

## فهرست مطالب:

صفحه

عنوان

چکیده

فهرست مطالب

7..... فصل اول:مقدمه

7..... 1-1 کلیات

8..... 2-1 کنترل برداری

10..... 3-1 کنترل مستقیم گشتاور

11..... 4-1 روشهای غیر خطی

11..... 5-1 بهینه سازی راندمان درایو القایی

13..... 6-1 روند ارائه مطالب

15..... فصل دوم:تحلیل ماشین القایی دو فاز نامتقارن

15..... 1-2 مقدمه

15..... 2-2 تحلیل ماشین دو فاز نامتقارن با استفاده از نظریه دستگاه مرجع

15..... 1-2-2 معادلات دینامیکی ماشین القایی دو فاز

17..... 2-2-2 معادلات ولتاژ و گشتاور در متغیرهای دستگاه مرجع ساکن

20..... 3-2 تحلیل موتور القایی دو فاز با استفاده از نظریه میدان گردان

20..... 1-3-2 موتورهای القایی دو فاز متقارن

24..... 2-3-2 موتورهای القایی دو فاز نامتقارن

28..... 4-2 شبیه سازی ماشین القایی دو فاز

29..... 5-2 نتایج شبیه سازی

33..... فصل سوم:کاهش ریپل گشتاور موتور القایی دو فاز نامتقارن با کاهش میدان چپگرد

33..... 1-3 مقدمه

34..... 1-3 اینورتر SPWM دو فاز نامتقارن

35..... 2-3 کنترل برداری در راستای شار روتور موتور القایی دو فاز نامتقارن

35..... 1-2-3 مدل ماشین

37..... 2-2-3 کنترل شار روتور

38..... 3-3 صفر نمودن امپدانس معادل چپگرد با اصلاح ساختار سیم پیچ کمکی

- 39-4 کاهش ریپل گشتاور با کاهش میدان چپگرد بر اساس کنترل برداری مبتنی بر پارامترهای سیم‌پیچ اصلی .....  
 40-5 نتایج شبیه سازی .....  
 40

**47 فصل چهارم: کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی دو فاز نامتقارن با روشهای غیر خطی .....**

- 47-1 مقدمه .....  
 47-2 روش خطی سازی ورودی-خروجی مبتنی بر شار استاتور به منظور کنترل مستقیم گشتاور .....  
 48-3 روش خطی سازی ورودی-خروجی مبتنی بر شار استاتور به منظور کنترل مستقیم سرعت .....  
 52-4 کنترل مستقیم گشتاور و شار دور استاتور مبتنی بر ساختار حالت لغزشی .....  
 53-4 کنترل مستقیم گشتاور و شار دور روتور با بهره گیری از تکنیک گام به گام عقب انتگرالی .....  
 56-6 مقایسه روشهای کنترل غیرخطی .....  
 60-7 نتایج شبیه سازی .....  
 60

**72 فصل پنجم: روش SVPWM در اینورتر دو فاز چهار سوئیچ .....**

- 72-1 مقدمه .....  
 73-2 تکنیک SVPWM برای درایو موتورهای القایی دو فاز متقارن .....  
 73-1-2 چهار بردار ولتاژ فضایی اینورتر دو فاز .....  
 75-2-2 تکنیک SVPWM در اینورتر دو فاز موتور القایی دو فاز متقارن .....  
 77-3-2 ترکیب رشته‌های سوئیچینگ .....  
 80-3-5 تکنیک SVPWM برای درایو موتورهای القایی دو فاز نامتقارن .....  
 80-4-5 مزایا و معایب سیستم درایو موتور القایی دو فاز .....  
 81-5-5 شبیه سازی اینورتر دو فاز چهار سوئیچ .....

**84 فصل ششم: بهینه سازی راندمان موتور القایی دو فاز نامتقارن .....**

- 84-1 مقدمه .....  
 84-2 تلفات در موتورهای القایی [37] .....  
 85-1-2 تلفات اهمی .....  
 85-2-2 تلفات هسته مغناطیسی .....  
 86-3-2 تلفات اصطکاک و مقاومت هوا .....  
 86-4-2 تلفات پراکنده .....  
 86-5-2 مجموعه عوامل تلفات موتور .....  
 86-6-2 مقایسه تلفات در موتور تکفاز و سه فاز .....

87 ..... 7-2-6 استاندارد های تعیین راندمان

88 ..... 3-6 روشهای بهبود راندمان موتور القایی

89 ..... 4-6 بهینه سازی راندمان موتور القایی دو فاز با روش جستجوی شار بهینه

89 ..... 5-6 نتایج شبیه سازی

91..... فصل هفتم:نتایج

94..... منابع

## فهرست اشکال:

صفحه	عنوان
16	شکل 1-2 ماشین القایی دوفاز نامتقارن، دو قطب.....
19	شکل 2-2 مدار محور $d$ و $q$ مربوط به یک موتور القایی دو فاز نامتقارن.....
21	شکل 3-2 نمایش مدار یک موتور دو فاز.....
23	شکل 4-2 تجزیه یک منبع ولتاژ دو فاز نامتعادل به دو منبع دو فاز.....
24	شکل 5-2 مدار معادل یک فاز از موتور القایی دو فاز متقارن با تغذیه نامتعادل.....
25	شکل 6-2 طرحواره الکتریکی یک موتور دو فاز نامتعادل در حالت کلی.....
26	شکل 7-2 مدار معادل اولیه هر یک از سیم پیچی های موتور.....
28	شکل 8-2 مدار معادل یک موتور دو فاز نامتقارن.....
31	شکل 9-2 نتایج شبیه سازی موتور القایی دو فاز متقارن.....
32	شکل 10-2 نتایج شبیه سازی موتور القایی دو فاز نامتقارن.....
34	شکل 1-3 سیستم درایو مربوط به موتور القایی تکفاز.....
34	شکل 2-3 مدولاسیون پهنای پالس.....
38	شکل 3-3 بلوک دیاگرام کنترل غیر مستقیم در راستای شار روتور.....
39	شکل 4-3 مدار معادل موتور القایی دو فاز متقارن.....
42	شکل 5-3 کنترل سرعت با روش کنترل برداری غیر مستقیم در راستای شار روتور.....
43	شکل 6-3 کنترل شار با روش کنترل برداری غیر مستقیم در راستای شار روتور.....
44	شکل 7-3 نتایج شبیه سازی موتور القایی دو فاز نامتقارن اصلاح ساختار شده ( $a=10/9$ ).....
45	شکل 8-3 کنترل سرعت موتور القایی دوفاز نامتقارن با روش کنترل برداری بر اساس پارامترهای سیم پیچ اصلی.....
46	شکل 9-3 کنترل شار موتور القایی دوفاز نامتقارن با روش کنترل برداری بر اساس پارامترهای سیم پیچ اصلی.....
61	شکل 1-4 کنترل مستقیم گشتاور (سرعت) به روش های غیر خطی مبتنی بر شار استاتور.....
62	شکل 2-4 کنترل سرعت موتور القایی دو فاز نامتقارن در چهار ناحیه گشتاور- سرعت با تکنیک خطی سازی ورودی خروجی.....
63	شکل 3-4 کنترل شار موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک خطی سازی ورودی خروجی.....
64	شکل 4-4 کنترل موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک خطی سازی ورودی خروجی با تغییر پارامترها.....
65	شکل 5-4 کنترل سرعت موتور القایی دو فاز نامتقارن در چهار ناحیه گشتاور- سرعت با تکنیک حالت لغزشی.....
66	شکل 6-4 کنترل شار استاتور موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک حالت لغزشی.....
67	شکل 7-4 کنترل موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک حالت لغزشی با تغییر پارامترها.....
68	شکل 8-4 کنترل شار موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک گام به گام عقب.....
69	شکل 9-4 کنترل سرعت موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک گام به گام عقب.....
70	شکل 10-4 کنترل سرعت موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک خطی سازی ورودی خروجی مبتنی بر کنترل سرعت و شار استاتور.....
71	شکل 11-4 کنترل شار موتور القایی دو فاز نامتقارن با تکنیک خطی سازی ورودی خروجی مبتنی بر کنترل سرعت و شار استاتور.....
73	شکل 1-5 اینورتر نیمه پل چهار سوئیچه.....
74	شکل 2-5 یکسوکننده و اینورتر به کمک شش سوئیچ.....

- شکل 3-5 حالت های سوئیچینگ اینورتر دو فاز..... 74
- شکل 4-5 چهار بردار ولتاژ فضایی اینورتر دو فاز..... 74
- شکل 5-5 تعیین زمان های سوئیچینگ در تکنیک *SVPWM* اینورتر دو فاز..... 75
- شکل 6-5 ولتاژهای خروجی با بکارگیری تکنیک مدولاسیون متقارن دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز..... 78
- شکل 7-5 ولتاژهای خروجی با بکارگیری تکنیک مدولاسیون متقارن دو فاز توسعه یافته *SVPWM* اینورتر دو فاز..... 79
- شکل 8-5 ولتاژهای دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز، زمان شبیه سازی: 0/2. ثانیه..... 82
- شکل 9-5 ولتاژهای دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز، زمان شبیه سازی: 0/1. ثانیه..... 82
- شکل 10-5 جریان های دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز، زمان شبیه سازی: 0/2. ثانیه..... 82
- شکل 11-5 جریان های دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز، زمان شبیه سازی: 0/1. ثانیه..... 82
- شکل 12-5 ولتاژهای دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز نامتقارن، زمان شبیه سازی: 0/2. ثانیه..... 82
- شکل 13-5 ولتاژهای دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز نامتقارن، زمان شبیه سازی: 0/1. ثانیه..... 83
- شکل 14-5 جریان های دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز نامتقارن، زمان شبیه سازی: 0/2. ثانیه..... 83
- شکل 15-5 جریان های دو فاز *SVPWM* اینورتر دو فاز نامتقارن، زمان شبیه سازی: 0/1. ثانیه..... 83
- شکل 1-6 مقایسه درصد تلفات در موتور تکفاز و سه فاز..... 87
- شکل 2-6 ترکیب الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر جستجوی شار با کنترل کننده خطی ساز ورودی خروجی..... 90

## فهرست جداول:

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
29	جدول 1-2 پارامترهای موتور القایی دو فاز نامتقارن [38]
29	جدول 2-2 پارامترهای موتور القایی دو فاز متقارن [41]
41	جدول 1-3 پارامترهای موتور القایی دو فاز نامتقارن اصلاح شده
86	جدول 1-6 متوسط توان تلف شده در یک موتور استاندارد NEMA
93	جدول 1-7 مقایسه نتایج شبیه سازی روشهای مختلف کنترلی

## فصل اول

### مقدمه

#### 1-1 کلیات

افزایش مصرف انرژی در عین محدودیت منابع و هزینه زیاد انرژی، عامل اصلی تلاش در راستای کاهش تلفات در سیستم‌های الکتریکی می‌باشد. از طرف دیگر موتورهای القایی بیش از 50 درصد مصرف انرژی الکتریکی در صنعت را شامل می‌شوند [1]. بر این اساس، تلاش‌های زیادی در جهت افزایش راندمان موتورهای الکتریکی و بخصوص موتورهای القایی انجام گرفته و صورت می‌گیرد. بدین منظور، طراحی، ساخت و استفاده از موتورهای الکتریکی پر بازده با بکارگیری مواد اولیه‌ی با کیفیت بهتر، و نیز استفاده از تکنیک‌های مونتاژ و ساخت پیشرفته‌تر مورد توجه محققین قرار دارد. جایگزینی موتورهای الکتریکی تک سرعت کنترل شده با روشهای مکانیکی همچون گیربکس، با درایوهای الکتریکی سرعت متغیر از دیگر فعالیتهای مورد توجه در صنعت به منظور افزایش راندمان موتور درایوهای الکتریکی به شمار می‌رود. تلاش در جهت جایگزینی موتور درایوهای DC در صنایعی چون کاغذ سازی و نساجی، با درایوهای القایی (و یا مغناطیس دائم) از دیگر فعالیتهای انجام گرفته در راستای بهبود الگوی مصرف انرژی در صنعت شناخته می‌شود.

از سوی دیگر، موتورهای القایی برای یک ولتاژ و فرکانس ثابت طراحی و ساخته می‌شوند به گونه‌ای که، راندمان بهینه‌ی آنها بازای تقریباً 75٪ از بار نامی موتور محقق شده و در بار نامی نیز راندمان آنها نزدیک به ماکزیمم باشد. در نتیجه، با اتصال موتور به مبدل ولتاژ در یک درایو القایی سرعت متغیر، راندمان موتور در فرکانس‌ها و بارهای مختلف متصل به موتور بهینه نخواهد بود.

لذا، ارائه‌ی روش‌های کنترلی مدرن در جهت مینیمم سازی تلفات کلی موتور شامل تلفات مسی، تلفات هسته، تلفات مکانیکی، و نیز تلفات مبدل ولتاژ متصل به موتور بازای مقادیر مختلف سرعت و بار مکانیکی متصل به شافت موتور از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

بخش عظیمی از موتورهای توان پایین (زیر یک کیلو وات) در صنعت موتورهای دو فاز هستند که درصد بسیار بالایی از آنها را موتورهای دو فاز نامتقارن (تکفاز) به خود اختصاص داده‌اند. این موتورها از راندمان پایین و گشتاور راه اندازی نسبتاً کم رنج می‌برند. یکی از دلایل آن هم روش کنترل آنها است. از آنجایی که در بهترین شرایط عملکردی، این موتورها بصورت - ثابت راه اندازی می‌شوند و در این تکنیک هم امکان کنترل مستقل سرعت و ولتاژ (شار) وجود ندارد لذا دستیابی به راندمان بالا با تکیه بر این روش دور از دسترس می‌باشد. همچنین در موتورهای دو فاز نامتقارن به دلیل وجود میدان چپگرد، ریپل گشتاور قابل ملاحظه‌ای تولید می‌شود که باعث ایجاد نویز صوتی و آسیب‌های مکانیکی به بلبرینگ‌های موتور می‌گردد. در ادامه مروری کوتاه بر روی برخی از کارهای تحقیقاتی انجام گرفته در زمینه کنترل و افزایش راندمان این گونه موتورها خواهیم داشت.

## 2-1 کنترل برداری

بهینه سازی رفتار موتورهای القایی تکفاز با پژوهش بر روی ساختارهای خاص و روشهای کنترلی شروع شد. در اکثر این پژوهشها ساختارهای متفاوت با استراتژی‌های کنترلی متنوع مبتنی بر کنترل سرعت موتور ارائه شده‌است [2-3]. این ساختارها با توجه به عمومی نبودن، موجب افزایش پیچیدگی ساخت و هزینه کلی سیستم می‌گردند. از دیگر سو با توجه به تولید گسترده و کاهش هزینه مازول سه فاز استفاده از این مازول جهت کنترل سرعت موتور القایی تکفاز پیشنهاد شد.

این مازول تواناییهای زیادی را فراهم می‌آورد و اعمال کنترل برداری به موتورهای القایی تکفاز را میسر می‌سازد [4]. کنترل برداری (FOC) در اوایل دهه‌ی 80 قرن بیستم [5]، معرفی گردید. با معرفی این روش، امکان کنترل مستقل شار و گشتاور تولیدی موتور همانند موتور dc فراهم گردید، و تحولی شگرف در طراحی و ساخت درایوهای القایی نسبت به نمونه‌های قبلی مبتنی بر روش کنترل اسکالر ایجاد شد.

در روش کنترل اسکالر که بر اساس روابط شناخته شده حالت دائمی موتور استوار است فقط اندازه و فرکانس (سرعت زاویه‌ای) ولتاژ، جریان و شار بردارهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در کنترل اسکالر نیازی به موقعیت روتور در حالت گذرا نیست، اما کنترل برداری بر پایه روابط حالت گذرا است و متغیرهای کنترل علاوه بر اندازه و فرکانس (سرعت زاویه‌ای)، موقعیت لحظه‌ای بردارهای فضایی شار، جریان و ولتاژ را نیز شامل می‌شود. بنابراین کنترل برداری بر روی موقعیت بردارهای فضایی عمل می‌کند و می‌توان گفت که کنترل برداری یک روش کنترلی عمومی است که می‌تواند با روشهای گوناگونی پیاده سازی شود که عمومی‌ترین روش آن کنترل برداری در راستای شار میدان است. در کنترل برداری معادلات به دستگاه مختصاتی که سرعت چرخش آن برابر با بردار شار روتور است، انتقال می‌یابد. هنگامی که اندازه شار روتور ثابت باشد رابطه‌ای خطی بین متغیرهای موتور و گشتاور برقرار است. در روش‌های مختلف کنترل اسکالر، ولتاژ و یا جریان همراه با فرکانس به عنوان متغیرهای کنترل کننده موتور القایی می‌باشند. در این حالت گشتاور و شار هر دو تابعی از ولتاژ (یا جریان) و فرکانس هستند. لذا این دو متغیر اثر تزویجی متقابل بر روی یکدیگر داشته و باعث کندی پاسخ موتور القایی نسبت به تغییر سیگنال مرجع ورودی می‌گردد. به عنوان مثال چنانچه گشتاور مرجع افزایش یابد، مقدار



فرکانس افزایش یافته تا گشتاور الکتریکی تولید شده افزایش یابد، ولی در این شرایط مقدار شار شروع به کاهش می‌کند. اگر چه این کاهش شار به دلیل وجود حلقه بسته کنترل شار و از طریق افزایش ولتاژ جبران می‌شود. ولی پاسخ این سیستم تحت این شرایط دارای نوسان بوده و زمان استقرار آن هم افزایش پیدا می‌کند. امروزه در صنایع مختلف بخاطر وجود این مشکلات در روش کنترل اسکالر، از روش کنترل برداری به علت عملکرد مطلوب آنها، در سطح گسترده‌ای استفاده می‌شود. کنترل برداری و یا به عبارت دیگر کنترل با جهت یابی شارامکان کنترل موتور القایی به طور مشابه با یک موتور جریان دائم با تحریک مستقل را فراهم می‌سازد.

متغیرهای کنترل کننده ماشین جریان دائم جریان (مولفه گشتاور) و جریان (مولفه شار) هستند. این دو متغیر را می‌توان از یکدیگر مستقل دانست. زیرا تغییر یکی بر دیگری اثری ندارد و جریان آرمیچر و جریان تحریک هر یک مستقلاً قابل کنترل می‌باشند. در عمل ابتدا میزان شار در حد نامی تنظیم می‌شود و سپس گشتاور تولیدی با تغییر تنظیم می‌گردد. از آنجا که جریان تحریک بصورت مجزا از جریان آرمیچر می‌باشد، لذا در حالت پایدار و گذرا مقدار گشتاور به خوبی توسط قابل کنترل خواهد بود.

بطور مشابه در یک ماشین القایی اگر معادلات و بلوک دیاگرام مربوط به آن در مختصات مرجع با سرعت سنکرون در نظر گرفته شود، کلیه سیگنالهای سینوسی به صورت مقادیر DC خواهند بود. در این حالت جریان استاتور توسط دو مولفه و بیان می‌گردد. در کنترل برداری جریان مشابه جریان بوده و به عنوان مولفه شار عمل می‌کند و مشابه جریان بوده و به عنوان مولفه گشتاور عمل می‌نماید. مولفه‌های و با توجه به این که مولفه‌های جریان بر روی مختصات مرجع دوار با سرعت سنکرون می‌باشند، می‌توانند به عنوان ابزار کنترل کننده موتور القایی مورد استفاده قرار گیرند. تغییرات دو مولفه و به صورت مستقل از یکدیگر امکان پذیر است. در شرایط کار عادی مایل هستیم که مقدار شار، معادل مقدار نامی باشد لذا را در مقدار نامی تنظیم می‌کنیم و سپس جهت تغییر گشتاور مقدار تنظیم می‌شود. این نحوه کنترل مشابه ماشین های جریان دائم می‌باشد.

با این همه، عدم تقارن ناشی از برابر نبودن تعداد دورها و سطح مقطع سیم پیچ های کمکی و اصلی در موتور القایی تکفاز، شرایط متفاوتی با موتور سه فاز که از تقارن خوبی برخوردار است بوجود می‌آورد. لذا عملکرد موتور صرفاً با اعمال کنترل برداری تامین نمی‌شود و در مقایسه با موتورهای سه فاز تمهیدات بیشتری مورد نیاز است. می‌توان نشان داد که مدل موتور در دستگاه دوار شامل عبارتهای متغیر با زمان است [6]. این عبارت ناشی از برابر نبودن اندوکتانس و مقاومت سیم پیچ های کمکی و اصلی استاتور است. با انتقال معادلات موتور به سمت روتور، علاوه بر حذف عدم تقارن ناشی از برابر نبودن اندوکتانسهای استاتور، عدم تقارن ناشی از برابر نبودن مقاومت‌های استاتور نیز حذف می‌شود [7]. لیکن این روش مستلزم آن است که نسبت اندوکتانسها برابر با نسبت مقاومت سیم پیچ های استاتور باشد. این فرض در حالت کلی برقرار نیست. با انتقال معادلات استاتور به سمت یکی از سیم پیچ های استاتور و با فرض برابر بودن اندوکتانسهای پراکندگی سیم پیچ کمکی و اصلی نیز، عدم تقارن ناشی از برابر نبودن اندوکتانس های استاتور حذف می‌شود. لیکن برای جبران عدم تقارن ناشی از برابر نبودن مقاومت‌های استاتور، کنترل کننده رشته دوتایی<sup>1</sup> ارائه شده است که علاوه بر نیاز به روش پیچیده طراحی مستلزم افزایش تعداد کنترل کننده های جریان است [8]. استفاده از کنترل کننده جریان هیستریزس مشکل ناشی از عدم تقارن ناشی از برابر نبودن مقاومت‌های استاتور را منتفی می‌سازد [9]. با این حال کنترل کننده

---

۱. Double-Sequence

هیستریزیس بدلیل عملکرد نامطلوب در جریانهای کم و تغییر فرکانس کلیدزنی گزینه چندان مناسبی در برخی از کاربردها نمی‌باشد.

حذف نمونه بردار سرعت بدلیل کاهش اثر نویز اندازه‌گیری، کاهش هزینه و حجم درایو و نیز افزایش قابلیت اطمینان مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد [10-11]. در آخرین تحقیق انجام شده از روش  $ISFOC^2$  بهبود یافته استفاده شده است و سرعت با اندازه‌گیری جریان استاتور تخمین زده می‌شود [11].

روشهای کنترل برداری علی‌رغم سرعت پاسخ دهی زیاد از مشکلاتی همچون محقق نشدن کنترل برداری در شرایط گذاری شار [12]، وابستگی زیاد به پارامترهای الکتریکی موتور، و محاسبات نسبتاً زیاد جهت انتقال معادلات از دستگاه ساکن متصل به استاتور، به دستگاه مرجع گردان و بالعکس رنج می‌برند [13]. همچنین نیاز به رگولاتورهای جریانی در ساختار این کنترل کننده، تنظیم دقیق ضرایب آنرا در نواحی مختلف مشکل می‌سازد.

### 3-1 کنترل مستقیم گشتاور

تکنیک کنترل مستقیم گشتار (DTC) در دستگاه مرجع ساکن برای اولین بار توسط تاکاهاشی و به منظور رفع معایب کنترل برداری در دهه‌ی 80 معرفی شد [14]. در این روش، خطای تعقیب شار استاتور و گشتاور تولیدی موتور نسبت به مقادیر مرجع خواسته شده، با انتخاب و اعمال بردار فضایی ولتاژ مناسب، در یک باند هیستریزیس محدود می‌گردد. تاکنون تحقیقات کمی بر روی روش  $DTC^3$  موتور القایی دوفاز گزارش داده شده است [15-17]. اولین تحقیق گزارش شده که در آن از روش DTC برای کنترل درایو موتور القایی دوفاز استفاده شد، در سال 2002، توسط فرانسیسکو<sup>4</sup> و همکارانش بود [15]. در این مقاله، برای کنترل موتور با اینورتر 2 ساق دو روش مطرح شده است؛ اولین روش بر اساس همان DTC کلاسیک است. اینورتر دوساق صفحه‌ی dq را به چهار سکتور تقسیم می‌کند، اما در برخی از نواحی صفحه‌ی dq (ناحیه‌هایی که بردار شار استاتور نزدیک مرز سکتورها است) استفاده از جدول کلیدزنی کاهش خطای گشتار را تضمین نمی‌کند (این مشکل در DTC ماشین‌های سه فاز وجود ندارد زیرا در آنجا شش بردار اکتیو ولتاژ وجود دارد اما برای اینورتر دو ساق چهار بردار وجود دارد). در این تحقیق، نویسنده با استفاده از تقسیم تناوبی صفحه‌ی dq این مشکل را حل می‌کند. بدین ترتیب می‌توان بردار ولتاژ مناسبی را انتخاب کرد که وقتی اندازه‌ی خطای شار کمتر از مقدار هیستریزیس است خطای گشتاور کاهش یابد. در این روش گشتاور و شار پاسخ سریع و دقیقی دارند اما برای اینکه گشتاور بیش از اندازه نوسان نکند باید از فرکانس نمونه برداری بزرگی استفاده شود. در روش دومی که نویسنده پیشنهاد داده است از کنترل کننده‌های PI و معادلاتی که در راستای میدان استاتور هستند، استفاده می‌شود؛ تا مولفه‌های ولتاژ محورهای d و q طوری تعیین شوند که اندازه‌ی شار و نوسان گشتاور کنترل شود. نتایج نشان می‌دهد که گشتاور و شار مقدار مرجع خود را سریع و دقیق دنبال می‌کنند بدون اینکه فرکانس نمونه برداری بزرگی نیاز باشد.

در [16] نویسندگان به بیان روش DTC کلاسیک و  $SVPWM-DTC^5$  برای موتور تغذیه شده با اینورتر 3 ساق پرداخته‌اند. اینورترهای سه ساق، در مقایسه با نوع چهارساقی خود هزینه‌ی کمتر و در مقایسه با نوع دو

۱. Indirect Stator Field Oriented Control
۲. Direct Torque Control
۳. Francisco.A.S.Neves
۴. Space Vector Pulse width Modulation

ساقی هارمونیک کمتری در ولتاژ خروجی دارند. مزیت روش SVPWM- DTC این است که می‌توان موتور را با فرکانس کلیدزنی ثابت درایو کرد و اگرچه نوسانات گشتاور نسبت به روش کلاسیک تغییر چندانی نمی‌کند اما ریبیل جریان و شار کاهش می‌یابد. همین محققین در مقاله‌ای که یک سال بعد ارائه داده‌اند [17]؛ از یک فیلتر پایین‌گذر برای تخمین شار در روش DTC استفاده کرده‌اند. در روش معمول، برای تخمین شار استاتور از یک انتگرالگیر ساده استفاده می‌شود و سیگنال خروجی انتگرالگیر مشکل مقدار اولیه و دررفت<sup>6</sup> dc دارد. برای غلبه بر این مشکل، نویسندگان از یک فیلتر پایین‌گذر که فرکانس قطع آن تا حدی پایین است که بتواند به عنوان یک انتگرالگیر کار کند استفاده می‌کنند.

ضربانهای زیاد گشتاور تولیدی، فرکانس سویچینگ متغییر و میزان زیاد اغتشاش در سرعت‌های کم، از جمله معایب روش DTC نسبت به تکنیک کنترل برداری به حساب می‌آیند [18].

#### 4-1 روشهای غیر خطی

استفاده از تکنیکهای کنترل غیر خطی در پیاده سازی کنترل برداری و کنترل مستقیم شار و گشتاور حدوداً از دهه 90 رواج یافت، و در حال حاضر بهترین گزینه برای کنترل داریوهای الکتریکی بنظر می‌رسند، چرا که با بهره‌گیری از این روشها امکان از بین بردن نسبی معایب روشهای متعارف، ضمن حصول کلیه‌ی محاسن آنها وجود دارد. در مورد موتورهای دو فاز اخیراً به این روشها پرداخته شده است [19 و 20].

در [19] یک تخمین‌زن سرعت تطبیقی بر پایه MRAS پیشنهاد شده است. در [20] علاوه بر اینکه برای تخمین سرعت روتور از MRAS<sup>7</sup> (بر اساس محاسبه توان راکتیو موتور)، استفاده شده، از یک مشاهده‌گر فیلتر کالمن برای جلوگیری از نوسانات سرعت تخمینی استفاده شده‌است و برای دستیابی به رنج وسیعی از کنترل سرعت شامل سرعت‌های پایین و تنظیم خودکار پارامترهای کنترلر از کنترلر RMRAC استفاده شده‌است.

#### 5-1 بهینه سازی راندمان درایو القایی

تلفات در یک موتور القایی دوفاز شامل تلفات مسی استاتور و روتور، تلفات آهنی، تلفات سرگردان و تلفات مکانیکی می‌باشد. تمرکز کردن روی تلفات الکترومغناطیسی (تلفات آهن و مسی) از آن جهت اهمیت پیدا می‌کند که بخش عمده‌ای از تلفات کل ماشین را تشکیل داده و از طرف دیگر قابل کنترل می‌باشد. تلفات هسته بواسطه شار فاصله هوایی و تلفات مسی بواسطه جریان‌های موتور است. تلفات مسی، آهنی و سرگردان در حدود 90 درصد تلفات کل و تلفات مکانیکی حدود 10 درصد تلفات کل را تشکیل می‌دهند. این توزیع تلفات در موتورهای تغذیه شده با منابع ولتاژ اینورتری بدلیل وجود هارمونیکهای جریان و ولتاژ، فرق می‌کند. در این حالت تلفات سرگردان افزایش می‌یابد و بسته به طیف هارمونیک می‌تواند قسمت بزرگی از تلفات کل را شامل شود [21]. لازم به ذکر است که در درایو علاوه بر تلفات موتور، تلفات کلیدزنی اینورتر و یکسوساز نیز وجود دارند. وقتی ماشین در بار سبک کار می‌کند، توازن بین تلفات مسی و آهنی بهم می‌خورد و بازده موتور کاهش می‌یابد، زیرا در بارهای سبک تلفات آهن بخش عمده تلفات را شامل می‌شود. بنابراین برای داشتن بازدهی بالا در موتور علاوه بر اینکه نیاز به کاربرد موادی با کیفیت بالا و بکارگیری روش طراحی ویژه در پروسه ساخت هسته می‌باشد همچنین نیازمند به روشهای کنترلی خاص می‌باشد. می‌توان با کاهش شار و در نتیجه کاهش تلفات هسته، در بار سبک بازده موتور را افزایش داد.

۱. Dc Drift

۲. Model Reference Adaptive System

هدف اصلی در بهبود الگوریتم کنترلی موتور، تغییر اندازه شار دور مرجع موتور در شرایط کاری مختلف می‌باشد بنحویکه تلفات کلی موتور در همه شرایط کاری کمینه گردد. روشهای مختلف کنترل راندمان انواع موتورهای الکتریکی که تاکنون مورد توجه قرار گرفته‌اند، در یک بررسی کلی به سه گروه زیر تقسیم می‌شوند:

(الف) روشهای مبتنی بر مدل موتور

(ب) روشهای مبتنی بر جستجوی شار

(ج) روشهای اصلاح توان

روش اول از طریق محاسبه تلفات با استفاده از مدل تلفات ماشین و سپس محاسبه شار بهینه عمل می‌کند. در روش دوم شار یا هر متغیر کنترلی دیگر تا زمانی که توان تلفاتی به کمترین میزانش برای یک سرعت و گشتاور خاص برسد تغییر می‌کند.

برای روش اول مدل‌های تلفات متفاوتی را می‌توان در مقالات مختلف یافت [22]. در روش دوم توان ورودی، اندازه‌گیری شده و به روشهای مختلف و توسط متغیرهای متفاوت و الگوریتم‌های گوناگون کاهش می‌یابد [23]. روش مبتنی بر مدل تلفات، روش سریعی است اما به شدت وابسته به پارامترهای ماشین می‌باشد، که با توجه به حساسیت پارامترها به شرایط کاری و محیطی، محاسبه دقیق این پارامترها مشکل می‌باشد. توان تلفاتی کنترل شده در این روش چون بر مبنای مدل موتور است، تلفات اینورتر را شامل نمی‌شود. در ضمن پیاده سازی این روش با توجه به محاسبات و تخمین‌های پیچیده مشکل می‌باشد [22 و 24].

روش جستجوگر مقدار بهینه، روش بسیار ساده‌تری در مقایسه با روش اول است و می‌تواند همه تلفات از جمله تلفات اینورتر را (بسته به محل اندازه‌گیری توان) کاهش دهد. اما این روش در مقایسه با روش قبل کند می‌باشد با این حال، عدم وابستگی آن به پارامترهای موتور و درایو، سبب شده است که این روش مورد توجه محققین و صاحبان صنایع قرار گیرد. [1 و 25].

در مرجع [26]، کنترل مستقیم شار و گشتاور تولیدی موتور القایی سه فاز به روش متعارف و با استفاده از جدول تصمیم‌گیری ارائه شده است، به نحویکه راندمان موتور القایی بازای هر گشتاور بار و هر سرعت روتور داده شده ماکزیمم گردد. بدین منظور، اندازه‌ی شار دور مرجع استاتور از خروجی یک بلوک بهینه سازی راندمان مبتنی بر الگوریتم جستجوی نقطه‌ی بهینه تعیین شده است. در این مرجع شرایط ماکزیمم راندمان موتور القایی با مینیمم شدن جریان استاتور بازای هر بار مکانیکی و سرعت روتور داده شده محقق می‌گردد، در نتیجه، بلوک جستجوی شار بهینه نقطه‌ی مینیمم جریان استاتور را با کاهش گام به گام شار دور مرجع استاتور از مقدار اولیه‌ی نامی و ارزیابی اندازه‌ی جریان استاتور در هر گام تعیین می‌کند.

در اینجا لازم به یاد آوری می‌باشد که، اگر چه جریان فازهای استاتور موتور القایی در شرایط کار با راندمان ماکزیمم نسبت به شرایط معمولی (استفاده از شار دور استاتور یا روتور نامی) کاهش می‌یابد، و لیکن لزوماً مینیمم مقدار نخواهد بود که علت اصلی آن تلفات آهن هسته‌ی استاتور می‌باشد.

در مرجع [27]، توان الکتریکی ورودی به موتور بجای اندازه‌ی جریان استاتور بعنوان تابع هدف انتخاب می‌گردد. انتخاب توان الکتریکی ورودی سه فاز موتور القایی بجای اندازه‌ی جریان استاتور، اگر چه سرعت همگرایی الگوریتم جستجو به سمت نقطه‌ی شار بهینه را تا حدودی کاهش می‌دهد، و لیکن بصورت دقیق اندازه‌ی شار مرجع بهینه‌ی استاتور (یا روتور) را مشخص می‌سازد.

در زمینه‌ی بهینه‌سازی راندمان موتور القایی تکفاز تحقیقات اندکی انجام گرفته است. در این تحقیقات، عموماً از روشهای شناخته شده کنترل ولتاژ استاتور استفاده شده است [28-30]. اما، به دلیل عدم استفاده از منبع فرکانس متغیر در این تکنیکها، قابلیت ذخیره انرژی تنها محدود به محدوده کوچکی از سرعت می‌شود. علاوه بر این، اعوجاج هارمونیکی قابل توجه در شرایط ضریب توان پایین، تولید می‌شود.

مدتهاست که از درایوهای سرعت متغیر برای موتورهای القایی سه فاز استفاده می‌شود. این درایوها با کاهش سرعت باعث صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شوند. از سال 1990 با کاهش هزینه این درایوها، استفاده از آنها برای موتورهای القایی تکفاز مورد توجه قرار گرفت [31]. در برخی منابع، تکنیکهای متفاوت تبدیل توان برای درایوهای سرعت متغیر موتورهای القایی تکفاز بیان شده است [32 و 33]. اما با وجود تمام مزایایی که درایوهای سرعت متغیر دارند؛ این درایوها معمولاً باعث می‌شوند موتور در شرایط غیر نامی کار کند بنابراین تلفات موتور افزایش می‌یابد [34 و 35]. با افزودن تابع کنترل راندمان به درایو سرعت متغیر می‌توان مصرف انرژی را با دو راه بهبود بخشید: اول، صرفه جویی در مصرف انرژی با درایو سرعت متغیر و دوم، بهبود راندمان با ماکزیمم کردن راندمان موتور در شرایط متفاوت کاری. متأسفانه، تا کنون تنها در دو مقاله چنین کاری انجام شده است [36 و 37]. در [36]، برای مدلسازی تلفات آهن ماشین القایی دوفاز نامتقارن دو مقاومت معادل برای حالت چپگرد و راستگرد در نظر گرفته شده است. بطوریکه مجموع توان تلف شده آهنی در این دو مقاومت با کل تلفات آهن برابر فرض شده است. اما از آنجاییکه تلفات آهن موتور رابطه غیرخطی با اندازه شار برابند میدانهای چپگرد و راستگرد دارد نمی‌توان تلفات آهن کل را با مجموع تلفات آهن ناشی از میدانهای چپ و راست برابر دانست و بنابراین مدل ارائه شده در آن مرجع کاملاً مردود است.

در آخرین تحقیق انجام شده [37]، کاهش تلفات مس، با بهبود نسبت  $T/I$  در روش کنترل اسکالر برای موتور القایی تکفاز با خازن راهانداز مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور روشهای مبتنی بر روش پارامتر و روش جستجو، برای محاسبه دامنه ولتاژ و فرکانس تغذیه‌ی اینورتر ارائه شده‌اند و با استفاده از معادلات ماشین، لغزشی که در آن نسبت  $T/I$  ماکزیمم می‌شود بدست آمده است و از روی خطای سرعت با کمک یک کنترل کننده PI دامنه ولتاژ مورد نیاز اینورتر محاسبه شده است.

## 6-1 روند ارائه مطالب

پس از ارائه مقدمه در فصل جاری، در فصل دوم مروری بر تحلیل ماشین القایی دوفاز نامتقارن خواهیم داشت. در این فصل، تحلیل ماشین القایی دوفاز نامتقارن با استفاده از دو روش انجام می‌شود: اول) نظریه دستگاه مرجع برای بدست آوردن معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع ساکن که در شرایط دائمی و گذرا معتبرند و دوم) نظریه میدان گردان برای بدست آوردن معادلات ولتاژ در حالت دائمی.

در فصل سوم از میان روشهای کنترل برداری مرور کوتاهی بر روش کنترل برداری در راستای شار روتور خواهیم داشت. سپس دو دیدگاه جدید به منظور کاهش ریبیل گشتاور موتور القایی دو فاز نامتقارن مطرح می‌شود.

در فصل چهارم، کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی دو فاز نامتقارن، در دستگاه مختصات ساکن با بهره‌گیری از تکنیک‌های غیرخطی مختلف نظیر خطی‌سازی ورودی-خروجی، حالت لغزشی و گام به گام عقب‌انتگرالی معرفی می‌گردد.

در فصل پنجم، تکنیک مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی، اینورتر دو فاز چهار سوئیچه، ابتدا برای حالت متقارن بیان شده و سپس برای حالت نامتقارن ارائه می شود.

در فصل ششم، بهینه سازی راندمان موتور القایی با بهره گیری از یک الگوریتم مبتنی بر جستجوی شار بهینه ارائه شده است. در این روش توان الکتریکی ورودی به موتور بعنوان تابع هدف انتخاب شده و اندازه شار مرجع بهینه استاتور (یا روتور) با قید کمینه سازی این تابع و با بهره گیری از یک الگوریتم جستجوی ساده تعیین می شود.

در فصل هفتم به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی ها پرداخته و پیشنهاداتی به منظور ادامه کار بیان می گردد.

## فصل دوم

### تحلیل ماشین دو فاز نامتقارن

#### 1-2-1 مقدمه

ماشینهای القایی دوفاز نامتقارن بطور وسیعی به عنوان یک موتور القایی تکفاز در منازل و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نامتقارنی ماشین، ناشی از این حقیقت است که سیم پیچهای استاتور این ماشین از نظر الکتریکی به صورت متفاوتی طراحی شده‌اند و اغلب یک خازن بطور سری به یکی از سیم پیچهای استاتور متصل می‌شود. در این صورت این سیم پیچ جریان پیش فاز خواهد کشید و گشتاور راه اندازی بوجود می‌آید. در این فصل، تحلیل ماشین القایی دوفاز نامتقارن با استفاده از دو روش انجام می‌شود: اول) نظریه دستگاه مرجع [38] برای بدست آوردن معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع ساکن که در شرایط دائمی و گذرا معتبرند و دوم) نظریه میدان گردان [39و40] برای بدست آوردن معادلات ولتاژ در حالت دائمی.

#### 2-2-2 تحلیل ماشین دو فاز نامتقارن با استفاده از نظریه دستگاه مرجع

##### 1-2-2-1 معادلات دینامیکی ماشین القایی دو فاز

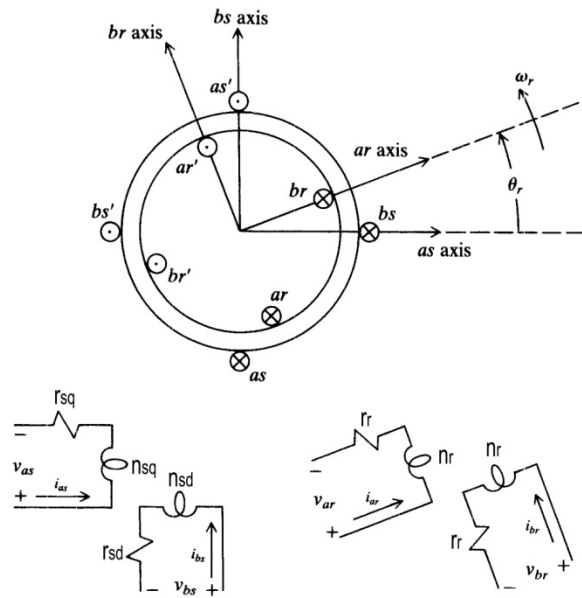
یک ماشین القایی دو فاز، نامتقارن و دو قطب در شکل 1-2 نشان داده شده است. سیم پیچهای استاتور یکسان نبوده و دارای توزیع سینوسی بوده و نسبت به همدیگر عمود می‌باشند. فرض کنید سیم پیچ  $a_s$  دارای تعداد دور  $N_s$  و مقاومت  $R_s$  و سیم پیچ  $b_s$  دارای تعداد دور موثر  $N_{ms}$  و مقاومت  $R_{ms}$  باشد. سیم پیچهای رتور را می‌توان به صورت دو سیم پیچ مشابه در نظر گرفت که بصورت سینوسی و در محورهایی عمودی نسبت به هم قرار گرفته‌اند. هر سیم پیچ رتور تعداد دور موثر  $N_r$  با مقاومت  $R_r$  دارد. معادلات ولتاژ بیان شده در متغیرهای ماشین را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$= \quad + \quad (1-2)$$

$$= \quad + \quad (2-2)$$

$$= \quad (3-2)$$

$$= \quad (4-2)$$



شکل 1-2 ماشین القایی دوفاز نامتقارن، دو قطب

$$= 0 \quad (5-2)$$

$$= \begin{pmatrix} \phantom{0} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

$$= 0 \quad (7-2)$$

$$= 0 \quad (8-2)$$

که  $v_{ar} = v_{ar} + v_{br}$  و  $i_{ar} = i_{ar} + i_{br}$  است و  $v_{br}$  و  $i_{br}$  به ترتیب اندوکتانسهای پراکندگی و مغناطیس کننده سیم پیچ اصلی (سیم پیچ  $as$ ) و  $v_{ar}$  و  $i_{ar}$  به ترتیب اندوکتانسهای پراکندگی و مغناطیس کننده سیم پیچ کمکی (سیم پیچ  $bs$ ) است.

$$= 0 \quad (9-2)$$

که  $v_{br} = v_{br} + v_{ar}$  و  $i_{br} = i_{br} + i_{ar}$  است. اما شرایط رتور یکسان است بنابراین معمولاً  $v_{ar} = v_{ar}$  و  $i_{ar} = i_{ar}$  را در نظر می گیرند.

$$= \begin{pmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{pmatrix} \quad (10-2)$$

که  $v_{br}$  و  $i_{br}$  به ترتیب دامنه اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ اصلی (سیم پیچ  $as$ ) و سیم پیچ رتور محور  $q$  و اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ کمکی (سیم پیچ  $bs$ ) و سیم پیچ رتور محور  $d$  می باشد. موقعیت زاویه ای رتور ( $\theta$ ) که بستگی به سرعت دستگاه مرجع رتور و استاتور دارد در شکل 1-2 تعریف شده است. واضح است که



روابط بالا برای یک ماشین القایی دو فاز متقارن نیز صادق است با این تفاوت که در روابط بالا و = خواهد بود. عبارت گشتاور را می توان از رابطه کلی زیر بدست آورد:

$$= \frac{1}{2} ( \quad ) - [ ( \quad ) ] \quad (11-2)$$

معادله (11-2) به صورت ماتریسی است و به شکل گسترده می توان آنرا به صورت زیر نوشت:

$$= \frac{1}{2} ( - \sin \quad - \cos \quad ) + ( \cos \quad - \sin \quad ) \quad (12-2)$$

$$\frac{1}{2} ( \quad - \quad ) = - \quad (13-2)$$

که مجموع ممان اینرسی رتور و بار متصل به آن است. گشتاور مکانیکی (بار) می باشد و برای حالت موتوری مثبت است.

### 2-2-2 معادلات ولتاژ و گشتاور در متغیرهای دستگاه مرجع ساکن

همانطور که ذکر شد چون دستگاه مرجع رتور و استاتور دارای سرعت نسبت به هم هستند لذا برای این که معادلات را با پارامترهای ثابت بدست آوریم لازم است تا متغیرهای ماشین را به دستگاه ساکن منتقل کنیم. معادلات ولتاژ بر حسب متغیرهای دستگاه مرجع ساکن ( $\omega = 0$ ) به صورت زیر است:

$$= \quad + \quad (14-2)$$

$$= \quad - \quad + \quad (15-2)$$

که

$$= \quad - \quad (16-2)$$

با نوشتن مجدد معادلات شار پیوندی در دستگاه  $d-q$ ، معادلات شار پیوندی به صورت زیر خواهد بود:

$$= \frac{1}{2} ( \quad )^2 - \frac{1}{2} ( \quad )^2 \quad (17-2)$$

با قرار دادن ( $\omega = 0$ )

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (18-2)$$

می توان ثابت کرد که:  $\frac{1}{2} ( \quad )^2 = 0$  و همچنین:

$$\frac{1}{2} ( \quad )^2 = \frac{1}{2} ( \quad ) ( \quad )^2 = 0$$

بنابراین می توان معادلات را بفرم گسترده به صورت زیر نوشت:

$$= \quad + \quad (19-2)$$

$$= \quad + \quad (20-2)$$

$$= \quad - \quad + \quad (21-2)$$

$$= \quad + \quad + \quad (22-2)$$

$$= \quad + \quad (23-2)$$

$$= \quad + \quad (24-2)$$

$$= \quad + \quad (25-2)$$

$$= \quad + \quad (26-2)$$

برای بدست آوردن مدار معادل ماشین‌های الکتریکی متداول است که متغیرهای رتور را با یک نسبت دور به سمت استاتور منتقل می‌کنند. چون تعداد دورهای سیم پیچ محور  $d$  و  $q$  در ماشین‌های القایی دوفاز یکسان نیستند بهتر است همه متغیرهای رتور و استاتور را به طرف سیم پیچ اصلی یعنی محور  $q$  (سیم پیچ  $as$ ) منتقل کرد. اما در اینجا برای پی گیری بحث، متغیرهای محور  $q$  رتور را به سمت محور  $q$  استاتور با تعداد دور و متغیرهای محور  $d$  رتور را به سمت محور  $d$  استاتور با تعداد دور انتقال می‌دهیم. بنابراین معادلات ولتاژ به صورت زیر خواهند بود:

$$= \quad + \quad (27-2)$$

$$= \quad + \quad (28-2)$$

$$= \quad - \quad + \quad (29-2)$$

$$= \quad + \quad + \quad (30-2)$$

که

$$= \quad + \quad ( \quad + \quad ) \quad (31-2)$$

$$= \quad + \quad ( \quad + \quad ) \quad (32-2)$$

$$= \quad + \quad ( \quad + \quad ) \quad (33-2)$$

$$= \quad + \quad ( \quad + \quad ) \quad (34-2)$$

که در آن

$$= \quad - \quad (35-2)$$

$$= \quad - \quad (36-2)$$

$$= \quad - \quad (37-2)$$

$$= \quad - \quad (38-2)$$

$$= \quad - \quad ^2 \quad (39-2)$$

$$= \quad - \quad ^2 \quad (40-2)$$

$$= \quad - \quad ^2 \quad (41-2)$$

$$= \quad - \quad ^2 \quad (42-2)$$

$$= \quad - \quad (43-2)$$

$$= \quad - \quad (44-2)$$

اما در تبدیل روابط شار در معادلات (31-2) تا (34-2) اثری از و نیست زیرا هنگام انتقال پارامترهای رتور به محور  $q$  استاتور، به و هنگام انتقال پارامترهای رتور به محور  $d$  استاتور به تبدیل می‌شود. برای اثبات این قضیه می‌توان این گونه تصور کرد که؛ اگر را توان فاصله هوایی در نظر بگیریم، آنگاه خواهیم داشت:

$$= \quad 2 \quad *$$

$$= \quad 2 \quad *$$

$$= \quad * \quad *$$

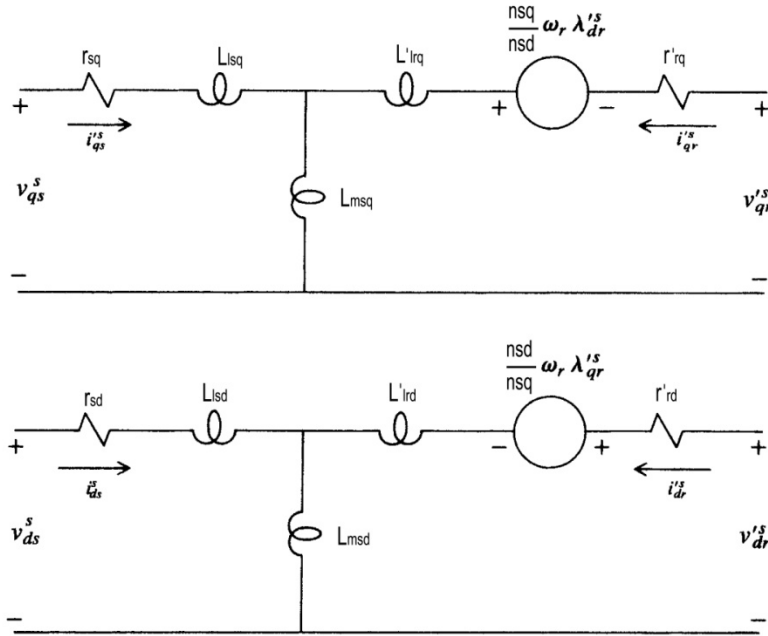
هنگام انتقال m به محور q استاتور:

$$= \frac{2}{*} * = \frac{2}{*} * * * = 2 * =$$

هنگام انتقال به محور d استاتور:

$$= \frac{2}{*} * = \frac{2}{*} * * * = 2 * =$$

با استفاده از معادلات مورد بحث، مدار معادل برای یک موتور القایی دوفاز نامتقارن به صورت زیر می باشد.



شکل 2-2 مدار محور d و q مربوط به یک موتور القایی دو فاز نامتقارن

متداول است که معادله های ولتاژ و شار پیوندی را بر حسب راکتانس ها به جای اندوکتانسها بیان می کنند. لذا معادلات (27-2) لغایت (34-2) به صورت زیر نوشته می شوند:

$$= + \text{ --- } \quad (45-2)$$

$$= + \text{ --- } \quad (46-2)$$

$$= \text{ --- } \text{ --- } + \text{ --- } \quad (47-2)$$

$$= \text{ --- } \text{ --- } + \text{ --- } \quad (48-2)$$

که سرعت زاویه ای الکتریکی مبنای مورد استفاده در محاسبه راکتانس های سلفی است. معادله های شار پیوندی نیز بر حسب شارهای پیوندی در واحد زمان نوشته می شوند. لذا

$$= + ( + ) \quad (49-2)$$

$$= + ( + ) \quad (50-2)$$

$$= + ( + ) \quad (51-2)$$

$$= + ( + ) \quad (52-2)$$

می توان این معادلات را بصورت ماتریسی بفرم زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & - & & 0 & & - & & 0 \\ & 0 & & + & - & & 0 & - \\ - & & - & 1 & & + & - & - \\ - & & - & & - & - & & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \\ \phantom{0} \end{bmatrix} \quad (53-2)$$

که می باشد و

$$= + \quad (54-2)$$

$$= + \quad (55-2)$$

$$= + \quad (56-2)$$

$$= + \quad (57-2)$$

گشتاور لحظه‌ای ماشین به صورت زیر بیان می گردد:

$$= \frac{1}{2} \quad - \quad (58-2)$$

$$= \frac{1}{2} ( \quad - \quad ) \quad (59-2)$$

با صرف نظر از اشباع، اندوکتانس‌ها را می توان بر حسب تعداد دورها و مقاومت مغناطیسی بیان کرد. بنابراین، می توان نشان داد که:

$$\quad = \quad (60-2)$$

$$\frac{\quad}{2} = \frac{\quad}{2} \quad (61-2)$$

بنابراین رابطه (59-2) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$= \frac{1}{2} \quad - \quad ( \quad ) \quad - \quad (62-2)$$

## 2-3 تحلیل موتور القایی دو فاز با استفاده از نظریه میدان گردان

در این قسمت موتورهای القایی دو فاز را در حالات مختلف بررسی می کنیم:

### 2-3-1 موتورهای القایی دو فاز متقارن

در این قسمت رفتار موتور القایی دو فاز متقارن در دو حالت زیر بررسی خواهد شد:

1- موتور از یک شبکه دو فاز متعادل تغذیه شود.

2- موتور از یک شبکه دو فاز نامتعادل تغذیه شود.

### 2-3-1-1 موتور القایی دو فاز متقارن با تغذیه متعادل

شکل (2-2) مدار یک موتور دو فاز دو قطبی را به صورت طرحواره‌ای نشان می دهد. دو سیم پیچی  $m$  و  $a$  کاملاً مشابه اند و با هم  $90^\circ$  درجه الکتریکی فاصله مکانی دارند.

در این موتور،  $mmf$  های فضایی به دست آمده از هر سیم پیچی را، با توجه به مبدأ زاویه انتخاب شده، می توان به صورت زیر نوشت:

$$= F \cos \theta$$