

تشخیص عیب استاتور در موتور القایی به وسیله منطق فازی با قواعد بهینه

حمید فکری ازگمی^(۱) - جواد پشتمان^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۱

خلاصه: موتورهای القایی به دلیل کنترل ساده و گستردگی کاربرد، جایگاه ویژه‌ای در صنایع امروزی دارند. به دلیل شرایط کاری، این موتورها به شدت تحت تأثیر خرابی‌ها هستند، از اینرو توجه به مسئله تشخیص عیب این دسته از موتورها همواره رو به افزایش است. علاوه بر این، امروزه توجه به تشخیص عیب به هنگام، به دلیل تشخیص به موقع و جلوگیری از لطمات جدی به موتور، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. اما چالش پیش رو در این راستا، وجود یک مدل تحلیلی دقیق از موتور معیوب است. به همین منظور منطق فازی می‌تواند بسیار راهگشا باشد. در این مقاله با استفاده از منطق فازی راهکاری ساده برای تشخیص عیب سیم پیچی استاتور در موتورهای القایی - که از عیوب بسیار رایج و مهم است - پیشنهاد شده است. وضعیت و شرایط کاری موتور به وسیله مفاهیم زبانی تعریف شده و در واقع منطق فازی رابطی است بین دانش خبرگی و دنیای واقعی که به صورت قواعد اگر - آنگاه در پایگاه قواعد فازی، به مسئله تشخیص عیب می‌پردازد. در نهایت نتایج شبیه سازی‌های انجام شده نیز برای آزمایش میزان دقت روش پیشنهادی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: تشخیص عیب، موتور القایی، منطق فازی، استاتور، قواعد بهینه.

۱- مقدمه

موتورهای القایی به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان بالا، پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی موجود در صنایع مختلف از قبیل پتروشیمی، نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی، نفت، گاز، حمل و نقل ریلی و بسیاری دیگر از صنایع هستند. از همین رو هرگونه عیب آشکار نشده موجب خاموشی پروسه و تحمیل هزینه‌های هنگفت به صنایع مذکور خواهد شد. یکی از راههایی که در سال‌های اخیر برای کاهش هزینه‌ها ارائه شده، استفاده از روش‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است. در کشور ما نیز استفاده از روش‌های یاد شده در سال‌های اخیر رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است.

امروزه بیشتر صنایع مدرن از روش‌های تعمیرات و نگهداری بر مبنای قابلیت اطمینان و همچنین پایش وضعیت موتور القایی برای کاهش خرابی پیش بینی نشده، استفاده می‌کنند. ویژگی این روش‌ها نسبت به روش‌های نگهداری و تعمیرات کلاسیک، افزایش زمان بین عملیات نگهداری و تعمیرات (نت) و کاهش هزینه عملیات مذکور است. به طور خلاصه این روش‌ها با پایش وضعیت موتور بر اساس سیگنال‌های قابل

اندازه گیری آن، وجود یا عدم وجود عیب در داخل موتور القایی را تشخیص می‌دهند. در این مقاله هدف تشخیص عیب در استاتور موتور القایی است. به همین منظور برای نشان دادن اهمیت تشخیص این نوع عیب، در ادامه یک مقایسه آماری بین انواع عیوب موتورهای القایی ارائه شده است.

به علت اهمیت موتورهای القایی، در سال‌های اخیر برای تعیین عیب این دسته از موتورها و حذف نقاط ضعف، روش‌های پیشگیرانه‌ای ارائه شده است. امروزه شبکه‌های فازی به دلیل عدم نیاز به روابط پیچیده، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده‌اند. از ویژگی‌های شبکه فازی می‌توان به حجم پایین محاسبات نسبت به روش‌های مشابه اشاره کرد به طوری که امکان پیاده کردن آنها به صورت سخت افزاری را فراهم می‌نماید. یکی از کاربردهای شبکه‌های مذکور، استفاده از آنها برای تشخیص عیب در موتور القایی است. با توجه به توضیحات داده شده، روش فازی به علت سادگی و انعطاف پذیری مناسب از اهمیت بالایی برای تشخیص عیب در موتورهای القایی برخوردار است. مهمترین عیب الکتریکی و در عین حال یکی از مهمترین عیوب موجود

قرار گرفته که از الگوهای کنکور دیا برای تشخیص عیب اتصال کوتاه شدن سیم پیچی یک فاز استاتور و یا مدار باز شدن یک فاز استفاده می‌کند. این الگوها توسط تبدیل پارک جریان‌های سه فاز و انتقال آن به قاب ساکن دو بعدی dq به دست می‌آیند. در مرجع [۸] هم از روش فازی برای تشخیص عیب موتورهای تکفاز استفاده شده و به منظور شکل دادن توابع عضویت نیز از دانش خبرگی در مورد دینامیک این دست از موتورها بهره گرفته شده است.

هدف از ارائه این مقاله، پرداختن به مسئله تشخیص عیب سیم پیچی استاتور در موتورهای القایی با استفاده از منطق فازی است که برای این منظور در بخش بعدی ابتدا به تأثیرات عیب استاتور بر روی عملکرد موتور القایی پرداخته شده است. سپس به بررسی مدل تحلیلی از دینامیک موتور القایی پرداخته شده و سپس این مدل به همراه وجود عیب در سیم پیچی استاتور نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن به اساس منطق فازی در مبحث تشخیص عیب و کاربرد آن در زمینه تشخیص عیب استاتور پرداخته شده و در نهایت نیز نتیجه گیری کلی از مباحث انجام شده ارائه گردیده است.

۲- تأثیر عیب استاتور بر عملکرد موتورهای القایی

عیب استاتور از عوامل زیادی ناشی می‌شوند که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ دمای زیاد هسته و سیم پیچی ناشی در سیستم خنک کننده
 - ✓ از بین رفتن اتصالات در انتهای سیم پیچی استاتور
 - ✓ آلودگی روغن، رطوبت و کثیفی
 - ✓ اتصال کوتاه شدن و تنش‌های موقع شروع کار موتور
- از جمله تأثیرات ناشی از عیب سیم پیچی استاتور نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- ✓ نامتعادل شدن جریان‌های سه فاز و شار فواصل هوایی
 - ✓ افزایش تلفات و کاهش کارایی موتور
 - ✓ ایجاد گرما و افزایش دمای هسته
 - ✓ کاهش گشتاور اولیه

زمانی که یکی از فازهای استاتور معیوب می‌شود، متناسب با مقدار عیب ایجاد شده، مقدار مقاومت و اندوکتانس مرتبط با آن فاز تغییر می‌کند. این عامل باعث نامتعادل شدن سه فاز استاتور و در نتیجه موجب ایجاد نامتقارنی در جریان‌های سه فاز استاتور خواهد شد. در واقع عیب استاتور باعث تغییر در مقدار موثر جریان هر کدام از جریان‌های سه فاز استاتور می‌شود. علاوه بر این، ایجاد عیب در یک موتور القایی سه فاز متقارن موجب پیدایش جریان گردشی در سیم پیچی استاتور می‌گردد. در نتیجه این اتفاق، مقدار جریان رو به افزایش گذارده و موجب گرم‌تر شدن هسته سیم پیچی می‌گردد. چنانچه این حرارت ایجاد شده کنترل نشود، باعث ایجاد خرابی‌های اساسی در موتور القایی می‌گردد.

در موتورهای القایی عیب استاتور است. این عیب که به عیب سیم پیچی استاتور نیز معروف است، در حدود ۳۸ درصد از مجموع عیوب ایجاد شده در موتورهای القایی را شامل می‌شود [۱]. در زمینه تشخیص عیب استاتور، می‌توان سه رویکرد کلی را مد نظر قرار داد؛ رویکردهای بر مبنای مدل و رویکردهای بر مبنای سیگنال و رویکردهای هوشمند [۲].

روش‌های بر مبنای مدل در حین فرآیند تشخیص عیب به دانستن مدلی از سیستم احتیاج می‌رساند. دسترسی به مدلی دقیق از چالش‌های پیش رو در این دسته از رویکردهاست. روش‌های بر مبنای سیگنال نیز به دلیل اجرا در حوزه فرکانس، پیاده‌سازی بسیار پرهزینه دارند. از همین رو در سالیان اخیر روش‌های هوشمند جایگزین مناسب و کمک شایانی برای روش‌های سنتی بوده‌اند.

از جمله روش‌های هوشمند می‌توان به منطق فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک اشاره نمود. منطق فازی در مبحث تشخیص عیب، در واقع استفاده از مفاهیم زبانی در نوع عملکرد موتور القایی در شرایط مختلف و در ازای عیوب ایجاد شده است. بدین صورت که دانش فرد خبره را با ترکیب با مفاهیم زبانی به صورت قواعدی تبدیل می‌کند که وضعیت عملکردی موتور را توصیف کرده و مسئله تشخیص عیب را انجام دهد [۱-۲].

مزیت اصلی منطق فازی سادگی پیاده کردن قواعد سرانگشتی، مفاهیم تجربی و مفاهیم زبانی است. در این روش از داده‌های آزمایشگاهی و همچنین دانش خبرگی برای شکل دادن قواعد فازی به فرم اگر- آنگاه استفاده می‌شود. سیستم فازی در واقع یک توصیف کیفی از وضعیت موتور و همچنین نحوه عملکرد موتور را ارائه می‌کند. این توصیف در واقع از توابع عضویت فازی بهره می‌گیرد. در مرجع [۳] از دو متغیر جریان و فرکانس برای ورودی سیستم فازی استفاده شده و در ادامه نیز نشان داده است که با عواملی مثل افزایش تعداد متغیرهای ورودی سیستم و همچنین تغییر در شکل توابع عضویت فازی، می‌توان به عملکرد بهتری دست یافت.

در مراجع [۴] و [۵] از شبکه‌های فازی برای تشخیص عیب استاتور در یک موتور الکتریکی با مغناطیس دائم استفاده شده و همچنین نشان داده شده است که استفاده از شبکه‌های فازی باعث افزایش حساسیت نسبت به روش‌های دیگر برای تشخیص عیب در استاتور موتور القایی خواهد شد. همچنین در مرجع [۶] از ترکیب این شبکه‌ها و روش‌های بر مبنای مدل برای تشخیص عیب در موتور القایی استفاده شده است. مرجع [۱] نیز از روش فازی برای تشخیص عیب استفاده کرده و برای شکل دادن توابع عضویت فازی نیز، از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی موتور القایی بهره گرفته است. به منظور شبیه‌سازی موتور القایی نیز از روش المان محدود بهره گرفته شده است. دلیل استفاده از روش مذکور نیز پیش بینی وضعیت و عملکرد موتور پس از ایجاد عیب در سیم پیچی استاتور است.

در مرجع [۷] تشخیص دهنده فازی برای این منظور مورد بهره برداری

۳- مدل سازی تحلیلی موتور القایی

در سیستم فازی تشخیص دهنده عیب، می بایست داده های ناشی از عملکرد موتور در دو حالت سالم و معیوب مورد بررسی قرار گیرند. از همین رو، در این بخش به تحلیل و مدل سازی دینامیکی موتور القایی پرداخته شده است. در این راستا ابتدا موتور القایی متقارن در حالت سالم و عاری از هرگونه عیب در مرجع استاندارد abc مورد تحلیل قرار گرفته، سپس برای سادگی با استفاده از تبدیل پارک ایستا، مدل موتور به فضای دو بعدی انتقال داده شده و در ادامه نیز روند مدل سازی برای موتور همراه با عیب در سیم پیچی استاتور، مورد تحلیل های مشابه با حالت سالم قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام گرفته به وسیله نرم افزار متلب نیز گزارش گردیده است.

به منظور مدل سازی دینامیکی موتور القایی می بایست معادلات اساسی در موتور را مدنظر قرار دهیم. همان طور که در مراجع مختلف نیز اشاره شده است، معادلات دینامیکی در یک موتور القایی سه فاز در حالت سالم و عاری از عیب در سیم پیچی استاتور مطابق ذیل خواهد بود [۹].

معادلات مربوط به استاتور، روتور و سرعت در مرجع دو بعدی عبارتند از:

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds} \quad (1)$$

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = -r_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = -r_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - B_m \omega_r - T_{load}}{J} \quad (5)$$

برای جریان ها نیز داریم:

$$i_{qs} = \lambda_{qs} a_1 - \lambda_{qr} a_2 \quad (6)$$

$$i_{ds} = \lambda_{ds} a_1 - \lambda_{dr} a_2 \quad (7)$$

$$i_{qr} = \lambda_{qr} a_4 - \lambda_{qs} a_2 \quad (8)$$

$$i_{dr} = \lambda_{dr} a_4 - \lambda_{ds} a_2 \quad (9)$$

که در آن ضرایب ثابت برابرند با:

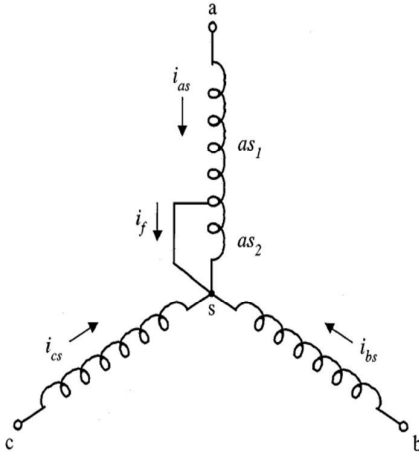
$$a_0 = L_s L_r - L_m^2; \quad a_1 = \frac{L_r}{a_0}; \quad a_2 = \frac{L_m}{a_0}; \quad (10)$$

$$a_3 = \frac{1}{L_{ls}}; \quad a_4 = \frac{L_s}{a_0}; \quad a_5 = \frac{1}{L_{lr}}$$

برای معادله گشتاور نیز خواهیم داشت:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (11)$$

حال در حالتی که به طور مثال قسمتی از یک فاز استاتور اتصال کوتاه شود (شکل (۱))، این معادلات به صورت زیر تبدیل می شوند که در آن μ میزان اتصال کوتاه در سیم پیچی را نشان می دهد ($0 < \mu < 1$).



شکل (۱): مدل استاتور موتور القایی همراه با عیب
Fig. (1): Induction motor stator with interturn fault

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} r_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds} + 2/3 \mu r_s i_f \cos \theta \quad (12)$$

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + 2/3 \mu r_s i_f \sin \theta \quad (13)$$

همچنین گفتنی است که معادلات روتور بدون تغییر باقی می ماند. (معادلات ۳ و ۴)

برای معادله شار سیم پیچ اتصال کوتاه شده نیز رابطه زیر برقرار است.

$$\frac{d\lambda_{as2}}{dt} = r_f i_f - \mu r_s (i_{ds} \cos \theta + i_{qs} \sin \theta - i_f) \quad (14)$$

جریان های استاتور، روتور و سیم پیچ اتصال کوتاه شده نیز بدین صورت محاسبه می گردند:

$$i_{qs} = \lambda_{qs} a_7 - \lambda_{qr} a_8 + (L_r a_{10} - L_m a_{11}) i_f \cos \theta \quad (15)$$

$$i_{ds} = \lambda_{ds} a_7 - \lambda_{dr} a_8 + (L_r a_{10} - L_m a_{11}) i_f \sin \theta \quad (16)$$

$$i_{qr} = \lambda_{qr} a_9 - \lambda_{qs} a_8 + (L_s a_{11} - L_m a_{10}) i_f \cos \theta \quad (17)$$

$$i_{dr} = \lambda_{dr} a_9 - \lambda_{ds} a_8 + (L_s a_{11} - L_m a_{10}) i_f \sin \theta \quad (18)$$

$$i_f = (-\lambda_{as2} + (a_{12} i_{qs} + a_{13} i_{qr}) \cos \theta + ((a_{12} i_{ds} + a_{13} i_{dr}) \sin \theta) / a_{11} \quad (19)$$

ضرایب ثابت در معادلات بالا نیز بدین ترتیب هستند:

$$a_6 = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}; \quad a_7 = \frac{1}{a_6 L_s}; \quad a_8 = \frac{L_m a_7}{L_r}; \quad (20)$$

$$a_9 = \frac{1}{a_6 L_r}; \quad a_{10} = \frac{2 \mu L_s}{3 a_0}; \quad a_{11} = \frac{2 \mu L_m}{3 a_0};$$

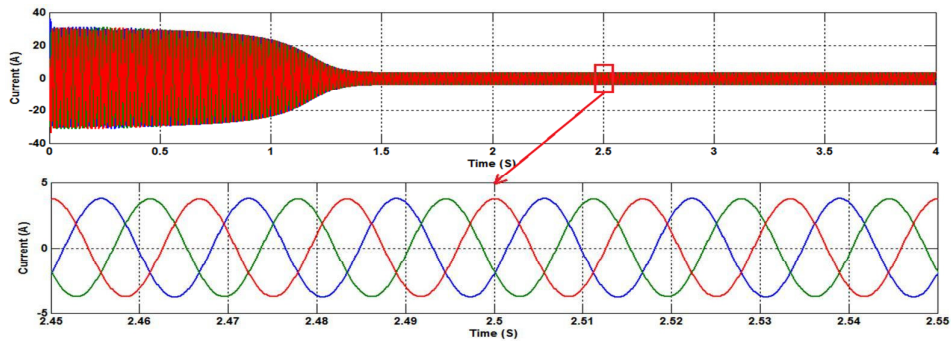
$$a_{12} = \mu L_s; \quad a_{13} = \mu L_m$$

نیز این سیگنال جریان به ازای ۱۰ و ۲۰ درصد عیب نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نامتقارنی در سیگنال جریان‌های سه‌فاز استاتور به ازای بروز عیب بزرگتر، افزایش می‌یابد که همین افزایش در فرایند تشخیص عیب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای معادله گشتاور نیز خواهیم داشت:

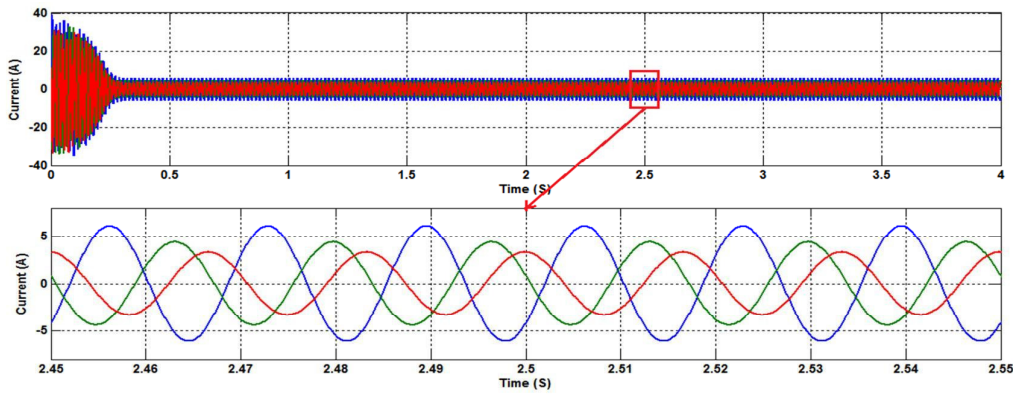
$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) + \frac{p}{2} \mu L_m i_f (i_{qr} \sin \theta - i_{dr} \cos \theta) \quad (21)$$

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته به وسیله معادلات توضیح داده شده را مشاهده می‌کنیم. در شکل (۲) جریان‌های سه‌فاز استاتور در حالت سالم نمایش داده شده است. در شکل‌های (۳) و (۴)



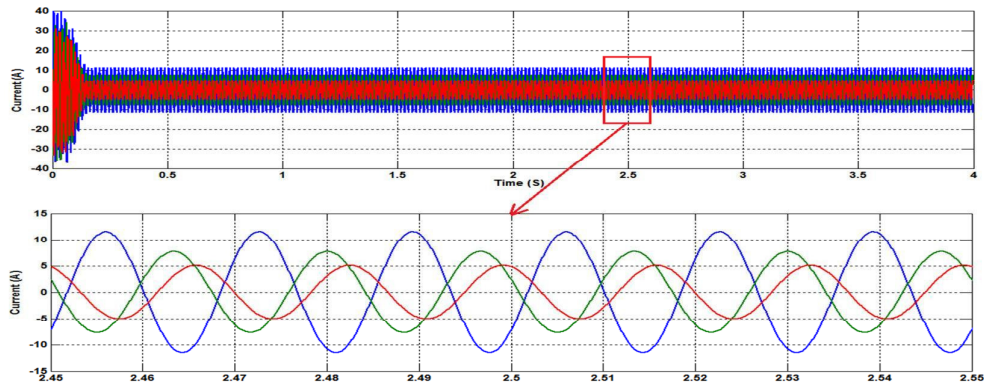
شکل (۲): جریان‌های سه‌فاز استاتور در حالت سالم

Fig. (2): Three-phase stator currents without fault (healthy condition)



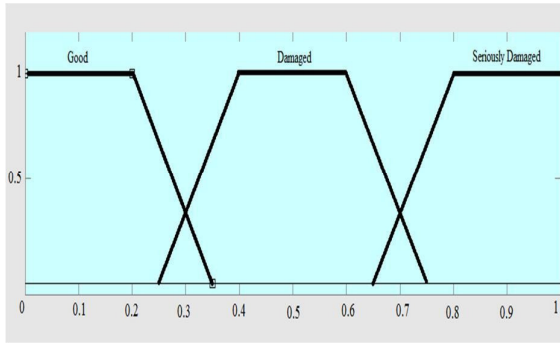
شکل (۳): جریان‌های سه‌فاز استاتور همراه با ۱۰٪ عیب

Fig. (3): Three-phase stator currents with 10% fault



شکل (۴): جریان‌های سه‌فاز استاتور همراه با ۲۰٪ عیب

Fig. (4): Three-phase stator currents with 20% fault



شکل (۶): نمونه تابع عضویت خروجی وضعیت استاتور

Fig. (6): Sample of membership functions for Stator Condition (SC) output

مهمترین بخش سیستم تشخیص عیب فازی، پایگاه قواعد و موتور استنتاج است که قواعد به وسیله دانش خبرگی حاصل شده و با توجه به توابع عضویت ورودی و خروجی در پایگاه قواعد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین باید با توجه به پایگاه اطلاعات در مورد نحوه عملکرد موتور، قواعدی به فرم اگر- آنگاه نوشت. به همین ترتیب و با توجه به متقارن بودن موتور در حالت سالم و با حذف قواعد مشترک و مازاد از بین تمامی حالات، می‌توان به قواعد بهینه رسید که مجموعه این قواعد در جدول (۱) نشان داده شده است.

Table (1): If – THEN Rules

جدول (۱): مجموعه کامل قواعد اگر – آنگاه

شماره قواعد	بخش "اگر" قواعد			بخش "آنگاه" قواعد
	I_a	I_b	I_c	
1	VS			SD
2		VS		SD
3			VS	SD
4	B			SD
5		B		SD
6			B	SD
7	M	M	M	G
8	S	S	S	G
9	M	S	S	D
10	S	M	S	D
11	S	S	M	D
12	S	M	M	D
13	M	S	S	D
14	S	M	S	D

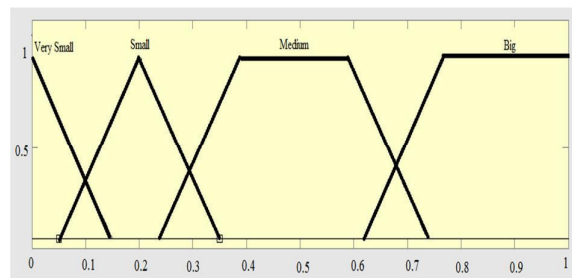
همان طور که در این جدول دیده می‌شود، قواعد ۱ تا ۳ مربوط به وضعیت قطع شدن سیم پیچی یک فاز استاتور هستند. بدین ترتیب که در صورت وقوع اتصال باز (قطع شدن سیم پیچی یک فاز از استاتور)، دست کم مقدار RMS جریان یکی از فازها بسیار کوچک (صفر) شده که در نتیجه مربوط به تابع عضویت خیلی کوچک (VS) بوده و در

۴- تشخیص عیب سیم پیچ استاتور با استفاده از منطق فازی

تئوری فازی به وسیله پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ در مقاله‌ای به نام "مجموعه‌های فازی" معرفی گردید [۱۱]. امروزه منطق فازی کاربردهای فراوانی در زمینه مختلف علمی و صنعتی دارد و استفاده از سیستم‌های فازی به طور چشمگیری در حال توسعه است. با توجه به این گسترش کاربرد، مبحث پیاده‌سازی سیستم‌های فازی از جمله موضوعات مورد توجه محافل علمی و صنعتی می‌باشد.

روال کلی در مسئله تشخیص عیب با استفاده از منطق فازی بدین صورت است که پس از دریافت سیگنال جریان سه فاز استاتور، ابتدا مقدار مؤثر هر یک از فازها محاسبه شده و سپس وارد سیستم استنتاج فازی می‌گردد [۱]. در این سیستم استنتاج، سه بخش اساسی می‌بایست مورد توجه قرار گیرد؛ بخش اول مربوط به ورودی سیستم است که باید به صورت فازی وارد سیستم شود، بخش دوم مربوط به پایگاه استنتاج فازی می‌باشد و در نهایت بخش پایانی است که در آن باید خروجی فازی توسط فازی زدای مناسب به خروجی معمول تبدیل گردد. حال به توضیح تک تک مراحل می‌پردازیم.

در مرحله ابتدایی به صورت مفاهیم زبانی توابع عضویت تعیین می‌شوند. بدین ترتیب که چنانچه مقادیر مؤثر جریان‌های سه فاز را I_a , I_b , I_c بنامیم، با استفاده از مفاهیم زبانی خیلی کوچک (VS) - کوچک (S) - متوسط (M) و بزرگ (B) می‌توانیم ورودی فازی ایجاد کنیم [۱۱]. به منظور به دست آوردن توابع عضویت فازی بهینه، از داده‌های آزمایشی حاصل از مدل تحلیلی ایجاد شده در قسمت قبلی استفاده شده است. نمونه‌ای از توابع عضویت فازی برای هر فاز از جریان استاتور در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نمونه تابع عضویت برای جریان‌های ورودی

Fig. (5): Sample of membership functions for input current

برای بخش خروجی سیستم تشخیص دهنده نیز مطابق بخش ورودی در نظر می‌گیریم، بدین ترتیب که خروجی مطلوب را "وضعیت استاتور" (SC) در نظر گرفته و با مفاهیم زبانی مناسب سالم (G)، معیوب (D) و به شدت معیوب (SD)، توابع عضویت مناسب خروجی را شکل می‌دهیم. نمونه‌ای از این توابع عضویت در شکل (۶) نمایش داده شده است.

مشمول توابع عضویت کوچک (S) و متوسط (M) هستند. در حالت عملکرد سالم موتور قواعدی مثل قاعده زیر بر عملکرد آن حاکم هستند:

◆ If I_a is S, Then SC is G.

بخش نهایی سیستم استنتاج فازی، موتور استنتاج است. در فرایند تشخیص عیب با استفاده از منطق فازی، از موتور استنتاج مینیمم ممدانی استفاده می‌شود. دلیل استفاده از این موتور استنتاج نیز اساس الگوریتم تشخیص عیب است که در واقع نوعی عملیات دسته بندی فازی است. همان طور که در مرجع [۱۲] نیز به این مسئله اشاره شده، موتور استنتاج مینیمم ممدانی در زمینه دسته بندی فازی، عملکرد بهتری نسبت به سایر موتورهای استنتاج دارد، چراکه در برخورد با مقادیر کوچک به جای استفاده از عملگر ضرب که موجب کوچک تر شدن خروجی‌ها می‌گردد، از عملگر مینیمم استفاده می‌کند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام گرفته در فرایند تشخیص عیب مشاهده می‌شود. (شکل‌های (۷)-(۹))

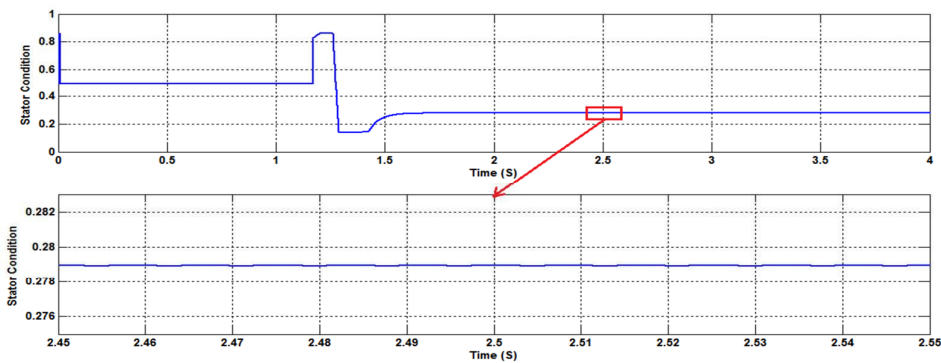
این شرایط بنا به دانش خبرگی، این وضعیت را به شدت معیوب (SD) در نظر می‌گیریم. در نتیجه این اتفاق قاعده‌ای به فرم زیر حاصل شده است.

◆ If I_a is VS, Then SC is SD.

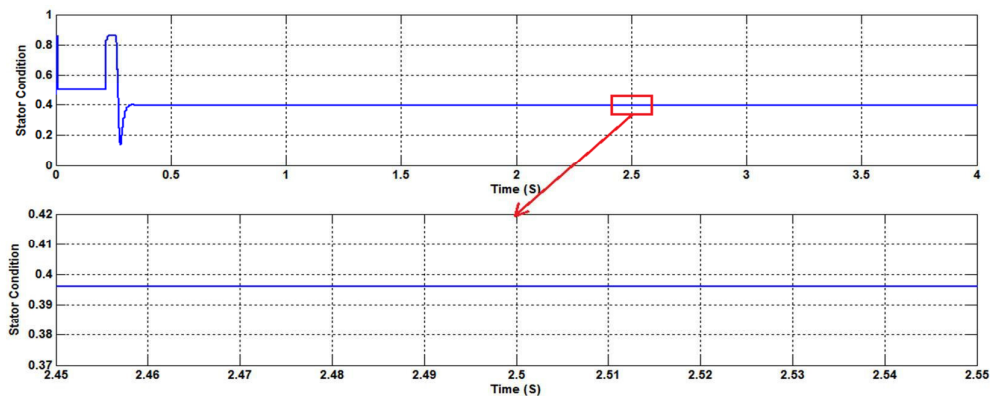
قواعد ۴ تا ۶ نیز مربوط به وضعیت وقوع اتصال کوتاه شدید (بالا تر از ۱۵٪) در سیم پیچی یک فاز از استاتور است، که در نتیجه این عیب مقدار موثر جریان حداقل یکی از فازهای استاتور رو به افزایش شدید گذاشته و در نتیجه مشمول تابع عضویت بزرگ (B) شده و در این حالت با توجه به دانش خبرگی از قبل دانسته، این وضعیت را به شدت معیوب (SD) در نظر می‌گیریم. در نتیجه این اتفاق قاعده‌ای به فرم زیر حاصل می‌گردد.

◆ If I_a is B, Then SC is SD.

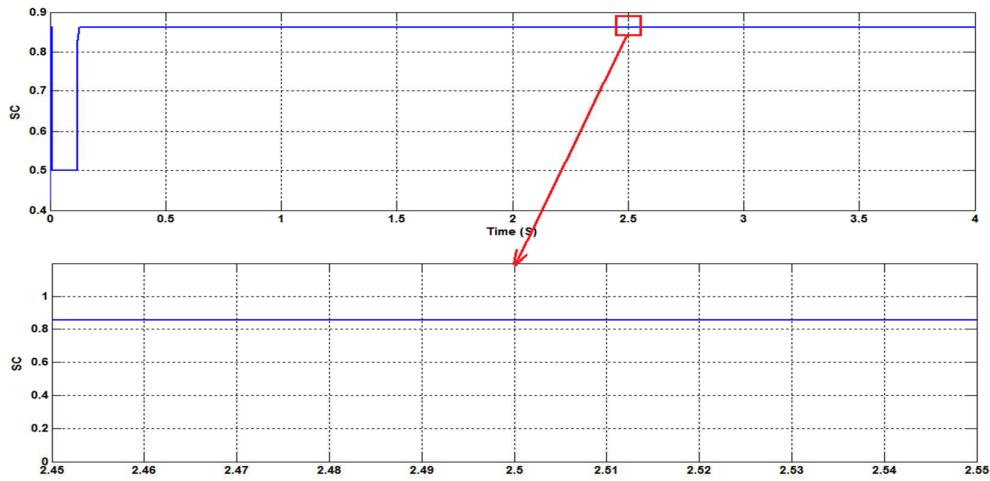
قاعده‌های ۷ و ۸ نیز مربوط به تلقی عملکرد خوب یا حالت بدون عیب در سیم پیچی استاتور است. بدین ترتیب که عملکرد سالم موتور مربوط به وضعیتی است که نامتقارنی‌ای در جریان‌های سه فاز استاتور دیده نشود. مقدار RMS جریان در این حالت دارای مقادیری است که



شکل (۷): خروجی وضعیت استاتور در حالت بدون عیب
Fig. (7): Stator condition in healthy mode



شکل (۸): - خروجی وضعیت استاتور در حالت ۱۰٪ عیب
Fig. (8): Stator condition in faulty mode (% 10)

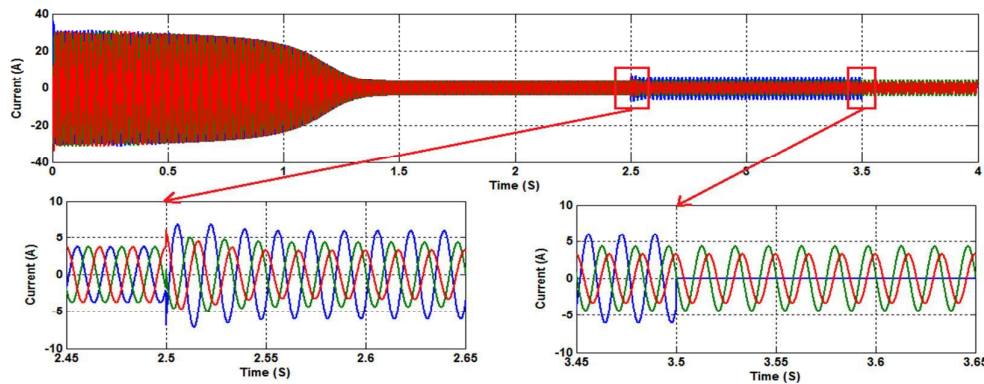


شکل (۹): خروجی وضعیت استاتور در حالت ۲۰٪ عیب
 Fig. (9): Stator condition in faulty mode (% 20)

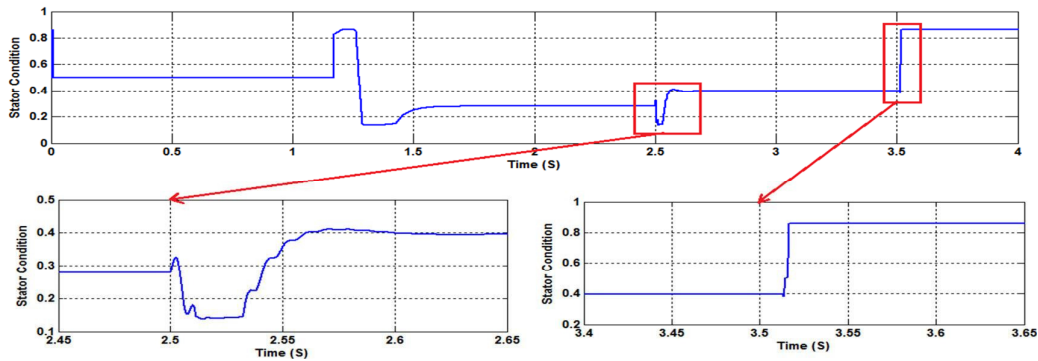
باشد. برای این منظور فرض می‌کنیم ۲/۵ ثانیه پس از شروع کار موتور اتصال کوتاه ۱۰ درصدی در سیستم پیچی یک فاز آن رخ داده و در لحظه ۳/۵ ثانیه نیز یک فاز استاتور قطع گردد. در این حالت سیگنال جریان سه فاز استاتور مطابق شکل (۱۰) می‌شود. نتیجه فرآیند تشخیص عیب نیز در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می‌گردد، ابتدای امر مقدار خروجی SC برابر ۰/۲۸ و در هنگام رخداد عیب ۱۰ درصد این مقدار به ۰/۴ و در حین قطع شدن یک فاز استاتور، مقدار خروجی SC ۰/۸۵ شده است که مؤید حالت به شدت معیوب است.

همان طور که مشاهده می‌گردد در حالت اول - شکل (۷) - نتیجه حاصل از وضعیت بدون وجود عیب نمایان شده که با توجه به تابع عضویت خروجی کاملاً تصدیق می‌شود ($SC=0/28$). در شکل (۸) نیز وضعیت استاتور معیوب اعلام شده که مطابق انتظار بوده ($SC=0/40$) و در نهایت در شکل (۹) نیز حالت عیب ۲۰ درصد به درستی تشخیص داده شده است. ($SC=0/85$) ذکر این نکته حائز اهمیت است که نوسانات موجود در ابتدای خروجی‌ها به دلیل عبور مشخصه موتور از حالت گذرا به حالت ماندگار است.

در بخش نهایی نیز حالتی را در نظر می‌گیریم که موتور القایی در حال کار به صورت سالم و عاری از هرگونه عیبی در سیم پیچی استاتور آن



شکل (۱۰): جریان های سه فاز استاتور درحالت وقوع عیوب چندگانه
 Fig. (10): Three-phase stator currents in different fault situation



شکل (۱۱): خروجی وضعیت استاتور در حالت وقوع عیوب چندگانه

Fig. (11): Stator condition in multi-fault situation

شکل مشخص است که سیستم وجود عیب ۱۰ درصدی در لحظه ۵ ثانیه را به درستی تشخیص داده، و در برابر اغتشاش بار ورودی ۱۵ درصدی به سیستم در لحظه ۷/۵ ثانیه نیز مقاوم است.

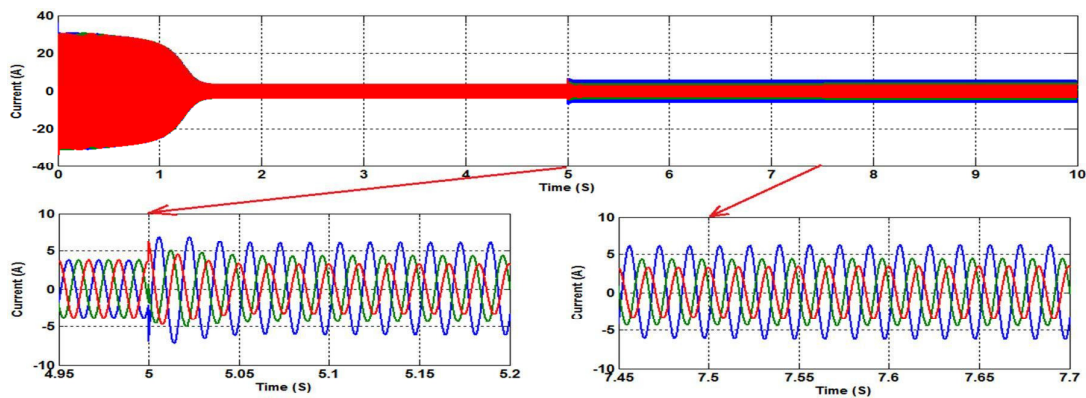
۶- نتیجه گیری

در این مقاله، تشخیص عیب سیم پیچی استاتور در موتور القایی سه فاز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا موتور القایی توسط معادلات دینامیکی شبیه سازی گردید، پس از آن با در نظر گرفتن عیب در یکی از فازها معادلات بازنویسی شد. برای مسئله تشخیص عیب از منطق فازی و کاربرد آن در دسته بندی (Clustering) استفاده شد. از مزایای این روش تشخیص عیب می توان به دقت بالا، به هنگام بودن و همچنین عدم نیاز به مدلی دقیق از سیستم اشاره کرد، البته باید در نظر داشت که از مزایای بسیار کاربردی این روش در صنایع امروزی، قابلیت تطبیق آن با شرایط مختلف موتور است. بدین ترتیب که چنانچه پارامترهای موتور به هر دلیلی دچار تغییری شوند، با اندکی تغییر در مکانیزم تشخیص عیب می توان هدف مسئله را تأمین نمود. همچنین از معایب این سیستم هم می توان به دشواری تعیین توابع عضویت فازی مناسب اشاره کرد.

۵- بررسی دقت عملکرد سیستم تشخیص دهنده عیب در ازای وجود اغتشاش بار

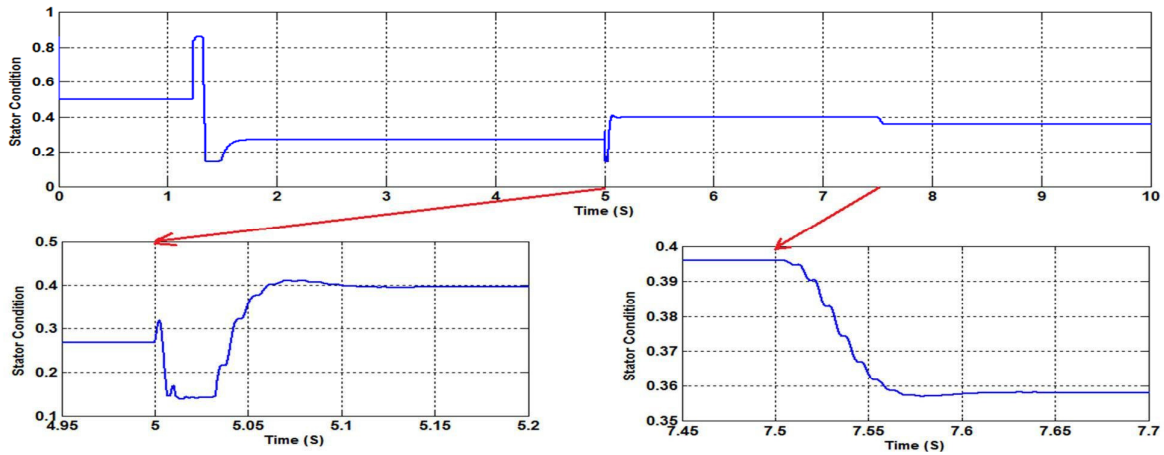
یکی از مسائلی که در زمینه تشخیص عیب در موتورهای القایی و به خصوص عیب استاتور مطرح است، وجود اغتشاش بار به موتور است. در این وضعیت به طور معمول تغییری در سیگنال های جریان استاتور رخ می دهد که این مسئله می تواند در فرآیند تشخیص عیب خلل وارد نماید. از این رو در این بخش حالتی را در نظر می گیریم که در عین وجود عیب در سیم پیچی استاتور، باری به عنوان اغتشاش به سیستم وارد شود.

برای این منظور، در حالی که موتور عملکرد عادی و بدون عیب داشته، ابتدا ۱۰ درصد حلقه ها اتصال کوتاه شده و در ادامه نیز بار اغتشاش به موتور اعمال می شود. برای به دست آوردن حد این قوام، با تغییر مقدار بار به حالتی می رسیم که در ازای اغتشاش حداکثر ۱۵ درصدی، سیستم تشخیص دهنده عیب مقاوم بوده و دارای عملکرد مناسب است. سیگنال جریان استاتور در ازای ورود اغتشاش بار ۱۵ درصدی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز مشخص است، در لحظه ۵ ثانیه، عیب اتصال کوتاه رخ داده و ۷/۵ ثانیه بعد نیز بار اضافی ۱۵ درصدی به سیستم وارد شده است. در نهایت خروجی سیستم تشخیص دهنده نیز در (۱۳) نشان داده شده است. از این



شکل (۱۲): جریان های سه فاز استاتور در حالت وقوع عیوب و تغییرات بار ورودی

Fig. (12): Three-phase stator currents in different fault situation and variable input load



شکل (۱۳): شاخص وضعیت استاتور در حالت وقوع عیوب و تغییرات بار ورودی
 Fig. (13): Stator condition in different fault situation and variable input load

References

- [1] P.V. Jover Rodriguez, A. Arkio, "Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic", Applied Soft Computing, Vol. 8, No. 2, pp. 1112-1120, 2008.
- [2] A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors", IEEE Trans. on Ene. Conv., Vol. 20, No. 1, pp. 106-114, 2005.
- [3] M.S. Ballal, H.M. Suryawanshi, M.K. Mishra, "Detection of incipient faults in Induction Motors Using FIS, ANN and ANFIS Techniques", Jou. of Pow. Elec., Vol. 8, No. 2, pp. 181-191, 2008.
- [4] J. Penman, H.G. Sedding, B.A. Lloyd, W.T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors", IEEE Trans. on Ene. Conv., Vol. 9, No. 4, pp. 652-658, 1994.
- [5] H.A. Toliyat, T.A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults", IEEE Trans. on Ene. Conv., Vol. 10, No. 2, pp. 241-247, 1995.
- [6] F. Zidani, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, M.S. Nait-Said, "Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system", IEEE Trans. on Ene. Conv., Vol. 18, No. 4, pp. 469-475, 2003.
- [7] M.K. Mishra, S.G. Tarnekar, D.P. Kothari, A. Ghosh, "Detection of incipient faults in single phase induction motors using fuzzy logic", IEEE/Power Quality, pp. 117-121, Hyderabad, 1998.
- [8] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, "Analysis of electric machinery", IEEE Press, New York, 1996.
- [9] R.M. Tallam, T.G. Habetler, R.G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 38, No. 3, pp. 632-637, 2002.
- [10] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, Vol.8, pp. 338-353, 1965.
- [11] L.X.Wang, "A course in fuzzy systems and control", Prentice Hall PTR, 1997.

