

# کنترل تطبیقی و هوشمند سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) با استفاده از ترکیب منطق فازی و الگوریتم گرگ خاکستری در شرایط بروز خطا

محمد داوود خیری<sup>۱</sup>      علیرضا توکلی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

[davood74.dk@gmail.com](mailto:davood74.dk@gmail.com)

۲- استادیار- گروه مهندسی برق، واحد اهواز- دانشگاه آزاد اسلامی- اهواز- ایران

[a.tavakoli@iauhvaz.ac.ir](mailto:a.tavakoli@iauhvaz.ac.ir)

**چکیده:** امروزه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به دلیل حذف تلفات تحریک، طول عمر و بازدهی بالاتر به وفور در صنعت مورد استفاده قرار گرفته اند. وقوع خطا در سیستم‌های مبتنی بر موتور و درایو، حین عملکرد اجتناب ناپذیر است. بنابراین باید سناریوی مناسبی برای زمانی که این سیستم‌ها دچار خطا می‌شوند، در نظر گرفت. اگر پیش‌بینی‌های لازم و الگوریتم‌های کنترلی مناسبی برای شرایط بروز خطا در نظر گرفته نشود، خسارات سنگینی به تجهیزات و ادوات به خصوص در سطح توان بالا، تحمیل خواهد شد. یکی از روش‌های کنترلی مرسوم در اینورترها و درایوهای موتور سنکرون، روش کنترل تناسبی-انتگرالی است. در اغلب موارد، کنترل تناسبی-انتگرالی ساده با بهره‌های ثابت به کار گرفته می‌شود. در این مقاله از منطق فازی با توابع عضویت مناسب جهت تعیین تطبیقی و هوشمند بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی برای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم در هنگام مواجهه با خطا استفاده شده است. با ترکیب منطق فازی و الگوریتم گرگ خاکستری به منظور دستیابی به کنترل‌کننده بهینه، روشی ارائه می‌شود که از مزایای کنترل‌کننده فازی در کنار کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی بهره برده و با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری برای بهینه‌سازی، منتج به دستیابی به کنترلی بهینه و پایدار در شرایط مختلف خطا می‌شود. بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی که به همراه الگوریتم گرگ خاکستری برای کنترل سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، با استفاده از منطق فازی برای شرایط خطا، تعیین می‌شوند. در این مقاله، روش پیشنهادی در محیط سیمولینک نرم افزار متلب، در دو مرحله، یک بار برای تغییرات پله ای سرعت و گشتاور مرجع و یک بار تحت بروز سه نوع خطا شبیه سازی شده و نتایج نشان‌دهنده بهبود قابلیت ردیابی سرعت مرجع و کاهش اعوجاج جریان‌های سه فاز و نوسانات گشتاور است.

**واژه‌های کلیدی:** درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم، شرایط خطا، منطق فازی، الگوریتم گرگ خاکستری، کنترل تناسبی-انتگرالی هوشمند

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.105**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: علیرضا توکلی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اهواز - بزرگراه گلستان - فرهنگ شهر - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اهواز

## ۱- مقدمه

امروزه موتورهای الکتریکی در انواع فرآیندهای صنعتی، در نقش عملکرد ظاهر شده و انجام بخشی از یک فرآیند را بر عهده دارند. موتورهای الکتریکی در انواع مختلفی تولید می‌شوند که عمده‌ترین آنها در صنعت، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)<sup>۱</sup> و موتورهای القایی هستند. موتور سنکرون مغناطیس دائم، یکی از انواع موتورهای متناوب سنکرون است که میدان مغناطیسی درونی آن با استفاده از آهنربای دائم، تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر روتور این موتورها از آهنربای دائم ساخته شده و نیازی به سیم‌پیچ تحریک مستقل ندارند. در موتور سنکرون، دو میدان مغناطیسی مجزای استاتور و روتور تمایل به همراستا شدن دارند که در نتیجه آن گشتاور به وجود می‌آید. چون میدان استاتور دوار است، روتور برای همراستا شدن، شروع به چرخش می‌کند و در نتیجه حرکت و دوران حاصل می‌شود [۱].

یکی از عوامل آسیب‌زا برای موتورهای الکتریکی، نوسانات و ضربات گشتاور و سرعت دورانی آنها است. در برخی مقالات از جمله [۲]، رویکرد موثری در جهت کنترل و کاهش نوسانات سرعت در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری ارائه شده است. مبنای این روش، تنظیم تابع هزینه مناسب، به منظور بهره‌برداری از فرآیند بهینه‌سازی روش گرگ خاکستری در کنترل ماشین الکتریکی است. نقش این الگوریتم پیدا کردن ورودی کنترلی بهینه برای ردیابی سرعت مرجع است. الگوریتم گرگ خاکستری روش کنترلی مستقل از مدل است که پارامترهای تابع هدف آن را می‌توان به سادگی و به گونه‌ای موثر تنظیم نمود. البته در این مرجع، رفتار کنترل‌گر در شرایط خطا مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

روش‌های کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم، به دو دسته کنترل اسکالر و برداری دسته بندی می‌شوند [۲]. در روش‌های کنترل اسکالر، تنها اندازه و فرکانس ولتاژ، جریان و شار ناشی کنترل می‌شود. مشهورترین روش کنترل اسکالر، روش کنترل نسبت ولتاژ به فرکانس ثابت است. روش  $V/f$  ثابت جز ساده‌ترین روش‌های کنترل است اما کارایی بالایی ندارد [۳]. در مقابل روش‌های کنترل برداری نه تنها دامنه و فرکانس بلکه موقعیت بردار حالت ولتاژ، جریان و شار ناشی را کنترل می‌نمایند [۴]. روش کنترل برداری جهتی میدانگرا (FOC)<sup>۲</sup> در چارچوب مرجع چرخان سنکرون برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم به کار گرفته می‌شود. در این روش موقعیت شار آهنربای دائم در داخل ماشین کنترل می‌شود [۵]. برای به کارگیری این روش، نیاز به کسب اطلاعات از جریان سه فاز استاتور، ولتاژ لینک DC و موقعیت روتور است [۶]. البته معمولاً نیاز به اندازه‌گیری جریان هر سه فاز استاتور نیست و کفایت جریان دو فاز اندازه‌گیری شود زیرا مجموع جریان‌ها معمولاً صفر می‌شود [۷]. در روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)<sup>۳</sup>، خطای شار و گشتاور و کنترل حالت‌های اینورتر بدون استفاده از حلقه داخلی جریان که در روش FOC استفاده می‌شود، قابل کنترل است. دو استراتژی برای استفاده از DTC-SVM وجود

دارد که شامل استفاده از ساختار آبخاری یا استفاده از ساختار موازی است [۸]. تمام این روش‌ها در شرایطی که خطا و وضعیت پیش‌بینی نشده‌ای رخ ندهد، به خوبی سرعت دوران و گشتاور ماشین الکتریکی را کنترل می‌نمایند اما در صورت وقوع خطا ممکن است ناپایداری یا افزایش دامنه نوسانات رخ دهد. بنابراین لازم است روش‌های برای تشخیص خطا و کنترل موتور در شرایط خطا در نظر گرفته شود تا بتوان موتور و سیستم مرتبط با آن را در ایمن‌ترین حالت کنترل و در صورت لزوم به صورت ایمن و بدون خطر متوقف نمود.

به طور کلی روش‌های اصلی تشخیص خطا در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به سه دسته اصلی، روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل، روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر سیگنال و روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر دانش تقسیم‌بندی می‌شوند [۹]. روش‌های مبتنی بر مدل علاوه بر نیاز به مدل دقیق و جزئی موتور و اینورتر باید توسط پردازنده‌های سطح بالا اجرا شوند و در واقع تحقق آنها اغلب به صورت کامپیوتر در حلقه میسر است زیرا ضمن عملکرد سیستم موتور و اینورتر، باید مدل شبیه‌سازی جزئی متناظر با آن نیز اجرا شود و سیگنال‌های مختلف عملی و شبیه‌سازی دائماً با یکدیگر مقایسه شوند. اگر اختلافی ضمن این مقایسه دائم مشاهده شود، پردازنده براساس نوع اختلاف و سیگنال مرتبط با آن، اقدام به تشخیص خطا و توقف سیستم می‌نماید. در روش‌های مبتنی بر سیگنال، شرایط از پیش تعریف شده‌ای برای سیگنال‌ها ضمن وقوع خطا در نظر گرفته می‌شود که در صورت تشخیص خطا، سیستم باید براساس سناریوی از قبل مشخص شده، رفتار نمایند. این روش صرفاً برای خطاهایی کاربرد دارد که شرایط وقوع آنها قبلاً در سیستم کنترل تعریف شده باشد. روش‌های مبتنی بر دانش نیز براساس دانش و تجربه کارشناس اقدام به تشخیص شرایط خطا و اجرای سناریوی کنترلی از پیش تعریف شده می‌نمایند و این رویکرد نیز در صورت وقوع خطاهایی که قبلاً تجربه آن وجود نداشته، با شکست مواجه خواهد شد.

برای بررسی رفتار سیستم در شرایط خطا، ابتدا باید مدلسازی خطا در سیستم‌های قدرت، مورد بررسی قرار گیرد. در یک سیستم درایو موتور PMSM که بر مبنای اینورتر و تکنولوژی IGBT طراحی شده است، خطاهای مختلف ممکن است روی دهد که مهم‌ترین آنها به شرح زیر است.

- خطای قطع تکفاز
- خطای قطع سه فاز
- خطای قطع یا مدارباز شدن یکی از کلیدها
- خطای اتصال کوتاه شدن یکی از کلیدها
- خطای اضافه بار موتور
- خطای اتصال کوتاه بین سیم‌پیچ‌های دو فاز

در مرجع [۱۰]، برای مواجهه با خطای قطع یک کلید اینورتر، از روش کنترل گشتاور بهینه در حلقه سرعت به منظور کاهش نوسانات گشتاور استفاده شده است. در این حالت احتمال وجود نوسانات

این روش نیاز به کنترل کننده رزونانسی مناسب برای ردیابی جریان مرجع نامتقارن، است.

یکی دیگر از روش‌هایی که برای درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط خطا به کار گرفته شده، روش پیش‌بینی جریان و استفاده از یک آستانه برای تشخیص خطا است. در این روش تعیین دقیق آستانه خطا دشوار است و چنانچه بار یا جریان موتور کم باشد، تشخیص خطا با دشواری مواجه می‌شود [۱۹]. روش کم هزینه‌تری برای کنترل مستقیم شار و گشتاور تحت خطای مدار باز ارائه شده که در آن گشتاور الکترومغناطیسی و شار ناشی استاتور با استفاده از معادله خط گشتاور، تخمین زده می‌شوند. البته سیستم هوشمندی برای اعمال این الگوریتم ارائه نشده است [۲۰]. روش‌های الگوریتم ژنتیک، کنترل غیرخطی جریان با مد لغزشی و کنترل Deadbeat جریان نیز به ترتیب در مراجع [۲۱]، [۲۲] و [۲۳] برای بهبود رفتار سیستم در شرایط پیشنهاد شده اند. البته این روش‌های با افزایش شدید حجم محاسبات و پیچیدگی پیاده‌سازی سیستم کنترل همراه هستند.

با توجه به مرور روش‌های مطرح شده در سایر مقالات و چالش‌های مربوط به پیچیدگی محاسبات و دشواری پیاده‌سازی و همچنین دور شدن از شرایط بهینه کنترلی در لحظه وقوع خطا، در این مقاله، رویکردی با هدف افزایش قابلیت ردیابی سرعت در گشتاور کم و کمینه سازی نوسانات سرعت پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر مبنای استفاده از منطق فازی با توابع عضویت مناسب جهت تعیین بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی در هنگام مواجهه با خطا است. به طور کلی مزایای روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها، شامل بهبود ردیابی سرعت مرجع، کاهش نوسانات گشتاور و جریان‌های سه فاز در شرایط خطا و کاهش اعوجاج جریان‌های سه فاز موتور است.

ساختار کلی مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ به کنترل تحمل‌پذیر خطا و شرایط خطا ضمن عملکرد موتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته می‌شود. در بخش ۳ سیستم مورد بررسی تعریف می‌شود. بخش ۴ روش پیشنهادی مطرح می‌گردد. بخش ۵، شبیه‌سازی و تحلیل نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۶ جمع‌بندی پژوهش آورده شده است.

## ۲- کنترل تحمل‌پذیر خطا

به طور کلی وقتی یک سیستم یا فرآیند در حال عملکرد عادی است ممکن است با خطا مواجه شود. این خطا ممکن است در بازه زمانی کوتاهی ظاهر شود یا اینکه طولانی و ماندگار باشد و مانع ادامه یافتن فرآیند شود. منظور از کنترل تحمل‌پذیر خطا این است که در صورت موقت و گذرا بودن شرایط خطا، اختلالی در عملکرد سیستم ایجاد نشود و در صورت طولانی بودن شرایط خطا، سیستم یا فرآیند به صورت ایمن و بدون آسیب فیزیکی متوقف گردد.

از دیدگاه کلی، خطاهای موجود در یک سیستم کنترل را می‌توان به سه دسته: ۱- فالت (Fault): باعث خطا (Error) می‌شود که به آن

فرکانس بالا برای سرعت وجود دارد. در مرجع [۱۱] نیز برای مواجهه با خطای قطع یک کلید اینورتر، یک شبکه عصبی-فازی-مصنوعی با یک شبکه فازی-عصبی، ترکیب می‌شود تا گشتاور با استفاده از معادله غیرخطی تخمین زده شود. یکی از معایب این روش بهینه نبودن سرعت الگوریتم آموزش است. همچنین در مرجع [۱۲]، یک تبدیل زاویه ای اصلاح شده برای یک چهارچوب گردان خاص ارائه شده که شار ناشی را ثابت نگه می‌دارد. در این حالت یک کنترل کننده غیرخطی جریان با مد لغزشی پیشنهاد می‌شود که دقت ردیابی مرجع و عملکرد دینامیکی را بهبود می‌دهد. از مزایای کنترل مد لغزشی، دینامیک غیرمستقل و از بین بردن اغتشاشات است اما اجرا آن، بسیار پرچالش است.

در مرجع [۱۳]، روش کنترل پیش‌بین به همراه مدولاسیون پهنای باند برای افزایش عملکرد سیستم کنترل در شرایط مختلف خطا، ارائه شده است. روش پیشنهادی، معایب کنترل پیش‌بین مانند حجم محاسبات بالا، فرکانس کلیدزنی پایین و هارمونیک‌های جریان بالا را تا حدودی بهبود داده و نویزپذیری کمتری دارد. در مرجع [۱۴]، استراتژی کنترل خطاهای مدار باز و خطای کلید برای یک اینورتر سه سطحی که یک موتور سنکرون مغناطیس دائم را درایو می‌کند، پیشنهاد شده است. از مزایای این روش کاهش تلفات مسی و دامنه جریان در شرایط خطای مدار باز و حذف هارمونیک‌های جریان است. کنترل مجزای فضای برداری باعث بهبود نوسانات گشتاور و جریان‌های فاز تحت شرایط خطای کلید باز می‌شود. چالش اصلی این روش این است که برای تثبیت ولتاژ لینک DC باید بردارهای ولتاژ تا حد امکان کوچک باقی بماند.

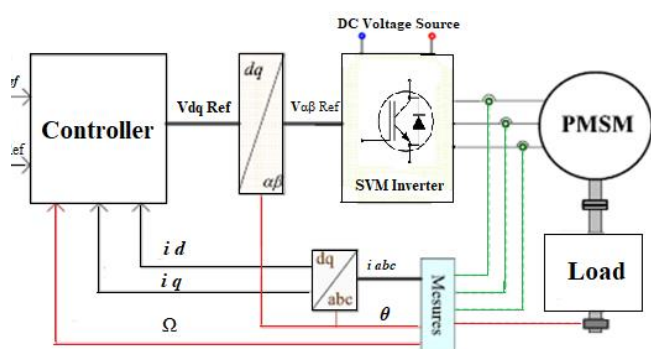
در مرجع [۱۵] برای بهبود عملکرد موتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط بروز خطا، روشی مبتنی بر تبدیل چهارچوب مرجع جدید پیشنهاد شده است. استفاده از چهارچوب مرجع جدید، نیاز به تکرار تبدیلات و محاسبات داشته و دشواری در پیاده‌سازی عملی را موجب می‌شود. برای مواجهه با خطای قطع یک کلید اینورتر، می‌توان در حلقه سرعت از روش کنترل گشتاور بهینه به منظور کاهش رپل گشتاور استفاده نمود. در این حالت سیستم تحت شرایط خطا، عملکرد پیوسته خود را حفظ می‌کند اما احتمال وجود نوسانات فرکانس بالا برای سرعت وجود دارد [۱۶].

در مرجع [۱۷]، یک شبکه عصبی-فازی-مصنوعی با یک شبکه فازی-عصبی، ترکیب می‌شود تا گشتاور با استفاده از معادله غیرخطی تخمین زده شود. یکی از معایب این روش بهینه نبودن سرعت الگوریتم آموزش است. در مرجع [۱۸]، سه روش کنترلی برای مواجهه با خطاهای اینورتر موتور سنکرون مغناطیس دائم پیشنهاد شده است. این سه روش شامل جبران‌سازی مستقیم جریان، استفاده از جریان نامتقارن و جبران‌سازی جریان معادل هستند. این روش‌ها تحت شرایط خطای مدار باز، نوسانات گشتاور و تلفات مسی را کاهش می‌دهد. چالش اصلی

$$\Omega = \frac{1}{J}(T_e - T_L - F\Omega) \quad (3)$$

در این رابطه  $T_L$  گشتاور بار و  $F$  ضریب اصطکاک و  $J$  ممان اینرسی است. گشتاور الکترومغناطیسی با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲].

$$T_e = p\psi_{pm} i_q \quad (4)$$



شکل (۱): توپولوژی فیزیکی سیستم و مدل آن [۲]

#### ۴- روش پیشنهادی در طراحی سیستم کنترل

روش اصلی الگوریتم پیشنهادی، استفاده از منطق فازی با توابع عضویت مناسب جهت تعیین بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی در هنگام مواجهه با خطا است. در روش پیشنهادی، قوانین و توابع تعلق منطق فازی مورد نظر با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، بهینه شده است. در واقع در این روش از الگوریتم گرگ خاکستری در دو مرحله استفاده خواهد شد. این الگوریتم به منظور بهینه‌سازی کنترل‌کننده فازی که انتخابگر بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشد و به منظور کنترل سرعت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بهره‌های کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی که به همراه الگوریتم گرگ خاکستری برای کنترل سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسط منطق فازی برای شرایط خطا، تعیین می‌شوند. بنابراین اهداف زیر در اجرا الگوریتم پیشنهادی مطرح می‌شود.

- استفاده از منطق فازی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری جهت تعیین بهره‌های کنترل تناسبی-انتگرالی
- اگر از منطق فازی برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شود، آنگاه نوسانات گشتاور و جریان‌های سه فاز که به دلیل بروز خطا ایجاد شده اند، کاهش پیدا می‌کنند.
- اگر خطای سرعت به کنترل‌کننده طراحی شده، اعمال شود، آنگاه سرعت مرجع پیش و پس از بروز خطا، دنبال می‌شود.

بنابراین مراحل اجرا روش پیشنهادی به شرح فلوچارت شکل ۲ است. پس از طراحی سیستم کنترل براساس این فلوچارت، تحلیل رفتار سیستم طی دو مرحله انجام می‌شود.

باگ (Bug) نیز گفته می‌شود. ۲- خطا (Error): حالتی از سیستم که منتج به خرابی سیستم می‌شود. ۳- شکست (Failure): وقتی اتفاق می‌افتد که سیستم از سرویس مورد نظر منحرف شود و نتایج نادرستی را در بر دارد تقسیم نمود. به طور کلی می‌توان گفت که در یک سیستم ابتدا فالت رخ می‌دهد که این اتفاق موجب Error و در صورت ادامه داشتن خطا منجر به شکست سیستم می‌شود. سیستم تحمل‌پذیر خطا<sup>۴</sup> معادل سیستم قابل اعتماد<sup>۵</sup> است که لازم است دارای ویژگی‌های همچون، Availability یعنی سیستم در هر لحظه آماده استفاده باشد، Reliability یعنی سیستم پیوسته و بدون عیب کار کند، Safety یعنی وقتی سیستم Fail شود اتفاق فاجعه‌آمیزی رخ ندهد و Maintainability یعنی سیستم Fail شده به راحتی قابل ترمیم باشد. عیب‌ها یا خطاها در فرآیندهای خودکار اغلب باعث واکنش‌های ناخواسته و خاموش شدن یک دستگاه کنترل می‌شود و عواقب آن می‌تواند به اجزا یا محیط آسیب برساند. کنترل تحمل‌پذیر خطا، مترادف مجموعه‌ای از تکنیک‌ها است که برای افزایش در دسترس بودن دستگاه و کاهش خطرات ایمنی ایجاد شده است. هدف از کنترل تحمل‌پذیر خطا، جلوگیری از ایجاد خطای ساده در بروز نقص یا ایراد جدی است. کنترل تحمل‌پذیر خطا برای دستیابی به این هدف چندین مورد را با هم ادغام می‌کند، از جمله تشخیص خطای آنلاین، تخمین خودکار شرایط و محاسبه اقدامات درمانی در هنگام تشخیص خطا و در مرحله آخر فعال سازی اقدامات لازم از طریق نرم افزار است [۲۴].

#### ۳- معرفی ساختار سیستم مورد بررسی

توپولوژی سیستم مورد بررسی در این پژوهش، در شکل ۱ نمایش داده شده است. سیستم درایو شامل یک منبع توان DC، یک اینورتر سه فاز و یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با قطب‌های نرم است. مدل الکتریکی ماشین در چهارچوب سنکرون به صورت رابطه زیر است:

$$u_s = R_s i_s + \psi_s + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \psi_s \quad (1)$$

در این رابطه  $u_s = [v_d v_q]^T$  بردار ولتاژ استاتور و  $i_s = [i_d i_q]^T$  بردار جریان استاتور است.  $\psi_s = [\psi_d \psi_q]^T$  بردار شار استاتور و  $R_s$  مقاومت هر فاز استاتور و  $\omega_e = p\Omega$  سرعت الکتریکی استاتور و  $p$  تعداد زوج قطب‌ها و  $\Omega$  سرعت زاویه‌ای مکانیکی روتور است. شار استاتور نیز با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲].

$$\psi_s = L_s i_s + \psi_{pm} \quad (2)$$

در این رابطه  $\psi_{pm} = [\psi_{pm} 0]^T$  شار مغناطیسی و  $L_s$  اندوکتانس استاتور است. معادله حرکت نیز به صورت زیر خواهد بود.



شکل (۲): فلوچارت مراحل پیاده سازی روش پیشنهادی

جدول (۵-۱): پارامترهای مدل شبیه سازی [۲]

یکا	مقدار	پارامتر
اهم	۰/۲۵	مقاومت استاتور
میلی هاری	۴/۸	اندوکنانس استاتور
---	۴	تعداد زوج قطب ها
وهر	۰/۲۳	شار آهنربای دائم
کیلوگرم متر مربع	۰/۰۰۷۷۴	اینرسی
نیوتن متر بر ثانیه	۰/۰۰۸۹	ضریب اصطکاک
دور در دقیقه	۱۵۰۰	سرعت نامی
نیوتن متر	۲۸/۴	گشتاور نامی

ب) کنترل کننده تناسبی-انترگالی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری با بهره های ثابت (این کنترل کننده در مرجع [۲] به کار گرفته شده است).

پ) کنترل کننده تناسبی-انترگالی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری با بهره های متغیر که با توجه به شرایط سیستم توسط منطق فازی تعیین می شود.

برای تحلیل رفتار سیستم از تغییرات پله ای سیگنال های مرجع یعنی سرعت و گشتاور استفاده شده که در شکل ۳ نمایش داده شده اند.

- مرحله ۱: شبیه سازی سیستم و تحلیل رفتار آن در برابر تغییرات پله ای سرعت و گشتاور مرجع
- مرحله ۲: شبیه سازی سیستم و تحلیل رفتار سیستم در شرایط بروز خطا

یکی از علل استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری قابلیت بالای آن در بهینه سازی سیستم ها به ویژه سیستم های فازی است. سیستم های مبتنی بر منطق فازی براساس دانش و شناخت کارشناس طراحی می شوند و لازم است بهینه سازی مناسبی بر روی آنها صورت گیرد تا قابلیت عملکرد مناسب و هوشمندی کافی را داشته باشند. الگوریتم های زیستی مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم گرگ خاکستری برای بهینه سازی سیستم های طراحی شده بر مبنای منطق فازی بسیار مناسب هستند. در این میان الگوریتم های ژنتیک برای دستیابی به پاسخ بهینه به زمان زیادی احتیاج دارند.

## ۵- شبیه سازی و تحلیل نتایج

شبیه سازی سیستم درایو و اینورتر موتور سنکرون مغناطیس دائم در محیط سیمولینک انجام شده و پارامترهای آن براساس مرجع [۲] در جدول ۱ درج شده است. پارامترها مشابه مرجع ۲ انتخاب شده تا قابلیت مقایسه حفظ گردد.

همانطور که گفته شد، تحلیل رفتار سیستم طی دو مرحله انجام می شود.

- مرحله ۱: شبیه سازی سیستم و تحلیل رفتار آن در برابر تغییرات پله ای سرعت و گشتاور مرجع
- مرحله ۲: شبیه سازی سیستم و تحلیل رفتار سیستم در شرایط بروز خطا

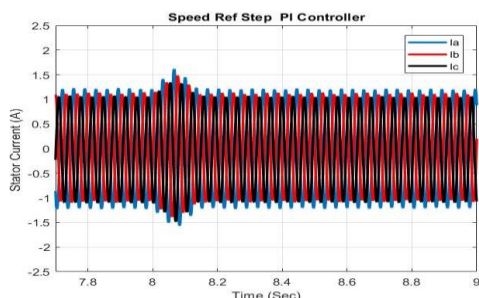
هدف از مرحله اول بررسی و تحلیل رفتار سیستم در حالت های عادی عملکرد و هدف از مرحله دوم، بررسی و تحلیل رفتار سیستم در شرایط بروز خطا است.

### ۵-۱- بررسی عملکرد سیستم (مرحله ۱: طراحی کنترل کننده و تحلیل رفتار سیستم در برابر تغییر سرعت و گشتاور مرجع)

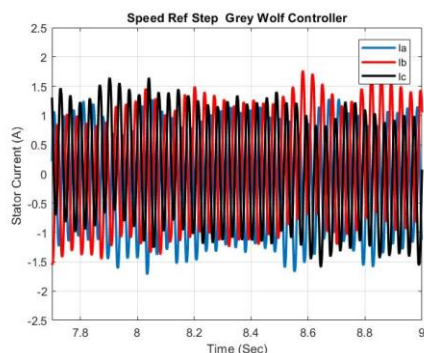
در این قسمت، مقایسه عملکرد سه کنترل کننده الف، ب و پ که به شرح زیر تعریف شده اند، صورت می گیرد. برای بررسی عملکرد سیستم در حالت عادی، گشتاور مرجع و سرعت مرجع به صورت پله ای تغییر کرده و این تغییر به سیستم اعمال شده و نتایج بررسی می شود.

الف) کنترل کننده تناسبی-انترگالی با بهره های ثابت که یکی از مرسوم ترین کنترل کننده های مورد استفاده در فرآیندهای صنعتی است.

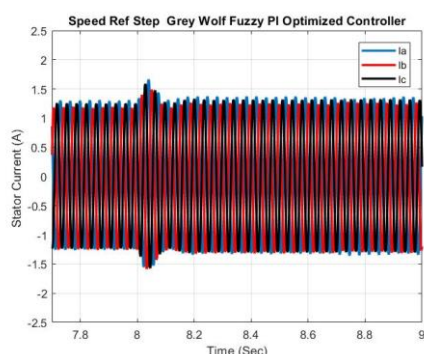




شکل (۵): جریان‌های سه فاز به هنگام پله سرعت مرجع (کنترلگر الف)



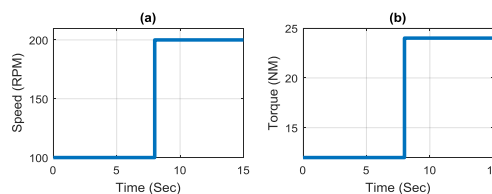
شکل (۶): جریان‌های سه فاز به هنگام پله سرعت مرجع (کنترلگر ب)



شکل (۷): جریان‌های سه فاز به هنگام پله سرعت مرجع (کنترلگر پ)

## ۵-۱-۲- تحلیل رفتار مدل و کنترل کننده‌ها در برابر تغییرات گشتاور بار

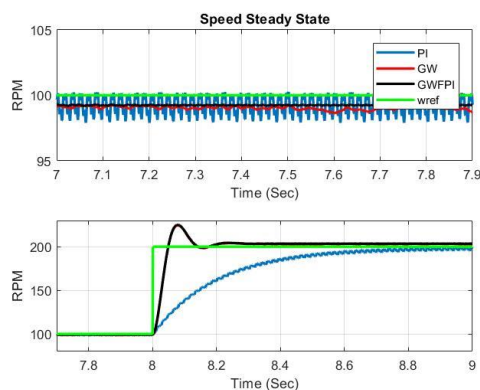
برای تحلیل رفتار سیستم در برابر تغییرات گشتاور بار، سرعت مرجع موتور ثابت نگه داشته می‌شود. سپس گشتاور بار در ثانیه ۸ ام شبیه سازی دو برابر می‌شود. شکل ۸ نوسانات سرعت را که ناشی از تغییرات گشتاور در دور ثابت است برای هر سه کنترل کننده نشان می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که نوسانات سرعت در حالت ماندگار برای کنترل کننده پ کمینه است و بعد از آن کنترل کننده ب رپیل کمتری را ایجاد می‌کند. بنابراین واضح است که از لحاظ نوسانات سرعت موتور در حالت ماندگار و دفع اغتشاش بار، کنترل کننده ب، بهترین عملکرد را در میان سه کنترل کننده شبیه سازی شده، دارد. البته به لحاظ فراجش و سایر مشخصات پاسخ زمانی، دو کنترل کننده ب و پ رفتار مشابهی دارند و نمودار سرعت آنها برهم منطبق است.



شکل (۳): تغییرات پله‌ای سیگنال‌های مرجع (a) سرعت و (b) گشتاور

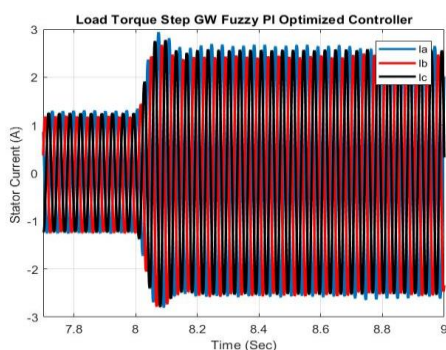
## ۵-۱-۱- تحلیل و مقایسه رفتار مدل و کنترل کننده‌ها در برابر تغییرات سرعت مرجع

برای تحلیل رفتار سیستم در برابر تغییرات سرعت مرجع، گشتاور بار ثابت نگه داشته می‌شود. سپس سرعت در ثانیه ۸ ام شبیه سازی از ۱۰۰ به ۲۰۰ دور بر دقیقه تغییر می‌کند. شکل ۴ سرعت مرجع و نوسانات سرعت را که ناشی از تغییر سرعت مرجع در گشتاور بار ثابت است برای هر سه روش کنترلی را نشان می‌دهد. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که نوسانات سرعت در حالت ماندگار برای کنترل کننده ب و پ کمتر است. در میان دو کنترل کننده ب و پ، پ به نوسانات کمتری منتج شده است. بنابراین واضح است که از لحاظ نوسانات سرعت موتور در حالت ماندگار و سرعت ردیابی تغییر سرعت، کنترل کننده پ، عملکرد بهتری در مقایسه با الف، دارد. البته به لحاظ فراجش و سایر مشخصات پاسخ زمانی، دو کنترل کننده ب و پ رفتار مشابهی دارند و نمودار سرعت آنها برهم منطبق است.



شکل (۴): سرعت مرجع و نوسانات سرعت موتور بر اثر تغییرات سرعت مرجع در گشتاور بار ثابت (هر سه کنترل کننده)

شکل های ۵، ۶ و ۷ جریان‌های سه فاز موتور را به صورت معادل با شکل ۴ برای هر سه کنترل کننده، نمایش می‌دهند. مقایسه شکل-های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که کدام یک از دو کنترل کننده، برای پاسخ به تغییرات سرعت مرجع، اعوجاج جریانی کمتری ایجاد کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اعوجاج جریانی با استفاده از کنترل کننده ب در پاسخ به تغییرات سرعت مرجع موتور، کمتر است. این کنترل کننده از لحاظ نوسانات سرعت موتور در حالت ماندگار و سرعت ردیابی تغییرات، نیز رفتار مناسب‌تری دارد.



شکل (۱۱): جریان‌های سه فاز موتور به هنگام تغییرات گشتاور بار (کنترل کننده پ)

در جدول ۲، سه کنترل کننده الف، ب و پ براساس معیارهای کنترلی و به صورت عددی مورد مقایسه قرار گرفته اند.

جدول (۲): مقایسه عملکرد براساس معیارهای کنترلی

روش کنترلی	درصد فراجش	IAE	ISE	ITAE
الف	۱۵	۶/۱	۲۲/۴۶	۶/۷
ب	۷	۱/۷	۱/۸	۱/۸
پ	۶/۹	۱/۶۵	۱/۷	۱/۶۷

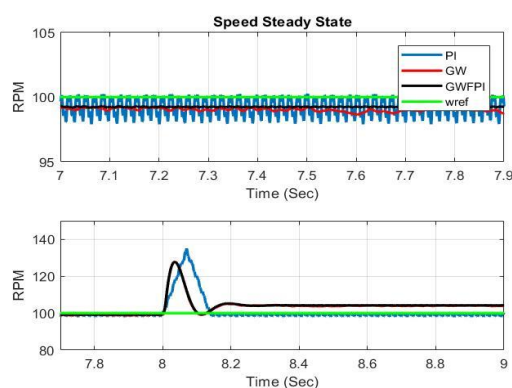
با توجه به شبیه سازی در اعمال پله سرعت مرجع در گشتاور بار ثابت و اعمال پله گشتاور بار در دور مرجع ثابت، موارد زیر نتیجه گیری می شود.

- رفتار کنترل کننده ب و پ در ردیابی سرعت مرجع مشابه و سریع تر از کنترل کننده الف است.
- رفتار کنترل کننده ب و پ در دفع اغتشاش ناشی از تغییرات گشتاور بار مشابه و سریع تر از کنترل کننده الف است.
- در مقایسه سه کنترل کننده از لحاظ رپل سرعت موتور در حالت ماندگار، کنترل کننده پ کمترین و کنترل کننده الف بیشترین رپل را ایجاد می کند.
- در مقایسه سه کنترل کننده از لحاظ اعوجاج جریان های سه فاز موتور در ردیابی سرعت مرجع و دفع اغتشاش بار، کنترل کننده پ کمترین و کنترل کننده ب بیشترین اعوجاج جریانی را ایجاد می کند.

## ۵-۲- بررسی عملکرد سیستم (مرحله ۲: شبیه سازی

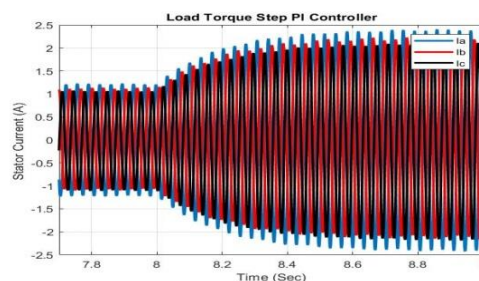
### سیستم و تحلیل رفتار سیستم در شرایط بروز خطا)

در این بخش رفتار سیستم در شرایط بروز خطا بررسی و تحلیل می شود. در ابتدا روش های شبیه سازی خطا، مطرح و بررسی می شود. در این بخش خطاهای قطع یک کلید، اتصال کوتاه یک کلید و خطای قطع تک فاز مورد بررسی قرار می گیرند.

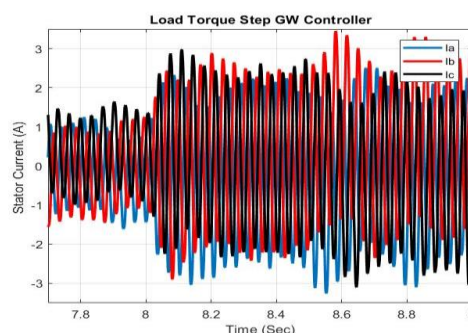


شکل (۸): سرعت مرجع و نوسانات سرعت موتور بر اثر تغییرات گشتاور بار در سرعت ثابت برای هر سه کنترل کننده

شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ جریان های سه فاز موتور را به صورت معادل با شکل ۸ نمایش می دهند. مقایسه این شکل ها نشان می دهد که کدام یک از سه کنترل کننده، برای پاسخ به تغییرات گشتاور بار، اعوجاج جریانی کمتری ایجاد کرده است. همانطور که مشاهده می شود، اعوجاج جریانی با استفاده از کنترل کننده پ در پاسخ به تغییرات گشتاور بار، کمتر است. این کنترل کننده از لحاظ نوسانات سرعت موتور در حالت ماندگار و سرعت ردیابی تغییرات، نیز رفتار مناسب تری دارد.



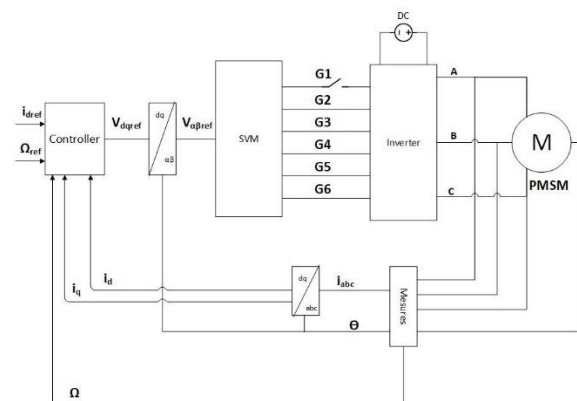
شکل (۹): جریان های سه فاز موتور به هنگام تغییرات گشتاور بار (کنترل کننده الف)



شکل (۱۰): جریان های سه فاز موتور به هنگام تغییرات گشتاور بار (کنترل کننده ب)

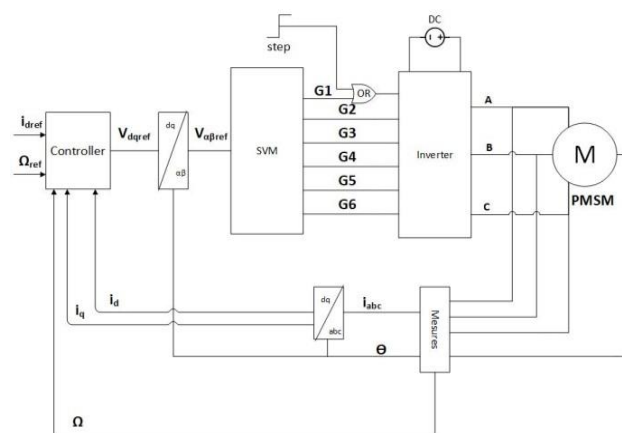
## ۵-۲-۱- شبیه‌سازی شرایط خطا

برای شبیه‌سازی خطای قطع یا Open Circuit شدن یکی از کلید-ها، باید پالس اعمالی به آن صفر شود. شکل ۱۲، نمای کامل سیستم برای خطای قطع کلید را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): بلوک دیاگرام کامل سیستم برای رویداد خطای قطع یک کلید

همچنین برای شبیه‌سازی خطای اتصال کوتاه شدن یک کلید، باید برای چند سیکل پالس اعمالی به آن یک باشد. شکل ۱۳، نمای کامل سیستم برای خطای اتصال کوتاه شدن یک کلید را نشان می‌دهد.

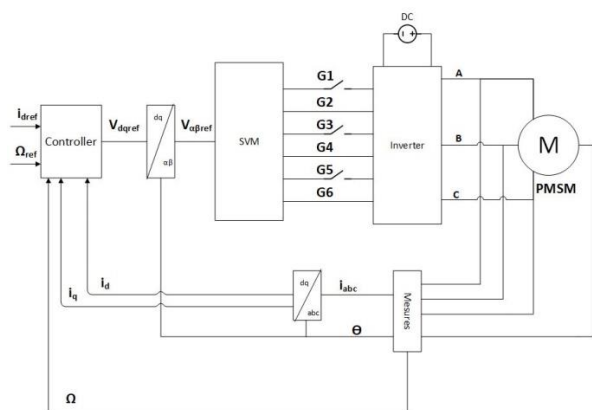


شکل (۱۳): بلوک دیاگرام کامل سیستم برای رویداد خطای اتصال کوتاه شدن یک کلید

برای شبیه‌سازی خطای قطع تک‌فاز باید جریان یکی از فازهای A، B یا C که از اینورتر به موتور منتقل می‌شود، صفر گردد. برای صفر کردن جریان یکی از فازها باید سه عدد از کلیدها به صورت همزمان قطع باشند. نحوه اجرا و شبیه‌سازی این خطا در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

## ۵-۲-۲- تحلیل عملکرد سیستم در شرایط بروز خطا

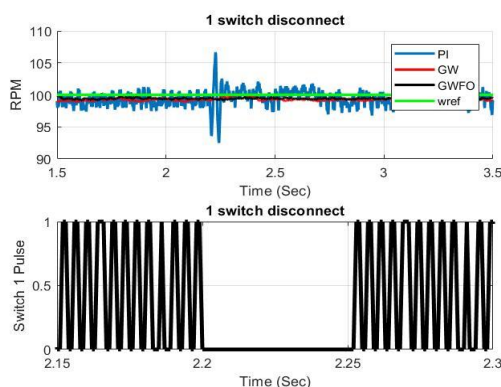
در این بخش رفتار سه کنترل‌کننده در شرایط بروز خطا، بررسی و مقایسه می‌شود.



شکل (۱۴): بلوک دیاگرام کامل سیستم برای رویداد خطای قطع تک‌فاز

## ۵-۲-۲-۱- خطای قطع یک کلید

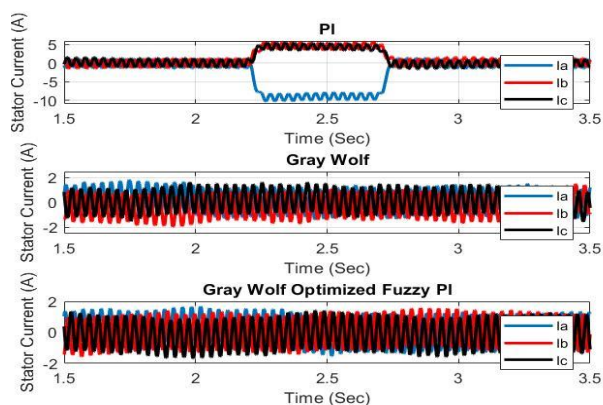
در شبیه‌سازی صورت گرفته، خطای قطع یک کلید در بازه زمانی ۲/۲ تا ۲/۲۵ ثانیه اتفاق افتاده است. شکل ۱۵ نمودار سرعت و پالس-های کلیدی را که قطع شده است، نشان می‌دهد. رفتار کنترل‌کننده‌ها در تنظیم سرعت موتور نیز در همین شکل نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار هر سه کنترل‌کننده در کنترل سرعت مشابه است با این تفاوت که کنترل‌کننده پ در هنگام خطا و پس از بروز خطا نسبت به کنترل‌کننده الف و ب نوسانات کمتری از خود نشان می‌دهد.



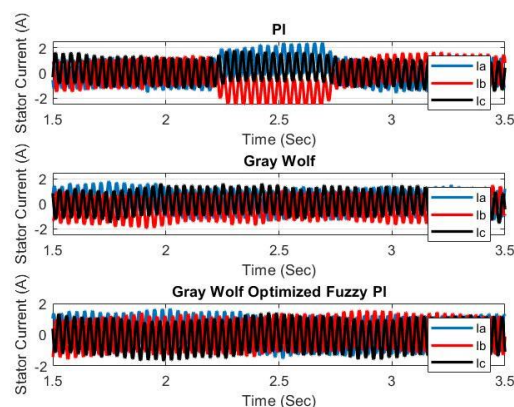
شکل (۱۵): تغییرات سرعت موتور و پالس یک کلید در شبیه‌سازی خطای قطع یک کلید

شکل ۱۶، نشان‌دهنده جریان‌های سه فاز موتور به هنگام رویداد خطای قطع یک کلید است. همانطور که مشاهده می‌شود، قطع یک کلید باعث قطع جریان فازها نشده اما نسبت به حالت متقارن سه فاز اعوجاج ایجاد می‌کند. این اعوجاج جریانی برای کنترل‌کننده پ کمتر از کنترل‌کننده الف و ب می‌باشد که علت قابلیت تطبیق بهتر آن با شرایط خطا است.





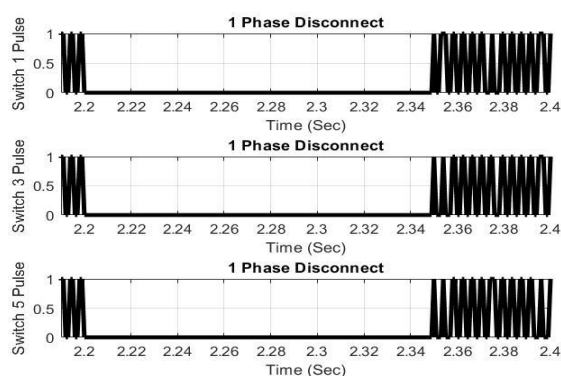
شکل (۱۸): جریان‌های سه فاز موتور برای هر سه کنترل‌کننده (خطای اتصال کوتاه یک کلید)



شکل (۱۶): جریان‌های سه فاز موتور برای هر سه کنترل‌کننده (خطای قطع یک کلید)

### ۵-۲-۳- خطای قطع تکفاز

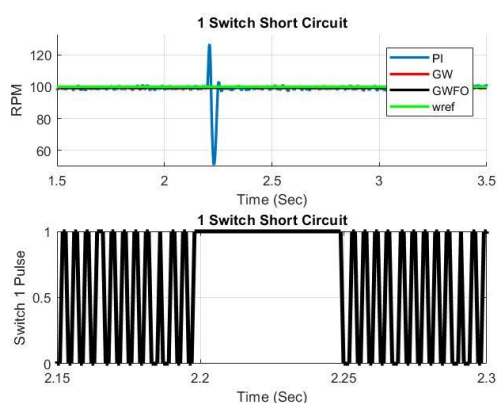
برای پیاده سازی خطای قطع تکفاز پالس کلیدهای ۱، ۳ و ۵ به هنگام ایجاد خطای قطع تکفاز به صورت شکل ۱۹، قطع می‌شود. تغییرات سرعت موتور در شرایط قطع تکفاز به صورت شکل ۲۰ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار کنترل‌کننده‌های ب و پ به هنگام بروز خطای قطع تکفاز تقریباً مشابه است اما کنترل‌کننده پ با افت سرعت کمتری نسبت به کنترل‌کننده الف و ب مواجه شده است. همچنین پیش و پس از بروز خطا نوسانات سرعت با استفاده از کنترل‌کننده پ کمینه است که در نتایج تحقیقات حریری و همکاران [۲۶] نیز به این نتایج اشاره شده است. جریان‌های سه فاز موتور برای سه کنترل‌کننده، ضمن رویداد خطای قطع تکفاز در شکل ۲۱ ترسیم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ثانیه ۲/۲ تا ۲/۳۵، جریان مشکی رنگ برابر صفر شده است که به معنی قطع تکفاز است. با استفاده از کنترل‌کننده پ جریان‌های سه فاز نیز در هنگام خطا و پس از بروز خطا اعوجاج کمتری نسبت به کنترل‌کننده الف و ب دارند. مقایسه عددی دو کنترل‌کننده‌ها در شرایط خطا به صورت جدول ۳ خواهد بود.



شکل (۱۹): صفر شدن پالس کلیدهای ۱، ۳ و ۵ به هنگام خطای قطع تکفاز

### ۵-۲-۲- خطای اتصال کوتاه یک کلید

در شبیه سازی صورت گرفته، خطای اتصال کوتاه شدن یک کلید در بازه زمانی ۲/۲ تا ۲/۲۵ ثانیه اتفاق افتاده است. شکل ۱۷ نمودار سرعت و پالس‌های کلیدی را که اتصال کوتاه شده، نشان می‌دهد. رفتار کنترل‌کننده‌ها در تنظیم سرعت موتور نیز در همین شکل نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده پ در مقایسه با کنترل‌کننده الف و ب نوسانات سرعت کمتری از خود نشان می‌دهد و عملکرد مناسب‌تری دارد. البته بدیهی است که اگر اتصال کوتاه کلید ماندگار باشد، باعث توقف سیستم خواهد شد.



شکل (۱۷): تغییرات سرعت موتور و پالس یک کلید در شبیه سازی خطای اتصال کوتاه یک کلید

شکل ۱۸، نشان‌دهنده جریان‌های سه فاز موتور به هنگام رویداد خطای اتصال کوتاه یک کلید است. همانطور که مشاهده می‌شود، اتصال کوتاه یک کلید باعث اعوجاج نسبت به حالت متقارن سه فاز جریان می‌شود. میزان اعوجاج جریان‌های سه فاز در کنترل‌کننده پ به دلیل قابلیت تطبیق بهتر با شرایط خطا کمتر از کنترل‌کننده الف و ب است.

گشتاور بار ثابت، کنترل کننده یعنی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری با بهره های متغیر که با توجه به شرایط سیستم توسط منطق فازی تعیین می شود، می باشد.

جدول (۳): مقایسه کنترل کننده ها در شرایط وقوع خطا

قطع تک فاز		اتصال کوتاه یک کلید		قطع یک کلید	
ITAE	THD	ITAE	THD	ITAE	THD
سرعت و جریان	سرعت و جریان	سرعت و جریان	سرعت و جریان	سرعت و جریان	سرعت و جریان
مرجع	مرجع	مرجع	مرجع	مرجع	مرجع
۱۳۰	۲۱/۹	۲۸۰	۴۰/۲	۱۴۰	۲۵/۱
۲۰	۱۵/۱	۳۳	۱۲/۸	۶۰	۱۲/۹
۱۹	۷/۹	۱۸	۷/۵	۵۸	۸/۴

## ۶- نتیجه گیری

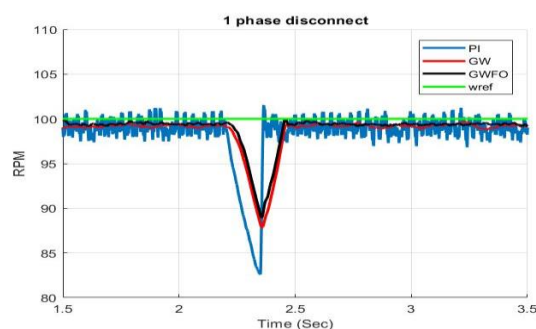
در روش پیشنهادی این مقاله، منطق فازی مورد نظر با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، بهینه شده است. در واقع در این روش از الگوریتم گرگ خاکستری در دو مرحله استفاده شده است. این الگوریتم به منظور بهینه سازی کنترل کننده فازی که انتخابگر بهره های تناسبی- انتگرالی می باشد و به منظور کنترل سرعت مورد استفاده قرار گرفت. بهره های کنترل کننده تناسبی- انتگرالی که به همراه الگوریتم گرگ خاکستری برای کنترل سرعت مورد استفاده قرار می گیرد، توسط منطق فازی برای شرایط خطا، به روز رسانی می شوند. بنابراین چندین هدف و نوآوری در الگوریتم پیشنهادی مطرح شد که به طور خلاصه به شرح زیر است.

- استفاده از منطق فازی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری جهت تعیین بهره های کنترل کننده تناسبی-انتگرالی در شرایط مختلف
- کاهش نوسانات گشتاور و جریان های سه فاز با استفاده از منطق فازی در شرایط مختلف
- بهبود ردیابی سرعت مرجع

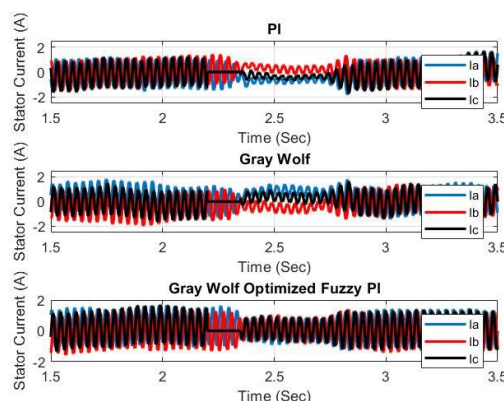
با توجه به شبیه سازی کنترل کننده ها، نتایج زیر حاصل می شود.

- در مقایسه کنترل کننده ها از لحاظ نوسانات سرعت موتور در حالت ماندگار، کنترل کننده پ نوسانات کمتری را ایجاد می کند.
- در مقایسه کنترل کننده ها از لحاظ اعوجاج جریان های سه فاز موتور در ردیابی سرعت مرجع و دفع اغتشاش بار، کنترل کننده پ اعوجاج کمتری را ایجاد می کند.

شبیه سازی سیستم در شرایط خطا با مدل کردن سه خطای اتصال کوتاه یک کلید اینورتر، اتصال باز یا قطع شدن یک کلید اینورتر و



شکل (۲۰): تغییرات سرعت موتور در شرایط قطع تک فاز



شکل (۲۱): جریان های سه فاز موتور برای هر سه کنترل کننده (خطای قطع تک فاز)

با توجه به شبیه سازی های انجام شده در شرایط خطا برای سه کنترل کننده الف، ب و پ نتایج زیر حاصل می شود.

- کنترل کننده های ب و پ در مقابل انحراف سرعت، به صورت مقاوم عمل کرده و مانع از تغییرات محسوس سرعت موتور می شوند. اما کنترل کننده الف به خوبی قادر به تعامل با این تغییرات نیست و نوسانات قابل توجهی به صورت مقطعی در زمان بروز خطا در سرعت موتور ایجاد می کند. این مطلب به دلیل قابلیت انطباق این کنترل کننده ها با شرایط جدید حاکم بر سیستم به علت وقوع خطا است.
- انحراف جریان های سه فاز از حالت سه فاز متعادل در صورت استفاده از کنترل کننده پ، کمینه است. در واقع کنترل کننده پ با کمترین میزان اعوجاج جریانی، قادر به مهار وضعیت خطا تا گذر از آن است. این مطلب تا حدودی در مورد کنترل کننده ب نیز رعایت شده زیرا از الگوریتم گرگ خاکستری برای بهینه سازی بهره برده است اما کنترل کننده الف دچار نامتعادلی شدید جریانی شده است.

بنابراین مناسب ترین کنترل کننده با در نظر گرفتن شرایط خطا، اعمال پله گشتاور بار در سرعت مرجع ثابت و اعمال پله سرعت در

International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 20–22 June 2018; pp. 154–159.

[11] Guo, H., J. Xu and Y. Chen, "Robust Control of Fault Tolerant Permanent Magnet Synchronous Motor for Aerospace Application With Guaranteed Fault Switch Process", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 62(12): p.7309-7321.

[12] Lin, F., et al., "Recurrent Fuzzy Neural Cerebellar Model Articulation Network Fault Tolerant Control of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo Drive", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016. 24(1): p.153-167.

[13] Tian B., et al., "Fault-Tolerant Control of a Five Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for Industry Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4):p. 3943-3952.

[14] Lu H., et al., "Fault-Tolerant Predictive Control of Six-Phase PMSM Drives Based on Pulse Width Modulation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019. 66(7): p. 4992-5003.

[15] Wang Z., et al. "Fault Tolerant Control of NPC Three-Level Inverters-Fed Double-Stator-Winding PMSM Drives Based on Vector Space Decomposition", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017. 64(11): p. 8446-8458.

[16] Fabio Immovilli, Claudio Bianchini, "Evaluation of Reference Frame Transformation For Intermittent Fault Detection In Permanent Magnet Multiphase Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 63, Issue 3, 2014.

[17] Guo, H., J. Xu and Y. Chen, "Robust Control of Fault Tolerant Permanent Magnet Synchronous Motor for Aerospace Application With Guaranteed Fault Switch Process", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 62(12): p.7309-7321.

[18] Lin, F., et al., "Recurrent Fuzzy Neural Cerebellar Model Articulation Network Fault Tolerant Control of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo Drive", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016. 24(1): p.153-167.

[19] Wang Z., et al., "Fault-Tolerant Control of Paralleled-Voltage-Source-Inverter-Fed PMSM Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 62 (8): p.4749-4760.

[20] Kontarcek A., et al., "Cost-Effective Three-Phase PMSM Drive Tolerant to Open-Phase Fault", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 62(11): p. 6708-6718.

[21] Scarcella, G. et al., "Fault-Tolerant Capability of Deadbeat-Direct Torque and Flux Control for Three-Phase PMSM Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, 2017. 53(6): p.4596-5508.

[22] Fe. Zhou, X. et al., "Open-Phase Fault Tolerant Modeling and Optimized Fault-Tolerant Control of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE Transactions on Power Electronics, 2019. 34(11): p.11116-11127.

[23] Tian B., et al., "Fault-Tolerant Control of a Five Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for Industry Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4):p. 3943-3952.

[24] X. Wang et al., "Deadbeat Predictive Current Control Based Fault-Tolerant Scheme for Dual Three-Phase PMSM Drives," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, doi: 10.1109/JESTPE.2020.2983691.

[25] M. Blanke, W.Christian Frei, F. Kraus, J.Ron Patton, M. Staroswiecki, What is Fault-Tolerant Control?, Volume 33, Issue 11, June 2000, Pages 41-52.

قطع تکفاز انجام شد. با توجه به شبیه‌سازی های صورت گرفته در شرایط خطا برای کنترل‌کننده های مختلف نتایج زیر حاصل گردید.

- وقوع خطا باعث انحراف جریان های سه فاز از حالت سه فاز متعادل خود می‌شود.
- انحراف جریان‌های سه فاز از حالت سه فاز متعادل در صورت استفاده از کنترل‌کننده ب، کمینه است. در واقع کنترل‌کننده پ با کمترین میزان اعوجاج جریانی، قادر به مهار وضعیت خطا تا گذر از آن است.

بنابراین مناسب‌ترین کنترل‌کننده با در نظر گرفتن شرایط خطا، اعمال تغییرات گشتاور بار در سرعت مرجع ثابت و اعمال تغییرات سرعت در گشتاور بار ثابت، کنترل‌کننده پ یعنی کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری با بهره‌های متغیر که با توجه به شرایط سیستم توسط منطق فازی تعیین می‌شوند، می باشد.

## مراجع

[1]: JOUR, Thampi, Parvathy, Kiran, Chitra, "A Review on Controlling Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) and Current State of the Art in the Research Area", DO - 10.5120/cae2019652808, Communications on Applied Electronics.Research Gate, January 2019.

[۲]: علی پور جابر، درودی عارف، قاسمی نژاد مرتضی. تأثیر مشخصه های انواع مختلف افت ولتاژهای نامتقارن بر گشتاور گذرای موتور سنکرون. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۵؛ ۱۳ (۱): ۱۴۶-۱۳۵

[3] Djerioui A, et al. "Grey Wolf based control for speed ripple reduction at low speed operation of PMSM drives", ISA Transactions (2018), <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.01.012>.

[4] Yong Chen, Siyuan Liang, Wanfu Li, Hong Liang and Chengdong Wang, "Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review", Applied. Sciences. 2019, 9, 2116; doi:10.3390/app9102116.

[5] Mandra S, Galkowski K, Ascherman H. Robust guaranteed cost ILC with dynamic feedforward and disturbance compensation for accurate PMSM position control. Contr Eng Pract 2017;65(4):36-7.

[6] F. Blaabjerg, F. Iov, T. Terekes, R. Teodorescu, and K. Ma, "Power Electronics - Key Technology for Renewable Energy Systems," in 2nd Conference on power electronics, Drive system and Technologies (PEDSTC), 2011, pp. 445–466.

[7] A. Rajaei, M. Mohamadian, and A. Yazdian Varjani, "Vienna-Rectifier-Based Direct Torque Control of PMSG for Wind Energy Application," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 7, pp. 2919–2929, Jul. 2013.

[8] Z. Zhang, O. C. Thomsen, and M. A. E. Andersen, "Discontinuous PWM Modulation Strategy With Circuit-Level Decoupling Concept of Three-Level Neutral-Point-Clamped (NPC) Inverter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 5, pp. 1897–1906, May 2013.

[9] Liang, H.; Chen, Y.; Liang, S.; Wang, C. "Fault Detection of Stator Inter-Turn Short-Circuit in PMSM on Stator Current and Vibration Signal". Appl. Sci. 2018, 8, 1677.

[10] Guefack, F.L.T.; Kiselev, A.; Kuznetsov, A., "Improved Detection of Inter-turn Short Circuit Faults in PMSM Drives using Principal Component Analysis", In Proceedings of the

[۲۶] حریری علی محمد، دامکی علی آباد علی اکبر. طراحی جامع و ساخت موتور سنکرون آهن ربای دائم با هدف دستیابی به کمترین گشتاور دندانه. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۱۲۱-۱۱۳

## زیر نویس ها

---

<sup>1</sup> Permanent Magnet Synchronous Motor

<sup>2</sup> Field Oriented Control (FOC)

<sup>3</sup> Direct Torque Control (DTC)

<sup>4</sup> Fault tolerant

<sup>5</sup> Dependable