

فهرست مطالب

| شماره صفحه | عنوان |
|------------|---|
| ۷ | فصل اول - مقدمه |
| ۷ | ۱-۱- مقدمه |
| ۸ | ۲-۱- پیشینه تحقیق و بررسی منابع |
| ۹ | ۳-۱- معرفی و ساختار پایان نامه |
| ۱۱ | ۴-۱- اهداف اصلی طرح |
| ۱۲ | فصل دوم - موتور های القایی شش فاز |
| ۱۲ | ۱-۲- مقدمه |
| ۱۳ | ۲-۲- موتورهای چند فاز |
| ۱۳ | ۳-۲- کاربرد های موتور چند فاز |
| ۱۵ | ۴-۲- مزایا و معایب موتورهای چند فاز |
| ۱۵ | ۵-۲- ساختار موتورهای القایی شش فاز |
| ۱۶ | ۱-۵-۲- ماتریس تبدیل موتور شش فاز |
| ۱۸ | ۲-۵-۲- معادلات موتور شش فاز |
| ۲۳ | ۶-۲- مرور تکنیک های کنترل اینورترهای سه فاز |
| ۲۵ | ۷-۲- مرور تکنیک های کنترل اینورترهای چند فاز |
| ۲۶ | ۸-۲- استراتژی مدولاسیون پهنای پالس با بردارهای فضایی موتور شش فاز |
| ۲۶ | ۱-۸-۲- تبدیل ولتاژ خروجی اینورتر به صفحات جدید در قاب مرجع |
| ۳۱ | فصل سوم - کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی شش فاز نامتقارن |
| ۳۱ | ۱-۳- مقدمه |
| ۳۲ | ۲-۳- مروری بر روش های کنترل موتورهای الکتریکی |
| ۳۴ | ۳-۳- کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی سه فاز |
| ۳۵ | ۱-۳-۳- اصول روش کنترل کننده DTC |
| ۳۸ | ۴-۳- روش های بهبود عملکرد DTC |
| ۳۹ | ۱-۴-۳- روش تغییر جدول |
| ۳۹ | ۲-۴-۳- روش افزایش تعداد قطاع ها |
| ۴۲ | ۳-۴-۳- روش پیش بین |
| ۴۳ | ۴-۴-۳- کنترل کننده هوشمند |
| ۴۳ | ۵-۳- کنترل مستقیم شار و گشتاور موتور القایی پنج فاز |
| ۴۴ | ۱-۵-۳- معادلات ماشین پنج فاز |
| ۴۵ | ۲-۵-۳- اصول روش کنترل کننده DTC موتور پنج فاز |
| ۴۹ | ۶-۳- روش DTC موتور القایی شش فاز متقارن |
| ۵۰ | ۳-۶-۱- بردار های فضایی موتور القایی شش فاز متقارن |

| | |
|-----|--|
| ۵۳ | ۳-۶-۲- روش کنترل DTC موتور شش فاز متقارن |
| ۵۵ | ۳-۶-۳- روش جدید برای حذف جریان های هارمونیکی موتور القایی شش فاز متقارن |
| ۵۷ | ۳-۷-۱- اصول روش DTC موتور القایی شش فاز نامتقارن |
| ۵۷ | ۳-۷-۱- روش تک جدولی |
| ۵۹ | ۳-۷-۲- بهبود روش تک جدولی |
| ۶۰ | ۳-۷-۳- روش سه جدولی پیشنهادی |
| ۶۰ | ۳-۷-۳-۱- تعیین زمان اعمال جداول پیشنهادی |
| ۶۳ | فصل چهارم- DTC موتور القایی شش فاز نامتقارن با استفاده از منطق فازی |
| ۶۳ | ۴-۱- مقدمه |
| ۶۳ | ۴-۲- مروری بر تاریخچه منطق فازی |
| ۶۵ | ۴-۳- سیستم های فازی |
| ۶۶ | ۴-۳-۱- موارد استفاده کنترل کننده فازی |
| ۶۸ | ۴-۴- مرور روش های DTC با استفاده از سیستم های هوشمند |
| ۶۹ | ۴-۵- روش DTC با منطق فازی |
| ۷۰ | ۴-۶- روش DTC موتور القایی شش فاز نامتقارن با منطق فازی |
| ۷۱ | ۴-۶-۱- روش DTC با فازی در حالت تک جدولی |
| ۷۱ | ۴-۶-۲- روش DTC با فازی در حالت سه جدولی |
| ۷۳ | فصل پنجم- نتایج شبیه سازی |
| ۷۳ | ۵-۱- مقدمه |
| ۷۳ | ۵-۲- نتایج شبیه سازی روش تک جدولی |
| ۸۰ | ۵-۳- نتایج شبیه سازی روش تک جدولی بهبود یافته |
| ۸۵ | ۵-۴- نتایج شبیه سازی روش سه جدولی |
| ۹۰ | ۵-۵- نتایج شبیه سازی DTC با منطق فازی |
| ۹۶ | فصل ششم- نتیجه گیری و پیشنهادات |
| ۹۶ | ۶-۱- نتیجه گیری |
| ۹۸ | ۶-۲- پیشنهادات |
| ۹۹ | منابع |
| ۱۰۱ | ضمیمه |

پیوست

فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

| | | |
|----------|--|----|
| شکل ۱-۲ | سیم بندی استاتور ماشین n فاز | ۱۴ |
| شکل ۲-۲ | اتصالات ماشین های ۷ و ۹ فاز | ۱۴ |
| شکل ۳-۲ | شمای سیم پیچ های استاتور یک ماشین شبه شش فاز | ۱۴ |
| شکل ۴-۲ | مدار معادل موتور القایی شش فاز | ۲۲ |
| شکل ۵-۲ | مدار معادل اینورتر منبع ولتاژ شش فاز | ۲۶ |
| شکل ۶-۲ | سیم بندی استاتور با نقطه نول مشترک و مجزا | ۲۷ |
| شکل ۷-۲ | تصویر بردارهای ولتاژ اینورتر بر روی صفحات $\alpha - \beta$ و $0^+ - 0^-$ ، $x - y$ | ۳۰ |
| شکل ۱-۳ | بلوک دیاگرام پایه محرکه موتور القایی | ۳۲ |
| شکل ۲-۳ | بلوک دیاگرام کنترل مستقیم شار و گشتاور | ۳۴ |
| شکل ۳-۳ | بردار های فضایی استاتور | ۳۷ |
| شکل ۴-۳ | بردار های فضایی استاتور در حالت تغییر قطاع | ۳۹ |
| شکل ۵-۳ | بردارهای فضایی استاتور در روش افزایش قطاع | ۴۱ |
| شکل ۶-۳ | اینورتر موتور القایی پنج فاز | ۴۴ |
| شکل ۷-۳ | بردارهای فضایی اینورتر پنج فاز | ۴۶ |
| شکل ۸-۳ | اینورتر موتور القایی شش فاز متقارن | ۴۹ |
| شکل ۹-۳ | بردارهای فضایی استاتور در صفحات $\alpha - \beta$ و $x - y$ و $0^+ - 0^-$ | ۵۲ |
| شکل ۱۰-۳ | بلوک دیاگرام روش DTC موتور شش فاز متقارن | ۵۳ |
| شکل ۱۱-۳ | بردارهای فضایی و لتاژ در صفحه $\alpha - \beta$ و $x - y$ در روش جدید | ۵۶ |
| شکل ۱۲-۳ | تصویر بردارهای بزرگ در صفحات $\alpha - \beta$ و $x - y$ | ۵۸ |
| شکل ۱۳-۳ | تصویر سه بردار فضایی ولتاژ در صفحه $\alpha - \beta$ و تصویر آن در صفحه $x - y$ | ۶۰ |
| شکل ۱۴-۳ | بردار برآیند بردارهای صفحه $x - y$ | ۶۱ |
| شکل ۱-۴ | سیستم فازی به عنوان کنترل کننده حلقه باز | ۶۶ |
| شکل ۲-۴ | سیستم فازی به عنوان کنترل کننده حلقه بسته | ۶۷ |
| شکل ۳-۴ | ساختار یک سیستم فازی | ۶۷ |
| شکل ۴-۴ | ساختار ورودی سیستم فازی | ۶۸ |
| شکل ۵-۴ | ساختار ورودی کنترلر فازی DTC | ۶۹ |
| شکل ۶-۴ | بلوک دیاگرام روش DTC با فازی | ۶۹ |
| شکل ۷-۴ | تابع تعلق خطای گشتاور - تابع تعلق خطای شار - تابع تعلق زاویه شار | ۷۰ |
| شکل ۸-۴ | تابع تعلق بردارهای ولتاژ | ۷۱ |
| شکل ۱-۵ | گشتاور الکترومغناطیسی موتور به روش تک جدولی در حالت چهار پله | ۷۴ |
| شکل ۲-۵ | گشتاور الکترومغناطیسی موتور به روش تک جدولی در حالت دو پله | ۷۵ |

| | |
|--|----|
| شکل ۳-۵: جریان استاتور..... | ۷۵ |
| شکل ۴-۵: جریان توالی صفر | ۷۶ |
| شکل ۵-۵: شار تولیدی استاتور | ۷۷ |
| شکل ۶-۵: مولفه های α, β شاراستاتور | ۷۷ |
| شکل ۷-۵: سرعت موتور | ۷۸ |
| شکل ۸-۵: سرعت مرجع موتور در حالت کنترل سرعت | ۷۸ |
| شکل ۹-۵: سرعت موتور در حالت کنترل سرعت | ۷۹ |
| شکل ۱۰-۵: گشتاورموتور در حالت کنترل سرعت..... | ۷۹ |
| شکل ۵- ۱۱: گشتاور موتور روش تک جدولی بهبود یافته در حالت چهار پله..... | ۸۰ |
| شکل ۵- ۱۲: گشتاور موتور روش تک جدولی بهبود یافته در حالت دوپله | ۸۱ |
| شکل ۵- ۱۳: جریان استاتور در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۱ |
| شکل ۵- ۱۴: جریان توالی صفر در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۲ |
| شکل ۵- ۱۵: شار موتور در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۳ |
| شکل ۵- ۱۶: مولفه های α, β شاراستاتور در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۳ |
| شکل ۵- ۱۷: کنترل سرعت در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۴ |
| شکل ۵- ۱۸: گشتاورموتور در حالت روش تک جدولی بهبود یافته | ۸۴ |
| شکل ۵- ۱۹: گشتاور موتور در حالت سه جدولی | ۸۵ |
| شکل ۵- ۲۰: گشتاورپله ای موتور در حالت سه جدولی | ۸۶ |
| شکل ۵- ۲۱: جریان استاتور در حالت سه جدولی | ۸۶ |
| شکل ۵- ۲۲: جریان توالی صفر در حالت سه جدولی | ۸۷ |
| شکل ۵- ۲۳: شاراستاتور در حالت سه جدولی | ۸۸ |
| شکل ۵- ۲۴: مولفه های α, β شاراستاتور در حالت سه جدولی | ۸۸ |
| شکل ۵- ۲۵: تغییر پله ای شاراستاتور در حالت سه جدولی | ۸۹ |
| شکل ۵- ۲۶: مولفه های α, β تغییر پله ای شاراستاتور در حالت سه جدولی | ۸۹ |
| شکل ۵- ۲۷: گشتاور موتور با استفاده از منطق فازی | ۹۰ |
| شکل ۵- ۲۸: گشتاورپله ای موتور با استفاده از منطق فازی | ۹۱ |
| شکل ۵- ۲۹: شاراستاتور در حالت منطق فازی | ۹۱ |
| شکل ۵- ۳۰: مولفه های α, β شاراستاتور در حالت منطق فازی | ۹۲ |
| شکل ۵- ۳۱: تغییر پله ای شاراستاتور در حالت منطق فازی | ۹۲ |
| شکل ۵- ۳۲: مولفه های α, β تغییر پله ای شاراستاتور در حالت منطق فازی | ۹۳ |
| شکل ۵- ۳۳: جریان استاتور در حالت منطق فازی | ۹۳ |
| شکل ۵- ۳۴: جریان توالی صفر در حالت منطق فازی | ۹۴ |
| شکل ۵- ۳۵: طیف هارمونیکي جریان استاتور در حالت تک جدولی | ۹۴ |
| شکل ۵- ۳۶: طیف هارمونیکي جریان استاتور در حالت سه جدولی | ۹۵ |

شکل ۵-۳۷: طیف هارمونیکی جریان استاتور در حالت سه جدولی با منطق فازی ۹۵

فهرست

| شماره صفحه | عنوان جداول |
|------------|---|
| ۳۷ | جدول ۱-۳: زاویه قرار گرفتن هر قطاع |
| ۳۸ | جدول ۲-۳: بردارهای افزایش یا کاهش دهنده شار و گشتاور در قطاع K ام |
| ۳۸ | جدول ۳-۳: جدول کلیدزنی |
| ۳۹ | جدول ۴-۳: زاویه قرار گرفتن هر قطاع |
| ۴۰ | جدول ۵-۳: جدول بهینه کلیدزنی |
| ۴۱ | جدول ۶-۳: زوایای قطاعها در روش دوازده قطاعی |
| ۴۲ | جدول ۷-۳: تاثیر بردارهای ولتاژ بر روی افزایش و یا کاهش شار و گشتاور |
| ۴۲ | جدول ۸-۳: جدول بهینه کلیدزنی در حالت دوازده قطاعی |
| ۴۶ | جدول ۹-۳: زاویه قرار گرفتن قطاعها |
| ۴۸ | جدول ۱۰-۳: تاثیر بردارهای ولتاژ بر روی شار و گشتاور در قطاع ۱ |
| ۵۳ | جدول ۱۱-۳: زاویه قرار گرفتن قطاعها |
| ۵۴ | جدول ۱۲-۳: تاثیر بردارهای ولتاژ بر روی شار و گشتاور در قطاع ۱ |
| ۵۴ | جدول ۱۳-۳: جدول کلیدزنی بهینه |
| ۵۶ | جدول ۱۴-۳: حالات بهینه کلیدزنی |
| ۵۹ | جدول ۱۵-۳: تاثیر بردارهای فضایی ولتاژ بر روی شار و گشتاور در قطاع اول |
| ۵۹ | جدول ۱۶-۳: بردارهای کلیدزنی روش تک جدولی |
| ۵۹ | جدول ۱۷-۳: بردارهای کلیدزنی روش تک جدولی بهبود یافته |
| ۶۲ | جدول ۱۸-۳: جدول طراحی شده زمان های کوچکتر از t_1 |
| ۶۲ | جدول ۱۹-۳: جدول طراحی شده بین زمان های t_1 و $\frac{t_2}{2}$ |
| ۶۲ | جدول ۲۰-۳: جدول طراحی شده بین زمان های $\frac{t_2}{2}$ و t_2 |
| ۷۱ | جدول ۱-۴: قوانین فازی در حالت تک جدولی |
| ۷۲ | جدول ۲-۴: قوانین فازی در حالت سه جدولی در زمان کوچکتر از t_1 |
| ۷۲ | جدول ۳-۴: قوانین فازی در حالت سه جدولی بین زمان های t_1 و $\frac{t_2}{2}$ |
| ۷۲ | جدول ۴-۴: قوانین فازی در حالت سه جدولی بین زمان های $\frac{t_2}{2}$ و t_2 |
| ۹۸ | جدول ۱-۶: مقایسه بین روش تک جدولی و سه جدولی و فازی |

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

موتورهای القایی چند فازه بواسطه مزایایی که دارند در صنعت کاربردهای فراوانی یافته اند. این موتورها بیش از سه دهه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند. اولین کاربردهای صنعتی موتورهای چند فازه (بیش از سه فاز) به اواخر دهه هفتاد قرن بیستم میلادی باز می گردد. اولین موتورهای چند فازه موتورهای پنج فاز یا شش فاز بودند که بیشتر به علت کاهش گشتاور ضربانی نسبت به موتورهای سه فاز مورد توجه قرار گرفتند. موتورهای چند فازه مزایای زیادی نظیر کاهش دامنه و میزان ضربان گشتاور، کاهش دامنه جریان هر فاز بدون کاهش ولتاژ آن، کاهش هارمونیکهای جریان لینک DC و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به موتورهای سه فاز (به علت اینکه از دست رفتن یک فاز مانع از عملکرد مداوم ماشین نمی شود) و همچنین توان بالا نسبت به موتورهای سه فاز و کاهش تلفات هارمونیکی جریان روتور را دارا هستند. با افزایش تعداد فازها همچنین می توان نسبت گشتاور به جریان مؤثر را به طور چشمگیری افزایش داد. به دلیل افزایش درجات آزادی در این موتورها می توان با تزریق هارمونیکهای خاص جریان، میزان گشتاور تولیدی را افزایش داد و یا با یک سیستم درایو مشترک چندین موتور را تحریک نمود. امروزه، این موتورها بیشتر در سیستم محرکه کشتی و زیردریایی، ترن برقی وسایل نقلیه هایبرید، و هوا فضا استفاده می شوند. بعضی از مزایای موتورهای چندفازه از جمله کاهش هارمونیک و گشتاورهای ضربه ای از آنجا ناشی می شود که ماشینهای چندفاز برای تغذیه با اینورتر طراحی می شوند. به عبارتی از همان ابتدا برای کار با اینورتر سازگار شده اند اما معمولاً استانداردهای ساخت ماشینهای سه فاز برای کار با تغذیه با برق سینوسی ایجاد شده است و عملکرد آنها با اینورتر، نسبت به موتورهای چندفاز بدتر است. همانطور که اشاره شد

موتورهای چندفاز در سالهای اخیر کاربردهای متعددی یافته اند که اکثر این کاربردها به نوع خاصی از موتورهای القایی چندفاز باز می گردد که به موتورهای شش فاز نامتقارن مشهورند. این ماشین دارای دو مجموعه سیم پیچ ستاره با دو نقطه خنثی مجزاست که نسبت به هم ۳۰ درجه الکتریکی جابجایی دارند که باعث حذف هارمونیک ششم گشتاور خواهد شد. موتورهای القایی شش فاز نامتقارن بطور گسترده در توانهای بالا بکار رفته اند زیرا استفاده از این ماشینها منجر به تقسیم جریان و کاهش قیمت المانهای قدرت و افزایش قابلیت اطمینان سیستم درایو و کاهش گشتاور ضربانی خواهد شد ضمن آنکه سیستمهای پیچیده ای نیستند. مجموعه این عوامل، موتور شش فاز نامتقارن را گزینه مناسبی برای بسیاری از کاربردها می سازد.

۲-۱ - پیشینه تحقیق و بررسی منابع

برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط تاکاهاشی مطرح شد [۱]. یکی از روش های متداول کنترل موتورهای القایی، کنترل برداری می باشد. با این وجود، کنترل برداری مشخصه مستقل بودن کنترل سرعت (گشتاور) و شار را در شرایط گذرای شار دارا نبوده و وابستگی زیادی به تغییر پارامترهای موتور دارد [۲]. به همین دلیل روشهای غیر خطی برای کنترل این موتورها مطرح شده اند. روش کنترل لغزشی بدلیل مقاوم بودن نسبت به تغییر پارامترها برای این منظور ارائه شده است [۳]. روش خطی سازی با فیدبک جزئی با استفاده از رگولاتورهای PI برای کنترل شار روتور و سرعت در مرجع [۴] مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهبود عملکرد کنترل برداری، روش خطی سازی با فیدبک مبتنی بر تئوری هندسه دیفرانسیل برای کنترل شار روتور و سرعت مطرح شده است [۵]. تعدادی از روشهای خطی سازی با فیدبک با استفاده از تئوری پسیویته^۱ [۶] و روش گام به گام به عقب^۲ [۷] به این منظور به کار گرفته شده اند. روش خطی سازی ورودی خروجی با استفاده از کنترل کننده لغزشی در مرجع [۸] ارائه شده است.

کنترل مستقیم گشتاور با وجود سادگی، عملکرد خوب و مقاوم بودن، دارای معایبی است که پیشتر ذکر شد البته حساسیت آن به پارامترها نسبت به کنترل برداری کمتر می باشد. در راستای برطرف کردن این مشکلات روشهای متعددی ارائه شده است. استفاده از جدول سوئیچینگ اصلاح شده [۹]، اصلاح الگوهای سوئیچینگ [۱۰]، مقایسه کننده ها با و بدون محدوده هیستریزس دو و سه سطحی [۱۱]، اعمال روشهای فازی و عصبی- فازی [۱۲]، استفاده از تخمین زندهای اصلاح شده شار برای بهبود عملکرد آنها در سرعت های پائین [۱۳] و بالاخره اعمال روشهای مبتنی بر PWM^۳ و SVM^۴ برای تثبیت فرکانس سوئیچینگ [۱۴] مطرح شده اند. ناگفته نماند که اعمال تکنیک های مذکور برای بهبود عملکرد DTC^۵ منجر به افزایش پیچیدگی در پیاده سازی این روش کنترلی می گردد.

^۱ -Passivity

^۲ - Back stepping

^۳ -Pulse Width Modulation

^۴ -Space Vector Modulation

^۵ -Direct Torque Control

در مرجع [۱۵] یک روش بدون حسگر جدید برای کنترل حلقه بسته شاروگشتاور مطرح شده است. ولتاژ مورد نیاز درایو با تکنیک SVM تولید می شود، این روش موسوم به DTC-SVM می باشد. برای کاهش رپیل های گشتاور (سرعت) و تثبیت فرکانس نمونه برداری و امکان کنترل شار در سرعت های کم، روش کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از اینورترهای منبع ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی ولتاژ (DTC-SVM) و با استفاده از روش های کنترل غیرخطی مبتنی بر کنترل کننده های پیش بین [۱۶]، لغزشی [۱۷] و لغزشی تطبیقی [۱۸] صورت گرفته است. که این روشها حجم محاسبات زیاد و مشکلات پیاده سازی خاص خود را دارند.

در ارتباط با کنترل مستقیم ماشین های چندفاز تنها درسه مرجع [۱۹] و [۲۰] و [۲۱] مطالبی مطرح شده است. در مرجع [۱۹] ماشین پنج فاز مدنظر است و مشابه حالت سه فاز جدولی برای کنترل مستقیم گشتاور جدولی تنظیم شده است. برای کاهش رپیل های گشتاور، استفاده از موتور ۵ فاز که این مدل به علت اینکه از ۳۲ بردار ولتاژ استفاده شده نتایج حاصله نشان می دهد که موتور دینامیک بهتر و عملکرد ماندگار بهتری دارد. استفاده از ۲ سری سیم پیچ استاتور ۳ فاز با شیفت ۳۰ درجه که هر کدام استراتژی متفاوتی برای کلید زنی دارند باعث بهبود دینامیک و افزایش گشتاور و کاهش رپیل گشتاور می شود. چنین ماشینی شش فاز را نامتقارن گویند.

در مرجع [۲۱] یک جدول دارای اشتباه برای کنترل مستقیم گشتاور یک ماشین شش فاز نامتقارن مطرح شده است. با توجه پیچیدگی های زیاد ماشین شش فاز و تعداد زیاد حالات کلیدزنی، همچنان نیاز به کارهای تحقیقاتی دیگری می باشد.

۳-۱- معرفی و ساختار پایان نامه

با استفاده از این روش امکان دستیابی به عملکرد مناسب گشتاور موتور بدون نیاز به سنسور سرعت فراهم می شود. در این روش کنترل شار و گشتاور تولیدی ماشین با انتخاب بردار مناسب ولتاژ استاتور امکان پذیر است و انتخاب بردار مناسب ولتاژ باید بر اساس انتخاب موقعیت بردار فضایی شار استاتور صورت پذیرد. روش کنترل مستقیم گشتاور بر اساس محدود کردن خطای گشتاور و شار نسبت به مقادیر مرجع آنها در یک باند هیستریز می باشد. در این روش به رگولاتورهای جریان مرسوم در FOC^۶، انتقال دستگاههای مختصات و اینورترهای PWM (بازمان بندی مشخص) و تکنیک های مرسوم کلید زنی نیازی نیست. با وجود سادگی، DTC امکان کنترل گشتاور را در شرایط گذرا و ماندگار شار فراهم می کند. از طرف دیگر روش DTC دارای معایب شناخته شده زیر می باشد [۲]:

- ۱) پیچیدگی کنترل شار و گشتاور در سرعت های بسیار پایین
- ۲) رپیل های زیاد جریان و گشتاور
- ۳) میزان زیاد نویز در سرعت های کم
- ۴) عدم امکان کنترل مستقیم بر روی جریان

^۶- Flux Oriented Control

و در نهایت به دلیل ثابت نبودن فرکانس کلید زنی فیلتر کردن هارمونیک های موجود در جریان استاتور مشکل است.

در دهه اخیر تحقیقات گسترده ای در راستای بهبود مشکلات فوق الذکر انجام شده است. استفاده از جداول کلیدزنی⁷ اصلاح شده، اصلاح مقایسه کننده ها، با و بدون محدوده هیستریزیس دو و سه سطحی، استفاده از کنترل کننده های هیستریزیس با تعداد سطوح مقایسه بالا هم برای شار و هم برای گشتاور، اعمال روشهای فازی و عصبی- فازی، استفاده از تخمین زندهای اصلاح شده شار برای بهبود عملکرد آنها در سرعت های پائین و بالاخره اعمال روشهای مبتنی بر PWM و SVM و همچنین روش های کنترل پیش بین، روش های مبتنی بر مد لغزشی⁸ و روش های مبتنی بر خطی سازی با فیدبک، برای تثبیت فرکانس سوئیچینگ مطرح شده اند. در واقع کنترل برداری کنترل مستقل مولفه های شار ساز و مولفه های گشتاور ساز جریان استاتور در یک قاب مرجع خاص می باشد. کنترل این مولفه ها در این قاب مرجع با تنظیم دامنه، فاز و فرکانس ولتاژ تغذیه انجام می شود. روش کنترل برداری مشخصه مستقل بودن کنترل سرعت (گشتاور) و شار را در شرایط گذرای شار دارا نبوده و وابستگی زیادی به تغییر پارامترهای موتور دارد. به همین دلیل روشهای غیر خطی برای کنترل این موتورها مطرح شده اند. برای دستیابی به پاسخ بهتر گشتاور در لحظات گذرای شار، حذف رگولاتورهای PI و وابستگی کمتر کنترل کننده به تغییر پارامترها از تکنیک کنترل مستقیم گشتاور و شار استفاده میشود. بر خلاف روشهای غیرخطی، روش کنترل مستقیم گشتاور از ساختار ساده ای برخوردار است و به سادگی قابل پیاده سازی است. سیستم های هوشمند در دو دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته اند روش های فازی، عصبی، ژنتیک و غیره با توجه به مزایایی که نسبت به روش های تحلیلی مرسوم دارد نظیر عدم نیاز به مدل دقیق فرآیند، عدم حساسیت زیاد به نویز و عدم نیاز به اطلاعات و داده های دقیق، کاربرد های زیادی پیدا کرده اند در شاخه کنترل موتورها از کنترل کننده های فازی، عصبی، به طور جایگزین برای PI های مرسوم استفاده زیادی شده است که با توجه به پارامترها و امکانات این کنترل کننده ها، نتایج بهتری برای کنترل سرعت (گشتاور) و شار ماشین ها به دست آمده است. همچنین با استفاده از سیستم های فازی در کنترل کننده های مود لغزشی عملکرد سیستم بهبود داده شده است بطوریکه پدیده نا مطلوب شوریدگی⁹ (وزوز) تا حد زیادی حذف شده است. زمینه دیگری که استفاده از سیستم های هوشمند در آن مطرح است کنترل مستقیم گشتاور کلاسیک ماشین های سه فاز می باشد. با توجه به اینکه روش DTC کلاسیک باعث نوسان¹⁰ (تضاریس) با فرکانس متغیر می شود. روش های هوشمند نظیر فازی می توانند باعث بهبود عملکرد سیستم بشوند. این زمینه در چند سال اخیر مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته چون که با کاهش نوسان، لرزش و صدای موتور کاهش می یابد. در این پروژه ابتدا مشکلات روش کنترل مستقیم گشتاور موتورهی شش فاز را بررسی کرده (شایان ذکر است که بر اساس تحقیقات و بررسی های انجام شده، تنها یک مقاله در سال میلادی ۲۰۱۰ در ارتباط با جداول و استفاده از منطق فازی برای کنترل DTC ماشین ۶ فاز وجود دارد [۲۰] و سپس به تشریح ویژگیهای روش کنترل مستقیم گشتاور با سیستم های هوشمند

⁷ - Switching Table

⁸ - Sliding mode

⁹ - Chattering

¹⁰ - Ripple

با عملکرد بهتر نسبت به روش قبل، می پردازیم. به علت مزایای روش های هوشمند از این روش کنترلی بهره خواهیم گرفت. همچنین روش ارائه شده قبلی جریان زیادی از اینورتر می کشد که باعث افزایش چشمگیر تلفات می شود. پس از ارائه مقدمه در فصل جاری، در فصل دوم به بررسی تئوری ماشین های چند فاز به خصوص ماشین های شش فاز پرداخته می شود. این بخش بیشتر بر روی ماشین های شش فاز نامتقارن تکیه دارد و در این فصل معادلات ماشین شش فاز و مدار معادل ماشین و همچنین نحوه بدست آوردن ماتریس تبدیل ماشین های چند فاز به خصوص ماشین شش فاز مورد بررسی قرار می گیرد و همچنین در مورد اینورترهای منبع ولتاژ مورد استفاده ماشین های چند فاز بررسی شده است. در فصل سوم به کنترل شار و گشتاور ماشین القایی شش فاز با استفاده از روش کلاسیک پرداخته شده است. الگوریتم روش DTC کلاسیک ماشین شش فاز علی رغم شباهت با الگوریتم کار در ماشین سه فاز است دارای تفاوت های عمده ای است. در این فصل در مورد بردارهای مناسب ولتاژ و نحوه بدست آوردن جدول مناسب کلید زنی اینورتر ماشین شش فاز مفصل توضیح داده شده است و یک جدول مناسب طراحی شده است. در فصل چهارم به استفاده از سیستم های هوشمند در روش کنترل مستقیم شار و گشتاور بخصوص منطبق فازی پرداخته است و به طراحی یک جدول فازی پرداخته ایم. در فصل پنجم ابتدائاً نتایج شبیه سازی شده مرجع [۲۱] نشان داده شده است و سپس نتایج حاصل از جدول پیشنهادی و همچنین نتایج استفاده از سیستم های هوشمند نشان داده شده است نتایج بدست آمده کارایی استفاده از سیستم های هوشمند را نشان می دهد و در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد موتور و کاهش ریپل شار و گشتاور ارائه شده است.

۴-۱- اهداف اصلی طرح

کنترل مستقیم گشتاور با وجود سادگی، عملکرد خوب و مقاوم بودن، دارای معایبی است که پیشتر ذکر شد. در راستای برطرف کردن این مشکلات روشهای متعددی ارائه شده است. در این پروژه سعی بر اصلاح جداول کنترل مستقیم گشتاور برای ماشین القایی شش فاز و بهبود عملکرد با اعمال روشهای هوشمند نظیر منطبق فازی مدنظر است. بهبود عملکرد DTC شش فاز و کاهش پیچیدگی در پیاده سازی این روش کنترلی از اهداف این پروژه است.

در مورد ماشین های شش فاز دو مولفه جریان دیگر علاوه بر مولفه های روش اول ماشین سه فاز وجود دارد. در این پایان نامه هدف کاهش این مولفه ها همراه با کنترل گشتاور و شار نیز مد نظر است تا تلفات ماشین و اینورتر کاهش یابد. برای کاهش ریپل های گشتاور (سرعت) روش کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از روشهای هوشمند مورد استفاده قرار میگیرد. یکی از دلایل استفاده از سیستم های هوشمند این است که کنترل کننده های هوشمند جایگزین کنترل کننده های PI قرار می گیرند که باعث بهبود عملکرد موتور می شود. در ضمن از جمله مزایای سیستم های هوشمند می توان به عملکرد نرم کنترل کننده و کاهش تغییرات سریع و ناگهانی متغیرها واز جمله معایب می توان به افزایش درجه آزادی و اعمال کنترل با استفاده از دستورات زبانی اشاره کرد.

فصل دوم

موتورهای القایی شش فاز

۲-۱- مقدمه

موتورهای القایی به دلیل اینکه دارای طراحی و ساختار بسیار ساده ای دارند و همچنین به دلیل مزایایی که نسبت به انواع موتورهای جریان مستقیم و جریان متناوب دارند ، امروزه بیشتر در صنایع کاربرد دارند و تقریباً قریب به ۹۰ درصد موتورهای مورد استفاده در صنعت را تشکیل می دهند. از جمله کاربردهای موتورهای القایی در صنعت می توان به استفاده در بالابرها ، کمپرسورها، چرخ آسیاب ها و غیره نام برد.

از جمله مزایای این موتورها عبارتند از:

- ۱) سادگی و استحکام ساختمان
 - ۲) عدم نیاز به تعمیر و نگهداری مستمر
 - ۳) قیمت پایین تر نسبت به موتورهای جریان مستقیم
- و همچنین از جمله معایب موتورهای القایی می توان به
- ۱) کنترل پیچیده
 - ۲) ضریب قدرت نسبتاً پایین
 - ۳) عدم کنترل توان راکتیو

نام برد.

موتورهای القایی بخصوص موتورهای قفس سنجابی مزایایی نسبت به موتورهای سنکرون و dc دارند. مواردی نظیر نیاز به نگهداری کمتر، قابلیت اطمینان بالا، هزینه، وزن، حجم و اینرسی کمتر، راندمان بیشتر، قابلیت عملکرد در محیط های با گردو غبار و در محیط های قابل انفجار را می توان نام برد.

روتور موتور قفس سنجابی در دسترس نیست و حرکت زیادی ندارند و همچنین به دلیل عدم داشتن کموتاتور، جاروبک و همچنین حلقه های لغزان (که در ماشین های جریان مستقیم و سنکرون به کار می رود)، این نوع از موتورهای القایی کاربرد بیشتری دارند. این نوع از موتورها به دلایلی که ذکر شد باعث افزایش قابلیت اطمینان موتورهای القایی و همچنین حذف جرقه (به دلیل عدم داشتن کموتاسیون) و همچنین مقاوم بودن روتور در سرعت های بالا و جلوگیری از ضربات شدید مکانیکی که به دلیل تغییر بار صورت می گیرد. با توجه به مزایای فوق در تمامی کاربردها، موتورهای القایی بر سایر موتورهای الکتریکی ترجیح داده می شوند. با این حال تا چندی پیش از موتورهای القایی فقط در کاربردهای سرعت ثابت استفاده شده است و در کاربردهای سرعت متغیر موتورهای dc ترجیح داده شده اند. این امر ناشی از آن است که روش های کنترل مرسوم در کنترل سرعت موتورهای القایی هم غیر اقتصادی و هم دارای راندمان کم بوده است. با بهبود در قابلیت ها و کاهش در هزینه ترستورها و ترانزیستورهای قدرت و GTO^{11} ها امکان ساخت محرکه های سرعت متغیر با استفاده از موتورهای القایی بوجود آمده است که در برخی موارد حتی از نظر هزینه و عملکرد از محرکه هایی با موتورهای dc نیز پیشی گرفته اند. در نتیجه این پیشرفت ها، محرکه های موتورهای القایی در برخی کاربردهای سرعت متغیر به جای محرکه های dc مورد استفاده قرار گرفته اند. پیش بینی می شود در آینده موتورهای القایی به طور گسترده در محرکه های سرعت متغیر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۲-۲- موتورهای چند فاز

یک نوع دیگر از موتورهای AC که اخیراً توسعه یافته اند و مورد توجه دانشمندان و پژوهشگران قرار گرفته است موتورهای چند فاز^{۱۲} یا موتورهای فاز بالا HPO^{13} هستند که بیش از سه دهه مورد توجه قرار گرفته اند. موتور چند فاز به موتوری گفته می شود که تعدادسیم بندی فازهای استاتور بیش از ۳ باشد. قدرت مورد نیاز و همچنین محدودیت های ولتاژ و جریان کلیدها و ادوات صنعتی منجر به ظهور HPO شده است. بررسی تحقیقات مرتبط در زمینه موتورهای چند فاز از قبیل ۵، ۷، ۹، ۱۵، ۶ و غیره انجام شده است. در شکل ۲-۱ سیم بندی استاتور یک ماشین n فاز نشان داده شده است [۲۲].

۲-۳- کاربرد های موتور چند فاز

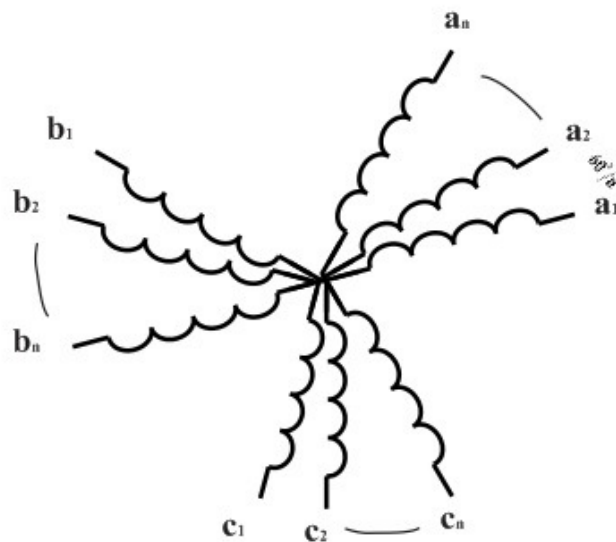
موتورهای چند فاز اغلب در صنایعی که نیاز به قدرت بالا است مورد استفاده قرار می گیرند از قبیل صنایع نساجی استفاده در نیرومحرکه کشتی ها، هواپیماها، خودروهای هیبریدی و باتری ها و غیره که در طول

¹¹ - Gate Turn-off Thyristor

¹² - Multi-phase

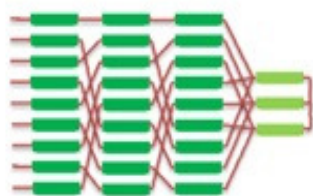
¹³ - High Phase Order

چند سال گذشته زمینه های کاربردی و ظهور موتورهای چند فاز را پدید آورده اند. در کاربردهای توان بالا از قبیل نیرو محرکه کشتی ها استفاده از درایو های چند فاز می تواند استرس ولتاژ را بر روی پایه های اینورتر کاهش دهد و در کاربرد هایی از قبیل هواپیما ها جایی که قابلیت اطمینان مهم است از درایو های چند فاز استفاده می شود و همچنین در ماشین های هیبریدی که نیرو محرکه قوی دارند، درایو های چند فاز می توانند نرخ جریان های عبوری از سوئیچ های نیمه هادی را کاهش دهند. و نهایتاً یکی از دلایل مهم علاقه مندی به موتورهای چند فاز استفاده آن ها در موتورهای احتراقی است.

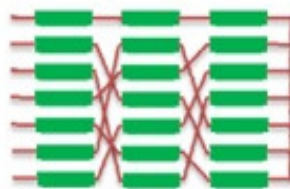


شکل ۱-۲ سیم بندی استاتور ماشین n فاز

شایان ذکر است که ماشین های چند فاز قابلیت سری شدن و کنترل مستقل را دارند که چند نمونه از این اتصالات در شکل ۲-۲ برای ماشین های ۵ و ۷ و ۹ فاز نشان داده شده است [۲۲].



ج-۹ فاز



ب-۷ فاز



الف-۵ فاز

شکل ۲-۲ اتصالات ماشین های ۵ و ۷ و ۹ فاز

۲-۴- مزایا و معایب موتورهای چند فاز

دانشمندان در مورد مزایای موتورهای HPO نسبت به سه فاز تحقیقات زیادی انجام داده اند [۲۳]. از قبیل کاهش ریپل گشتاور و کاهش هارمونیک ها در جریان روتور، کاهش نویز، کاهش استرس ولتاژ بر روی کلیدهای اینورتر، گشتاور بالا نسبت به موتورهای سه فاز افزایش تعداد درجات آزادی در ماشین های چند فاز که اجازه بهره برداری کامل از مزایای ماشین چند فاز را می دهد و وقتی از یک ماشین چند فاز به جای یک سیستم چند ماشینه به کار می رود ذاتاً می تواند قابلیت اطمینان را حفظ کند و نهایتاً امکان استفاده از این ماشین ها در سرو درایوهای چند موتور سری و کنترل تک تک موتورها به طور مجزا که این ویژگی به کاربر امکان کاهش هزینه ها را در برخی کاربردهای خاص می دهد. از جمله معایب این موتورها می توان به افزایش هارمونیک ها در جریان استاتور اشاره کرد. مثلاً در موتورهای شش فاز هارمونیک های پنجم و هفتم در جریان استاتور وجود دارد که این هارمونیک ها تلفات زیادی را ایجاد می کند که منتهی آن گرم شدن ماشین و همچنین منجر به افزایش حجم ماشین و همچنین افزایش هزینه ماشین می شود. برای کاهش این هارمونیک ها تحقیقاتی انجام گرفته است [۲۳].

۲-۵- ساختار موتورهای القایی شش فاز

در ماشین های شش فاز دو دسته سیم پیچ سه فاز متعادل در استاتور تعبیه شده است که به (Dual Three Phase) یا ماشین های فاز شکسته^{۱۴} معروف هستند. که این دو دسته با یکدیگر از لحاظ فضایی اختلاف زاویه دارند. اگر این اختلاف زاویه ۶۰ درجه الکتریکی باشد، به این مجموعه سیم پیچ ها شش فاز حقیقی^{۱۵} و اگر ۳۰ درجه الکتریکی باشد، شبه شش فاز^{۱۶} می گویند. در مرجع [۲۴] نشان داده شده است که در بین زوایای مختلف، آرایش شبه شش فاز حداقل ضربان گشتاور را دارد به همین دلیل این نوع سیم پیچ ها بیشترین کاربرد را دارند. در این رساله ماشین های القایی شبه شش فاز QIM^{۱۷} مد نظرند.

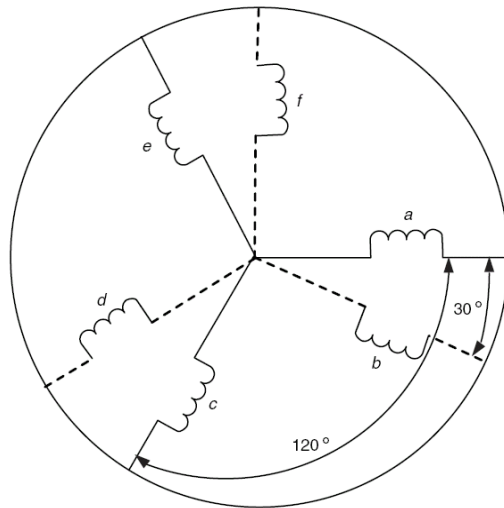
مراکز خنثی این دو دسته سه فاز با اتصال ستاره می توانند مجزا و یا متصل به یکدیگر باشند ولی ثابت می شود که اگر این مراکز خنثی مجزا باشند مولفه های صفر حذف می شوند که مطلوبتر است [۲۴]. شمای سیم پیچ های استاتور یک ماشین شبه شش فاز در شکل ۲-۴ نشان داده شده است [۲۵ و ۲۲].

¹⁴ - Split-Phase

¹⁵ - True Six-Phase

¹⁶ - Quasi Six-Phase

¹⁷ - Quasi Six-Phase IM



شکل ۲-۳: شمای سیم پیچ‌های استاتور یک ماشین شبه شش فاز

۲-۵-۱- ماتریس تبدیل موتور شش فاز

یک موتور شش فاز به طور کلی یک سیستم شش بعد است. بنابراین مسئله مدلسازی و کنترل این قبیل سیستم‌ها باید از نقطه نظر شش بعدی مورد بررسی قرار بگیرند مدل سازی و کنترل موتورهای چند فاز با بدست آوردن یک ماتریس تبدیل بسیار ساده می شود که در مرجع [۲۴] به طور مبسوط نحوه بدست آوردن ماتریس تبدیل موتورهای چند فاز توضیح داده شده است. برای بدست آوردن ماتریس تبدیل موتورهای شش فاز می توان از تجزیه فضای برداری ۶ بعدی به سه زیر فضای ۲ بعدی متعامد استفاده کرد. با توجه به زاویه بین سیم پیچ‌ها در ماشین شبه شش فاز می توان بردارهای پایه جدید را بصورت زیر انتخاب کرد [۳۳].

$$S_k(wt) = [\cos k(wt), \cos k(wt - \phi), \cos k(wt - 4\phi), \cos k(wt - 5\phi), \cos k(wt - 8\phi), \cos k(wt - 9\phi)]^T \quad (1-2)$$

و با در نظر گرفتن $\phi = \left(\frac{\pi}{6}\right)$ و $k=0,1,3,5,\dots$ که هارمونیک های زمانی را نشان می دهد.

با در نظر گرفتن $k=1$ در معادله (۱-۲) و قراردادن $wt=0$ و $wt=\frac{\pi}{2}$ ، بردار α و β را تولید می کند.

$$\alpha: [1, \cos(\phi), \cos(4\phi), \cos(5\phi), \cos(8\phi), \cos(9\phi)]^T$$

$$wt = 0$$

و همچنین

$$\beta: [0, \sin(\phi), \sin(4\phi), \sin(5\phi), \sin(8\phi), \sin(9\phi)]^T$$

$$wt = \frac{\pi}{2}$$

چهار بردار دیگر باید انتخاب شوند که این بردارها نسبت به هم و همینطور نسبت به بردارهای α, β عمود هستند. با در نظر گرفتن $k=5$ در معادله (۲-۱) و قراردادن $wt=0$ و $wt=\frac{\pi}{2}$ ، بردار x و y را تولید می کند که به بردارهای توالی صفر^{۱۸} هم معروف هستند.

$$x: [1, \cos(5\phi), \cos(8\phi), \cos(\phi), \cos(4\phi), \cos(9\phi)]^T$$

$$wt = 0$$

و همچنین

$$y: [0, \sin(5\phi), \sin(8\phi), \sin(\phi), \sin(4\phi), \sin(9\phi)]^T$$

$$wt = \frac{\pi}{2}$$

و در نهایت بردارهای صفر که با در نظر گرفتن $k=3$ در معادله (۲-۱) و قراردادن $wt=0$ و $wt=\frac{\pi}{2}$ ، بردار 0^+ و 0^- را تولید می کند.

$$0^+: [1, 0, 1, 0, 1, 0]^T$$

$$wt = 0$$

و همچنین

$$0^-: [0, 1, 0, 1, 0, 1]^T$$

$$wt = \frac{\pi}{2}$$

با بدست آوردن ۳ زیر فضای ۲ بعدی عمود بر هم، ماتریس تبدیل موتور القایی شش فاز به صورت رابطه زیر استخراج می شود.

$$[T] = \begin{bmatrix} \alpha & 1 & \cos \phi & \cos 4\phi & \cos 5\phi & \cos 8\phi & \cos 9\phi \\ \beta & 0 & \sin \phi & \sin 4\phi & \sin 5\phi & \sin 8\phi & \sin 9\phi \\ \sqrt{\frac{2}{6}} x & 1 & \cos 5\phi & \cos 8\phi & \cos \phi & \cos 4\phi & \cos 9\phi \\ \sqrt{\frac{2}{6}} y & 0 & \sin 5\phi & \sin 8\phi & \sin \phi & \sin 4\phi & \sin 9\phi \\ 0^+ & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0^- & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

این تبدیل دارای این ویژگی است که مولفه اول متغیرهای ولتاژ و جریان ماشین را به صفحه $\alpha - \beta$ منتقل می کند. محورهای $\alpha - \beta$ چنان انتخاب شده اند که بر صفحه مکان هندسی شار فاصله هوایی منطبق باشند. بنابراین تنها مولفه های β و α در فاصله هوایی ماشین تولید نیرو محرکه مغناطیسی گردان می کنند و در نتیجه به تبدیل انرژی الکترومکانیکی مربوط می شوند. چهار مولفه دیگر برای یک موتور در واقع همه مولفه توالی صفر هستند.

¹⁸ - Zero Sequence

۲-۵-۲ - معادلات موتور شش فاز

در اینجا مدل ماشین شبه شش فاز با در نظر گرفتن ماتریس تبدیل (۲-۲) بدست آورده می شود [۳۳ و ۲۵]. در بدست آوردن مدل فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

(۱) سیم پیچ های ماشین دارای پخش فضایی سینوسی می باشند.

(۲) مسیر شار خطی است.

(۳) از اندوکتانس های ناشی متقابل صرف نظر می شود.

(۴) متغیرهای روتور با توجه به نسبت دورسیم پیچ های روتور و استاتور به سمت استاتور ارجاع شده اند.

نخست مدل ماشین در فضای شش بعدی اولیه مطرح می شود. معادله ولتاژ استاتور عبارت است از:

$$\begin{aligned} [v_s] &= [R_s][i_s] + p[\lambda_s] \\ &= [R_s][i_s] + p([\lambda_{ss}] + [\lambda_{sr}]) \\ &= [R_s][i_s] + p([L_{ss}][i_s] + [L_{sr}][i_r]) \end{aligned} \quad (۳-۲)$$

در این جا $p = \frac{d}{dt}$ عملگر مشتقگیری است.

و همچنین معادلات ولتاژ روتور به صورت زیر است :

$$\begin{aligned} [v_r] &= [R_r][i_r] + p[\lambda_r] \\ &= [R_r][i_r] + p([\lambda_{rr}] + [\lambda_{rs}]) \\ &= [R_r][i_r] + p([L_{rr}][i_r] + [L_{rs}][i_s]) \end{aligned} \quad (۴-۲)$$

در این جا بردارهای ولتاژ و جریان بصورت زیر تعریف می شوند:

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ds} \\ v_{es} \\ v_{fs} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ds} \\ i_{es} \\ i_{fs} \end{bmatrix}, [v_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \\ i_{dr} \\ i_{er} \\ i_{fr} \end{bmatrix}$$

ماتریس های مقاومت ها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = L_{ls} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = L_{lr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{rs} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

در اینجا L_{ls} و L_{lr} و L_{ms} به ترتیب اندوکتانس‌های نشستی استاتور و روتور و اندوکتانس مغناطیس کننده استاتور هستند. ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور-روتور $[L_{sr}]$ به صورت زیر می باشد .

$$[L_{sr}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{5\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{9\pi}{6}) \\ \cos(\theta_r + \frac{11\pi}{6}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{3\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{7\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) \\ \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{9\pi}{6}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{5\pi}{6}) \\ \cos(\theta_r + \frac{7\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{11\pi}{6}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{3\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{5\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{9\pi}{6}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) \\ \cos(\theta_r + \frac{3\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{7\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{8\pi}{6}) & \cos(\theta_r + \frac{11\pi}{6}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

برای بدست آوردن معادلات موتور شش فاز القایی در فضای شش بعدی جدید، تبدیل (۲-۲) بر معادلات (۲-۳) و (۴-۲) اعمال می گردد.

$$[T][v_s] = [T][R_s][T]^{-1}[T][i_s] + p([T][L_{ss}][T]^{-1}[T][i_s] + [T][L_{sr}][T]^{-1}[T][i_r]) \quad (۵-۲)$$

$$[T][v_r] = [T][R_r][T]^{-1}[T][i_r] + p([T][L_{rr}][T]^{-1}[T][i_r] + [T][L_{rs}][T]^{-1}[T][i_s]) \quad (۶-۲)$$

$$+[T][L_{rs}][T]^{-1}[T][i_s])$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \\ i_{x r} \\ i_{y r} \\ i_{0^+ r} \\ i_{0^- r} \end{bmatrix} = [T][i_r] \quad \text{و} \quad \begin{bmatrix} v_{\alpha r} \\ v_{\beta r} \\ v_{x r} \\ v_{y r} \\ v_{0^+ r} \\ v_{0^- r} \end{bmatrix} = [T][v_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{x s} \\ i_{y s} \\ i_{0^+ s} \\ i_{0^- s} \end{bmatrix} = [T][i_s] \quad \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{x s} \\ v_{y s} \\ v_{0^+ s} \\ v_{0^- s} \end{bmatrix} = [T][v_s]$$

مدل ماشین در فضای شش بعدی جدید (یا سه زیر فضای دو بعدی جدید) به صورت زیر مطرح می‌شود:
مدل الکتریکی ماشین در زیر فضای $\alpha - \beta$ عبارتست از:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{ls} + 3L_{ms} & 0 \\ 0 & L_{ls} + 3L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 3\cos\theta_r & -3\sin\theta_r \\ 3\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \right\} \quad (7-2)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{lr} + 3L_{ms} & 0 \\ 0 & L_{lr} + 3L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 3\cos\theta_r & 3\sin\theta_r \\ -3\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \right\} \quad (8-2)$$

مدل الکتریکی ماشین در زیر فضای $x - y$ عبارتست از:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{x s} \\ i_{y s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x s} \\ i_{y s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x s} \\ v_{y s} \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{x r} \\ i_{y r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_r & 0 \\ 0 & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x r} \\ i_{y r} \end{bmatrix} \quad (10-2)$$

مدل ماشین در زیر فضای 0^{\pm} عبارتست از:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{0^+ s} \\ i_{0^- s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0^+ s} \\ i_{0^- s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{0^+ s} \\ v_{0^- s} \end{bmatrix} \quad (11-2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{0^+ r} \\ i_{0^- r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_r & 0 \\ 0 & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0^+ r} \\ i_{0^- r} \end{bmatrix} \quad (12-2)$$