

تعیین درصد خطای سیم پیچی موتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از منطق فازی

مهران تقی پور^۱، محمد علی شمسی نژاد^۲، سید محمد رضوی^۳، محسن فرشاد^۴، ایرج فرجی^۵ و حسن قهرمانی^۶

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

mtaghipour@birjand.ac.ir

۲- استادیار، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

m_sh_80@yahoo.com

۳- استادیار، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

Razavism@yahoo.com

۴- استادیار، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

moh_farshad@yahoo.com

۵- کارشناس، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۶- کارشناس، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده: روش‌های هوشمند به صورت گسترده‌ای در تشخیص خطا در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورماتورها و به طور کلی، در تمامی قسمت‌های صنعت برق به کار می‌روند. سیستم استنتاج فازی یکی از مدرن‌ترین روش‌هایی است که برای این منظور مورد استفاده می‌شود. از آنجایی که در موارد پیچیده، به ویژه مواردی که استخراج قوانینی کارآمد، بسیار مشکل است، استفاده از استنتاج فازی غیر ممکن است. لذا در چنین مواردی سعی بر آن است که از روش‌هایی کارآمد در استخراج قوانین استفاده شود. یکی از این روش‌های مؤثر شبکه تطبیقی عصبی فازی است که به ANFIS معروف است. در این مقاله، به منظور تعیین میزان درصد خطا در سیم پیچی موتور سنکرون مغناطیس دائم از سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. این کار در دو مرحله صورت پذیرفته است: در مرحله اول، مدلی ریاضی از موتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط خطا در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شد و داده‌های مورد نیاز که عبارتند از جریان تفاضلی هر فاز و سرعت، موتور استخراج گردید. سپس در مرحله دوم، با استفاده از ویرایشگر ANFIS و داده‌های به دست آمده در مرحله اول، سیستم استنتاج فازی مورد نیاز ایجاد شد و در نهایت، از آن به صورت یک بلوک کنترلی فازی در شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش ارائه شده می‌تواند در زمانی کوتاه خطا را دنبال و میزان درصد خطا را بیان کند.

واژه‌های کلیدی: خطای سیم پیچی، سیستم تطبیقی عصبی - فازی ANFIS، منطق فازی، موتور سنکرون مغناطیس دائم.

۱- مقدمه

[۱]. به علاوه، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نسبت به موتورهای دیگر، دارای کارایی و قدرت بیشتری هستند. با توجه به کاربرد حساس این نوع موتورها، نگهداری از آنها امری ضروری به نظر می‌رسد. این در حالی است که اجتناب از خطاها در سیستم‌های مهندسی کار آسانی نیست. از دهه‌های گذشته کوشش شده است که خطاها در ابزارهای الکتریکی شناسایی شوند و بهترین واکنش در برابر آنها انجام گیرد، بنابراین، تشخیص دقیق و سریع خطا بسیار مهم به نظر می‌رسد. برای مثال، یکی از روش‌های سنتی تشخیص خطا در [۲] ارائه شده است. در مقاله مذکور، روشی مبتنی بر جریان و شار مجازی به منظور تعیین

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، از جمله ماشین‌های الکتریکی مهم با کاربردهایی خاص به شمار می‌آیند. چگالی قدرت بالای این نوع موتورها یکی از مزایای این موتورها در مقایسه با انواع ماشین‌های الکتریکی به حساب می‌آید

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۵

نام نویسنده مسؤول: مهران تقی پور

نشانی نویسنده مسؤول: ایران-بیرجند- شوکت آباد-

دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی - گروه برق و کامپیوتر

در بین خطاهای مختلفی که ممکن است در ماشین‌های الکتریکی رخ دهد، اتصال کوتاه داخلی (حلقه به حلقه) سیم‌پیچی استاتور یکی از رایج‌ترین خطاهای الکتریکی در تجهیزات الکتریکی است [۶-۹]. در [۱۰]، به منظور شناسایی خطای اتصال کوتاه داخلی (حلقه به حلقه) در موتور القایی، روش شناسایی نقطه تغییر بیز-فازی^۵ استفاده شده است. برای انجام این تحقیق در مقاله مذکور دو مرحله به کار رفته است: در مرحله اول، داده‌های اولیه به گونه‌ای به وسیله خوشه‌بندی فازی تبدیل می‌شوند که قابل تقریب‌زدن توسط توزیع بتا باشند؛ در مرحله دوم، الگوریتم متروپولیس^۶ به منظور اجرای تشخیص نقطه تغییر در سری‌های زمانی تبدیل یافته که به وسیله مرحله اول با توزیعی مشخص تولید شده، استفاده شده است. روش دیگری که بر منطق فازی استوار است و برای شناسایی خطای اتصال کوتاه داخلی (حلقه به حلقه) سیم‌پیچی استاتور در موتور القایی است، در [۱۱] ارائه شده است. نویسندگان در مقاله مذکور معتقدند؛ از آنجایی که خطای استاتور علائم واضحی در طیف جریان ندارد، لازم است که به جای روش تحلیل طیفی سنتی از دیگر روش‌ها استفاده کرد. به همین دلیل، از روش منطق فازی روی دامنه جریان فازها استفاده شده است.

در این مقاله نیز هدف تشخیص خطای سیم‌پیچی موتور سنکرون مغناطیس دائم و تعیین میزان درصد آن است. این کار در دو مرحله صورت پذیرفته است: در مرحله اول، مدلی ریاضی از موتور سنکرون مغناطیس دائم تحت شرایط خطا در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شد و داده‌های مورد نیاز که عبارتند از جریان تفاضلی هر فاز و سرعت موتور، استخراج گردید. سپس در مرحله دوم، با استفاده از ویرایشگر ANFIS و داده‌های به دست آمده، سیستم استنتاج فازی مورد نیاز ایجاد شد و در نهایت به صورت یک بلوک کنترلی فازی در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش ارائه شده می‌تواند در زمانی کوتاه خطا را دنبال و میزان درصد خطا بدرستی را بیان کند.

در ادامه این مقاله، در بخش بعدی مبانی اصلی سیستم تطبیقی فازی-عصبی ANFIS بیان خواهد شد. پس از آن

خطاهای روتور در موتور سه فاز القایی استفاده شده است. برای پیاده‌سازی روش ارائه شده، از طیف توانی توان لحظه‌ای استفاده شده است، و همچنین، دو سیستم متداول در این زمینه به این منظور تطبیق یافته‌اند: مورد اولی سیستمی است که تنها از مؤلفه‌های آنالوگ استفاده می‌کند، و دومی DSPIC است که داده‌ها را به داده‌های قابل استفاده در رایانه تبدیل می‌کند.

شایان ذکر است که این روش‌های سنتی به اندازه کافی انعطاف پذیر نبوده، اغلب هزینه محاسباتی بالایی دارند. لذا امروزه، روش‌های هوشمند به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شوند و با اینکه از لحاظ ساختاری ساده‌اند، اما نتایج نسبتاً دقیقی ارائه می‌دهند. برای مثال، در [۳]، از طبقه‌بندی کننده‌ای که مبتنی بر شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLPNN)^۱ بهینه است، برای تعیین شرایط کاری مختلف موتور القایی سه فاز استفاده شده است. این شرایط عبارتند از: اتصال کوتاه داخلی (حلقه به حلقه) سیم‌پیچی استاتور^۲، گریز از مرکز دینامیکی روتور و یا هر دو باهم. همچنین، از پارامترهای آماری به عنوان فضای ویژگی ورودی استفاده می‌شود و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)^۳ برای کاهش ابعاد ورودی استفاده شده است. همچنین، در [۴]، یک الگوریتم ANN ساده برای شناسایی خطای استاتور در موتور القایی استفاده شده است. در این مقاله، مدلی ریاضی از ماشین القایی برای شبیه سازی عملکردهای موتور تحت شرایط مختلف خطا طراحی و برای تنظیم داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی استفاده شده است. روشی مبتنی بر منطق فازی برای شناسایی خطا در ترانسفورماتورهای قدرت عایق شده با روغن^۴ در [۵] ارائه شده است. روش ارائه شده از گازهای کلیدی، همچون: هیدروژن، مونواکسید کربن، متان، اتان، اتیلن، استیلن و برخی شاخص‌های دیگر استفاده می‌کند. می‌توان این گونه گفت که این شاخص‌ها به عنوان ورودی منطق فازی در نظر گرفته شده‌اند. البته، گاهی اوقات استخراج قوانین مؤثر سخت و دشوار است. به همین علت، ضرورت وجود ابزاری هوشمند برای ایجاد قوانینی دقیق احساس می‌شود. یکی از قدرتمندترین ابزارهای موجود برای این منظور شبکه عصبی مصنوعی است.

آنچه در طراحی هر سیستم فازی دارای اهمیت است، استخراج قوانینی کارآمد و همچنین تنظیم دقیق توابع عضویت است که می‌تواند تأثیر بسزایی در جواب داشته باشد. این فرآیند معمولاً در مسائل ساده به صورت سعی و خطا صورت می‌پذیرد، اما در مسائل پیچیده که انجام این کار بسیار دشوار است، به ابزاری نیاز است که بتواند با استفاده از الگو‌هایی مناسب این کار را انجام دهد. ویرایشگر ANFIS در نرم افزار MATLAB می‌تواند این امکان را بدهد که سیستم فازی دقیقی برای حل یک مسئله مهندسی در اختیار کارشناس قرار گیرد.

این سیستم در اصل ساختاری عصبی است؛ یعنی ویرایشگر ANFIS یک شبکه عصبی مصنوعی پنج لایه است که با کمک گرفتن از روش های رایج برای آموزش شبکه عصبی کار می‌کند و آنچه در انتها در اختیار کاربر قرار می‌دهد، یک سیستم فازی مناسب است [۱۳].

همان طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، در این نوع سیستم از دو نوع گره استفاده می‌شود:

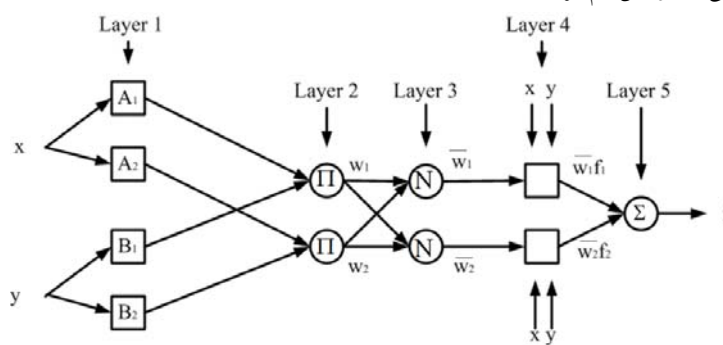
مربعی (سازگار): در این گره می‌توان از توابع عضویت مانند مثلثی، دوزنقه ای، گوسین و غیره بهره برد. دایره ای (ثابت): در این نوع گره ها می‌توان از توابع ریاضی و منطقی مانند؛ ضرب، تقسیم، AND، OR و غیره استفاده کرد.

در بخش سوم، مختصری در مورد موتور سنکرون مغناطیس دائم مطرح می‌شود. سپس در بخش چهارم طراحی مدل موتور تحت شرایط خطای سیم پیچی استاتور و کاربرد ANFIS در پژوهش صورت گرفته ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده نیز در بخش پنجم ارائه می‌شوند و در نهایت در بخش ششم نتیجه گیری بیان می‌شود.

۲- شبکه تطبیقی عصبی-فازی ANFIS

در تمامی مباحث علمی و محاورات روزانه گوینده مقداری جای خلاصی باقی می‌گذارد تا اثر نتیجه‌گیری نادرست، دخالت عوامل اغتشاش و همچنین حضور عوامل مؤثری را که اختیار آن از دست وی خارج است، در نظر بگیرد. این مسأله از تفاوت درک انسان از محیط و حقیقت واقعی اشیا نشأت می‌گیرد. فازی، حوزه‌ای است که این دو مقوله را با بیانات، روابط و توابع ریاضی به هم مرتبط می‌سازد.

یک سیستم فازی شامل چند قسمت اصلی است که لازم است برای استفاده در کاربرد تنظیم شوند، همانند: توابع عضویت ورودی و خروجی، عملگرهای قوانین اگر-آنگاه و غیره [۱۲]. از توابع عضویتی که به صورت متداول در سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شوند، می‌توان از تابع عضویت دوزنقه ای، مثلثی و گوسین نام برد.



شکل (۱): ساختار سیستم تطبیقی فازی-عصبی ANFIS

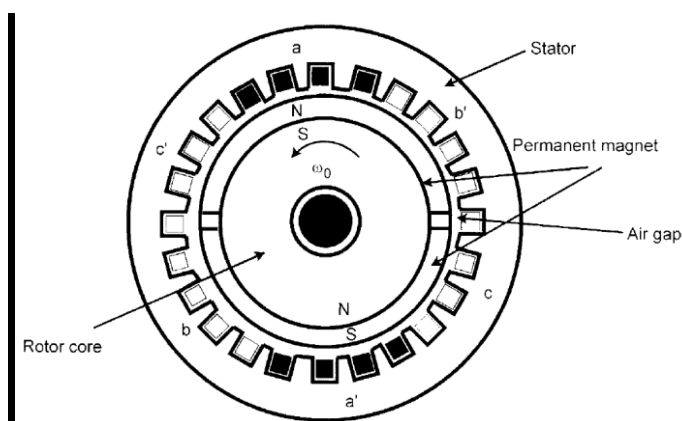
۳- موتور سنکرون مغناطیس دائم

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از جمله ماشین‌های الکتریکی مهم در قسمت‌های مختلف صنعت برق به شمار می‌آیند. میدان مغناطیسی رتور این ماشین الکتریکی به

نکته آخر که می‌توان در مورد این سیستم گفت آن است که ANFIS در نرم افزار مطلب بر اساس فازی نوع سوگنو^۷ کار می‌کند.

PMSM^۱ را فهرست کرده است. با وجود این، کاربرد موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با توان بالا، گسترده نیست و این امر به قابلیت استفاده از مواد مغناطیس دائم، هزینه و قابلیت ساخت این مواد برمی‌گردد. با توجه به طراحی رتور، قطب‌های PMSM می‌توانند به صورت صاف و یا برجسته طراحی شوند. موتورهای با قطب صاف، یک رتور استوانه‌ای (سیلندری) دارند و در نتیجه فاصله هوایی یکنواختی خواهند داشت. موتورهای با قطب برجسته دارای فاصله هوایی متغیری هستند. مدلی از یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با دو قطب در شکل (۲) نمایش داده شده است [۱۴].

وسيله يك آهنربای دائم ایجاد می‌شود. از آنجایی که کنترل گشتاور خروجی به وسیله تغییر جریان استاتور میسر است، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم برای کاربردهای صنعتی مطلوب است. چگالی قدرت بالای این موتورها که به صورت توان خروجی در یک واحد وزن (توان/ وزن) تعریف می‌شود، یکی از مزایای این موتورها در مقایسه با انواع ماشین‌های الکتریکی است. یک موتور با چگالی قدرت بالاتر دارای طراحی مطلوبتر و فشرده‌تری است. به علاوه، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نسبت به موتورهای دیگر، دارای کارایی و قدرت بیشتری هستند. برای مثال، ناو جنگی US در بین بهترین موتورها برای کشتی نظامی که براساس سیستم‌های متحرکه کار می‌کند،



شکل (۲): مدلی از یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با دو قطب [۱۴]

از اهمیت بالایی برخوردار است. در طراحی قدرتمند یک سیستم تشخیص عیب‌یابی و خطا، گام اول، استخراج دانشی مناسب از طریق ارثه یک مدل سازگار است که بتواند رفتار سیستم را به طور کامل شبیه‌سازی کند. مدل طراحی شده می‌تواند کمی و یا کیفی باشد. مدل‌های کمی دارای پیچیدگی محاسباتی هستند، ولی در عوض از دقت بالایی برخوردارند، درحالی که مدل‌های کیفی دقت و پیچیدگی و حجم محاسبات کمتری دارند.

مدلی که یک سازش خوب بین پیچیدگی محاسبات و دقت مدل را فراهم کند و برای هر دو حالت بدون خطا و حالت خطا قابل تغییر باشد، قابل ترجیح است. برای مدل کردن سیستم تحلیل کامل رفتار سیستم مورد نیاز است. با

۴- شبیه سازی

۴-۱- مدل موتور سنکرون مغناطیس دائم تحت

شرایط خطای سیم پیچی

اجتناب از خطاها در سیستم‌های مهندسی کار آسانی نیست. این در حالی است که بروز خطا می‌تواند پیامدهای خطرناکی در پی داشته باشد. عیب‌یابی و تشخیص مؤثر خطا می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد و از نگهداری و تعمیرات پرهزینه جلوگیری کند. تشخیص خطا و عیب‌یابی در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به خاطر کاربردهای حساسی که در ناوهای جنگی و هوافضا دارند،

با توجه به روابط ریاضی حاکم بر موتور سنکرون مغناطیس دائم که می توان آنها را در [۱] یافت، مدل موتور تحت شرایط عادی و خطا با توجه به پارامترهای موجود در جدول (۱) طراحی گردید.

استفاده از این تحلیل، اطلاعاتی درباره علائم خطا به دست می آید که این علائم به انتخاب مناسبترین روش های تشخیص و عیب یابی خطا کمک می کند. پس از تشخیص خطا، اطلاعات بیشتری برای نگهداری و تعمیرات و یا دیگر سطوح بالاتر کنترل، لازم است. در نتیجه، عیب یابی خطا برای به دست آوردن این اطلاعات انجام می شود.

جدول(۱): پارامترهای طراحی و شبیه سازی موتور PMSM در نرم افزار مطلب

پارامتر	مقدار
منبع ولتاژ	۵۶۰ ولت
اندوکتانس هر سیم پیچی سالم (L)	۱/۱۸۲ میلی هانری (mH)
اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچی سالم (M)	۰/۱۳۶ میلی هانری (mH)
مقاومت هر سیم پیچی سالم (r)	۰/۰۱۶ اهم (Ω)
ممان اینرسی (گشتاور لختی)	۰/۰۱ (kg.m ²)
ضریب بار	۰/۱ (f×ω)

فرض صرفنظر کردن از تغییرات اندوکتانس متقابل، رابطه (۱) را خواهیم داشت.

$$M_a \cong M \quad (1)$$

اگر دور N_f از کل دور N در سیم پیچ فاز a اتصال کوتاه شود، در سیم پیچ فاز a بوسیله مقاومت R اتصال کوتاه مدل می شود، که در آن صورت متغیر X به صورت رابطه (۲) تعریف می شود.

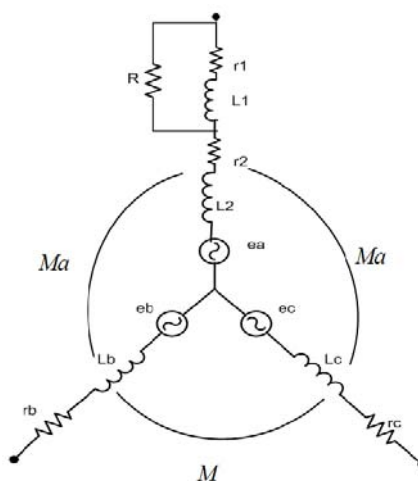
$$X = \frac{N_f}{N} \quad (2)$$

مقاومت و اندوکتانس مطابق رابطه (۳) با تعداد دور مرتبطاند.

$$\begin{cases} R = \rho \frac{l}{A} & \Rightarrow R \propto N \\ L = \frac{N^2}{R_m} & \Rightarrow L \propto N^2 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A سطح مقطع سیم پیچ، ρ مقاومت مخصوص سیم پیچ، l طول سیم پیچ، N تعداد دور سیم پیچ و R_m رلوکتانس مغناطیسی مسیر مغناطیسی است. با توجه به رابطه (۳) مقاومت با طول رابطه مستقیم دارد و با تعداد دور متناسب است. اندوکتانس با مجذور دور رابطه مستقیم دارد.

برای مدل سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم از مدل abc، و از روابط سه فاز استفاده شده است. اثر خطا با اعمال خطا در سیم پیچی فاز a مدل شده است. این وضعیت در شکل (۳) نشان داده شده است. در این حالت مقاومت و اندوکتانس فاز a و همچنین اندوکتانس متقابل بین فازهای a و b و فازهای a و c تغییر می کند.



شکل (۳): شمای کلی از خطای سیم پیچی در فاز a

با توجه به شکل (۳)، درصدی از سیم پیچ فاز a اتصال کوتاه شده است. مقاومت اتصال کوتاه برابر R است. با

$$r_a = \frac{R^2 X r + R X^2 r^2 + w^2 R X^4 L^2}{(R + X r)^2 + (w X^2 L^2)} \quad (11)$$

$$+ (1 - X) \times r$$

$$L_a = \frac{R^2 X^2 L}{(R + X r)^2 + (w X^2 L^2)^2} \quad (12)$$

$$+ (1 - X)^2 \times L$$

طبق معادلات بالا، جریان‌های سه فاز محاسبه می‌شوند.

با به دست آمدن پارامترهای جدید، می‌توان مدل را شبیه‌سازی کرد. اگر در مدل abc به دست آمده، به جای مقاومت و اندوکتانس جدید، مقادیر نامی مقاومت و اندوکتانس فاز a قرار داده شوند، مدل خطا به مدل موتور سالم تبدیل خواهد شد، در نتیجه می‌توانیم از مدل خطا برای دو حالت سالم و خطا استفاده کنیم که هدف مطلوب ما نیز همین است. پس از مدل سازی سیستم، باید علائم خطاها بررسی شوند. برای این منظور باید، ابتدا ماهیت خطاها را بررسی کنیم. خطاها با توجه به سختی و شدت به دو نوع خطاهای سخت و نرم تقسیم بندی می‌شوند. خطاهای سخت مثل خطاهای سیم پیچی نسبتاً بزرگ، باعث تغییر پله‌ای در پارامترهای سیستم می‌شوند. خطاهای نرم که به خطاهای مرحله ابتدایی معروفند، باعث تغییرات آهسته پارامترهای سیستم می‌شوند، مثل یک خطای سیم پیچی کوچک که به علت حرارت ایجاد شده، به آهستگی گسترش می‌یابد.

۴-۲- منطق فازی و تشخیص درصد خطای سیم

پیچی

مدل سه فاز موتور سنکرون مغناطیس دائم با توجه به روابطی که تاکنون در مورد این موتور در بخش‌های قبلی ذکر شد، در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شد. سپس داده‌ها یا به عبارتی الگوهای مورد نیاز برای آموزش ANFIS با اجرای شبیه سازی در درصد خطاهای مختلف استخراج شوند. این داده‌ها عبارتند از: مقدار مؤثر

بنابراین، مقاومت و اندوکتانس در طول اتصال کوتاه شده مطابق معادلات (۴) تا (۷) به دست می‌آیند.

$$r_1 = X \times r \quad \text{و} \quad r_2 = (1 - X) \times r \quad (4)$$

$$\frac{L_1}{L} = \frac{\frac{N_f^2}{R_m}}{\frac{N^2}{R_m}} = \frac{N_f^2}{N^2} = X^2 \Rightarrow L_1 = X^2 \times L \quad (5)$$

$$\frac{L_2}{L} = \frac{\frac{(N - N_f)^2}{R_m}}{\frac{N^2}{R_m}} = \frac{(N - N_f)^2}{N^2} \quad (6)$$

$$= (1 - X)^2 \Rightarrow L_2 = (1 - X)^2 \times L$$

$$M = \frac{N_1 \times N_2}{R_m} = \frac{X \times (1 - X) \times N^2}{R_m} \quad (7)$$

$$= X \times (1 - X) \times L$$

در روابط (۴) تا (۷) متغیر X درصد اتصال کوتاه توسط مقاومت R است، بنابراین، روابط نهایی مقاومت و اندوکتانس معادل فاز a، طبق معادلات (۸) تا (۱۰) به دست می‌آیند.

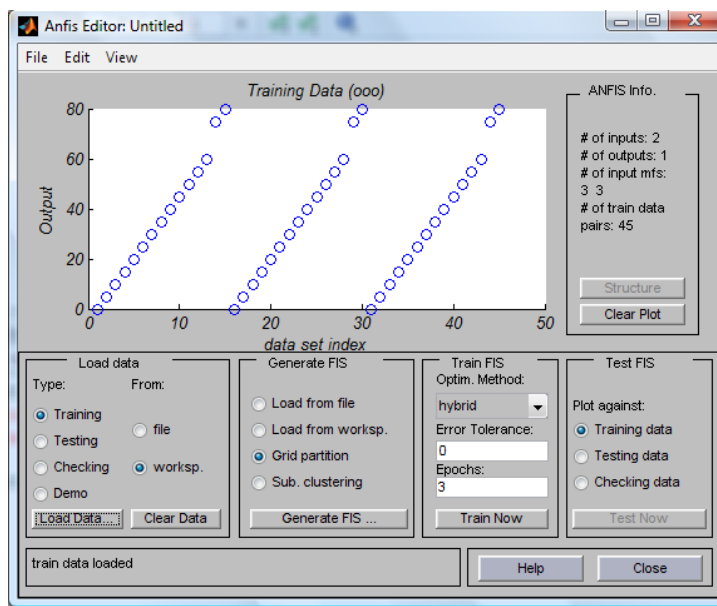
$$\begin{cases} R'_1 = r_1 + R \\ L'_1 = L_1 + M \\ L'_2 = L_2 + M \end{cases} \quad (8)$$

$$r'_a = \frac{r'_1 \times (R r_1 + w^2 L'_1 M) + w^2 L_1 \times (L'_1 R - r_1 M)}{(r'_1)^2 + (w L_1)^2} + r_2 \quad (9)$$

$$L'_a = \frac{r'_1 \times (L'_1 R - r_1 M) - L_1 \times (R r_1 + w^2 L'_1 M)}{(r'_1)^2 + (w L_1)^2} + L'_2 \quad (10)$$

در ضمن، در روابط بالا به علت پیچیده شدن روابط از اثر تزویج بین سیم پیچ اتصال کوتاه شده با سیم پیچ اتصال کوتاه نشده و فازهای دیگر صرف نظر و روابط به صورت زیر ساده شده است:

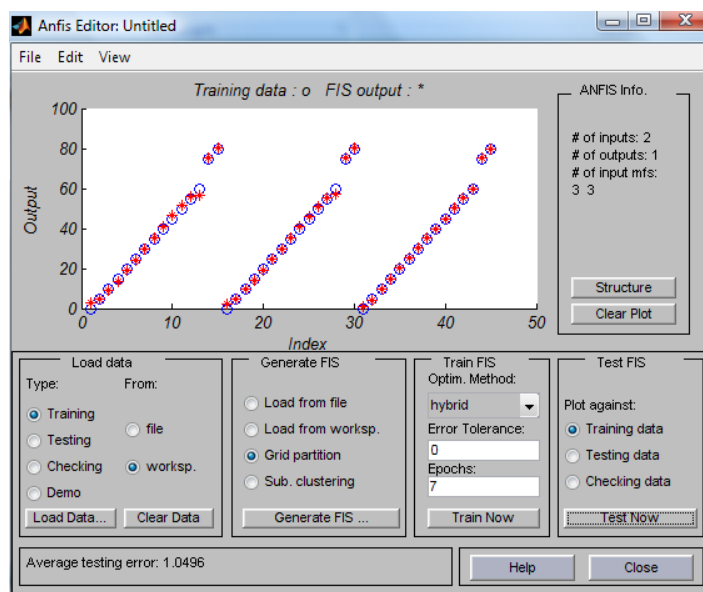
جریان تفاضلی و سرعت. داده‌های استخراج شده مطابق شکل (۴) در ویرایشگر ANFIS بارگذاری شده اند.



شکل (۴) : ویرایشگر ANFIS

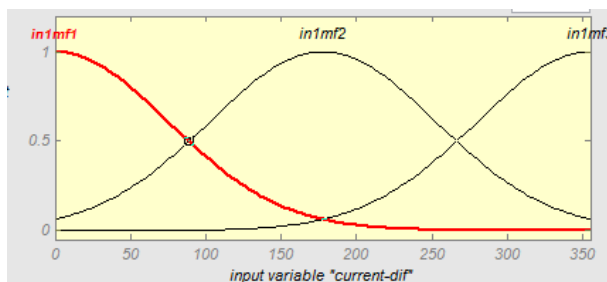
استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی سیستم فازی طراحی شده، همان طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، سیستم طراحی شده با داده های آموزشی، آزمایش شد.

در این مرحله برای تولید فایل fis از تابع عضویت گوسین "gaussmf" برای توابع عضویت ورودی استفاده شده است و خروجی نیز به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. برای آموزش از روش hybrid با خطای صفر fis

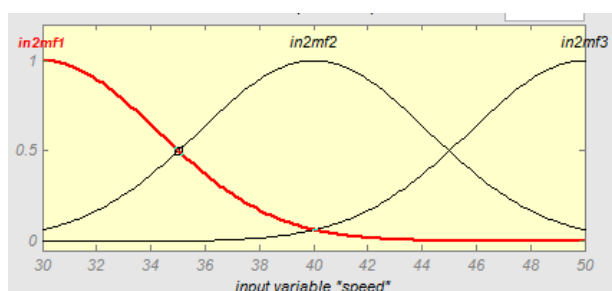


شکل (۵) : عملکرد سیستم فازی طراحی شده در قبال داده های آموزشی

توابع عضویت ورودی‌ها که به صورت گوسی انتخاب شده‌اند، به صورت اشکال (۶) و (۷) هستند.



شکل (۶): تابع عضویت جریان تفاضلی



شکل (۷): تابع عضویت سرعت

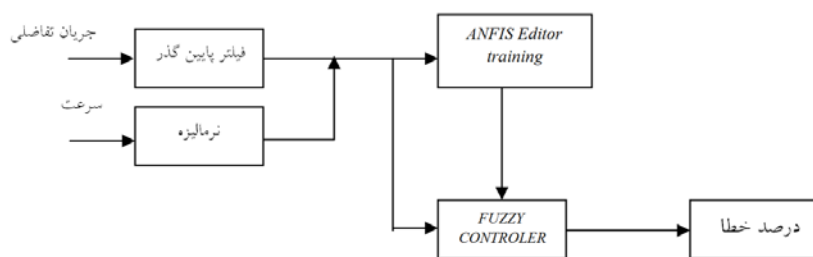
همان طور که در ذیل دیده می‌شود، عملگر به کار رفته

در قوانین از نوع and بوده و خروجی نیز به صورت یک تابع خطی تعریف شده است.

- Rule 1:** If (current-dif is in1mf1) and (speed is in2mf1) then (percent-of-fault is out1mf1)
Rule 2: If (current-dif is in1mf1) and (speed is in2mf2) then (percent-of-fault is out1mf2)
Rule 3: If (current-dif is in1mf1) and (speed is in2mf3) then (percent-of-fault is out1mf3)
Rule 4: If (current-dif is in1mf2) and (speed is in2mf1) then (percent-of-fault is out1mf4)
Rule 5: If (current-dif is in1mf2) and (speed is in2mf2) then (percent-of-fault is out1mf5)
Rule 6: If (current-dif is in1mf2) and (speed is in2mf3) then (percent-of-fault is out1mf6)
Rule 7: If (current-dif is in1mf3) and (speed is in2mf1) then (percent-of-fault is out1mf7)
Rule 8: If (current-dif is in1mf3) and (speed is in2mf2) then (percent-of-fault is out1mf8)
Rule 9: If (current-dif is in1mf3) and (speed is in2mf3) then (percent-of-fault is out1mf9)

می‌خواند، استفاده شده است. در شکل (۸)، نحوه پیاده سازی سیستم فازی طراحی شده در سیمولینک نشان داده شده است.

پس از آموزش و ذخیره سازی فایل fis از این فایل در سیمولینک استفاده شده است. برای این منظور، از بلوک fuzzy controller که اطلاعات فایل fis را از workspace

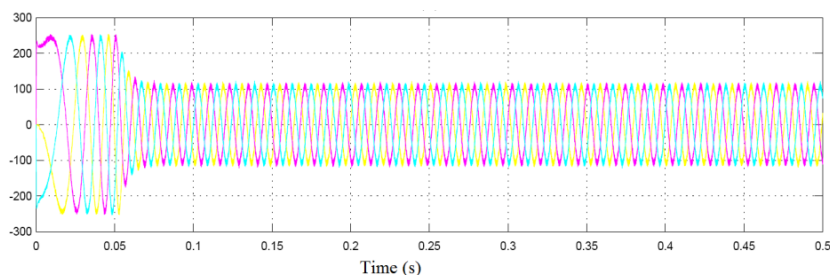


شکل (۸): بلوک دیاگرام تعیین درصد خطای سیم پیچی

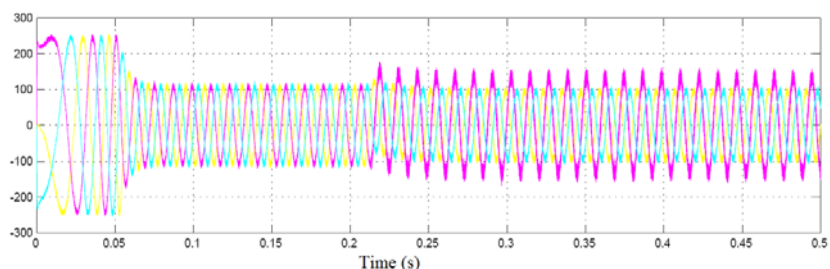
شرایط نرمال مشاهده می شود و در شکل (۱۰) جریان سه فاز تحت خطای سیم پیچی رخ داده در زمان ۰,۲۲ ثانیه در فاز a نمایش داده شده است. همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، جریان فاز معیوب افزایش یافته است.

۵- نتایج شبیه سازی و بحث در مورد نتایج

همان طور که اشاره شد، در این مقاله شبیه سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم براساس روابط ریاضی حاکم بر این موتور محقق شده است. در شکل (۹) جریان سه فاز در



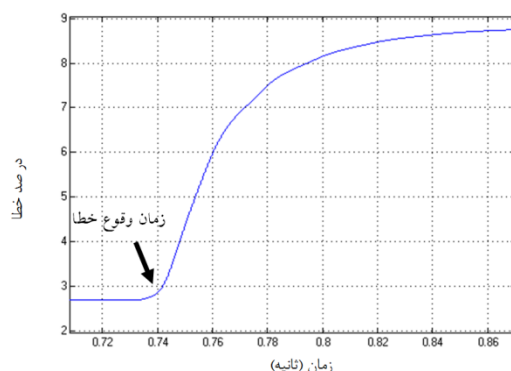
شکل (۹): جریان سه فاز در شرایط نرمال



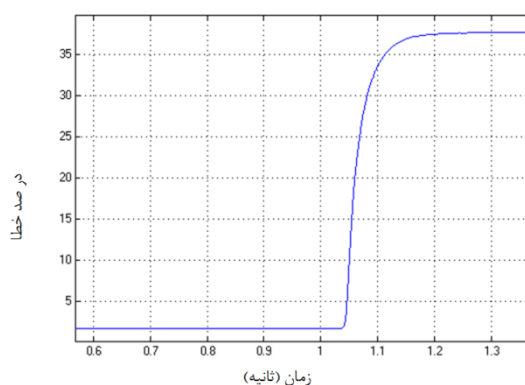
شکل (۱۰): جریان سه فاز تحت خطای سیم پیچی که در زمان ۰,۲۲ ثانیه در فاز a

اشکال (۱۱) تا (۱۳)، بترتیب منحنی دنبال کردن درصد خطا در چند سرعت آزمایشی نمایش داده شده است:

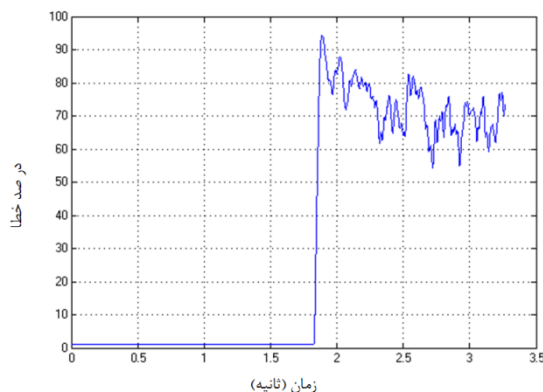
پس از استخراج داده های مورد نیاز در سرعت های مختلف، برای آزمون سیستم طراحی شده، سیستم در چند سرعت مختلف با درصد خطاهای مختلف آزمایش شد. در



شکل (۱۱): تشخیص خطا به وسیله منطق فازی (سرعت 3000 rpm - درصد خطا 10%)



شکل (۱۲): تشخیص خطا به وسیله منطق فازی (سرعت 4500 rpm - درصد خطا 35%)



شکل (۱۳): تشخیص خطا به وسیله منطق فازی (سرعت 5000 rpm - درصد خطا 75%)

منحنی‌های بالا نشان دهنده عملکرد سریع سیستم تشخیص در هنگام بروز خطا هستند.

۶- نتیجه گیری

اجتناب از خطاها در ابزارهای الکتریکی کار آسانی نیست. این درحالی است که بروز خطا می‌تواند پیامدهای

با توجه به اشکال بالا می‌توان گفت که سیستم فازی طراحی شده هم در درصد خطاهای پایین و هم در درصد خطاهای بالا عملکردی نسبتاً مناسب دارد و حدوداً 5% خطا دارد که می‌توان از آن چشم پوشی کرد. البته، در درصد خطای بالا و به علت ناپایداری PMSM؛ خروجی سیستم فازی دارای نوسان‌هایی است؛ هرچند مقدار میانگین و مقدار فاصله نامی خطا با هم برابرند. ضمناً می‌توان گفت که

- Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7, No. 2, April 2000, pp.177-186.
- [6] S.M.A. Cruz, and A.J.M. Cardoso, " Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 5, September 2001, PP. 1227 - 1233.
- [7] Yun Jangho, Lee Kwanghwan, Lee Kwang-woon, Lee Sang Bin, and Yoo Ji-Yoon, " Detection and Classification of Stator Turn Faults and High-Resistance Electrical Connections for Induction Machines" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 2, March 2009, PP. 666 - 675.
- [8] R.M. Tallam, Lee Sang Bin, G.C. Stone, G.B. Kliman, Yoo Jiyoan, T.G. Habetler, and R.G. Harley, " A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 4, July 2007, PP. 920 - 933.
- [9] R.M. Tallam, T.G. Habetler, and R.G. Harley, " Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 3, May 2003, PP. 720 - 724.
- [10] M. F.S.V. D'Angelo, R. M. Palhares, R. H.C. Takahashi, R. H. Loschi, L. M.R. Baccharini and W. M. Caminhas, " Incipient fault detection in induction machine stator-winding using a fuzzy-Bayesian change point detection approach" Applied Soft Computing, Vol. 11, No. 1, January 2011, PP. 179-192.
- [11] P. V. J. R. guez and A. Arkkio, " Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic" Applied Soft Computing, Vol. 8, No. 2, March 2008, PP. 1112-1120.
- [12] S. Mitra, S. K. Pal, "Fuzzy sets in pattern recognition and machine intelligence" Fuzzy Sets and Systems, Vol. 156, No. 3, December 2005, PP. 381-386.
- [13] Jyh-Shing Roger Jang, "ANFIS: Adaptive-Network_Based Fuzzy Inference System" IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, May 1993, PP.665-685.
- [14] B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC drives" Prentice Hall PTR, USA, 2002
- خطرناکی در پی داشته باشد. عیب یابی و تشخیص مؤثر خطا می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد و از نگهداری و تعمیرات پرهزینه جلوگیری کند. تشخیص خطا و عیب‌یابی در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به خاطر کاربردهای حساسی که در ناوهای جنگی و هوافضا دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج به دست آمده با استفاده از روش ارائه شده نشان می‌دهند که سیستم استنتاج فازی می‌تواند روشی مناسب برای شناسایی و تعیین درصد خطای سیم پیچی موتور سنکرون مغناطیس دائم باشد. همچنین، سیستم تطبیقی عصبی-فازی ANFIS می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای استخراج قوانین فازی مناسب باشد. از سویی، مدل ارائه شده تحت خطای سیم پیچی تا حد زیادی نتایجی مشابه واقعیت در اختیار گذاشته است.

۷- مراجع

- [1] M. A. Shamsi-Nejad, "Architectures d'Alimentation et de Commande d'Actionneurs Tolérants aux Défauts - Régulateur de Courant Non Linéaire à Large Bande Passante" PhD. Thesis, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, French, July 2007.
- [2] Dulce F. Pires, V. Fernao Pires, J.F. Martins, A.J. Pires, " Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors based on a current and virtual flux approach" Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 4, April 2009, PP. 1026-1032.
- [3] V. N. Ghate, and S. V. Dudul, " Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor" Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 4, April 2010, PP. 3468-3481
- [4] R. Di Stefano, S. Meo, and M. Scarano, "Induction motor faults diagnostic via Artificial Neural Network (ANN)" ISIE'94, May 1994, pp.220-225.
- [5] S. M. Islam, T. Wu, and Gerard Ledwich, " A Novel Fuzzy Logic Approach to Transformer Fault Diagnosis" IEEE Transactions on

¹ Multi Layer Perseptron Neural Network

² stator winding inter-turn short circuit

³ Principal Component Analysis

⁴ oil-insulated power transformers

⁵ fuzzy-Bayesian change point detection

⁶ Metropolis-Hastings

⁷ Sugeno

⁸ Permanent Magnet Synchronous Motor