

## کنترل میدان موتورهای القایی با در نظر گرفتن سرعت روتور به روش

### غیر مستقیم

محمد شهابی<sup>۱</sup>، علی کاظمی پور<sup>۲</sup> مهدی میرآب نوده<sup>۳</sup>، علیرضا اعتراف<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان shahab\_2017a@yahoo.com

<sup>۲</sup> شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان kazemipoor129@gmail.com

<sup>۳</sup> شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان mirabmehdi44@yahoo.com

<sup>۴</sup> شرکت توزیع نیروی برق گلستان، گرگان alirezaeteraf@gmail.com

#### چکیده

موتورهای القایی یکی از پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی هستند که در کاربردهای صنعتی و خانگی به وفور یافت می‌شوند. مزیت اصلی این موتور الکتریکی نسبت به سایر موتورهای الکتریکی از قبیل موتورهای DC هزینه پایین، قابلیت اطمینان بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر به دلیل نداشتن کموتاتور و جاروبک می‌باشد. این نوع موتورها، عموماً در سرعت ثابت کار می‌کنند و به طور مستقیم از شبکه تغذیه می‌شوند. با توجه به کاربرد وسیع موتور القایی در صنایع مختلف و محدودیت‌هایی که استفاده از سنسور سرعت در بعضی کاربردها ایجاد می‌کند، درایوهای بدون سنسور جایگاه ویژه‌ای یافتند و تلاش برای افزایش دقت تخمین و حذف نویزها ادامه دارد. در این مقاله روشی جدید برای کنترل سرعت بدون سنسور موتورهای القایی ارائه می‌شود که باعث افزایش دقت تخمین و بهبود عملکرد تعقیب در روش کنترل مستقیم گشتاور و حذف سنسور سرعت می‌شود. به این منظور تمامپارامترهای مورد نیاز برای کنترل بدون سنسور از جمله شار استاتور، سرعت موتور، و گشتاور بار را با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده می‌شود. در این روش نویز و اختلال ناشی از ساختار و نمونه‌گیری‌های جریان و ولتاژ در تمام کمیت‌های مؤثر حذف می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده افزایش دقت تخمین و تعقیب است. از ماشین‌های الکتریکی پرکاربرد در مصارف صنعتی و خانگی می‌توان از موتورهای القایی نام برد. این موتورها به دلیل هزینه پایین، قابلیت اطمینان بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر نسبت به سایر موتورهای الکتریکی از قبیل موتورهای DC مزیت زیادی دارند. یکی از انواع موتورهای القایی، موتور القایی دو فاز می‌باشد که اگر در استاتور آن دو سیم‌پیچی اصلی و کمکی با مقاومت و اندوکتانس متفاوت باشد، بصورت نامتقارن عمل می‌کند و مدل ریاضی آن شبیه موتور القایی تک‌فاز می‌باشد. عملکرد سرعت ثابت موتورهای القایی باعث بازده پایین، ضریب توان ضعیف و نوسانات گشتاور می‌شود. از این رو کنترل فرکانس متغیر این نوع موتورها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از روشهای نوین جهت تخمین سرعت در موتورهای القایی، استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته (Extended Kalman Filter) است که اغلب برای موتورهای القایی سه فاز مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله به جای استفاده از حسگر سرعت، یک روش جدید تخمین سرعت بر اساس روش فیلتر کالمن توسعه یافته در سیستم کنترل جهتدار میدان غیرمستقیم برای موتورهای القایی دو فاز نامتقارن ارائه شده است. موتور القایی به کار رفته در این پژوهش بر اساس روش کنترلی RFOC غیرمستقیم تغذیه شده توسط اینورتر دو فاز با روش کلیدزنی PWM راه‌اندازی شده است. نتایج شبیه‌سازی کنترل سرعت نشان می‌دهد که سرعت تخمین زده شده با فیلتر کالمن توسعه یافته به خوبی سرعت مرجع را در سرعت‌های مختلف دنبال می‌کند و عملکرد سیستم درایو معرفی شده برای کنترل سرعت موتور القایی دو فاز نامتقارن بسیار خوب می‌باشد.

**کلید واژه:** تخمین سرعت روتور، کنترل برداری، فیلتر کالمن توسعه یافته، موتور القایی، دو فاز نامتقارن

## ۱- مقدمه

امروزه موتورهایی که برای کار با منبع تکفاز طرح می‌شوند با انواع مختلف ساخته شده و در منازل ادارات، کارخانه‌ها، کارگاه‌ها، شرکت‌های تجاری و غیره بطور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای کوچک مخصوصا با قدرت کسر اسب بخار کاربرد فراوان دارند بطوریکه پیشرفت محصولات جدید سازندگان سفینه‌های فضائی، هواپیماها، ماشین‌های تجاری، ماشین‌های ابزار و غیره در سایه طرح موتورهای با قدرت کسر اسب بخار امکان‌پذیر می‌باشد. از آنجائیکه عملکرد و موارد استعمال موتورهای القایی بسیار گوناگون است صنعت تولید موتور در زمینه انواع چنین موتورهایی تکامل پیدا کرده بطوریکه برای هر زمینه‌ای طرحی موجود است. موتورهای القایی تک فاز دارای روتور قفس سنجابی بوده و استاتور آن حاوی یک سیم‌پیچ تک فاز است که در طول محیط استاتور درون شیارها توزیع شده است. همانطور که می‌دانیم، موتورهای القایی تک فاز یک نقص جدی دارند و اینکه چون در سیم‌پیچی استاتور آن‌ها تنها یک فاز وجود دارد بنابراین میدان مغناطیسی دوار در آن ایجاد نشده و در عوض نوسان می‌کند و در نتیجه برای شروع حرکت نیاز به گشتاور راه‌اندازی دارد. انواع موتورهای القایی تک فاز از لحاظ ساختار به شرح زیر می‌باشد [۱۹]:

## ۲- موتور القایی تکفاز با راه‌انداز خودبخود

همانطور که بحث شد موتور القایی تکفاز گشتاور راه‌اندازی ندارد. برای برطرف کردن این عیب و تبدیل آن به موتور با راه‌اندازی خود بخود موتور را موقتا در اثنای راه‌اندازی به دو فاز تبدیل می‌کنیم. برای این منظور استاتور موتور تکفاز را به یک سیم‌پیچی اضافی به نام سیم‌پیچی راه‌انداز (یا کمکی) مجهز می‌کنیم. دو سیم‌پیچ راه‌انداز و اصلی ۹۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند. روش‌های زیادی برای ایجاد اختلاف فاز لازم بین جریانهای این دو سیم‌پیچی وجود دارد.

## ۲-۲-۱ موتور القایی تکفاز انشعابی

در این موتور سیم‌پیچ اصلی مقاومت اهمی کم و مقاومت القایی زیاد دارد در حالی که سیم‌پیچ راه‌اندازی مقاومت اهمی زیاد و مقاومت القایی کمی دارد. مقاومت اهمی سیم‌پیچ راه‌اندازی را می‌توان با اتصال یک مقاومت بزرگ بطور سری با آن یا با انتخاب سیم نازک مسی برای سیم‌پیچی راه‌اندازی بالا برد.

به این ترتیب جریان  $I_s$  سیم‌پیچ راه‌اندازی نسبت به ولتاژ اعمال شده به اندازه زاویه کوچکی پس‌فاز می‌شود در حالیکه جریان  $I_m$  سیم‌پیچ اصلی نسبت به ولتاژ با زاویه بزرگتری عقب افتادگی پیدا می‌کند. زاویه فاز بین  $I_s$  و  $I_m$  تا حد امکان بزرگ می‌شود، زیرا گشتاور راه‌اندازی موتور القایی تکفاز انشعابی متناسب با  $\sin \alpha$  است. یک کلید گریز از مرکز بطور سری با سیم‌پیچی راه‌اندازی وصل می‌شود. این کلید در داخل موتور قرار دارد و کار آن قطع کردن خودکار سیم‌پیچی راه‌اندازی از منبع، در هنگامی است که موتور به ۷۵ درصد سرعت نامی رسیده می‌باشد. در بعضی از موتورها بجای کلید گریز از مرکز داخلی یک رله الکترومغناطیسی بکار می‌رود. بوبین رله بطور سری با سیم‌پیچ اصلی وصل شده و یک جفت کنتاکت باز در مدار سیم‌پیچی راه‌اندازی قرار گرفته است. در ابتدای راه‌اندازی که  $I_m$  بزرگ است کنتاکت‌های رله بسته شده و اجازه می‌دهد  $I_s$  از سیم‌پیچ راه‌انداز عبور کرده و موتور شروع بکار کند. بعد از اینکه موتور به ۷۵ درصد سرعت بار کامل خود رسید  $I_m$  بمقداری افت می‌کند که کنتاکت‌ها باز می‌شوند.

در این موتورها گشتاور راه‌انداز ۱۵۰ تا ۲۰۰ درصد گشتاور بار کامل بوده در حالی که جریان راه‌اندازی ۶ تا ۸ برابر جریان بار کامل است. این موتورها نسبت به موتورهایی با راه‌انداز خازنی گران قیمت ترجیح داده می‌شوند. موارد استفاده این موتورها عبارتند از: بادبزن، دمنده، پمپ‌ها، ماشین‌های پلی‌کپی، یخچال‌های خانگی، بخاری‌ها و غیره.

تنظیم سرعت موتورهای القایی تکفاز انشعابی استاندارد تقریباً مشابه موتورهای سه فاز است. سرعت این موتورها از حالت بی بار تا بار کامل در حدود ۲ تا ۵ درصد تغییر می‌کند به این دلیل چنین موتورهایی را معمولاً با سرعت تقریباً ثابت قلمداد می‌کنند. چنین موتورهایی را برای تمایز دادن از موتورهای القایی با راه انداز خازنی که بعداً مورد بحث قرار می‌گیرد بعضاً موتور القایی تکفاز انشعابی با راه انداز مقاومتی می‌نامند.

#### ۲-۲-۲ موتورهای القایی با راه انداز خازنی

در این موتورها اختلاف فاز لازم بین  $I_m$  و  $I_s$  با اتصال یک خازن بطور سری با سیم‌پیچ راه‌اندازی تامین می‌شود. خازن عموماً از نوع الکترولیتی است و همیشه در خارج موتور نصب می‌شود. خازن برای کار کوتاه مدت طرح شده و برای بیش از ۲۰ بار کار در ساعت ضمانت نشده است. جریان راه‌اندازی نباید از ۳ ثانیه بیشتر باشد. وقتی موتور به سرعت حدود ۷۵ درصد سرعت بار کامل خود رسید، کلید گریز از مرکز سیم‌پیچ راه انداز و خازن را از منبع جدا می‌کند و بنابراین فقط سیم‌پیچی اصلی به منبع وصل می‌ماند. جریان  $I_m$  سیم‌پیچ اصلی نسبت به ولتاژ منبع با زاویه بزرگی عقب است در حالی که  $I_s$  نسبت به ولتاژ به اندازه زاویه معینی جلو است. اختلاف فاز بین دو جریان حدود ۸۰ درجه است که در مقایسه با موتور القایی تکفاز انشعابی ۳۰ درجه بیشتر است. جریان منتجه کوچک بوده و تقریباً با ولتاژ همفاز است. بعضی از انواع مهم موتورها با خازن راه انداز در زیر شرح داده می‌شود.

#### ۲-۲-۲-۱ موتور تک ولتاژ قابل تغییر جهت گردش از خارج

در این موتور چهار سر برای معکوس کردن موتور از خارج لازم است. سیم‌پیچی راه‌اندازی با خازن الکترولیتی و کلید گریز از مرکز سری می‌باشد جهت گردش موتور را می‌توان بسادگی با تعویض سرهای سیم پیچی راه اندازی نسبت به سرهای سیم پیچی اصلی معکوس کرد.

#### ۲-۲-۲-۲ موتور تک ولتاژ بدون تعویض جهت گردش

در این حالت سرهای سیم‌پیچی راه‌اندازی در داخل به سرهای سیم‌پیچی اصلی وصل است. در نتیجه این موتورها دو سر خروجی دارند. جهت گردش این موتور را نمی‌توان عوض کرد مگر اینکه موتور را باز کرده و سرهای سیم پیچی راه اندازی را معکوس نمود.

#### ۲-۲-۲-۳ موتور تک ولتاژ با تغییر جهت گردش و ترموستات

بیشتر موتورها با وسیله‌ای به نام ترموستات مجهز شده اند که موتور را در مقابل بار زیاد حرارت زیاد و اتصال کوتاه حفاظت می‌کند. ترموستات از یک عنصر بی‌متال ساخته شده که بطور سری با موتور بسته شده و اغلب در خارج موتور نصب شده است. وقتی بنا به یکی از دلایل فوق جریان زیاد از موتور بگذرد حرارت زیادی تولید می‌شود و بی‌متال عمل می‌کند و کنتاکت‌ها باز شده و موتور از منبع قطع می‌شود. وقتی بی‌متال سرد شد کنتاکت‌ها بطور خودکار بسته می‌شوند.

#### ۲-۲-۲-۴ موتور تک ولتاژ بدون تغییر جهت گردش با کلید مغناطیسی

این موتورها عموماً در یخچال‌هایی که امکان کاربرد کلید گریز از مرکز نمی‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون معمولاً فقط به یک جهت گردش نیاز هست این موتورها برای معکوس شدن وصل نشده‌اند. یکی از معایب موتور با خازن راه انداز با کلید مغناطیسی اینست که امکان دارد در اضافه بار کم، اهرم کلید مغناطیسی عمل کند و سیم‌پیچی راه‌اندازی را به منبع وصل کند و چون این سیم‌پیچ برای کار کوتاه مدت طرح شده می‌سوزد.

#### ۲-۲-۲-۵ موتور دو ولتاژ بدون تغییر جهت گردش

این موتورها می‌توانند با دو ولتاژ متناوب ۱۱۰۷ یا ۲۲۰۷ یا ۲۲۰۷ و ۴۴۰۷ کار کنند. این چنین موتورهایی دو سیم‌پیچ اصلی و یک سیم‌پیچ راه اندازی دارند که تعداد سرهای مناسب از آن بیرون آمده تا بتواند با ولتاژهای مختلف کار کند. وقتی موتور با ولتاژ کم کار می‌کند، دو سیم‌پیچی اصلی بطور موازی وصل می‌شوند.

#### ۶-۲-۲-۲-۲ موتور دو ولتاژ با تغییر جهت گردش

تعویض جهت گردش با خارج ساختن دو سر اضافی از سیم‌پیچی راه اندازی عملی می‌شود.

#### ۷-۲-۲-۲-۲ موتور تک ولتاژ با تغییر جهت گردش سه سر

در این موتورها یک سیم‌پیچی اصلی دو قسمتی بکار می‌رود. دو بخش سیم‌پیچی اصلی در داخل سری شده و یک سر سیم‌پیچی راه اندازی به وسط مقاومت‌ها اتصال یافته است. سر دوم سیم‌پیچی راه‌اندازی و دو سر سیم‌پیچی اصلی از موتور بیرون آورده شده‌اند.

#### ۸-۲-۲-۲-۲ موتور تک ولتاژ با تغییر جهت گردش آنی

معمولاً موتور قبل از راه اندازی در جهت عکس، باید کاملاً بایستد، زیرا کلید گریز از مرکز نمی‌تواند بسته شود، مگر اینکه موتور عملاً متوقف گردد. چون سیم‌پیچ راه اندازی وقتی موتور در حال کار است از منبع قطع بوده، معکوس کردن سیم‌پیچی راه اندازی اثری بر کار موتور ندارد. معکوس کردن این موتور با یک کلید سه پل دو طرفه عملی می‌شود. این کلید دارای سه تیغه است که در دو جهت با هم حرکت می‌کنند. در یک حالت موتور در جهت ساعتگرد و در حالت دیگر در خلاف ساعت می‌چرخد. واضح است که با این ترتیب باید صبر کرد تا موتور متوقف گردد در بعضی موارد که معکوس کردن موتور فوراً لازم است، یک رله در مدار قرار می‌گیرد تا کلید گریز از مرکز را اتصال کوتاه کند و سیم‌پیچی راه اندازی را در جهت عکس وصل نماید.

#### ۹-۲-۲-۲-۲ موتور دو سرعته (دو دور)

سرعت را می‌توان با تغییر تعداد قطب‌های سیم‌پیچی تغییر داد با این منظور دو سیم‌پیچی اصلی جداگانه در شیارهای استاتور قرار می‌گیرد. یک سیم‌پیچی راه اندازی در رابطه با سیم‌پیچی اصلی سرعت زیاد عمل می‌کند. کلید گریز از مرکز دو طرفه بوده و دو کنتاکت راه اندازی و حالت کار (وصل و قطع) دارد. یک کلید برای تغییر سرعت در خارج موتور قرار گرفته است. موتور چه کلید سرعت روی کنتاکت سرعت زیاد باشد یا روی کنتاکت سرعت کم، همیشه با سرعت زیاد راه می‌افتد. اگر کلید سرعت روی کنتاکت سرعت باشد وقتی موتور سرعت گرفت کلید گریز از مرکز :  
الف) سیم‌پیچی راه اندازی را قطع کرده و سیم‌پیچی اصلی سرعت زیاد را باز می‌کند.  
ب) سیم‌پیچی اصلی سرعت کم را وصل می‌نماید.

#### ۱۰-۲-۲-۲-۲ موتور دو دور با دو خازن

این موتور دارای دو سیم‌پیچی اصلی، دو سیم‌پیچی راه اندازی و دو خازن است. یک خازن برای کار با سرعت زیاد و دیگری برای کار با سرعت کم بکار می‌رود. یک کلید گریز از مرکز دو طرفه برای قطع سیم‌پیچی راه اندازی بکار گرفته می‌شود.

#### ۳-۲-۲-۲ موتورهای تک‌فاز با قطب چاکدار

در این موتورها اختلاف فاز لازم جهت تولید میدان دوار توسط القاء تولید می‌شود. استاتور این موتورها با قطب بر جسته بوده و روتور آنها از نوع قفس سنجابی است. داخل قطب‌های مورق، شیارهای کنده شده که دارای پیچک مسی اتصال کوتاهی به نام پیچک تغییر فاز است. این قسمت قطب را تغییر دهنده فاز می‌نامند. وقتی از سیم‌پیچی تحریک یا میدان که دور قطب

پیچیده شده جریان متناوب عبور می‌کند محور مغناطیسی قطب از یک قسمت به قسمت تغییر دهنده فاز (دارای پیچک اتصال کوتاه) منتقل می‌شود.

این جابجا شدن محور میدان مغناطیسی معادل جابجایی فیزیکی قطب است. بنابراین روتور در جهت این جابجایی یعنی از قسمت بدون پیچک اتصال کوتاه به قسمت تغییر دهنده فاز (دارای پیچک اتصال کوتاه) شروع به گردش می‌کند. موتورهای با قطب چاکدار در قدرت‌های کم ساخته می‌شوند. چون این موتورها ساختمان ساده و قیمت ارزان دارند، بنابراین از معایب آن از قبیل کوپل راه اندازی کم، ظرفیت اضافه بار خیلی کم و راندمان کم صرفنظر می‌شود. راندمان این موتور از ۵٪ (برای موتورهای خیلی کوچک) تا ۳۵٪ (برای موتورهای بزرگتر) تغییر می‌کند. به علت گشتاور راه اندازی کم موتور با قطب چاکدار عموماً برای بادبزن ها، اسباب بازی، وسایل خانگی، خشک کننده مو (سشوار)، تهویه کننده‌ها، گردش دهنده‌های هوا و ساعت‌های الکتریکی بکار می‌رود. این موتور غالباً در وسایلی مانند همزن‌ها، گرامافون و ضبط صوت و دستگاه چاپ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۲-۲-۴ موتور خازنی

این موتور مشابه موتور با خازن راه انداز است با این تفاوت که سیم پیچی راه‌اندازی و خازن همیشه در مدار باقی می‌ماند. مزایای باقی ماندن خازن بطور دائم در مدار عبارتند از:

- اصلاح ظرفیت اضافه بار موتور
- بالا رفتن ضریب توان
- بالارفتن راندامان
- آراسته شدن کار موتور

بعضی از این موتور ها که با یک مقدار ظرفیت خازن راه اندازی شده و کار می‌کنند و به نام موتورهای خازنی تک مقدار موسومند. بعضی دیگر که توسط خازنی با ظرفیت زیاد راه اندازی شده و با خازن کم ظرفیتی کار می‌کنند، به نام موتورهای خازنی دو مقدار معروفند.

موتور خازنی تک مقدار دارای یک سیم پیچی اصلی و یک سیم پیچی راه اندازی است که با خازن سری شده است. چون خازن بطور دائمی در مدار باقی می‌ماند، این موتور القایی تکفاز انشعابی خازنی بوده و عملاً مانند یک موتور دو فاز نامتعادل کار می‌کند. مانند حالت موتور با خازن راه انداز احتیاجی به کلید گریز از مرکز نیست. چون یک خازن برای راه اندازی و حالت کار مورد استفاده قرار گرفته، واضح است که بهترین شرایط راه اندازی و حالت کار بدست نخواهد آمد، زیرا مقدار ظرفیت خازن بایستی مدار متوسطی بین ظرفیت لازم برای راه اندازی و بهترین ظرفیت برای حالت کار باشد. عموماً از خازن-های روغنی که گرانتز بوده استفاده می‌شود، زیرا باید بطور مداوم کار کنند. این موتورها در جایی به کار می‌روند که گشتاور راه اندازی کم مورد نیاز باشد مانند وسایل گردش دهنده هوا، دمنده‌ها، تنظیم کننده‌های ولتاژ و بخاری‌هایی که کار آرام آنها مطلوب باشد. یکی از مشخصات خوب این نوع موتور اینست که با کلید خارجی بسادگی معکوس می‌شود، به شرط اینکه سیم پیچی‌های اصلی و راه اندازی مشابه باشند. برای یک جهت گردش یکی از سیم پیچی‌ها به عنوان اصلی و دیگری به عنوان راه اندازی عمل می‌کند. برای جهت عکس سیم پیچی اصلی کار راه اندازی را می‌کند و سیم پیچی راه اندازی نقش سیم پیچی اصلی را بعهده می‌گیرد. چنین موتورهایی که جهت گردششان قابل تعویض است اغلب برای وسایلی که سریعاً باید به جلو و عقب بروند مانند روستاها، تنظیم کننده‌های القایی، کنترل کننده‌های کوره‌ها، تنظیم کننده‌های شیرها و جوشکاری با قوس الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

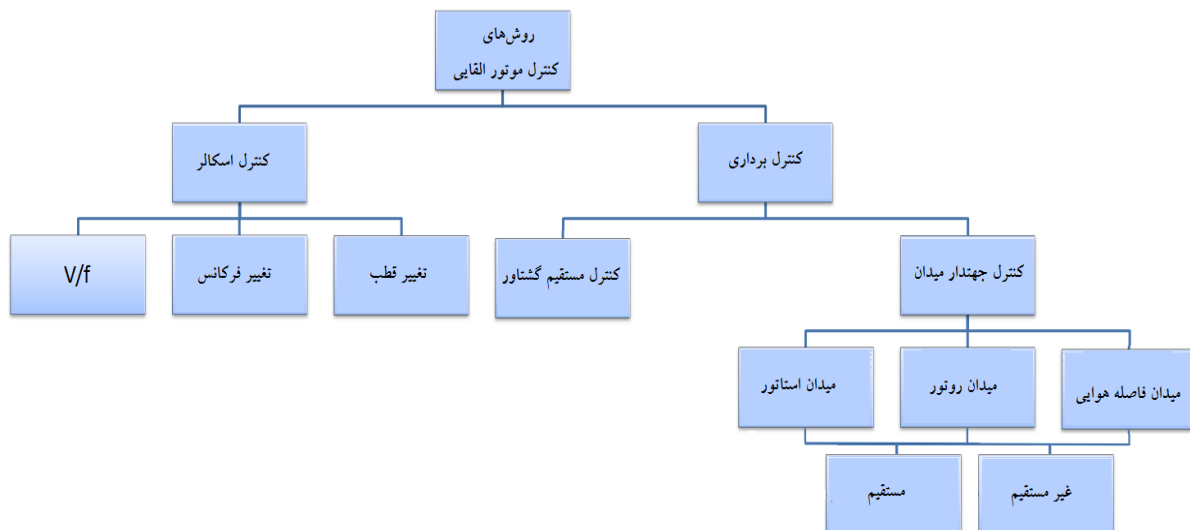
موتور خازنی دو مقدار (دو خازنی) توسط خازنی با ظرفیت زیاد سری با سیم پیچی راه اندازی راه می‌افتد و گشتاور راه اندازیش بالاست. عموماً ظرفیت خازن راه اندازی ۱۰ تا ۱۵ برابر ظرفیت خازن کار عادی است. در انتهای راه اندازی وقتی کلید

گریز از مرکز بسته است، دو خازن موازی بوده و ظرفیت مجموعه جمع دو ظرفیت خواهد بود. وقتی موتور به ۷۵ درصد سرعت نامی خود رسید کلید باز شده و تنها یک خازن در مدار سیم پیچی راه اندازی باقی می ماند. با این ترتیب بهترین شرایط کار برای حالت راه اندازی و حالت عادی موتور حاصل آمده است. نحوه کار آنها با مواردی نظیر توانایی راه اندازی بارهای سنگین، کار نرم و بسیار آرام، راندمان و ضریب توان بالا، توانایی تولید ۲۵ درصد ظرفیت اضافه بار مشخص می شود. اگر چنین موتورهایی خوب طرح شوند مشخصات کار آنها مانند موتورهای دو فاز نامتقارن است. نامتقارنی موتورهای القایی دو فاز به دلیل تفاوت در طراحی الکتریکی سیم پیچ‌های استاتور می باشد. این کار برای ایجاد جریان پیش فاز در یکی از سیم پیچ‌های استاتور نسبت به دیگری لازم است، که در نتیجه آن موقعی که دو سیم پیچی استاتور به یک منبع تک فاز متصل می شوند، گشتاور راه اندازی تولید خواهد شد. بنابراین این نوع ماشین‌ها نه تنها نامتقارن هستند بلکه همیشه در یک حالت نامتعادل کار می کنند [۱۳].

از آنجا که مدل ریاضی موتورهای القایی تک فاز شبیه موتورهای القایی دو فاز نامتقارن می باشد [۹]، در زیر به تحلیل موتور القایی تک فاز پرداخته می شود.

### ۳- کنترل سرعت و درایوهای موتورهای القایی تکفاز

به دلیل بازده پایین، ضریب توان ضعیف و نوسانات گشتاور در عملکرد سرعت ثابت موتورهای القایی، کنترل فرکانس متغیر این نوع موتورها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های متفاوتی برای کنترل فرکانس متغیر موتورهای القایی ارائه شده است [۲۰] که بطور کلی می توان این روش‌ها را بصورت شکل (۳-۱) دسته بندی کرد



شکل (۳-۱) انواع روش‌های کنترل فرکانس متغیر برای موتورهای القایی

کنترل به روش اسکالر معمولاً ساده و ارزان می باشد ولی در این روش با محدودیت رنج کنترل سرعت مواجه می شویم. در مقابل، روش کنترل برداری پیچیده و گران می باشد ولی می توان در این روش سرعت موتور را از سرعت صفر تا بالاتر از سرعت نامی موتور بطور دقیق کنترل کنیم.



### ۳-۱ روش‌های کنترل اسکالر

همان‌طور از رابطه سرعت روتور (۳-۱) که در آن  $n_r, n_s$  برابر سرعت موتور و  $S, f_s, P$  به ترتیب معادل لغزش، فرکانس تغذیه موتور و تعداد قطب می‌باشد، مشخص است برای تغییر سرعت موتور می‌توان سه پارامتر لغزش موتور، فرکانس تغذیه و یا تعداد قطب را تغییر داد.

$$n_r = (1-s)n_s = \frac{(1-s)f_s}{p} \quad (۳-۱)$$

### ۳-۲-۱ کنترل سرعت با تغییر لغزش

برای تغییر لغزش در موتورهای القایی سیم‌پیچی شده می‌توان یک مقاومت در روتور این موتورها اضافه کرد که با تغییر آن، منحنی گشتاور-سرعت تغییر کرده و در نتیجه سرعت موتور نیز تغییر می‌کند. در قدیم معمولاً از رتوستا به عنوان مقاومت استفاده می‌شد ولی امروزه از مقاومت استاتیکی می‌شود. این روش به دلیل تلفات زیاد و بازده کم موتور که در نتیجه اضافه کردن مقاومت ایجاد شده است، کمتر استفاده می‌شود.

### ۳-۲-۲ کنترل سرعت با تغییر قطب

با توجه به رابطه ۳-۱، سرعت با تعداد قطب رابطه عکس دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از چند سیم‌پیچی با تعداد قطب‌های مختلف در استاتور به جای یک سیم‌پیچی، به سرعت‌های مختلف دست یافت. البته باید در نظر داشت که در این روش، تغییرات سرعت پیوسته نبوده و فقط چند سرعت گسسته خواهیم داشت. از معایب این روش می‌توان کاهش بازده ماشین و افزایش هزینه را نام برد.

### ۳-۲-۳ کنترل سرعت با تغییر ولتاژ

رابطه گشتاور مکانیکی موتور از رابطه زیر بدست می‌آید و همانطور که مشاهده می‌کنیم، گشتاور موتور با مجذور ولتاژ تغذیه رابطه دارد:

$$T_{mech} = \frac{1}{\omega_{syn}} \frac{V_{th}^2}{[(R_{th} + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{th} + X'_2)^2]} \frac{R'_2}{s} \quad (۳-۲)$$

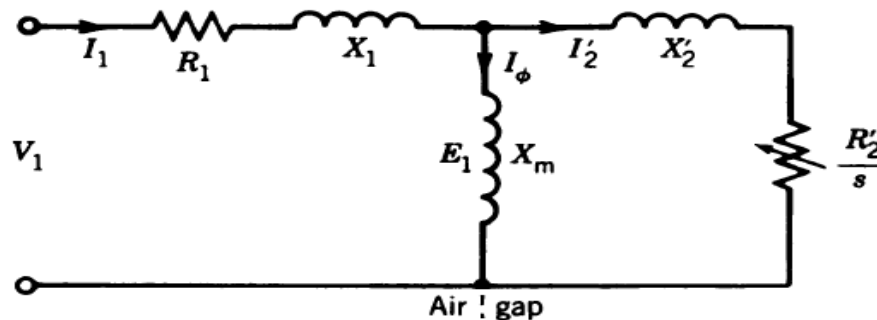
طبق رابطه فوق، می‌توان با تغییر ولتاژ، سرعت را کنترل کرد ولی باید توجه داشت که به دلیل مسایل عایقی نمی‌توان ولتاژ را از مقدار نامی خود بیشتر کرد و نیز کاهش زیاد ولتاژ، باعث تغییر شار شده که اثرات نامطلوبی بر روی موتور دارد.

### ۳-۲-۴ کنترل سرعت با تغییر فرکانس منبع

با استفاده از یک اینورتر که در سر راه تغذیه موتور قرار می‌گیرد می‌توان فرکانس منبع تغذیه را تغییر داد و به این طریق، در مقدار  $n_s$  تغییر ایجاد کرد. از آنجا که تلفات آهنی هسته استاتور با مجذور فرکانس رابطه مستقیم دارد ( $P_f \propto f^2$ ) بنابراین کنترل سرعت موتورهای القایی به روش تغییر فرکانس مشکلاتی را برای موتور بوجود می‌آورد که عمده‌ترین آن گرم شدن هسته استاتور به علت افزایش فرکانس بیش از حد نامی می‌باشد، در نتیجه به جای استفاده از این روش، از روش کنترل ولتاژ فرکانس ( $V/f$ ) استفاده می‌شود.

### ۳-۲-۵ کنترل ولتاژ-فرکانس ( $V/f$ )

با توجه به مدار معادل موتور القایی شکل ۳-۲ می‌توان معادله ولتاژ را صورت زیر نوشت:



شکل (۳-۲) روش کنترل سرعت با تغییر فرکانس منبع [۱۶].

$$V = (R_1 + jX_1)i_1 + E_1 \quad (۳-۳)$$

که در آن مقدار ولتاژ القایی برابر است با:

$$E_{1,ms} = 4.44fN \varphi_m \quad (۴-۳)$$

که در آن  $N$  تعداد حلقه‌های سری در هر فاز و  $\varphi_m$  شار هر قطب در شکاف می‌باشد. اگر از افت ولتاژ مقاومت استاتور صرف نظر کنیم داریم:

$$V \approx E_1 \rightarrow \varphi_m \propto \frac{V}{f} \quad (۵-۳)$$

طبق رابطه ۳-۵ جهت جلوگیری از به اشباع رفتن موتور، ولتاژ پایانه موتور باید متناسب با فرکانس تغییر نماید که به این روش کنترلی، روش کنترلی ولتاژ-فرکانس می‌گویند.

از مزایای این روش، پیاده‌سازی بسیار راحت و ارزان آن می‌باشد، ولی در رنج وسیع سرعت نمی‌توان از این روش استفاده نمود. از دیگر معایب این روش، وابستگی گشتاور و شار به جریان‌های تزریقی به موتور می‌باشد که در نتیجه این دو پارامتر را بصورت مستقل نمی‌توان کنترل کرد و با تغییر یکی، دیگری تغییر می‌کند.

اکثر روش‌های ذکر شده در شکل (۳-۱) برای موتورهای القایی سه فاز ارائه شده است و تنها بعضی از این روشها برای موتورهای القایی تکفاز مورد بررسی قرار گرفته است. روش کنترل اسکالر و روش کنترل برداری دو روش متداول برای کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز می‌باشند که از این میان روش کنترل سرعت بر اساس روش کنترل جهتدار میدان روتور متداولتر می‌باشد [۹] و [۱۰] و [۱۲] و [۱۴]. در این قسمت روش کنترل سرعت موتورهای القایی تکفاز بر اساس روش کنترل جهتدار میدان روتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۳ روش کنترل جهت دار میدان

روش کنترل برداری بر اساس کنترل در موتور DC شکل گرفته است. همان طور که می‌دانیم در موتور DC، دو سیم‌پیچی بصورت عمود بر هم وجود دارد که موجب می‌شود تغییرات در یک سیم‌پیچ، روی سیم‌پیچ دیگر اثری نداشته باشد. در نتیجه می‌توان جریان سیم‌پیچی میدان (شار) را ثابت در نظر گرفت و با کنترل جریان سیم‌پیچ آرمیچر (گشتاور)، سرعت را از صفر تا بالاتر از سرعت نامی کنترل کرد. در روش کنترل جهتدار میدان، به دنبال آن هستیم که همانند موتورهای DC گشتاور را با کنترل یکی از جریان‌های موتور (جریان محور q استاتور) و شار را با کنترل جریان دیگر (جریان محور d استاتور) کنترل نمائیم. برای این منظور از دو مولفه جریان استاتور استفاده می‌شود. برای بدست آوردن این مولفه‌ها نیاز به دانستن مدل دینامیکی موتور القایی در دستگاه دو محوری dq هستیم. به عبارتی دیگر هدف از روش کنترل جهتدار میدان



آن است که شار و گشتاور موتور القایی مستقل از یکدیگر و همانند موتور DC کنترل گردد. در روش کنترل جهتدار میدان، با جهت‌دهی مناسب بردار شار استاتور یا روتور در راستای محور  $d$  یا  $q$  دستگاه دو محوری به هدف فوق دست می‌یابیم. روش کنترل برداری، با توجه به اینکه کدام شار برای جهت‌دهی انتخاب شود، به سه روش زیر تقسیم می‌شود:

- کنترل جهتدار میدان روتور<sup>۱</sup>
- کنترل جهتدار میدان استاتور<sup>۲</sup>
- کنترل جهتدار میدان فاصله هوایی<sup>۳</sup>

از مزایا و معایب روش‌های فوق می‌توان پایداری کنترل جهتدار میدان روتور و حساسیت آن نسبت به پارامترهای موتور و پیچیدگی مدار مجزاساز<sup>۴</sup> را نام برد. در کنترل جهتدار میدان استاتور حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای موتور وجود دارد و نیز مدار مجزاساز آن نسبت به کنترل جهتدار میدان روتور ساده‌تر می‌باشد، ولی این روش به دلیل محدودیت جریان روی محور  $q$ ، پایدار نمی‌باشد. کنترل جهتدار میدان فاصله هوایی نسبت به لرزش و حرارت موتور حساس بوده و همچنین اندازه‌گیری شار در این روش مشکل می‌باشد و همانند روش کنترل جهتدار میدان استاتور دارای مشکل محدودیت جریان روی محور  $q$  و پایداری می‌باشد.

از آنجا که ما نیاز به کنترل پایدار داریم، در نتیجه کنترل جهتدار میدان روتور را به عنوان روش کنترلی انتخاب می‌کنیم. این روش، از نظر چگونگی اندازه‌گیری زاویه روتور به دو طریق مستقیم<sup>۵</sup> و غیرمستقیم<sup>۶</sup> پیاده‌سازی می‌شود. در روش مستقیم از سنسورها برای اندازه‌گیری زاویه روتور استفاده می‌شود، ولی در روش غیرمستقیم با استفاده از پارامترهای دیگر، موقعیت روتور تخمین زده می‌شود.

### ۳-۳-۱ مشکل ایجاد شده در کنترل برداری موتورهای القایی تکفاز

در این قسمت در ابتدا مشکل ایجاد شده در کنترل برداری موتورهای القایی تکفاز بحث می‌شود و در ادامه معادلات روش کنترل جهتدار میدان روتور برای کنترل دور موتورهای القایی تکفاز ارائه می‌شود. برای بیان معادلات کنترل برداری موتورهای القایی نیاز به بیان معادلات ماشین در قاب مرجع چرخشی می‌باشد. برای اینکار تبدیل چرخشی متداول زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

$$[T_s^e] = \begin{bmatrix} \sin \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (۳-۶)$$

با اعمال تبدیل فوق به معادلات  $dq$  ماشین القایی تکفاز در قاب ساکن، معادلات زیر بدست می‌آید [۱۷]:  
معادله ولتاژ محور  $d$  استاتور:

1. Rotor Flux Oriented Control  
2. Stator Flux Oriented Control  
3. Air Gap Flux Oriented Control  
1. Decouple  
2. Direct  
3. Indirect

$$v_{ds}^{+e} = \left(\frac{r_{ds} + r_{qs}}{2}\right) i_{ds}^{+e} + \left(\frac{L_{ds} + L_{qs}}{2}\right) \frac{di_{ds}^{+e}}{dt} - \omega_e \left(\frac{r_{ds} + r_{qs}}{2}\right) i_{qs}^{+e} + \quad (7-3)$$

$$\left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) \frac{di_{dr}^{+e}}{dt} - \omega_e \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) i_{qr}^{+e} + \left(\frac{r_{ds} - r_{qs}}{2}\right) i_{ds}^{-e} +$$

$$\left(\frac{L_{ds} - L_{qs}}{2}\right) \frac{di_{ds}^{-e}}{dt} + \omega_e \left(\frac{L_{ds} - L_{qs}}{2}\right) i_{qs}^{-e} + \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) \frac{di_{dr}^{-e}}{dt}$$

$$+ \omega_e \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) i_{qr}^{-e}$$

ولتاژ محور q استاتور:

$$v_{qs}^{+e} = \left(\frac{r_{ds} + r_{qs}}{2}\right) i_{qs}^{+e} + \left(\frac{L_{ds} + L_{qs}}{2}\right) \frac{di_{qs}^{+e}}{dt} + \omega_e \left(\frac{L_{ds} + L_{qs}}{2}\right) i_{ds}^{+e} + \quad (8-3)$$

$$\left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) \frac{di_{qr}^{+e}}{dt} + \omega_e \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) i_{dr}^{+e} + \left(\frac{r_{ds} - r_{qs}}{2}\right) i_{qs}^{-e} -$$

$$\left(\frac{L_{ds} - L_{qs}}{2}\right) \frac{di_{qs}^{-e}}{dt} + \omega_e \left(\frac{L_{ds} - L_{qs}}{2}\right) i_{ds}^{-e} - \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) \frac{di_{qr}^{-e}}{dt}$$

$$+ \omega_e \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) i_{dr}^{-e}$$

معادله ولتاژ محور d روتور:

$$0 = \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) \frac{di_{ds}^{+e}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) i_{qs}^{+e} + r_r i_{dr}^{+e} + L_r \frac{di_{dr}^{+e}}{dt} - \quad (9-3)$$

$$(\omega_e - \omega_r) L_r i_{qr}^{+e} + \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) \frac{di_{ds}^{-e}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) i_{qs}^{-e}$$

معادله ولتاژ محور q روتور:

$$0 = \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) \frac{di_{qs}^{+e}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \left(\frac{M_d + M_q}{2}\right) i_{ds}^{+e} + r_r i_{qr}^{+e} + l_r \frac{di_{qr}^{+e}}{dt} + \quad (10-3)$$

$$(\omega_e - \omega_r) l_r i_{dr}^{+e} - \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) \frac{di_{qs}^{-e}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \left(\frac{M_d - M_q}{2}\right) i_{ds}^{-e}$$

که در آن:

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^{+e} \\ i_{qs}^{+e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (11-3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dr}^{+e} \\ i_{qr}^{+e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (12-3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^{-e} \\ i_{qs}^{-e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (13-3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dr}^{-e} \\ i_{qr}^{-e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (14-3)$$

معادلات (7-3) الی (14-3) از دو جمله راستگرد (بالانویس "+e") و جملات چپگرد (بالانویس "-e") تشکیل شده‌اند. در معادلات موتور القایی تکفاز جملات چپگرد به دلیل نابرابر بودن اندوکتانس‌ها و مقاومت‌های d و q استاتور بوجود می‌آیند.

جملات چپگرد در معادلات موتور القایی سه فاز وجود ندارند. همانطور که مشاهده می‌شود کنترل یک موتور القایی تکفاز بر اساس این معادلات بسیار پیچیده می‌باشد. به منظور حذف مولفه‌های چپگرد ایجاد شده در معادلات موتور القایی تکفاز، می‌توان از ماتریس‌های تبدیل مناسب استفاده کرد. با به کارگیری این ماتریس‌ها و اعمال آنها به معادلات موتور القایی تکفاز، ساختار نامتقارن معادلات موتور القایی تکفاز به معادلاتی با ساختار متقارن تبدیل می‌شود.

### ۳-۳-۲ معادلات کنترل جهتدار میدان روتور موتور القایی تکفاز

با استفاده از ماتریس‌های تبدیل زیر می‌توان نشان داد که معادلات نامتقارن موتور القایی تکفاز به معادلاتی با ساختار متقارن تبدیل می‌شوند [۱۷].

$$[T_{vs}^e] = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{M_d} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\frac{M_q}{M_d} \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (15-3)$$

$$[T_{is}^e] = \begin{bmatrix} \frac{M_d}{M_q} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\frac{M_d}{M_q} \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (16-3)$$

با اعمال تبدلات (۱۵-۳) و (۱۶-۳) به معادلات موتور القایی تکفاز، داریم:

معادله ولتاژ استاتور:

$$[T_{vs}^e] \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} = [T_{vs}^e] \begin{bmatrix} r_{ds} + L_{ds}p & 0 \\ 0 & r_{qs} + L_{qs}p \end{bmatrix} [T_{is}^e]^{-1} [T_{is}^e] \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (17-3)$$

$$+ [T_{vs}^e] \begin{bmatrix} M_d p & 0 \\ 0 & M_q p \end{bmatrix} [T_{is}^e]^{-1} [T_{is}^e] \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix}$$

پس از ساده سازی معادله بالا، معادله ولتاژ استاتور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{qs} + L_{qs}p & -\omega_e L_{qs} \\ \omega_e L_{qs} & r_{qs} + L_{qs}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_q p & -\omega_e M_q \\ \omega_e M_q & M_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (18-3)$$

$$+ \begin{bmatrix} \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} r_{ds} - r_{qs} \right) + & -\omega_e \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} L_{ds} - L_{qs} \right) \\ \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} L_{ds} - L_{qs} \right) p & \\ \omega_e \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} L_{ds} - L_{qs} \right) & \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} r_{ds} - r_{qs} \right) + \\ & \left( \frac{M_q^2}{M_d^2} L_{ds} - L_{qs} \right) p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^{-e} \\ i_{qs}^{-e} \end{bmatrix}$$

که در آن:

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^{-e} \\ i_{qs}^{-e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_e & -\sin \theta_e \cos \theta_e \\ -\sin \theta_e \cos \theta_e & \sin^2 \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} \quad (19-3)$$

معادله ولتاژ روتور:

$$\begin{bmatrix} T_s^e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_d p & \omega_r M_q \\ -\omega_r M_d & M_q p \end{bmatrix} [T_{is}^e]^{-1} [T_{is}^e] \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} T_s^e \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_r + L_r p & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_r & r_r + L_r p \end{bmatrix} [T_s^e]^{-1} [T_s^e] \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (20-3)$$

پس از ساده سازی معادله (۲۰-۳)، معادله ولتاژ روتور به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q p & -(\omega_e - \omega_r) M_q \\ (\omega_e - \omega_r) M_q & M_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} r_r + L_r p & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_r & r_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (21-3)$$

معادله شار روتور:

$$\begin{bmatrix} T_s^e \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s^e \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_d & 0 \\ 0 & M_q \end{bmatrix} [T_{is}^e]^{-1} [T_{is}^e] \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} T_s^e \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} [T_s^e]^{-1} [T_s^e] \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

پس از ساده سازی معادله (۲۲-۳)، معادله شار روتور به صورت معادله (۲۳-۳) بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q & 0 \\ 0 & M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (23-3)$$

معادله گشتاور الکترومغناطیسی:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{pole}{2} (M_q i_{qs}^s i_{dr}^s - M_d i_{ds}^s i_{qr}^s) = \frac{pole}{2} \begin{bmatrix} i_{dr}^s & i_{qr}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & M_q \\ -M_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \\ &= \left( \frac{pole}{2} \begin{bmatrix} i_{dr}^s & i_{qr}^s \end{bmatrix} [T_s^e]^T \left( [T_s^e]^{-1} \right)^T \begin{bmatrix} 0 & M_q \\ -M_d & 0 \end{bmatrix} [T_{is}^e]^{-1} [T_{is}^e] \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (24-3)$$

پس از ساده سازی معادله بالا، معادله گشتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر بدست می آید:

$$T_e = \frac{pole}{2} M_q (i_{qs}^e i_{dr}^e - i_{ds}^e i_{qr}^e) \quad (25-3)$$

با چسبیدن محور d قاب گردان به بردار فضایی شار روتور، معادلات کنترل جهتدار میدان روتور برای یک موتور القایی تکفاز به صورت زیر بدست می آیند [17]:

$$|\lambda_r| = \frac{M_q i_{ds}^e}{1 + T_r p} \quad (26-3)$$

$$\omega_e = \omega_r + \frac{M_q i_{qs}^e}{T_r |\lambda_r|} \quad (27-3)$$

$$T_e = \frac{pole}{2} \frac{M_q}{L_r} |\lambda_r| i_{qs}^e \quad (28-3)$$

$$v_{ds}^e = \underbrace{\left( \frac{r_{qs} M_q^2 + r_{qs} M_d^2}{2M_d^2} \right) i_{ds}^e + \left( L_{qs} - \frac{M_q^2}{L_r} \right) p i_{ds}^e}_{\text{Generated by PI Controller}} \quad (29-3)$$

$$- \omega_e i_{qs}^e \left( L_{qs} - \frac{M_q^2}{L_r} \right) + \left( \frac{M_q}{L_r} \right) \left( \frac{M_q i_{ds}^e - |\lambda_r|}{T_r} \right) + v_{ds}^{-e}$$

Generated by Decoupling Circuit

$$v_{qs}^e = \underbrace{\left( \frac{r_{qs} M_q^2 + r_{qs} M_d^2}{2M_d^2} \right) i_{qs}^e + \left( L_{qs} - \frac{M_q^2}{L_r} \right) p i_{qs}^e}_{\text{Generated by PI Controller}} \quad (30-3)$$

$$+ \omega_e i_{ds}^e \left( L_{qs} - \frac{M_q^2}{L_r} \right) + \omega_e M_q \frac{|\lambda_r|}{L_r} + v_{qs}^{-e}$$

Generated by Decoupling Circuit

که در آن:





- رویتگر کاهش مرتبه یافته
- فیلترهای کالمن توسعه یافته
- رویتگرهای مد لغزشی
- شبکه‌های عصبی مصنوعی و هوش مصنوعی مبتنی بر کنترل بدون حسگر

موضوع قطب برجسته مبتنی بر تزریق سیگنال‌های تست با فرکانس بالا می‌باشد که در سرعت پایین عملکرد قابل قبولی دارد. اما در این روش به دلیل تزریق سیگنال فرکانس بالا، امکان به وجود آمدن ریبیل‌های گشتاور، لرزش و نویز افزایش می‌یابد، بعلاوه بالابردن برجستگی روتورهای موتور نیازمند طراحی ماشین مبتنی بر تکنیک‌های ماشین مخصوص است و نمی‌توان این تکنیک را در موتورهای استاندارد اجرا نمود.

مدل ولتاژ به اندوکتانس ناشی وابسته است و مدل جریان رویتگر شار نیز با آنکه بی تاثیر از اندوکتانس است ولی فقط در سرعت‌های پایین عملکرد خوبی دارد و در سرعت بالا به دلیل تغییری که در مقاومت روتور به سبب حرارت ایجاد می‌گردد، عملکرد مناسبی ندارد. به دلایل ذکر شده در بالا، پیشنهاد شده است که مدل ولتاژ در سرعت بالا و مدل جریان در سرعت پایین استفاده شود.

در سیستم تطبیقی مدل مرجع از دو تخمین‌گر که به صورت مقایسه‌ای نسبت به هم عمل می‌کنند، استفاده می‌شود که یک تخمین‌گر شار به عنوان مدل مرجع و دیگری به عنوان تخمین‌گر تطبیقی عمل می‌نماید. با مقایسه خروجی‌های دو تخمین‌گر و محاسبه خطای خروجی عملیات تخمین انجام می‌گردد که این عمل به عنوان یک مکانیزم مناسب تطبیق برای درایوی که سرعت تخمینی را تولید می‌کند، استفاده می‌شود. از معایب این روش می‌توان نیاز آن به انتگرال‌گیری را نام برد که پنگ<sup>۷</sup> برای غلبه بر این مشکل، پیشنهاد داد که جهت تخمین سرعت در کنترل کننده‌های تطبیقی از نیروی ضد محرکه الکتریکی و توان راکتیو لحظه‌ای استفاده شود. اگرچه تکنیک‌های مبتنی بر رویتگر تطبیقی می‌توانند با استفاده از قوانین مشتق شده تطبیقی عملکرد بهتری با محاسبات نسبتاً ساده داشته باشند ولی پارامتری شان با اطمینان ضمانت نمی‌شود.

در رویتگرهای کاهش مرتبه یافته نیز تنها شار رتور تخمین زده می‌شود و با استفاده از خطای بین بردار واقعی ولتاژ استاتور و یکی از مقادیر تخمینی عمل تصحیح انجام می‌شود. از آنجاکه در این روش به یک سنسور ولتاژ نیازمند است که به دلیل افزایش هزینه، مطلوب نمی‌باشد.

استفاده از رویتگرهای مد لغزشی به دلیل عدم حساسیت به پارامترهای موتور رواج یافته است. برای کنترل بدون سنسور موتور القایی رویتگرهای شار با استفاده از این تکنیک طراحی شده‌اند. در رویتگر شار مدل جریانی از تصحیح ترم خطای تخمین جریان استفاده می‌شود. این رویتگرها برای تخمین شار به سرعت رتور و ثابت زمانی آن وابسته هستند، در نتیجه با یک خطا در تخمین سرعت روتور یا ثابت زمانی رتور کنترل موتور القایی به درستی انجام نمی‌گیرد.

استفاده از رویتگرهای شبکه عصبی مصنوعی و هوش مصنوعی با آنکه می‌توانند به عملکرد بالا دست یابند ولی دارای معایبی نظیر پیچیدگی و زمان زیاد محاسبات می‌باشند.

با در نظر گرفتن نکات زیادی از جمله دقت، سرعت، زمان لازم برای همگرایی، سادگی یا پیچیدگی تخمین سرعت، حجم محاسبات، حالت‌های گذرای روش و عملکرد آن در سرعت‌های متفاوت، روش مناسب برای تخمین سرعت موتور القایی باید را انتخاب می‌کنیم. در این پایان نامه از فیلتر کالمن توسعه یافته به استفاده می‌کنیم.

#### ۲-۴ فیلتر کالمن

فیلتر کالمن، یکی از رویکردهای تصادفی شناخته شده می‌باشد و نام آن از نام رودولف کالمن که یکی از پایه‌گذاران این تئوری می‌باشد، گرفته شده است. این فیلتر بر اساس یک الگوریتم بازگشتی که حالت یک سیستم دینامیکی را برآورد می‌کند، کار می‌کند که این عمل را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های در طول زمان انجام می‌دهد. این الگوریتم در دو مرحله اجرا می‌شود. ابتدا این فیلتر، وضعیت فعلی متغیرها در شرایط عدم قطعیت تخمین می‌زند و سپس با اندازه‌گیری‌های بعدی، تخمین قبلی با میانگین وزن‌دار بروز می‌شود. به این ترتیب قطعیت مقادیر تخمینی بیشتر می‌شود.

این فیلتر کاربردهای فراوانی در زمینه‌های علمی و مهندسی دارد که از مهمترین آن می‌توان از موقعیت‌یابی وسایل نقلیه، فضاپیما، رادار و موشک نام برد. این فیلتر، یک فیلتر بازگشتی کارآمد است که حالت یک سیستم پویا را از یک سری اندازه‌گیری‌های همراه با خطا بر آورد می‌کند. الگوریتم فیلتر کالمن یکی از مباحث مهم در تئوری کنترل و مهندسی سیستم‌های کنترلی می‌باشد.

فیلتر کالمن یک نوع روئیتگر حالت نامعین است که از آن می‌توان برای ارتباط دادن متغیرهای حالت و پارامترهای مجهول در یک سیستم با مقادیر اندازه‌گیری شده نوین استفاده نمود. فیلتر کالمن یکی از بهترین تخمینگرها مخصوصاً در کاربردهای درایوهای الکتریکی است که قادر به تخمین در حضور نویزهای بسیار زیاد ناشی از کلیدزنی اینورتر است. این فیلتر در حالت‌های گذرا و دائم به نحو مطلوب، سرعت موتور را در طیف وسیعی به استثنای سرعت صفر تخمین می‌زند. پیاده‌سازی فیلتر کالمن نیاز به اندازه‌گیری از ولتاژ و جریان استاتور دارد. می‌توان به جای اندازه‌گیری ولتاژهای استاتور، از ولتاژ باس DC و فرمان به سوئیچ‌ها استفاده نمود. حتی می‌توان در اینورترهای SVM، بجای مقادیر واقعی ولتاژ از مقادیر مرجع ولتاژ که به اینورتر اعمال می‌شوند، استفاده نمود. از مشخصات فیلتر کالمن می‌توان به مبتنی بودن بر مدل، خطی بودن مدل، سفید و گوسی بودن نویزها نام برد. در حال حاضر استفاده از این فیلتر به سیستم‌های غیرخطی، با دینامیک متغیر و شرایط دیگر نویزها، توسعه پیدا کرده است [۱۵].

#### ۳-۴ الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین سرعت ماشین القایی دو فاز

مدل دینامیکی موتور القایی دو فاز که شبیه مدل دینامیکی موتور القایی تک فاز است را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{x} = Ax + Bu + G(t)w(t) \quad (1-4)$$

$$y = Cx + v(t) \quad (2-4)$$

در (۱-۴) و (۲-۴) ماتریس‌های کواریانس مربوط به این خطاها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q = \text{cov}(w) = E\{ww^t\} \quad (3-4)$$

$$R = \text{cov}(v) = E\{vv^t\} \quad (4-4)$$

از آنجاییکه الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته تنها برای سیستم‌های زمان گسسته به کار می‌رود، با توجه به مدل دینامیکی موتور القایی تک‌فاز، می‌توان ماتریس‌های C، B، A، u، y، x را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$x_n = \begin{bmatrix} i_{ds}^{(n)} & i_{qs}^{(n)} & \lambda_{dr}^{(n)} & \lambda_{qr}^{(n)} & \omega_r^{(n)} \end{bmatrix}^T \quad (5-4)$$

$$y_n = \begin{bmatrix} i_{ds}^{(n)} & i_{qs}^{(n)} \end{bmatrix}^T \quad (6-4)$$

$$u_n = \begin{bmatrix} v_{ds}^{(n)} & v_{qs}^{(n)} \end{bmatrix}^T \quad (7-4)$$

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \quad (۸-۴)$$

که در آن:

$$a_{11} = 1 + \left( \frac{r_r M_d}{l_r k_1} + \frac{l_r r_{ds}}{M_d k_1} \right) dt \quad a_{12} = 0 \quad (۹-۴)$$

$$a_{13} = \left( \frac{-r_r}{l_r k_1} \right) dt \quad a_{14} = \left( -\omega_r^{(n)} k_1 \right) dt$$

$$a_{15} = 0 \quad a_{21} = 0$$

$$a_{22} = 1 + \left( -\frac{r_{qs}}{k_2} + \left( \frac{1}{k_2} \right) \left( \frac{-M_q}{l_r} \right) \left( \frac{r_r M_q}{l_r} \right) \right) dt \quad a_{23} = \frac{1}{k_2} \left( \frac{-M_q}{l_r} \right) \omega_r^{(n)} dt$$

$$a_{24} = \frac{1}{k_2} \left( \frac{-M_q}{l_r} \right) \left( \frac{-r_r}{l_r} \right) dt \quad a_{25} = 0$$

$$a_{31} = \left( \frac{r_r M_d}{l_r} \right) dt \quad a_{32} = 0$$

$$a_{33} = 1 + \left( \frac{-r_r}{l_r} \right) dt \quad a_{34} = \left( -\omega_r^{(n)} \right) dt$$

$$a_{35} = 0 \quad a_{41} = 0$$

$$a_{42} = \left( \frac{r_r M_d}{l_r} \right) dt \quad a_{43} = \left( \omega_r^{(n)} \right) dt$$

$$a_{44} = 1 + \left( \frac{-r_r}{l_r} \right) dt \quad a_{45} = 0$$

$$a_{51} = a_{52} = a_{53} = a_{54} = 0 \quad a_{55} = 1$$

$$B_n = \begin{bmatrix} -l_r & 0 \\ \frac{1}{M_d k_1} & \frac{1}{k_2} dt \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = M_d - \frac{L_{ds}L_r}{M_d}$$

$$k_2 = L_{qs} - \frac{-M_q^2}{l_r}$$

الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین سرعت به صورت زیر است:

گام اول: پیشگویی حالت

$$x_{n+1|n} = \Phi(n+1, n, x_{n|n}, u_n) \quad (10-4)$$

که در آن:

$$\Phi(n+1, n, x_{n|n}, u_n) = A_n(x_{n|n})x_{n|n} + B_n(x_{n|n})u_n \quad (11-4)$$

گام دوم: تخمین ماتریس کوواریانس خطا

$$P_{n+1|n} = \left( \frac{d\Phi}{dx} \Big|_{x=x_{n|n}} \right) P_{n|n} \left( \frac{d\Phi^T}{dx} \Big|_{x=x_{n|n}} \right) + \Gamma_n Q \Gamma_n^T \quad (12-4)$$

که در آن:

$$\Gamma = \int_n^{n+1} \Phi(t_{n+1}, \tau) G(\tau) d\tau \quad (13-4)$$

گام سوم: بدست آوردن بهره فیلتر کالمن

$$K_n = P_{n|n-1} \left( \frac{\partial H^T}{\partial x} \Big|_{x=x_{n|n-1}} \right) \times \left( \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=x_{n|n-1}} P_{n|n-1} \frac{\partial H^T}{\partial x} \Big|_{x=x_{n|n-1}} + R \right)^{-1} \quad (14-4)$$

که در آن:

$$H(x_{n|n-1}, n) = C_n(x_{n|n-1})x_{n|n-1} \quad (15-4)$$

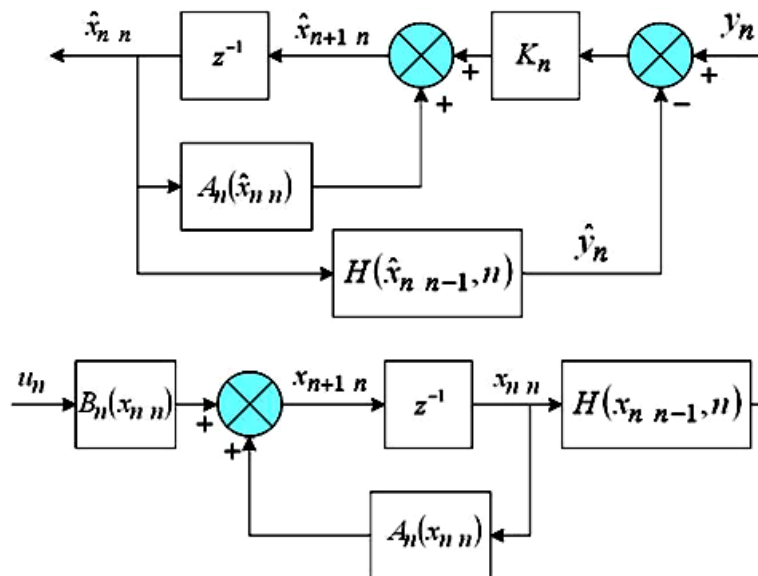
گام چهارم: تخمین حالت

$$x_{n|n} = x_{n|n-1} + K_n(y_n - H(x_{n|n-1}, n)) \quad (16-4)$$

گام پنجم: ماتریس کوواریانس خطا

$$P_{n|n} = P_{n|n-1} - K_n \left( \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=x_{n|n-1}} \right) P_{n|n-1} \quad (17-4)$$

با توجه به معادلات بالا و نیز الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته گفته شده در مرجع [۲] می‌توان بلوک دیاگرام این الگوریتم را به صورت شکل (۱-۴) رسم کرد.



شکل (۴-۱) بلوک دیاگرام فیلتر کالمن توسعه یافته

می‌توان سرعت موتور القایی دو فاز  $A$ ،  $B$ ،  $C$  با توجه به الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته و همچنین مقادیر ماتریسهای نامتقارن را تخمین زد.

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی رایانه‌ای ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها، شامل یک موتور القایی تک‌فاز ۱٫۵ کیلوواتی است که توسط یک اینورتر دو پایه با روش کلیدزنی PWM تغذیه می‌شود. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. مشخصات موتور شبیه‌سازی شده در زیر آورده شده است.

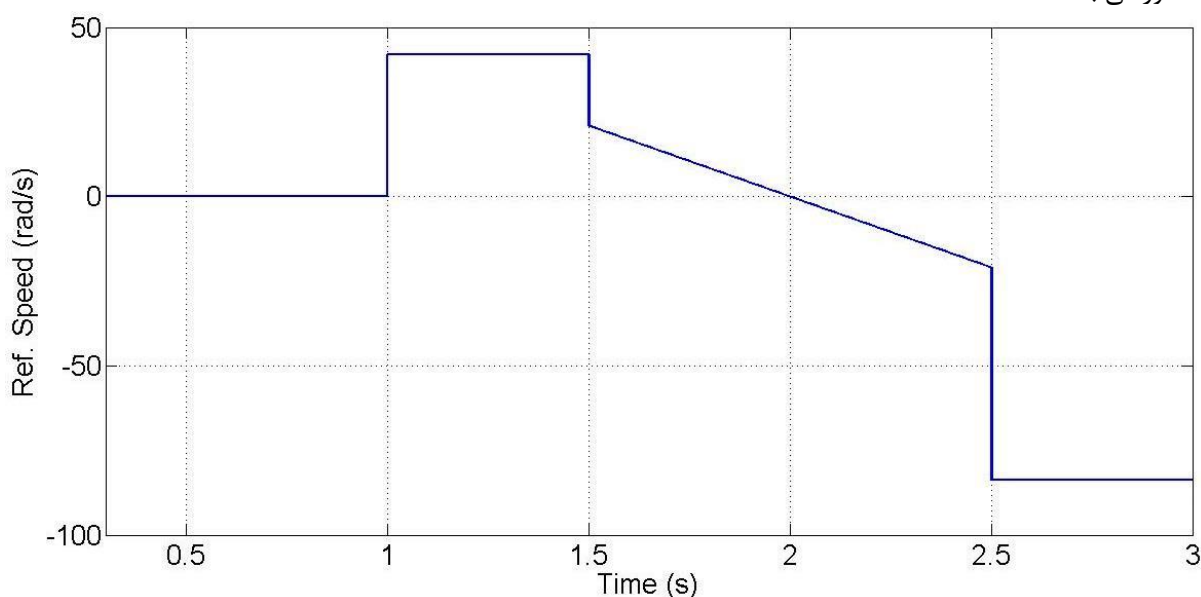
جدول (۵-۱) پارامترهای موتور

توان نامی	۱٫۵ کیلووات
تعداد قطب	۴
نسبت دور	۱٫۱
فرکانس نامی	۶۰ هرتز
ولتاژ	۱۲۰ ولت
مقاومت روتور	۱ اهم
مقاومت سیم پیچ اصلی	۱٫۵ اهم
مقاومت سیم پیچ کمکی	۲٫۵ اهم
اندوکتانس سیم پیچ اصلی	۰٫۰۰۶۹ هانری
اندوکتانس سیم پیچ کمکی	۰٫۰۰۶۶ هانری
اندوکتانس متقابل	۰٫۱۰۶۱ هانری
اندوکتانس سیم پیچ روتور	۰٫۰۰۳۹ هانری
اینرسی کل	۰٫۰۱۳۱ کیلوگرم.مترمربع

در شبیه‌سازی مطلب مقدار گشتاور اولیه بار صفر در نظر گرفته شد و نیز مقدار ضرایب کنترل کننده‌های PI به کار رفته به روش صحیح و خطا بدست آمده است. تعداد متغیرهای حالت پنج عدد و مقادیر اولیه آنها صفر در نظر گرفته شد. متغیرهای حالت انتخابی عبارتند از: سرعت، جریان محورهای  $d$  و  $q$  استاتور و جریان محورهای  $d$  و  $q$  روتور.

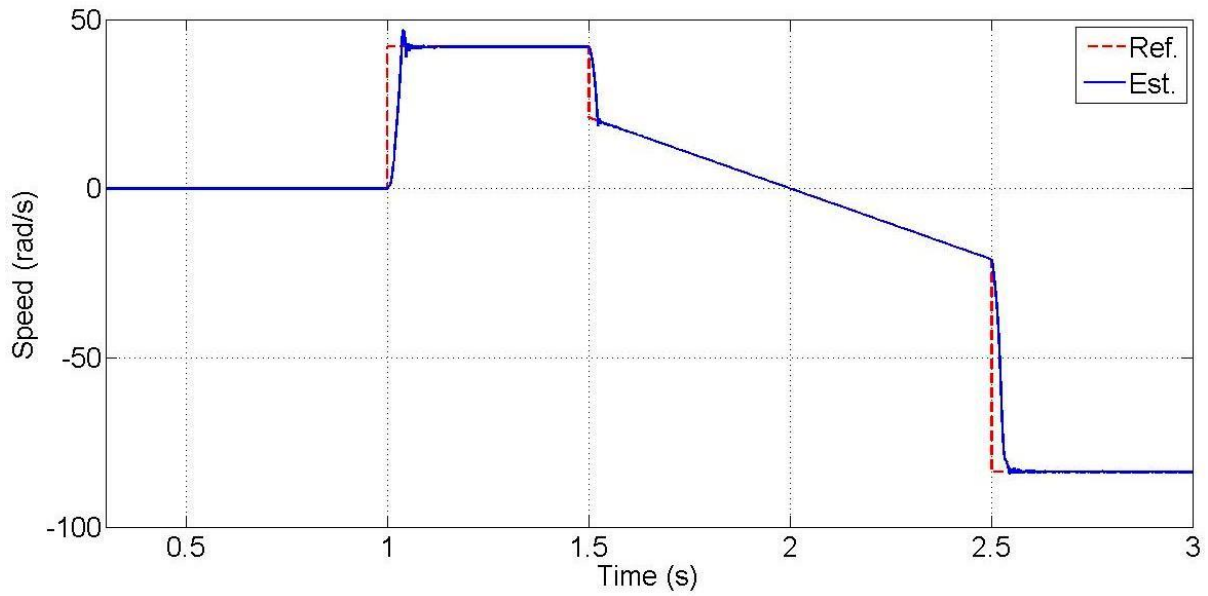
در شبیه‌سازی‌ها در زمان بین ۰٫۳ و ۱ ثانیه، سرعت مرجع دارای مقدار ثابت صفر دور بر دقیقه، در زمان بین ۱ و ۱٫۵ ثانیه، سرعت مرجع دارای مقدار ثابت ۲۰۰ دور بر دقیقه که معادل ۴۱٫۸۹ رادیان بر ثانیه است. در زمان بین ۱٫۵ و ۲٫۵ ثانیه، سرعت مرجع دارای تغییراتی با شیب منفی و در زمان بین ۲٫۵ و ۳ ثانیه، سرعت مرجع دارای مقدار ثابت ۴۰۰ دور بر دقیقه که معادل ۸۳٫۷۷۵ رادیان بر ثانیه می‌باشد.

شکل (۱-۵) نتایج شبیه‌سازی کنترل سرعت موتور القایی تکفاز به‌مراه تخمین سرعت توسط فیلتر کالمن توسعه یافته را نشان می‌دهد. در این شکل، موتور القایی بر اساس روش کنترلی RFOC غیرمستقیم تغذیه شده توسط اینورتر دو پایه با روش کلیدزنی PWM راه‌اندازی می‌شود. این شکل شامل شکل موج‌های سرعت و ولتاژ فاز  $a$  سیم پیچی استاتور می‌باشد.

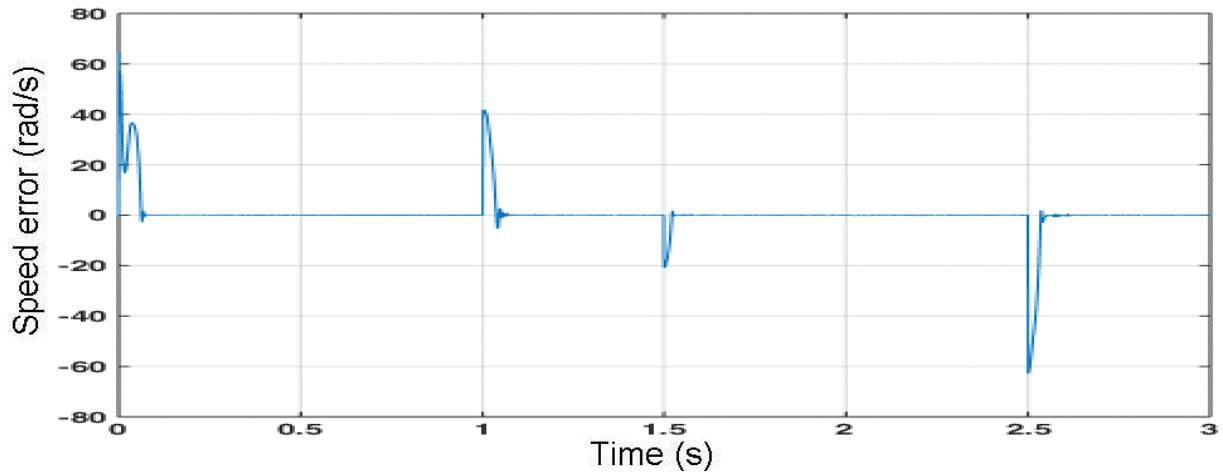


شکل (۱-۵) نمودار سرعت مرجع بر حسب زمان

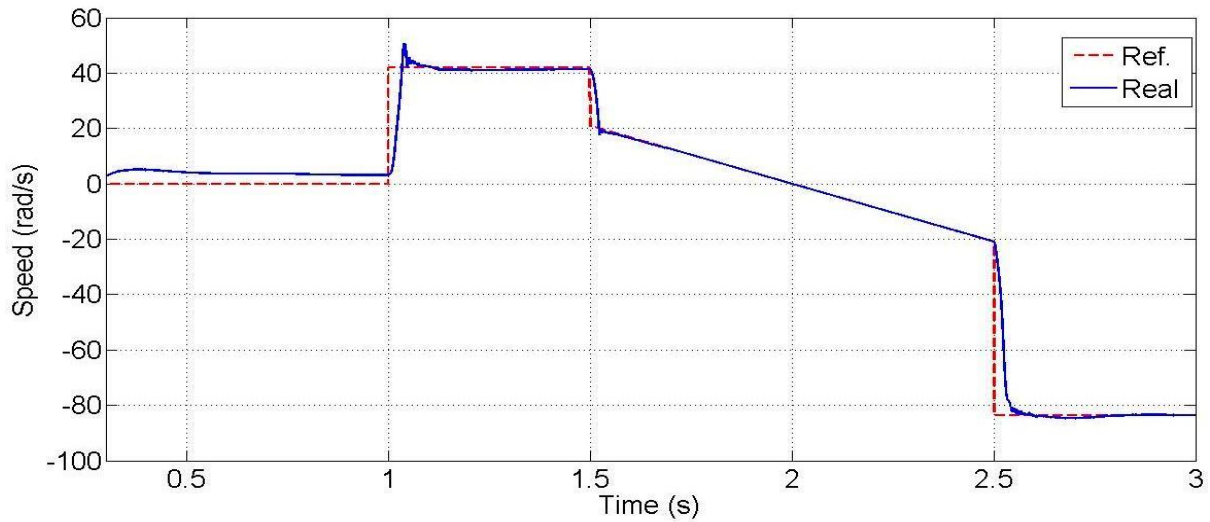




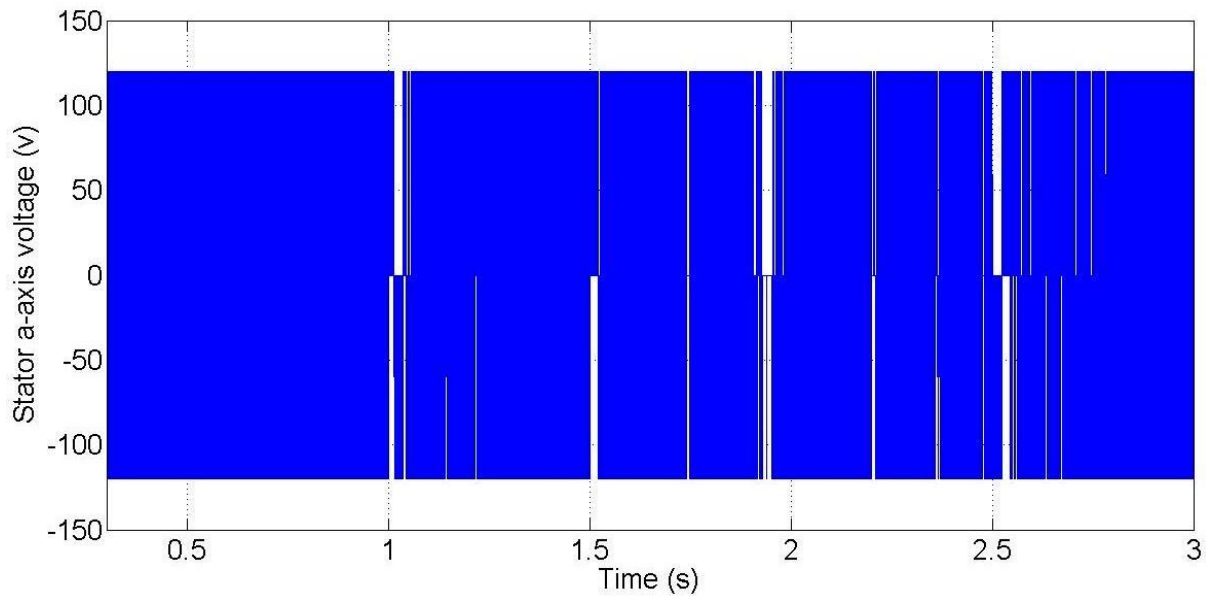
شکل (۲-۵) نمودار مقایسه سرعت مرجع و سرعت تخمینی



شکل (۳-۵) نمودار خطای سرعت مرجع و سرعت تخمینی



شکل (۴-۵) نمودار مقایسه سرعت مرجع و سرعت واقعی

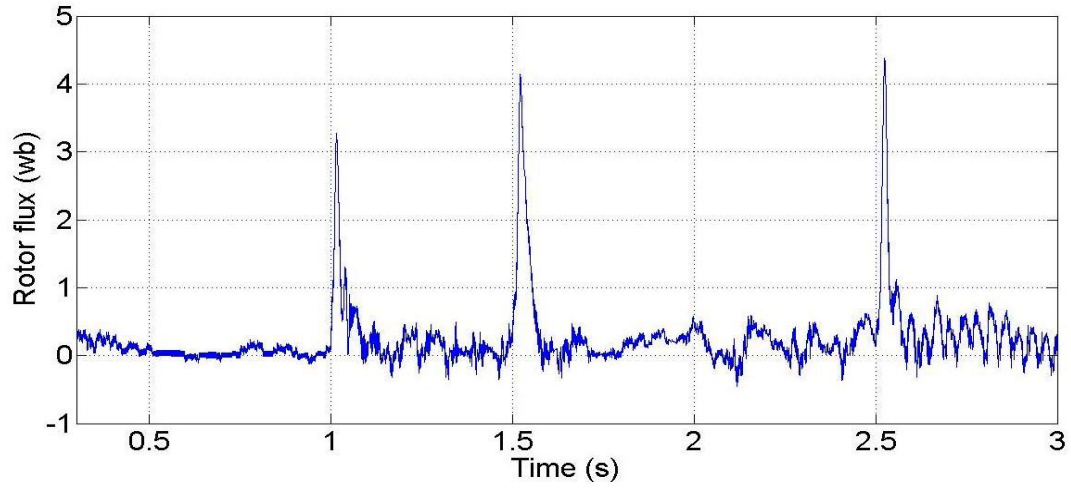


شکل (۵-۵) نمودار ولتاژ فاز a

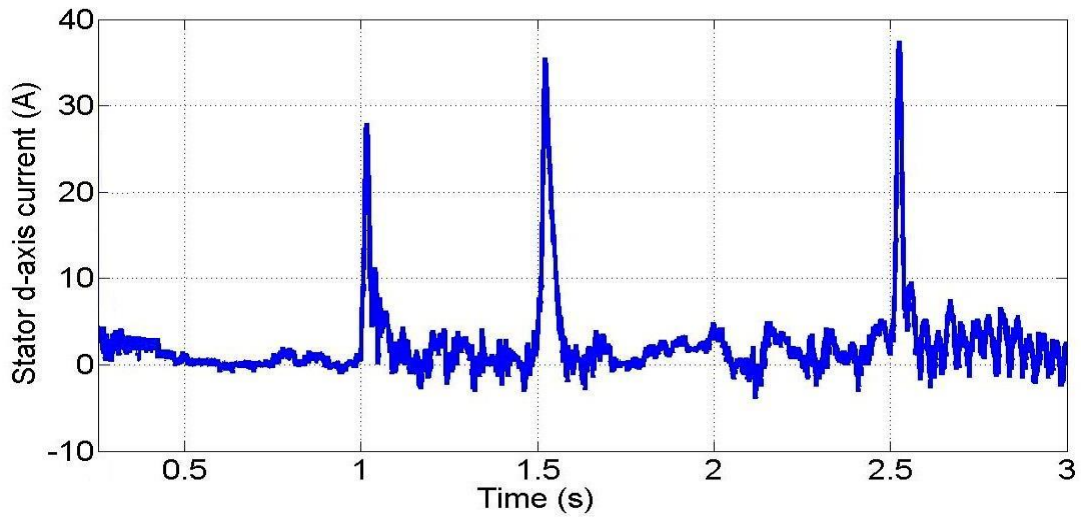
ششمین همایش بین‌المللی افق‌های نوین در  
مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک

6<sup>th</sup> International Conference on the New Horizons in  
Electrical Engineering, Computer and Mechanical

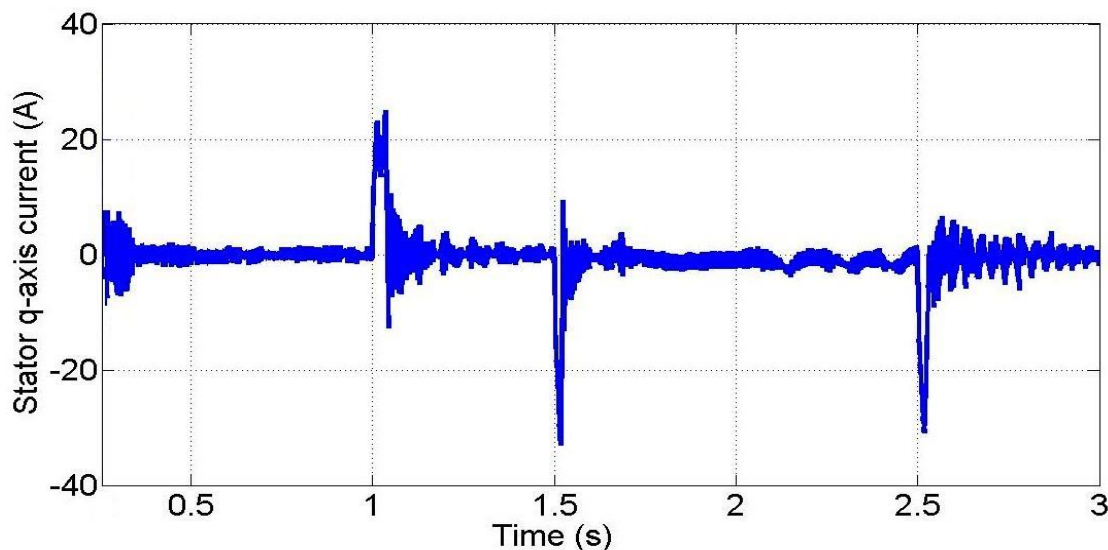
www.mhconf.ir



شکل (۵-۶) نمودار شار روتور

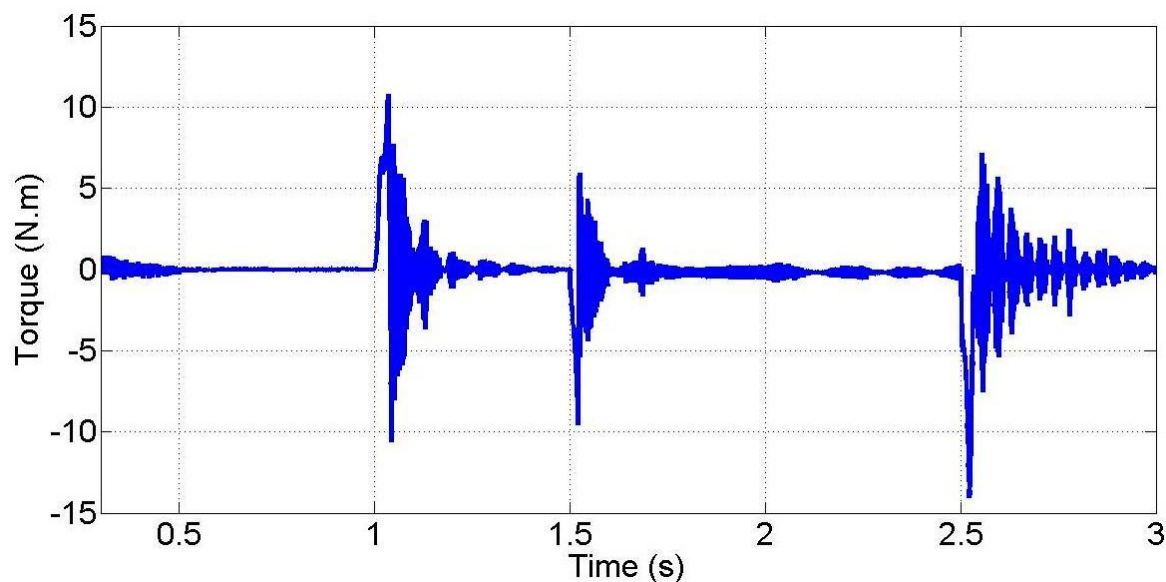


شکل (۷-۵) نمودار جریان محور d



استاتور

شکل (۸-۵) نمودار جریان محور q استاتور



شکل (۹-۵) نمودار گشتاور

#### ۶- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

در این پروژه کنترل برداری موتور القایی تکفاز تغذیه شده توسط یک اینورتر دو پایه با روش کلیدزنی PWM انجام شد. در روش معرفی شده از فیلتر کالمن توسعه یافته بمنظور تخمین سرعت موتور استفاده شده است. استفاده از سیستم درایو پیشنهادی می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای هزینه، اندازه و پیچیدگی سیستم درایو موتورهای القایی تکفاز را کاهش دهد. در این پایان نامه همچنین مروری بر روش‌های PWM مبتنی بر موج حامل مثلثی برای اینورتر دو پایه و سه پایه و چهار پایه انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی MATLAB عملکرد مناسب روش کنترلی پیشنهادی را برای کنترل سرعت موتور القایی تکفاز در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

همانطور که در این پایان نامه اشاره شد یکی از مشکلات روش‌های کنترل برداری برای موتورهای القایی تکفاز استفاده از حسگر سرعت به منظور اندازه‌گیری سرعت ماشین می‌باشد. استفاده از حسگر سرعت باعث افزایش هزینه و پیچیدگی سیستم درایو و کاهش قابلیت اطمینان می‌باشد. استفاده از مشاهده‌گرهایی مانند سیستم تطبیقی مرجع مدل، مد لغزشی و غیره می‌تواند جایگزین مناسبی برای حسگر سرعت باشند.

یکی دیگر از معایب روش کنترلی ارائه شده در این پایان نامه، تنظیم بهینه ضرائب کنترلرهای PI استفاده شده در الگوریتم FOC می‌باشد. الگوریتم‌های هوشمند زیادی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مورچه، زنبور، PSO می‌توانند برای بهینه کردن ضرائب کنترلرهای PI مورد استفاده قرار گیرند.

#### ۷- منابع و مأخذ

[1] Vieira RP, Grundling HA. Sensorless Speed Control with a MRAS Speed Estimator for Single-Phase Induction Motors Drives. **Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE); 2009. p. 1–10.**

[2] Jannati M, Fallah E. A new method for speed sensorless vector control of single-phase induction motor using Extended Kalman Filter. *Proceedings of 19th Annual Conference on IEEE Electrical Engineering ICEE; 2011. p. 1–5.*

[3] Ben Azza H, Jemli M, Boussak M, Gossa M. Implementation of sensorless speed control for two phase induction motor drive using ISFOC strategy. *Transactions of Electrical Engineering 2011;35:63–74.*

[4] Azza HB, Jemli M, Boussak M, Gossa, M. High performance sensorless speed vector control of SPIM Drives with on-line stator resistance estimation. *Simulation Modelling Practice and Theory 2011;19:271–282.*

[5] Jemli M, Ben Azza H, Boussak M. Sensorless Indirect Stator Field Orientation Speed Control for Single-Phase Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics 2009;24.6:1618–1627.*

[6] Kascak S, Prazenica M, Dobrucky B. Position Control of Two-Phase Induction Motor using dSpace environment. *Proceedings of 38th IEEE Conference on Industrial Electronics Society IECON; 2012. p. 1958–1963.*

[7] Correa MB, Jacobina CB, da Silva ERC, Lima AMN. Vector control strategies for single-phase induction motor drive systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics 2004;51:1073–1080.*

[8] Correa MB, Jacobina CB, Lima AMN, da Silva ERC. Rotor-flux-oriented control of a singlephase induction motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics 2000;47:832–841.*

- [9] Jemli M, Azza HB, Gossa M. Real-time implementation of IRFOC for single-phase induction motor drive using dSpace DS 1104 control board. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2009;17:1071–1080.
- [10] Reicy S, Vaez-Zadeh S. Vector Control of Single-Phase Induction Machine with Maximum Torque Operation. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*; 2005. p. 923–928.
- [11] Bolognani S, Peretti L, Zigliotto M. Parameter sensitivity analysis of an improved open-loop speed estimate for induction motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2008;23:2127–2125.
- [12] Jang DH. Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2013;28:526–536.
- [13] Krause PC. *Analysis of Electric Machinery*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986.
- [14] Vaez-Zadeh S, Harooni SR. Decoupling Vector Control of Single-Phase Induction Motor Drives. *Proceedings of 36th IEEE Conference on Power Electronics Specialists PESC*; 2005. p. 733–738.
- [15] Simon, D. (2006). *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons.
- [16] <http://machineryequipmentonline.com>
- [17] M. Jannati, A. Monadi, N.R.N. Idris, A.A.M. Faudzib. Analytical calculation of the RFOC method in single-phase induction motor. *International Journal of Electronics*, 2005
- [18] DO-HYUN JANG. PWM Methods for two-phase inverters. *IEEE industry application magazine*, 2007.
- [19] Mohammad Jannati, Sajad Abdollahzadeh Anbaran, Seyed Hesam Asgari, Wee Yen Goh, Ali Monadi, Mohd Junaidi Abdul Aziz, Nik Rumzi Nik Idris, A review on Variable Speed Control techniques for efficient control of Single-Phase Induction Motors: Evolution, classification, comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016