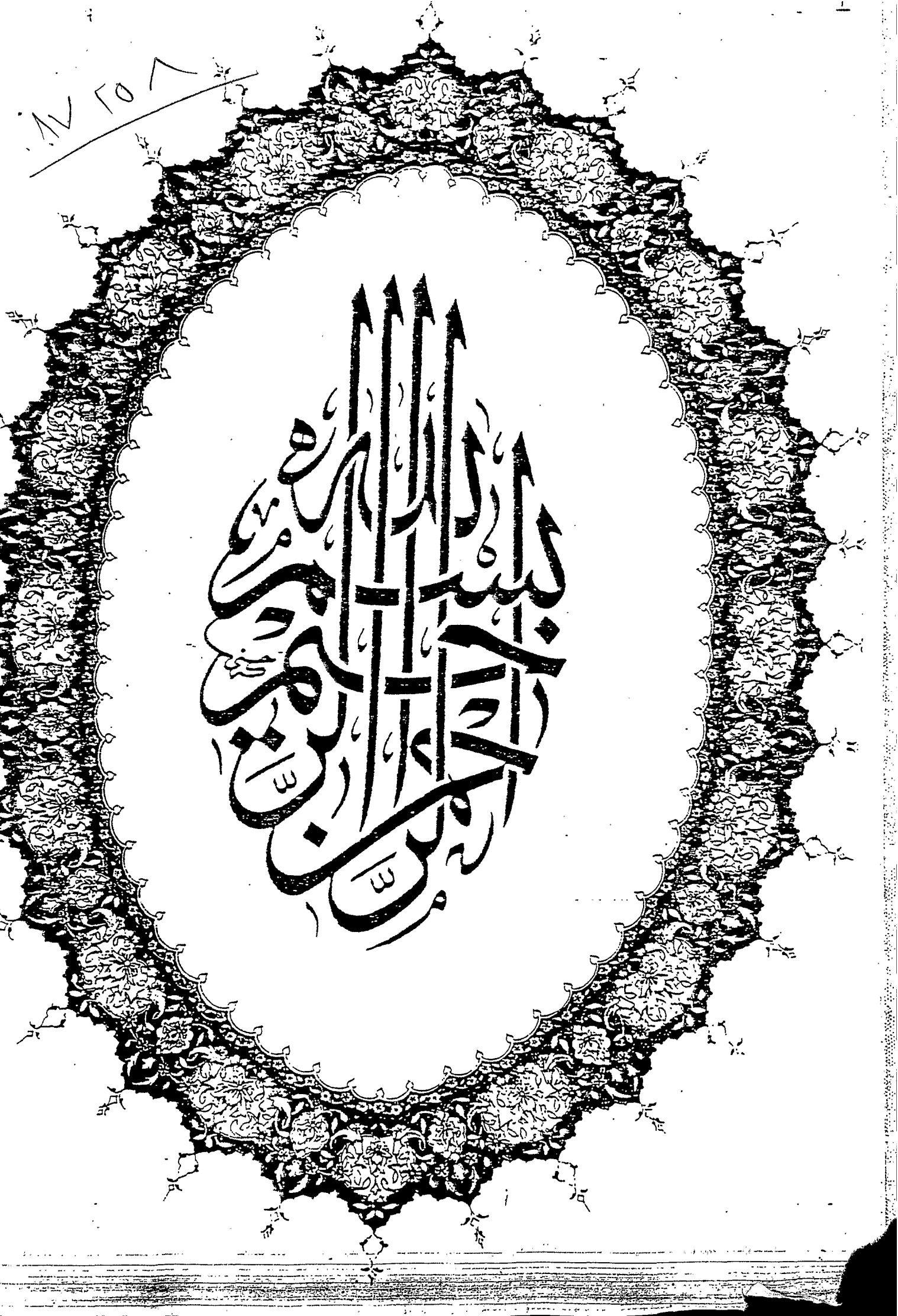


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی قدرت

بهینه سازی روش PWM در کنترل موتور القایی به  
روش کنترل برداری

غلامحسین رضوانی

استاد راهنما

دکتر مهرداد عابدی

تابستان ۱۳۷۲



۷۴۱

## چکیده :

استفاده از ماشین‌های DC بدلیل کنترل‌پذیری و رفتار خوب دینامیکی ناشی از کنترل دکوپله آن برای چند دهه تقریباً نقش انحصاری در صنعت داشته است. اما با پیداشدن مبدل‌های توان استاتیک و گسترش امکان پردازش توان الکتریکی ماشین‌های القایی از قید تکسرعتی بودن رهائی یافتند، با توجه به نداشتن محدودیت‌های ماشین DC و داشتن مزایای چندی، رفته‌رفته جای خود را در صنعت بیشتر باز کرده است. برای جمع کردن مزایای ماشین القایی و کنترل‌پذیری و رفتار خوب دینامیکی ماشین‌های DC، روشهای کنترل برداری بکار گرفته شده و تغذیه مطلوب توسط اینورتر PWM با مدولاسیون تطبیقی تامین می‌شود. شکل موج خروجی PWM حاوی هارمونیکهاست و موجب افزایش تلفات اضافی ماشین می‌شود که برای کاهش آن باید سرعت سوئیچینگ را بالا برد. با توجه به محدودیت عناصر موجود و برای جلوگیری از افزایش تلفات سوئیچینگ باید مصالحه‌ای بین تلفات ماشین و اینورتر ایجاد کرد. در اینجا با استفاده از سیمولیشن کامپیوتری معادلات ماشین حل شده با پذیرش رایبل مشخصی از جریان و با توجه به کنترل لحظه‌ای جریان ماشین ترتیبی داده می‌شود که کمترین تعداد سوئیچینگ در واحد زمان با پیشگویی جریان و انتخاب کلید مناسب بدست آید. شکل موج جریان‌های سه‌فاز و ولتاژ فاز اول و نیز مولفه‌های عمودی و افقی جریان و فلو و همچنین نمودار گشتاور و دور به‌علاوه تعداد سوئیچینگ تلفات هدایت و سوئیچینگ اینورتر محاسبه و نشان داده می‌شود.

# ( الف )

صفحه

فهرست مطالب

پیشگفتار

## فصل اول

مقدمه

- |   |   |
|---|---|
| ۳ | ۱-۱- اهمیت و کاربرد ماشین‌های الکتریکی    |
| ۴ | ۲-۱- لزوم کنترل ماشین‌های الکتریکی        |
| ۵ | ۳-۱- معایب ماشین‌های DC                   |
| ۵ | ۴-۱- مزایای ماشین‌های AC "القاشی"         |
| ۶ | ۵-۱- معایب ماشین‌های القاشی               |
| ۷ | ۶-۱- مقایسه کنترل‌پذیری ماشین‌های AC و DC |
| ۹ | ۷-۱- تقسیم بندی و شهای کنترلی             |

## فصل دوم

- |    |                               |
|----|-------------------------------|
| ۱۱ | ۱-۲- موتور القاشی             |
| ۱۲ | ۲-۲- لغزش و سرعت موتور القاشی |
| ۱۳ | ۳-۲- مدار معادل موتور القاشی  |

( ب )

فصل سوم

- ۱۷ ۱-۳-۱- کنترل موتور القاشی  
۱۸ ۲-۳-۲- روشهای کنترل  
۱۹ ۳-۳-۳- روشهای کنترل برداری  
۲۴ ۱-۳-۳-۱- روش مستقیم کنترل برداری  
۲۸ ۲-۳-۳-۲- روش غیر مستقیم کنترل برداری

فصل چهارم

- ۳۵ ۱-۴-۱- عناصر سوئیچینگ  
۳۷ ۲-۴-۲- المانهای نیمه هادی قدرت  
۳۷ ۱-۲-۴-۱- دیود  
۳۹ ۲-۴-۲-۲- تریستور  
۴۱ ۳-۲-۴-۳- تریاک  
۴۲ ۴-۲-۴-۴- GTO  
۴۴ ۵-۲-۴-۵- ترانزیستورهای دو قطبی قدرت  
۴۷ ۶-۲-۴-۶- ترانزیستور تک قطبی قدرت  
۴۷ ۷-۲-۴-۷- مسفت قدرت  
۴۹ ۸-۲-۴-۸- عناصر مرکب

فصل پنجم

- ۵۵ ۱-۵-۱- اینورترها  
۵۷ ۲-۵-۲- اینورترهای موج مربعی  
۵۸ ۱-۲-۵-۱- اینورترهای منبع ولتاژ موج مربعی  
۵۹ ۱-۱-۲-۵-۱- مدار پل تکفاز

( ج )

- ۶۶ - ۲-۲-۵- اینورترهای منبع جریان موج مربعی
- ۶۷ - ۳-۲-۵- اینورترهای منبع جریان ۱۲ پله ای
- ۶۸ - ۳-۵- مقایسه اینورترها
- ۷۰ - ۴-۵- اینورترهای PWM
- ۷۲ - ۵-۵- استراتژیهای PWM
- ۷۲ - ۱-۵-۵- مدولاسیون مقایسه ای
- ۷۴ - ۲-۵-۵- مدولاسیون محاسبه ای
- ۷۶ - ۳-۵-۵- مدولاسیون تطبیقی

فصل ششم

- ۷۸ - ۱-۶- بهینه سازی روش PWM
- ۷۸ - ۲-۶- اثرات هارمونیکها
- ۷۹ - ۳-۶- حذف هارمونیکها
- ۸۴ - ۴-۶- استراتژیهای بهینه
- ۸۶ - ۱-۴-۶- روش بهینه سازی رایبل جریان حد اقل
- ۸۸ - ۲-۴-۶- بهینه سازی دینامیک و تلفات موتور
- ۹۱ - ۳-۴-۶- روش های بهینه سازی PWM در اینورترهای

منبع جریان

- ۹۱ - ۴-۴-۶- معیار عملکرد با امکان تعیین دامنه موج اصلی
- ۹۳ - ۵-۴-۶- دو معیار بهینه سازی دیگر
- ۹۵ - ۶-۴-۶- روش خاص بهینه سازی
- ۹۵ - ۱-۶-۴-۶- معیار بهینه سازی
- ۹۷ - ۲-۶-۴-۶- اینورتر منبع ولتاژ
- ۹۷ - ۳-۶-۴-۶- حالت های مختلف سوئیچینگ

## بسمه تعالی

### پیشگفتار :

در میان انواع انرژی موجود کاربرد انرژی الکتریکی از گستردگی بیشتری برخوردار است. اختراع و ساخت وسایلی که بهره‌برداری از انرژی الکتریکی را مقذور می‌سازد مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. بهبود و افزایش کارآیی این وسایل بر تنوع و گستردگی کاربرد این شکل از انرژی می‌افزاید. در میان وسایل الکتریکی ماشین‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. بوجود آمدن انواع ماشین‌های جریان مستقیم و متناوب تحولی بزرگ در جهان صنعتی بوجود آورده روز بروز بر دامنه کاربرد آن افزوده است. کنترل‌پذیری ماشین جریان مستقیم علی‌رغم محدودیت‌ها استفاده انحصاری از آن را در دهه‌های گذشته باعث شده بود با توجه به لزوم غلبه بر محدودیت‌ها و مشکلات و ابداع روشهای اقتصادی‌تر در بکارگیری ماشین‌های جریان متناوب و نیز با توجه به کنترل‌پذیر شدن آنها، استفاده از ماشین‌های مذکور بتدریج ماشین‌های جریان مستقیم را تحت‌الشعاع قرار داده است.

[6] [8] [13] [14]

کنترل‌پذیری ماشین‌های AC ( القائی ) روشهای خاص تغذیه را می‌طلبد، مبدل‌های توان که برای فراهم نمودن تغذیه لازم پا به میدان گذاردند بخوبی پاسخگوی این نیاز بودند. با توجه به تنوع روشهای کنترلی و لزوم استفاده از روش کنترلی مناسب‌تر از میان مبدل‌های توان، اینترترهای (Pulse width modulation) PWM اهمیت بیشتری یافته‌اند.

[5] [17]

چنانچه اینورتر بعنوان تغذیه کننده و ماشین بعنوان مصرف کننده انرژی الکتریکی بعنوان یک مجموعه مورد توجه قرار گیرند تنوع روشهای مدولاسیون با عنایت به کاربردهای مختلف آنها ایده استفاده بهتر و شایسته تر از این روشها را مطرح میسازد.

بهینه سازی روش PWM در کنترل دور موتور القاشی با استفاده از روش کنترل برداری موضوعی است که این تز عمده دار تبیین آن است.

**فصل اول** "مقدمه" مشتمل بر ذکر اهمیت و کاربرد ماشینهای الکتریکی و مقایسه بین انواع AC و DC است. سپس به استفاده از انواع اینورترها با توجه به عناصر نیمه هادی اشاره می شود. نهایتاً با ذکر انواع و چگونگی انتخاب روشهای کنترل مقدمه به پایان می رسد.

**فصل دوم** مشتمل بر مقدمه ای کوتاه بر ماشین القاشی و بیان معادلات اساسی آن است.

**فصل سوم** با اشاره به روشهای کنترل به تشریح روش Vector Control می پردازد.

**فصل چهارم** به معرفی عناصر سوئیچینگ اختصاص دارد.

**فصل پنجم** با اشاره به کاربردهای عناصر الکترونیکی "الکترونیک قدرت" اینورترهای مختلف را مورد توجه قرار می دهد.

**فصل ششم** ضمن تشریح معیارهای بهینه سازی به توضیح روش خاص بهینه سازی می پردازد.

**فصل هفتم** اختصاص به برنامه های کامپیوتری و نتایج بدست آمده دارد. بدیهی است مطالب مطروحه خالی از ضعف نیست. امید است خوانندگان عزیز ضمن تذکر به حقیر برای بارور شدن مطالب این تز در خدمت به صنایع کشور از هیچ گونه کوششی دریغ نفرمایند.



## فصل اول

### مقدمه :

#### ۱-۱- اهمیت و کاربرد ماشین‌های الکتریکی

میزان انرژی مصرفی در هر جامعه‌ای بیانگر پیشرفت‌های صنعتی و رشد اجتماعی و سطح زندگی آن جامعه است. توسعه اقتصادی منوط به داشتن ارتباطات و خدمات‌رسانی و حمل و نقل است، که آنهم بدون داشتن انرژی تحقق نمی‌یابد. پیشرفتهای حاصله تبدیل انرژی موجود به اشکال مورد لزوم انرژی را اهمیتی خاص بخشیده و انرژی الکتریکی در میان انواع انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار است. چرا که سهولت در تولید و انتقال و تبدیل به اشکال دیگر باعث شده متداولترین شکل انرژی در جهان امروز باشد. پیشرفت تکنولوژیکی و توسعه زندگی اجتماعی و افزایش سطح رفاه بخصوص با میزان مصرف انرژی الکتریکی بیان می‌شود. به همین دلیل کشورهایی که کمتر به مواد خام متکی هستند انرژی الکتریکی بیشتری تولید کرده و آن را بصورت‌های دلخواه در آورده، مصرف می‌نمایند. مبدل‌های دوار الکترومکانیکی یا به عبارت بهتر الکترومغناطیسی که به ماشین‌های الکتریکی معروفند، از جمله وسائلی هستند که در تبدیل شکل انرژی الکتریکی نقشی بارزی را ایفا می‌کنند. ماشین‌های الکتریکی با حوزه عمل بسیار وسیع بخش عمده‌ای از مطالعات و کاربردهای مربوط به انرژی الکتریکی را به خود اختصاص داده‌اند.

تنوع و کثرت ماشین‌های الکتریکی برای رفع احتیاجات گوناگون، مطالعات و بررسیهای زیادی را در زمینه‌های طراحی، بهبود کیفیت،

افزایش راندمان، کاهش هزینه، توسعه کاربرد، افزایش ضریب اطمینان و ..... را به خود اختصاص داده است.

انواع ماشین‌های DC " شامل شنت، سری، کمپوند، تحریک مستقل و .... " و نیز انواع ماشین‌های AC " شامل سنکرون، آسنکرون یا القایی، ماشین‌های مخصوص " که امروز در جای جای صنعت و زندگی روزمره بکار می‌روند، بیانگر همین واقعیت است. در این میان افزایش سطح مهارت و تکنولوژی موجبات استفاده بهتر از ماشین‌های الکتریکی را فراهم آورده است.

## ۱-۲- لزوم کنترل ماشین‌های الکتریکی

در خیلی از موارد بکارگیری محرکی با سرعت قابل تنظیم برای کنترل دقیق و مستمر سرعت یا گشتاور یا وضعیت مورد نیاز است علاوه بر آن در مواردی نیاز به تعویض جهت چرخش و یا راه‌اندازی و ترمز در حداقل زمان ممکن ضرورت دارد. لذا کنترل موتورها از جهت تغییر گشتاور یا سرعت یا وضعیت، راه‌اندازی و ترمز و نیز معکوس‌سازی جهت چرخش اهمیت ویژه‌ای دارد. پاسخ به ضرورت‌های فوق‌الذکر با بکارگیری ماشین‌های الکتریکی کنترل شونده مقدور می‌شود. [5] [6]

در گذشته برای کارکرد محرکها با سرعت قابل تنظیم در سطح وسیعی از ماشین‌های DC استفاده می‌شد، زیرا در ماشین DC فلو و گشتاور به‌سادگی با کنترل جریان تحریک و جریان آرمیچر کنترل می‌شوند، یعنی کنترل متغیرهای گشتاور و فلو مستقلاً امکان‌پذیر است و همین امر موجب می‌شود که ماشین DC رفتار دینامیکی خیلی خوبی داشته باشد. بطور مشخص ماشین‌های DC تحریک مستقل برای بدست آوردن

پاسخ سریع و کار در چهار ربع مختصات با عملکرد خیلی خوب و نیز با امکان تامین سرعت نزدیک به صفر بکار برده می‌شوند.

[8] [13] [14] [17]

### ۳-۱- معایب ماشین‌های DC

صرفنظر از کنترل‌پذیری خوب ماشین‌های DC بدلیل داشتن کموتاتور و جاروبک دارای معایبی بشرح ذیل است :

- ۱ - احتیاج به نگهداری و تعمیرهای دوره‌ای دارد.
- ۲ - از آنها در محیط‌هایی که خطر انفجار یا احتراق یا خوردگی باشد نمی‌توان استفاده کرد.
- ۳ - کموتاتور محدودیت در سرعت موتور ایجاد می‌کند.
- ۴ - کموتاتور محدودیت در ولتاژ موتور ایجاد می‌کند.

بعلاوه :

۵ - وزن زیاد

۶ - بزرگی ابعاد " اندازه "

۷ - قیمت بالا

نیز از سایر معایب این نوع ماشین‌ها است.

[6] [9] [10] [20]

### ۴-۱- مزایای ماشین‌های AC " القایی "

برای فائق آمدن بر ضعف‌های مذکور در جاهائیکه ممکن باشد از ماشین‌های جریان متناوب استفاده می‌شود.

ماشین‌های جریان متناوب در مقابل دارای خصوصیات زیر است :

- ۱ - ساده و ساختمان آن محکم است.
- ۲ - دارای عمر زیاد و اقتصادی است.
- ۳ - زمخت و خشن و در مقابل اضافه‌بار تحمل زیادی دارد.

۴ - ابعاد کوچکتر آن موجب می‌شود تا با وزن کمتر دارای رانندمان بهتر باشد.

۵ - بدلیل نداشتن جاروبک به حداقل تعمیر نیاز دارد. بعلاوه تلفات اصطکاکی ندارد. در میان ماشین‌های AC ماشین القاشی این مزیت را دارد که از حالت سکون بدون نیاز به سنکرونیزه شدن راه می‌افتد، بخصوص در نوع قفس سنجایی راه‌اندازی خیلی ساده است. بعلاوه ماشین‌های القاشی قفس سنجایی از نظر اقتصادی نیز باصرفه‌تر است.

ماشین قفس سنجایی ساده و محکم و یکی از ارزانه‌ترین ماشین‌ها است که در هر قدرت اسمی در دسترس است.

[5] [13] [14]

#### ۱-۵- معایب ماشین‌های القاشی

البته نباید از نظر دور داشت که ماشین القاشی نیز علی‌رغم مزایای فوق، دارای معایبی بشرح زیر است:

۱ - بدون از دست‌دادن قسمتی از رانندمان سرعت آن قابل تغییر نیست.

۲ - مانند موتور شنت DC با افزایش بار سرعت آن تقلیل می‌یابد.

۳ - گشتاور راه‌اندازی آن از موتور شنت DC کمتر است.

بعلاوه ماشین القاشی در مقایسه با ماشین DC یک ماشین تقریباً " سرعت ثابت است و ترمز ندارد و تغییر جهت چرخش جز با تعویض دو فاز امکان‌پذیر نیست. با اینهمه پیشرفت صنعت ماشین القاشی را نیز کنترل‌پذیر ساخته و مزایای چشمگیر ماشین القاشی باعث شده استفاده از ماشین DC تحت‌الشماع استفاده از آن قرار بگیرد. بهمین دلیل روز بروز استفاده از ماشین القاشی گسترده‌تر و وسیع‌تر می‌شود.

## ۱-۶- مقایسه کنترل پذیری ماشین‌های DC و AC القایی و چگونگی کاربرد اینورترها در کنترل ماشین‌های AC

در ماشین DC با کنترل ولتاژ آرمیچر توسط یک رکتیفایر کنترل فاز و یا کنورتر DC - DC تغییر سرعت ممکن می‌شود و گشتاور با فلوی میدان تحریک و mmf آرمیچر مرتبط است.

در ماشین AC یک منبع تغذیه سه فاز یک میدان مغناطیسی گردان در فاصله هوایی ایجاد می‌کند که با mmf روتور موجب تولید گشتاور می‌شود. mmf روتور در یک موتور سنکرون ناشی از سیم‌پیچی میدان جداگانه با جریان DC می‌باشد. در حالیکه در موتور القایی بوسیله اثر القایی استاتور تولید می‌شود.

چنانچه منبع تغذیه ماشین AC فرکانس ثابتی داشته باشد، ماشین AC سرعت ثابتی دارد، زیرا با تعداد مشخصی قطب در نوع سنکرون موتور با دور سنکرون می‌چرخد و در نوع آسنکرون موتور با مقداری کمتر از دور سنکرون می‌چرخد، یعنی در هر حال دور ثابت محسوب می‌شود. [10] [12]

استفاده از منابع تغذیه با فرکانس متغییر مثل اینورترهای ولتاژ "VSI" و اینورترهای جریان "CSI" و سیکلوکنورترها ماشین‌های AC را از قید تک‌سرعتی بودن می‌رهاند. اما از آنجا که بهبود کارکرد ماشین‌های نیز مطلوب و مورد نظر است، استفاده از منابع تغذیه مذکور از جهت دیگر نیز لازم و ضروری می‌نماید. با توجه به وابستگی سرعت ماشین AC به فرکانس منبع چنانچه فرکانس بالا رود، بدلیل افزایش راکتانس مغناطیسی فلوی فاصله هوایی کاهش می‌یابد. در نتیجه کاهش گشتاور را نیز بدنبال

دارد. اما در طراحی ماشین بسنجوی عمل می‌شود که همواره ماشین با حداکثر فلوی مغناطیسی کار کند و برای ثابت نگه داشتن میزان فلو در فرکانسهای مختلف لازم است که نسبت ولتاژ اعمال شده به فرکانس مقدار ثابتی باشد که به معنای آن است که باید کنترل با تغییر توام ولتاژ و فرکانس اعمال شود. بهمین ترتیب می‌توان با تغییر توام جریان و فرکانس نیز کنترل لازمه را اعمال نمود.

[5] [10]

از این مثال می‌توان بطور کلی نتیجه گرفت که اعمال کنترل روشهای خاص تغذیه را می‌طلبد. خوشبختانه گسترش ساخت نیمه‌هادیهای مورد مصرف در مدارات قدرت و تنوع و کارآیی روز افزون این عناصر که با اعمال دستیابی به انواع و اقسام اینورترهای ولتاژ و جریان، PWM، و سیکلوکنورترها و مدارات پیشرفته کامپیوتری و میکروپروسسوری را ممکن ساخته، موجبات تحولی بزرگ در کنترل موتورهای الکتریکی را فراهم آورده است. با استفاده از این عناصر توان الکتریکی را با مشخصات مورد نیاز موتور تامین و آنرا تغذیه می‌کنند. با توجه به لزوم بهینه‌سازی کنترل ماشین و با توجه به اینکه شکل موج خروجی مبدل‌های قدرت استاتیکی " Solid State " حالت جامد برای تغذیه ماشین‌های AC عموماً " سینوسی کامل نیست، بنابراین حاوی هارمونیکها است. هارمونیکها موجب تلفات اضافی و نوسان گشتاور می‌شوند. هرچه شکل موج به سینوسی نزدیکتر باشد از جهت موارد مذکور بهتر است.

[5] [9] [10] [12] [14]

با توجه به کیفیت کارکرد اینورترهای Solid State برای گاهی هارمونیکها باید سرعت سوئیچینگ بالا برود و از نظر تئوریک یعنی سرعت بینهایت و قطع و وصلهای خیلی زیاد لازم است اما در عمل با توجه به محدودیت عناصر نیمه‌هادی سرعت بهر حال محدود می‌شود. پس شناخت عناصر قدرت و استفاده بجا و متناسب با نوع نیازمندی اینورتر موجب می‌شود تا به شرایط مطلوب که همان حداکثر نزدیکی ممکن شکل موج خروجی به سینوسی است بهتر برسیم.

پس در یک کلام کنترل بهینه ماشین از دیدگاه تغذیه‌کننده در گرو آن است که حتی المقدور شکل موج سینوسی باشد و از دیدگاه ماشین با توجه به تنوع روشهای کنترلی در گرو آن است که متناسب با نوع نیاز ما، ماشین بطور کامل کنترل‌پذیر باشد. به عبارت دیگر کنترل گشتاور و دور ببحوی که چهار ربع را در بر بگیرد کنترل مطلوب و مورد نظر است. برای آشناسدن با کنترل مطلوب توجه مختصری به روشهای کوناگون کنترل موتور AC لازم و ضروری می‌نماید

## ۱-۷- تقسیم‌بندی روشهای کنترلی در یک دیدگاه کلی به دو روش:

- ۱ - روشهای کنترل عددی یا Scalar Control Methoeds
  - ۲ - روشهای کنترل برداری یا Vector Control Methoeds
- در روش کنترل عددی فقط به اندازه " بزرگی " متغیرها توجه می‌شود و سیگنالهای فرمان و فیدبک مقادیر DC متناسب با متغیرها می‌باشند.