

تشخیص خطای شکستگی میله‌های روتور در موتور القایی قفس سنجابی به کمک شبکه عصبی

محمد رضا رفیع منزلت^{۱،۲} بابک نجار اعرابی^۱ جواد فیض^۱ عماد شریفی قزوینی^۲

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ایران.

۲- گروه ماشین‌های الکتریکی، پژوهشکده برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

کلمات کلیدی: تشخیص خطای میله شکسته، موتور القایی، شبکه عصبی، شناسایی الگو.

چکیده:

با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان موتورهای القایی در صنعت و لزوم تشخیص به موقع خطا به منظور پیشگیری از گسترش آن، روشی برای تشخیص خودکار خطای شکستگی میله‌های روتور که از جمله خطاهای رایج در موتورهای القایی قفسی است، ارائه گردیده است.

روش پیشنهادی بر مبنای تحلیل طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور به کمک روش‌های پردازش سیگنال و شناسایی الگو توسعه یافته است. این سیستم با دریافت جریان استاتور و سرعت روتور وضعیت موتور را از نظر وجود یا عدم وجود شکستگی میله‌های روتور تعیین می‌کند. برای تهیه این سیستم تشخیص خطا ابتدا با بررسی مجموعه داده‌های حاصل از نمونه‌برداری از موتورهای سالم و خطادار در شرایط بار و خطای مختلف، ویژگی‌های شاخص خطا از روی طیف فرکانسی سیگنال جریان استخراج و تناسب آنها برای امر تشخیص خطا بر اساس چند معیار مطرح شده،

ارزیابی شده است. پس از آن ویژگی‌های انتخاب شده برای مجموعه داده‌های مذکور محاسبه شده و از آنها برای آموزش یک شبکه عصبی استفاده شده است. سرانجام شبکه آموزش دیده بعنوان ابزار تفکیک موتورهای سالم و خطادار به کار رفته است.

روش ارائه شده بر روی مجموعه داده‌های حاصل از یک سری آزمایش‌های عملی بر روی یک موتور القایی سه فاز آزمایش شده، که نتایج عملی کارایی آن را در تشخیص خطای مورد نظر نشان می‌دهد.

۱. مقدمه:

یکی از مهم‌ترین هزینه‌ها در صنعت هزینه تعمیر و نگهداری و توقف روند تولید ناشی از خطاها می‌باشد. از این رو، بحث تشخیص به موقع خطا به منظور پیشگیری از گسترش آن از اهمیت زیادی در صنعت برخوردار است. در سال‌های اخیر تشخیص خطا و نگهداری پیشگیرانه که هدف

- تنش های حرارتی که در اثر اضافه بار، توزیع غیریکنواخت حرارت، نقاط داغ^۱ و جرقه (بیشتر در روتورهای شمش^۲) ایجاد می شود.
- تنش های مغناطیسی که به علت نیروهای الکترومغناطیسی، نیروهای نامتقارن مغناطیسی و نویزها و ارتعاشات الکترومغناطیسی ایجاد می شوند.
- تنش های پسماند^۳ بر اثر مشکلات در مرحله ساخت
- تنش های دینامیکی ناشی از گشتاور شفت و نیروهای گریز از مرکز
- تنش های محیطی در اثر آلودگی و ساییدگی مواد روتور توسط مواد شیمیایی و رطوبت
- تنش های مکانیکی ناشی از خستگی مکانیکی قسمت های مختلف، خرابی بلبرینگ ورقه های شل و غیره.
- روتورهای قفسه ای از نوع شمش^۲ بیشتر از روتورهای از نوع ریخته گری دچار این خطا می شوند ولی تعمیر آنها ساده تر است. وقتی یک میله روتور می شکند، میله های مجاور آن در اثر تنش های زیاد وارد به آنها، بیشتر در معرض خطا هستند و ممکن است بعد از شکستگی میله اول به فاصله زمانی کوتاهی آنها هم بشکنند. مراحل پیشرفت خطا به صورت زیر است [Vi i]:
- دمای میله ترک خورده در اطراف محل ترک زیاد می شود.
- میله می شکند و در محل شکستگی قوس الکتریکی ایجاد می شود که باعث صدمه دیدن ورقه های بدنه روتور در اطراف محل شکستگی می شود.
- دلیل عبور جریان میله شکستگی از میله های مجاور، میله های اخیر جریان بیشتری انتقال می دهند و در نتیجه تنش بیشتر مرحله جدیدی از شکستگی میله پدیدار می شود. توزیع جریان در این حالت مطابق شکل (۱) است.

آن جلوگیری از خطاهای بزرگ در موتورهاست، مورد توجه بسیاری از محققان و مهندسان قرار گرفته است. در این زمینه تا کنون روش های مخرب و غیرمخرب زیادی پیشنهاد شده است [i]. روش های غیر مخرب روش هایی هستند که بر پایه اندازه گیری های ساده و ارزان بنا شده اند و نیازی به تغییر ساختار موتور ندارند [ii].

اخیراً بحث تشخیص خطا در ماشین های الکتریکی از روش های متداول قدیمی به سمت روش های مبتنی بر هوش مصنوعی پیش می رود [iii و iv]. متغیرهای زیادی در ماشین می توانند به عنوان سیگنال تشخیص خطا تلقی شوند. به دلیل سادگی نمونه برداری از ولتاژها و جریان های استاتور و در دسترس بودن حسگرهای لازم برای اندازه گیری، استفاده از این سیگنال ها مناسب به نظر می رسد [v].

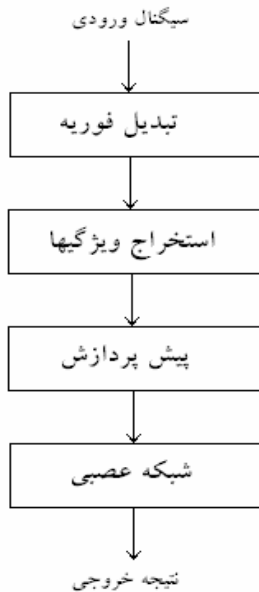
در این مقاله یک روش هوشمند بر مبنای تحلیل طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور به کمک روش های پردازش سیگنال و شناسایی الگو، برای تشخیص خطای ترک خوردگی میله های روتور در موتور القایی قفس سنجایی، ارائه خواهد شد.

ساختار مقاله بدین شرح است: ابتدا در بخش دوم خطای شکستگی میله های روتور در موتور القایی معرفی می شود. سپس در بخش سوم نمای کلی سیستم تشخیص خطای پیشنهادی ارائه می شود. در بخش چهارم نحوه استخراج ویژگی های مناسب برای تشخیص خطا از سیگنال جریان شرح داده می شود. بخش پنجم برخی پیش پردازش های لازم را معرفی می کند. نحوه پیاده سازی طبقه بندی کننده از نوع شبکه عصبی در بخش ششم توضیح داده می شود. نتایج عملی در بخش هفتم ارائه می شود و بخش آخر شامل بحث و نتیجه گیری است.

۲. خطای شکستگی میله های روتور

حدود ۵ تا ۱۰ درصد خطاهای متداول در موتورهای القایی روتور قفسی به دلیل شکستگی و یا ترک خوردگی میله های روتور و یا حلقه های انتهای آن است [v]. دلایل شکستگی و یا ترک خوردگی میله های روتور به شرح زیرند [vi]:

¹ Hot Spots
² Fabricated
³ Residual Stresses

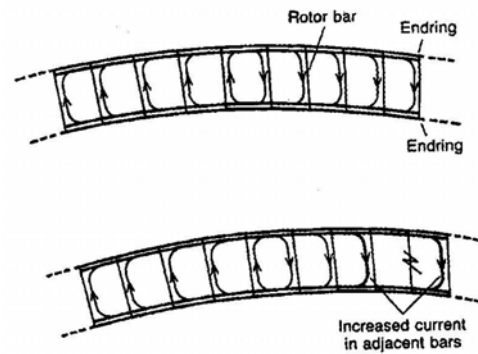


شکل ۲) ساختار سیستم تشخیص خطا

ابتدا سیگنال جریان استاتور نمونه برداری شده و به ورودی سیستم داده می شود. سپس به کمک تبدیل فوریه سریع (FFT) طیف فرکانسی سیگنال بدست می آید و با بکارگیری یک الگوریتم استخراج ویژگی، ویژگی های مناسب شاخص خطا از طیف سیگنال استخراج می شود. بردارهای ویژگی قبل از اعمال به ورودی شبکه عصبی در مرحله پیش پردازش بهنجارسازی می شوند. سپس بردار ویژگی بهنجارسازی شده به یک شبکه عصبی که از قبل به کمک تعداد کافی نمونه های سالم و خطا دار آموزش دیده است، اعمال می شود. شبکه عصبی که نقش طبقه بندی کننده الگوهای سالم و خطا دار را ایفا می کند، در مورد وضعیت موتور مورد آزمایش تصمیم گیری می کند.

۴. استخراج ویژگی های معرف خطا

یکی از مهمترین گامها در تولید سیستم تشخیص خطا استخراج ویژگی های مناسب از سیگنال ورودی به منظور تأمین معیارهای قابل قضاوت توسط طبقه بندی کننده می باشد. همانطور که در بخش (۲) ذکر شد وجود خطای میله شکسته باعث ظهور هارمونیک های جانبی در فرکانس های $(1+2s)f$ می گردد که می توانند نقش عوارض یا علائم خطا را ایفا کنند. بنابراین اولین قدم در این مرحله تعیین محل هارمونیک های مورد توجه (در صورت وجود) می باشد.



شکل ۱) نحوه عبور جریان در روتور موتور القایی [vii]

(بالا) سالم - (پایین) با میله شکسته

- به علاوه ممکن است میله های شکسته در اثر نیروی گریز از مرکز از محل شیار خارج شده و به سیم پیچی استاتور نیز آسیب برساند.

برای جلوگیری از این روند تخریبی باید خطا در همان مراحل اولیه شناسایی شده، اقدامات لازم برای تعمیر موتور به عمل آید [ii].

وجود میله های شکسته و یا شکستگی حلقه انتهایی در موتور القایی سبب ظهور هارمونیک هایی مطابق رابطه (۱) در طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور می گردد [iv].

$$f_b = (1 \pm 2ks)f \quad (1)$$

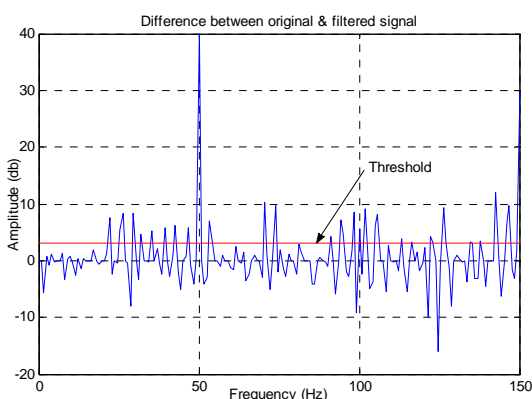
که در آن f فرکانس تغذیه و s لغزش موتور در نقطه کار آن و k یک عدد صحیح است. بزرگترین هارمونیک های حاصل از خطا بازای $k=1$ بدست می آیند. از این هارمونیک ها می توان بعنوان علائم مشخصه وجود خطا در موتور بهره گرفت. در شرایط عملی ممکن است باندهای جانبی حتی در موتور سالم موجود باشند [v]، که این امر گاهاً موجب دشواری تشخیص خطا می شود.

۳. سیستم تشخیص خطا

سیستم تشخیص خطای پیشنهادی بر مبنای تحلیل طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور به کمک روش های پردازش سیگنال و شناسایی الگو استوار است. شکل (۲) نمای کلی سیستم پیشنهادی را نشان می دهد. مراحل کار به طور خلاصه به شرح زیر می باشد:

آستانه مذکور باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند قله‌های قابل توجه را از قله‌های کوچک و بی اهمیت ناشی از نویز و ... تمیز دهد. میانگین مقادیر مثبت اختلاف سیگنال و فیلتر شده آن می‌تواند یک سطح آستانه خوب برای این هدف باشد.

اختلاف بین اندازه طیف فرکانسی یک سیگنال نمونه با نسخه نرم شده آن به همراه اولین سطح آستانه پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) اختلاف طیف فرکانسی یک سیگنال نمونه با نسخه نرم شده آن و سطح آستانه

الگوریتم طراحی شده بزرگترین قله نزدیک به فرکانس‌های محاسبه شده خطا (توسط رابطه (۱)) را جایابی می‌کند. بدین ترتیب الگوریتم چندان به دقت محاسبه فرکانس‌ها و در نتیجه دقت اندازه‌گیری سرعت وابسته نیست. ولی از آنجا که در شرایط کار واقعی هارمونیک‌هایی بجز هارمونیک‌های خطا نیز ممکن است در حوالی فرکانس‌های مذکور وجود داشته باشند [۷]، دانستن مقدار دقیق لغزش می‌تواند از اشتباهات احتمالی در تشخیص خطا در نتیجه وجود هارمونیک‌های غیر مرتبط در نزدیکی فرکانس‌های جانبی خطا جلوگیری کند.

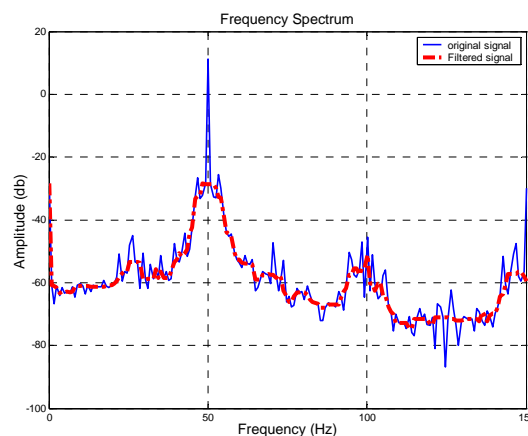
الگوریتم طراحی شده می‌تواند مختصات فرکانسی یک قله فرکانسی را در غالب نقاط شروع صعود، شروع تندترین صعود، نقطه رأس، نقطه اتمام تندترین نزول و نقطه اتمام نزول قله مشخص کند. نقاط مذکور در شکل (۵) با شماره‌های ۱ تا ۵ مشخص شده‌اند.

۴-۱. الگوریتم تشخیص قله

اولین گام در استخراج ویژگی‌های مناسب به کمک طیف فرکانسی سیگنال تعیین محل قله‌هایی است که می‌تواند ناشی از خطا باشند، که این کار توسط یک الگوریتم تشخیص قله انجام شده است.

این الگوریتم باید بتواند محل دقیق قله‌های مورد توجه را مشخص کرده و آنها را از قله‌های کوچک و بی اهمیت ناشی از نویز و ... متمایز کند.

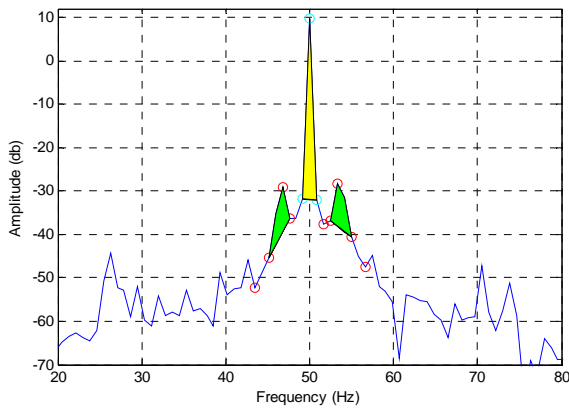
به همین منظور یک روش کارآمد برای تعیین موقعیت دقیق هارمونیک‌های اصلی و جانبی تهیه گردید. در این روش اندازه طیف فرکانسی سیگنال با نسخه نرم شده آن مقایسه می‌شود. برای بدست آوردن نسخه نرم شده سیگنال از فیلتر میانه^۱ استفاده می‌شود. از آنجا که فیلتر میانه طبیعتاً به نقاط پرت^۲ حساس نیست، استفاده از این فیلتر موجب مقاوم شدن^۳ و عدم حساسیت روش به نویز و عوامل مزاحم می‌شود. شکل (۳) طیف فرکانسی یک سیگنال نمونه را به همراه نسخه فیلتر شده آن نشان می‌دهد.



شکل (۳) طیف فرکانسی یک سیگنال نمونه به همراه نسخه فیلتر شده آن

سپس اختلاف بین سیگنال فرکانسی با نرم شده آن محاسبه شده و قله‌های قابل توجه در محل‌هایی که این اختلاف از حد معینی بیشتر باشد، جایابی می‌شوند. سطح

1 Median Filter
 2 Outlying points
 3 Robustness



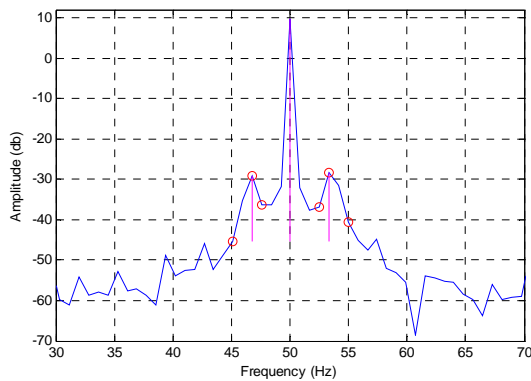
(ب)

شکل ۶) مساحت زیر قله‌های فرکانس تغذیه و هارمونیک‌های جانبی

۲-۲-۴. دامنه هارمونیک‌ها:

یکی دیگر از ویژگی‌های توصیف کننده اندازه هارمونیک‌ها می‌باشد که با شدت خطا رابطه مستقیم دارد.

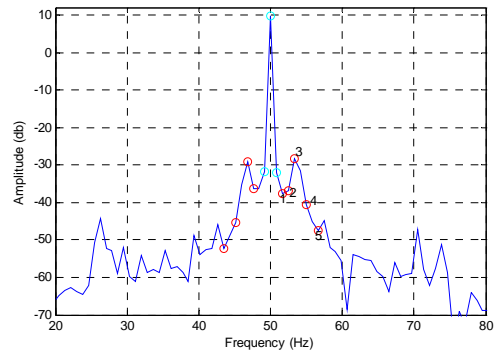
شکل ۷) دامنه‌های هارمونیک‌های جانبی و هارمونیک اصلی تغذیه را برای یک سیگنال نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۷) دامنه قله‌های فرکانس تغذیه و هارمونیک‌های جانبی

۳-۲-۴. زاویه رأس هارمونیک‌ها:

از جمله ویژگی‌های توصیف کننده شکل هارمونیک‌ها می‌باشد، که میزان تیزی قله هارمونیک را مشخص می‌کند. شکل ۸) شمای تصویری این ویژگی را برای یک سیگنال نمونه نشان می‌دهد.



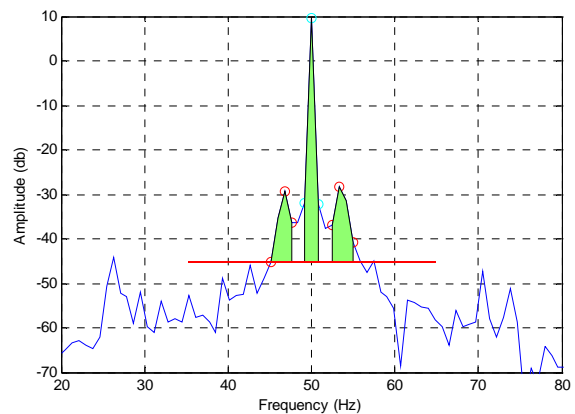
شکل ۵) نتیجه اعمال الگوریتم تشخیص قله به طیف سیگنال نمونه

۲-۴. ویژگی‌های پیشنهادی برای خطای میله شکسته

ویژگی‌های مختلفی از طیف تبدیل فوریه سیگنال جریان قابل استخراج است. این ویژگی‌ها می‌توانند هر یک به نحوی توصیف کننده اندازه یا شکل هارمونیک‌های شاخص خطا باشند. برخی از آنها عبارتند از:

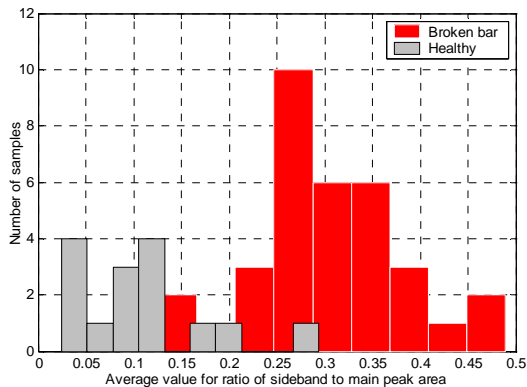
۲-۴-۱. سطح زیر منحنی هارمونیک‌ها:

از جمله ویژگی‌های توصیف کننده اندازه هارمونیک‌ها می‌باشد. محاسبه این ویژگی با انتگرال‌گیری از اندازه طیف فرکانسی سیگنال زیر هارمونیک‌های مورد نظر انجام می‌شود. انتگرال‌گیری را می‌توان نسبت به یک سطح مبنی و یا نسبت به نقاط شروع و پایان قله انجام داد. شکل‌های (۶) الف) و (ب) دو روش مذکور را نشان می‌دهند.

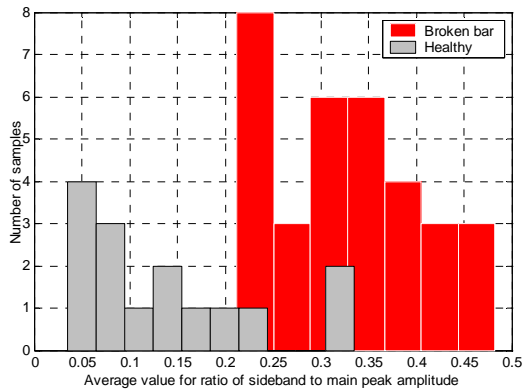


الف)

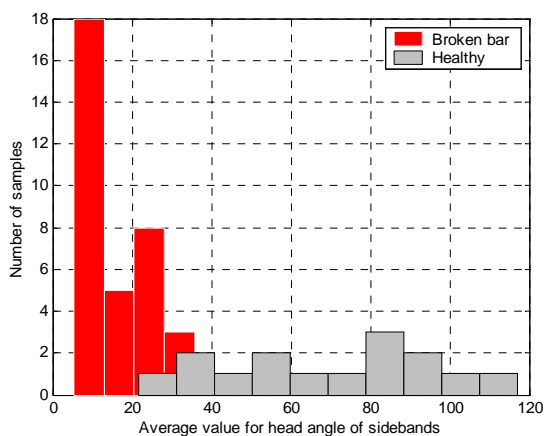
قبل را که برای یک سری آزمایش‌های عملی بر روی موتورهای سالم و خطادار محاسبه گردیده‌اند، نشان می‌دهند.



شکل ۹) هیستوگرام ویژگی اول برای داده‌های مربوط به موتورهای سالم و خطادار

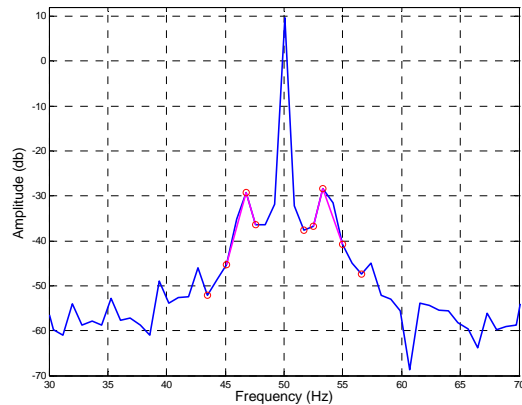


شکل ۱۰) هیستوگرام ویژگی دوم برای داده‌های مربوط به موتورهای سالم و خطادار



شکل ۱۱) هیستوگرام ویژگی سوم برای داده‌های مربوط به موتورهای سالم و خطادار

همانطور که مشاهده می‌شود، هر سه ویژگی دارای تفکیک‌پذیری مناسبی در هیستوگرام‌های خود هستند.



شکل ۸) زاویه رأس هارمونیک‌های جانبی

از آنجا دو باندهای جانبی چپ و راست وجود دارد که هر دو علامت وجود خطا هستند، از میانگین مقادیر ویژگی محاسبه شده برای باندهای جانبی چپ و راست استفاده می‌کنیم.

۳-۴. ارزیابی ویژگی‌های پیشنهادی

چند معیار برای ارزیابی ویژگی‌های معرفی شده و انتخاب ویژگی مناسب می‌توان در نظر گرفت. مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- 0 تفکیک‌پذیری ویژگی برای شرایط سالم و خطادار
- 0 عدم حساسیت ویژگی به شرایط کار موتور
- 0 تغییرات بکخواخت ویژگی با تغییر شدت خطا

۱-۳-۴. بررسی میزان تفکیک‌پذیری ویژگی‌ها

منظور از تفکیک‌پذیری یک ویژگی، میزان قابلیت آن برای تمایز شرایط سالم از شرایط خطادار است. هر چه مقادیر محاسبه شده یک ویژگی در شرایط سالم از مقادیر محاسبه شده آن در شرایط خطادار متمایزتر باشند، آن ویژگی برای امر تشخیص خطا مناسب‌تر است.

یک رویکرد برای بررسی میزان تفکیک‌پذیری یک ویژگی این است که پس از محاسبه آن برای تعدادی حالت‌های سالم و خطادار، نمودار فراوانی^۱ مقادیر محاسبه شده در دو حالت مذکور رسم گردد [viii]. شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) هیستوگرام حاصل برای سه ویژگی معرفی شده در قسمت

¹ Histogram

شدت ترک خوردگی میله‌ها و بزرگتر شدن دامنه هارمونیک‌های جانبی، این هارمونیک‌ها شکل تیزتری پیدا می‌کنند که این به معنی کوچکتر شدن زاویه رأس هارمونیک می‌باشد.

در هر صورت هر سه ویژگی دارای رابطهٔ یکنواخت (مستقیم یا معکوس) با شدت خطا هستند.

سه ویژگی پیشنهادی فوق بصورت ابعاد یک بردار موسوم به بردار ویژگی بکار می‌روند. از آنجا که در یک موتور القایی سه فاز مجموع جریان‌ها صفر است، عملاً دو جریان مستقل وجود دارد و جریان سوم از روی دو جریان دیگر قابل محاسبه است. به کمک تبدیل پارک می‌توان بدون از دست دادن اطلاعات، سه جریان a, b, c را به دو جریان در راستای محورهای d و q تبدیل کرد $[i X]$. با محاسبه سه ویژگی پیشنهادی برای دو جریان مذکور یک بردار ویژگی به طول شش برای هر نمونه بدست می‌آید.

البته از آنجا که اثر وجود میله‌های شکسته در هر سه جریان استاتور ظاهر می‌شود، در کاربردهای عملی که استفاده از سخت افزار کمتر ترجیح دارد، استفاده از یک جریان نیز قابل قبول است.

۵. پیش پردازش - بهنجارسازی بردارهای ویژگی

برای حصول عملکرد بهتر در شبکه عصبی، بردارهای ویژگی قبل از اعمال به ورودی شبکه، در مرحله پیش پردازش با هدف قرار گرفتن در محدودهٔ یکسان بهنجارسازی می‌شوند. یک روش مناسب برای بهنجارسازی، بهنجارسازی براساس میانگین و واریانس داده‌هاست. در این روش ابتدا میانگین و واریانس مقادیر ویژگی k ام برای تعداد N نمونه موجود طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ik} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{ik} - \mu_k)^2 \quad (3)$$

سپس مقادیر هر یک از ویژگی‌ها براساس میانگین و واریانس آنها طبق رابطهٔ زیر بهنجارسازی می‌شوند:

۴-۳-۲. عدم حساسیت ویژگی نسبت به شرایط کار موتور

یکی از معیارهای مهم در مورد ویژگی‌های منتخب برای تشخیص خطا عدم حساسیت ویژگی نسبت به شرایط آزمایش نظیر میزان بارگذاری موتور می‌باشد.

واضح است که اندازه هارمونیک اصلی جریان تغذیه با افزایش بار اعمالی به موتور افزایش می‌یابد. دامنه هارمونیک‌های جانبی نیز با افزایش بار اعمالی به موتور روند صعودی دارند. از طرفی برای دستیابی به دامنه کاربرد بیشتر مایلیم ویژگی‌های مورد استفاده در امر تشخیص خطا حتی الامکان نسبت به تغییرات بار و دیگر شرایط حساس نباشند. از این رو بهتر است به جای مقادیر مطلق سطح زیر نمودار قله‌های جانبی (ویژگی اول) و اندازه دامنه قله‌های جانبی (ویژگی دوم)، از مقادیر نسبی آنها نسبت به قله اصلی استفاده کرد. تا اثر تغییرات بار بر مقدار ویژگی‌های محاسبه شده کمتر شود.

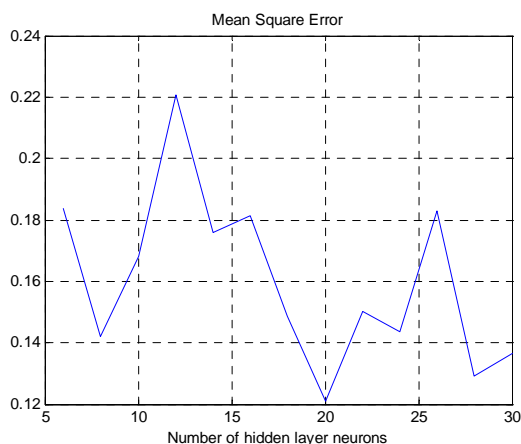
بعلاوه در [iv] نشان داده شده که دامنه باندهای جانبی چپ و راست نسبت به تغییرات ممان اینرسی بار حساس است. بطوریکه دامنه باند جانبی چپ با افزایش ممان اینرسی افزایش می‌یابد. در حالیکه دامنه باند جانبی راست با افزایش ممان اینرسی کاهش می‌یابد. بنابراین اگر از مجموع یا میانگین دامنه‌های باندهای جانبی چپ و راست استفاده گردد، ویژگی‌های حاصل به تغییرات ممان اینرسی بار حساس نخواهند بود.

۴-۳-۳. تغییرات یکنواخت ویژگی با تغییر شدت خطا

با توجه به اینکه هارمونیک‌های جانبی شاخص خطا در اثر عبور نامتقارن جریان از میله‌های روتور ایجاد می‌شوند، افزایش تعداد میله‌های شکسته یا میزان ترک خوردگی میله‌ها موجب افزایش نامتقارنی در عبور جریان و در نتیجه افزایش دامنه هارمونیک‌های جانبی و به تبع آن سطح زیر منحنی آنها می‌شود. بنابراین ویژگی‌های اول و دوم پیشنهادی دارای رابطه مستقیم با شدت خطا هستند.

ویژگی سوم بر خلاف دو ویژگی قبل رابطه معکوس با شدت خطا دارد. زیرا با افزایش تعداد میله‌های شکسته یا

قرار گرفت (شکل ۱۳)، که در نهایت به دلیل حصول خطای کوچکتر، تعداد ۲۰ نورون برای لایه میانی انتخاب گردید.



شکل ۱۳) بررسی اثر انتخاب تعداد نورون لایه میانی بر خطای شبکه

۶-۲. آموزش شبکه عصبی

برای آموزش شبکه عصبی مقداری (مثلاً ۶۰ تا ۸۰) از داده‌های موجود بصورت تصادفی به عنوان مجموعه داده‌های آموزش انتخاب می‌شود. بردار ویژگی برای مجموعه داده‌های مذکور محاسبه می‌شود. سپس با انتخاب یک معیار مناسب برای خطا مبتنی بر اختلاف خروجی شبکه با خروجی‌های مطلوب، به کمک یکی از روش‌های بهینه‌سازی، ضرایب وزن اتصالات نورون‌ها و مقادیر بایاس آنها در یک فرآیند تکرار شونده با هدف کمینه کردن معیار خطا تنظیم می‌گردند. به این فرآیند آموزش شبکه عصبی گویند.

روش‌های متعددی برای آموزش شبکه وجود دارد. در اینجا از معیار متوسط مربعات خطا یا mse^1 به عنوان معیار خطا و از روش Resilient back-propagation برای آموزش شبکه استفاده شده است [Xi i].

فرآیند آموزش شبکه یک فرآیند تکراری است. برای تعیین نقطه توقف این فرآیند چند روش وجود دارد.

0 تعیین حد بالا برای تعداد تکرار

0 تعیین حد مطلوب معیار خطا

0 توقف بر اساس صعود معیار خطا برای داده‌های محقق‌سازی^۲

$$\hat{x}_k = \frac{x_k - \mu_k}{\sigma_k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

که در آن n بعد بردار ویژگی می‌باشد.

داده‌های حاصل از بهنجارسازی به روش فوق دارای میانگین صفر و واریانس واحد در هر بعد خواهند بود [X].

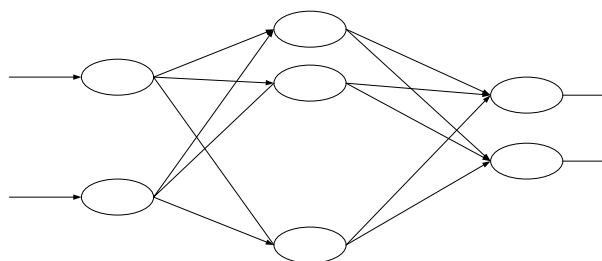
۶. طبقه‌بندی کننده از نوع شبکه عصبی

شبکه عصبی از مجموعه‌ای واحدهای پردازشگر موازی موسوم به نورون تشکیل شده که دارای ساختار ارتباطی و مکانیزم پردازش گوناگون هستند. با استفاده از شبکه عصبی می‌توان بر کلیه مشکلات و محدودیت‌های مربوط به مدلسازی ماشین‌های خطادار فائق آمد.

یک شبکه سیستم فیزیکی را به کمک الگوهای بدست آمده از چندین مثال عملی از موتورهای سالم و خطادار شناسایی می‌کند. عمل شناسایی سیستم فیزیکی با تنظیم ضرایب وزن اتصالات بین نورون‌های شبکه در غالب فرآیند موسوم به آموزش شبکه انجام می‌شود [Xi].

۶-۱. ساختار شبکه:

در اینجا از یک شبکه عصبی با یک لایه میانی (لایه پنهان) برای طبقه‌بندی بردارهای ویژگی استفاده شده است. شبکه دارای شش گره ورودی - برابر با ابعاد بردار ویژگی - و دو نورون خروجی - به تعداد کلاسهای خروجی (سالم/خطادار) می‌باشد. (شکل ۱۲)



شکل ۱۲) ساختار شبکه عصبی چند لایه

برای انتخاب تعداد نورون لایه میانی مراحل آموزش و آزمون شبکه بازای تعداد نورون‌های لایه میانی متفاوت تکرار گردید و میزان خطای شبکه در دفعات مختلف مورد مقایسه

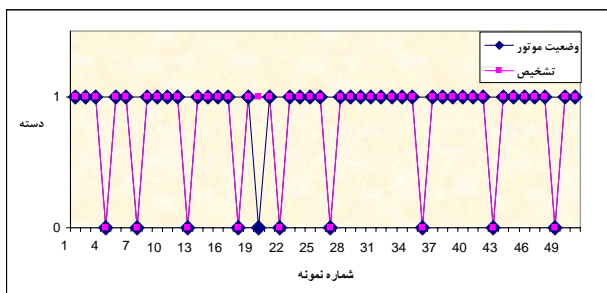
¹ Mean Square Error

² Validation

استفاده شده بود. برای تولید خطای میله شکسته از سوراخکاری میله‌ها استفاده شده بود. شرایط خطای بکار رفته در آزمایش‌ها عبارتند از: سالم، یک میله شکسته، سه میله شکسته مجاور، شش میله شکسته غیرمجاور و شکستگی حلقه انتهایی [xiii].

هر یک از آزمایش‌های فوق در پنج نقطه کار مختلف از ۱۰ تا ۱۰۰ درصد بار کامل انجام شده بود، که در مجموع ۲۵ نمونه برای استفاده فراهم بود [xiii].

از آنجا که تعداد نمونه‌ها برای آموزش شبکه عصبی کافی به نظر نمی‌رسید، از روش پنجره لغزان برای استخراج پنج نمونه از هر آزمایش استفاده شد. بدین ترتیب ۱۲۵ نمونه برای آموزش و آزمون شبکه عصبی بدست آمد که ۶۰ درصد آن بطور تصادفی برای آموزش و بقیه برای آزمون شبکه بکار گرفته شد. پس از آموزش شبکه به روش مشروح در بخش (۶-۲)، از داده‌های آزمون برای ارزیابی عملکرد آن استفاده شد. در شکل (۱۵) نتایج تشخیص وضعیت موتور با وضعیت واقعی آن برای نمونه‌های آزمون مقایسه شده است. در این شکل منظور از دسته صفر موتورهای سالم و دسته یک موتورهای خطا دار می‌باشد.

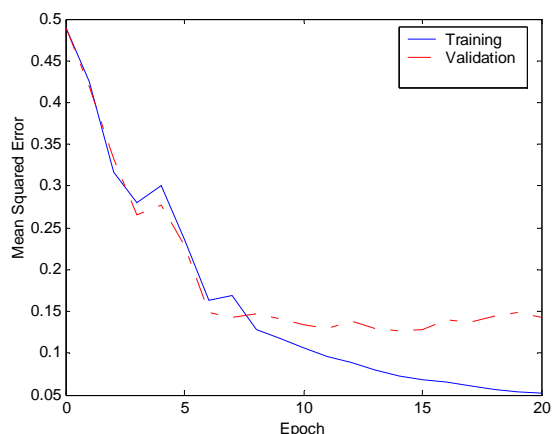


شکل (۱۵) نتایج تشخیص وضعیت موتور توسط شبکه عصبی

همان‌طور که در شکل مشخص است از ۵۰ نمونه آزمون بجز در یک مورد، وضعیت موتور از نظر وجود یا عدم وجود خطای میله شکسته بدرستی تشخیص داده شده، که معادل میزان خطای ۲٪ است. البته چنانچه از این روش در صنعت استفاده شود با توجه به تعداد بیشتر نمونه‌هایی که برای آموزش شبکه فراهم خواهد بود، می‌توان به میزان خطای بهتری دست یافت.

در دو روش اول و دوم توقف بدون توجه به میزان مورد نیاز آموزش صورت می‌گیرد. در حالیکه در روش سوم توقف به محض آموزش دیدن شبکه به قدر کافی و قبل از آموزش بیش از حد شبکه صورت می‌گیرد و از این جهت نسبت به دو روش قبل مزیت دارد.

در اینجا مجموعه داده‌های موجود را به نسبت ۶۰، ۲۰ و ۲۰ درصد برای آموزش، محقق‌سازی و آزمون شبکه تقسیم کرده‌ایم. مطابق شکل (۱۴) معیار خطا برای داده‌های آموزش همواره روند نزولی دارد، زیرا آموزش بر اساس همین داده‌ها انجام می‌شود. اما معیار خطا برای داده‌های محقق‌سازی پس از مدتی رو به افزایش می‌گذارد. این وقتی است که شبکه برای داده‌های آموزش فوق آموزش دیده^۱ می‌شود و در نتیجه عمومیت خود را برای تصمیم‌گیری در مورد داده‌های جدید از دست می‌دهد. در روش سوم فرآیند آموزش در همین نقطه قطع می‌شود.



شکل (۱۴) روند شاخصهای خطا در حین آموزش شبکه

۷. نتایج عملی

به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده، روش مذکور به داده‌های حاصل از یک سری آزمایش‌های عملی که بر روی یک موتور القایی سه فاز، سه اسب بخار، ۵۰ هرتز، دارای روتور ریخته‌گری شده با ۲۸ میله انجام شده بود [xiii]، اعمال شد. برای آزمایش‌ها از پنج روتور مختلف که یکی از آنها سالم و بقیه دارای انواع مختلف خطای میله شکسته بودند

¹ Over trained

Using AI Techniques”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, Oct. 2000, pp. 994-1004.

4. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., and Vas P., “AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 34, Jan./Feb. 1998, pp. 98-108.
5. Toliyat H. A., Nandi S., “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-a review”, *Proc. IEEE-IAS Annual Meeting*, Phoenix, AZ, Oct. 3-7, 1999, pp. 197-204.
6. Nandi S., Bharadwaj R., Toliyat H. A., Parlos A. G., "Study of Three Phase induction motors with incipient rotor cage faults under different supply conditions", *Proc. IEEE-IAS 1999 Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 1922-1928.
7. پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، گروه ماشین‌های الکتریکی، “بررسی خطاهای متداول و روش‌های تشخیص آنها در موتورهای القایی قفس سنجایی”، بهمن ۱۳۸۰.
8. Rafimanzelat M. R., Araabi B., Sharifi Ghazvini E., “New Features from Fourier Spectrum for Induction Machine Broken Bar Detection” *WSEAS Trans. Electronics*, Issue 2, Vol 1, April 2004. pp. 377-382.
9. Haji M., Toliyat H. A., “Pattern Recognition - A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection”, *IEEE Trans. Energy Conversion*. Vol. 16, No. 4, Dec. 2001, pp. 312-317.
10. Theodoridis S., Koutroumbas K., “Pattern recognition”, Academic press, UK, 1999.
11. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., “Neural Networks Aided on-line Diagnostics of induction Motors Rotor Faults”, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 31, No. 4, pp.892-899, Jul.-Aug. 1995.
12. Riedmiller, M., and H. Braun, “A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm,” *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, San Francisco, 1993.

۱۳. پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، گروه ماشین‌های الکتریکی، “گزارش آزمایش‌های عملی موتور در شرایط وجود خطای روتور”، ۱۳۸۲.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تشخیص خطای شکستگی میله‌های روتور بر مبنای تحلیل طیف فرکانسی جریان استاتور به کمک روش‌های پردازش سیگنال و شناسایی الگو ارائه شد. به کمک یک الگوریتم کارآمد، ویژگی‌های مناسب برای امر تشخیص خطا از طیف تبدیل فوریه سیگنال استخراج گردید و تناسب آنها برای هدف مذکور مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. سپس یک طبقه‌بندی‌کننده شبکه عصبی برای تفکیک موتورهای سالم و خطادار طراحی و پیاده‌سازی گردید و به کمک داده‌های حاصل از یک سری آزمایش‌های عملی آموزش داده شد.

نتایج اعمال روش پیشنهادی به داده‌های حاصل از آزمایش‌های عملی بر روی یک موتور القایی قفسی سه فاز کارایی آن را در تشخیص خطای شکستگی میله‌های روتور نشان می‌دهد. روش ارائه شده را می‌توان با تغییرات مناسب در بخش استخراج ویژگی برای تشخیص انواع دیگر خطاهای رایج در موتور القایی که علائمی متناظر با خطا در طیف فرکانسی یکی از سیگنال‌های موتور ایجاد می‌کنند، بکار گرفت.

تشکر و قدردانی:

این تحقیق با همکاری گروه ماشین‌های الکتریکی پژوهشگاه نیرو بویژه در زمینه تهیه داده‌های مربوط به آزمایش‌های عملی، انجام گردید. بدینوسیله از کلیه اعضای این گروه به‌خصوص خانم مهندس خسروشاهلی قدردانی می‌گردد.

مراجع:

1. Benbouzid M. E. H., “Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, Dec. 1999, pp. 1065-1074.
2. Kliman G. B., Koegl R. A., Stein J., Endicott R. D., Madden M. W., “Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. EC-3, No. 4, Dec. 1988 , pp. 873-879.
3. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., and Vas P., “Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis