \delta) \quad (7-1)$$

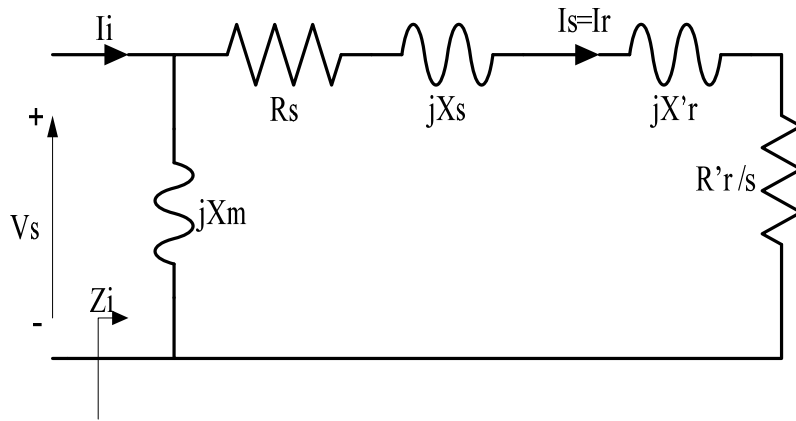
که در رابطه بالا  $N_r$  تعداد چرخش های هر فاز روتور،  $\omega_m$  سرعت زاویه ای روتور،  $\delta$  موقعیت نسبی روتور،  $E_r$  مقدار موثر ولتاژ هر فاز روتور می باشد و  $s$  پارامتری مهم به نام لغزش<sup>1</sup> می باشد که از رابطه زیر برای موتور القایی تعریف می شود [3]:

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (8-1)$$

بنابراین با توجه به روابط بالا مدار معادل تقریبی هر فاز موتور القایی را می توانیم مطابق شکل ۱-۲ ترسیم کنیم. در این شکل  $R_s$  و  $X_s$  به ترتیب مقاومت و رکتانس هر فاز استاتور و  $R_r$  مقاومت هر فاز رتور و  $X_m$  رکتانس مغناطیسی هسته و  $X'_r$  رکتانس هر فاز روتور در فرکانس تغذیه می باشد.

---

<sup>1</sup> Slip



شکل ۱-۲: مدار معادل تقریبی موتور القایی [۳]

با توجه به مدار معادل تقریبی موتور می توان مقاومت ظاهری دیده شده از دو سر استاتور را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Z_i = \frac{-X_m(X_s + X'_{r'}) + jX_m(R_s + \frac{R'_{r'}}{s})}{R_s + j(X_m + X_s + X'_{r'}) + \frac{R'_{r'}}{s}} \quad (9-1)$$

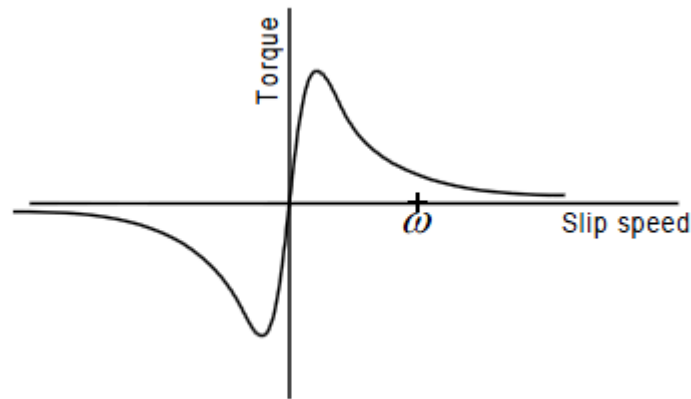
با توجه به اینکه  $X_m \gg R_s + jX_s$  می توان  $v_s = v_m$  فرض کرد و در این حالت جریان رتور نیز از رابطه زیر حاصل می شود:

$$I_r = \frac{v_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R'_{r'}}{s})^2 + (X_s + X'_{r'})^2}} \quad (10-1)$$

بنابراین می توانیم گشتاور موتور القایی را برای حالت سه فاز از رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$T_{3\phi} = \frac{3R_s v_s^2}{s\omega_s [(R_s + \frac{R'_{r'}}{s})^2 + (X_s + X'_{r'})^2]} \quad (11-1)$$

با توجه به روابط بالا می توان نمودار گشتاور-لغزش موتور القایی مطابق شکل ۱-۳ ترسیم کرد.



شکل ۱-۳: مشخصه گشتاور- لغزش موتور القایی [۵]

## ۲-۱- راه اندازی موتور القایی

در قسمت قبلی روابط و مدار معادل موتور القایی را بدست آمد و با توجه به اینکه به هنگام راه اندازی لغزش موتور برابر با صفر است طبق رابطه ۱-۱۰ در راه اندازی موتور القایی جریان موتور چندین برابر جریان نامی<sup>۱</sup> موتور می باشد و این جریان زیاد علاوه بر اینکه به خود موتور صدمه می زند، به مصرف کننده های دیگری که از این خط مشترک تغذیه می شوند لطمه زده و کار آنها را مختل می سازد. موتورهای القایی با توجه به قدرت و ولتاژ آن به طرق مختلف راه اندازی می شوند. موتور القایی معمولاً به روشهای زیر راه اندازی می شود، تا جریان راه اندازی کاهش یابد:

### ۱-۲-۱- به طور مستقیم

برای موتورهایی که بزرگ نیستند و آمپر زیادی از شبکه نمی کشند بوسیله یک کلید سه قطبی به شبکه متصل می شوند [۱].

<sup>۱</sup> Rated