

تشخیص بروز شکستگی در میله‌های رتور موتورهای القایی با استفاده از شبکه‌های عصبی

محمد ابراهیمی*، محمدرضا مرادیان**، همایون مشکین کلک*، محمد دانش*** و محمدباقر بیات****

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی نجف‌آباد

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر تهران

(دریافت مقاله: ۸۲/۴/۱۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۲/۹)

چکیده - در این مقاله برای تشخیص ترک خوردگی حلقه‌های انتهایی و یا میله‌های رتور موتورهای القایی قفسه سنجابی روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی ارائه شده است. برای این منظور پس از بررسی روشهای سنتی تشخیص خطا، مدل دینامیکی موتور القایی با استفاده از روش تابع سیم‌پیچ معرفی شده است. در این روش اثر هر یک از شیارهای استاتور و میله‌های رتور را جداگانه در نظر می‌گیریم. در نتیجه می‌توان عملکرد موتور در حالت سلامت رتور و یا بروز شکستگی در هر بخش آن را مورد بررسی قرار داد. پس از آن با استفاده از تبدیل فوریه، طیف فرکانسی سیگنالهای جریان در شرایط مختلف استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آن گاه پس از یک بحث تحلیلی در مورد اصول نظری، الگوریتمی ساده با استفاده از شبکه‌های عصبی برای تشخیص خطا ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که این سیستم قادر به تشخیص سریع و دقیق خطاهای رتور است. در ادامه همان شبکه عصبی توسط اطلاعات تولید شده توسط یک موتور نمونه به قدرت ۱/۱ kW مورد آموزش قرار گرفت. برای اینکه این سیستم بتواند به ازای گشتاورهای مختلف کارایی داشته باشد، اطلاعات مورد نیاز به ازای گشتاورهای مختلف تولید شد. این سیستم قادر به تشخیص سلامت یا شکستگی حلقه‌های انتهایی و یا میله‌های رتور، به صورت بهنگام بوده است.

واژگان کلیدی: موتور القایی، تشخیص شکستگی، میله‌های رتور، رتور قفسه‌ای، شبکه‌های عصبی و تابع سیم‌پیچی

Neural-Network-Aided On-line Diagnosis of Broken Bars in Induction Motors

M. Ebrahimi, M. Moradiyan, H. Moeshginkelk, M. Danesh, and M. Bayat

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: This paper presents a method based on neural networks to detect broken rotor bars and end rings in squirrel cage induction motors. In the first part, detection methods are reviewed and traditional methods of fault detection as well as dynamic

**** - کارشناس ارشد

*** - دانشجوی دکترا

** - مربی

* - استادیار

model of induction motors are introduced using the winding function method. In this method, all stator and rotor bars are considered independently in order to check the performance of the motor for any faults in the parts. Then the frequency spectrum of current signals is derived using the Fourier transform and analyzed under various conditions. In the second part of the paper, an analytical discussion of the theoretical principles is presented to arrive at a simple algorithm for fault detection based on neural networks. The neural network has been trained using the information from a 1.1 KW induction motor. Finally, the system is tested with different values of load torque and is found capable of working on-line to detect all normal and ill-performing conditions.

Keywords: Squirrel cage induction motor, Rotor fault, Neural network

فهرست علائم

ماتریس مقاومت رتور	R_{rr}	فرکانس منبع تغذیه	f_s
ماتریس اندوکتانس استاتور	R_{ss}	طول شکاف فاصله هوایی	g
شعاع متوسط فاصله هوایی	r	بردار جریان رتور	I_r
لغزش	S	بردار جریان استاتور	I_s
بردار شار استاتور	λ_s	ممان اینرسی	J
بردار شار رتور	λ_r	طول محور ماشین	l
گشتاور الکتریکی	T_e	ماتریس اندوکتانس روتور	L_{rr}
گشتاور بار	T_l	ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور و رتور	L_{sr}
بردار ولتاژ استاتور	V_s	ماتریس اندوکتانس استاتور	L_{ss}
سرعت چرخش مکانیکی	ω_{m}	تعداد میله‌های رتور	N_r
وضعیت زاویه‌ای مکانیک	θ_{m}	تابع دور	$N(\varphi)$
موقعیت زاویه‌ای	Φ	تابع سیم‌پیچ	$n(\varphi)$

۱- مقدمه

• ناهمگونی استاتیکی و دینامیکی فاصله هوایی
 • خطای بلبرینگ و یاتاقان
 در دهه اخیر تحقیقات بسیار زیادی برای تشخیص خطاهای ماشینهای القایی انجام گرفته است. در این میان مهمترین روشهایی که برای تشخیص خطای شکستگی میله یا حلقه انتهایی استفاده شده را می‌توان در یکی از دو دسته عمده زیر قرار داد:

الف) روشهای خارج از خط:

مشخصه مشترک این روشها، خارج کردن موتور از سرویس برای تشخیص عیب است. مهمترین این روشها عبارت‌اند از [۲]:

- بازدید مستقیم
- استفاده از اشعه X یا روشهای فراصوتی

اغلب خطاهای مربوط به موتورهای الکتریکی منجر به وقفه در تولید، کاهش محصول و یا حتی باعث آسیب رسیدن به سایر ماشینهای مرتبط با آن می‌شود. در دنیای صنعتی امروز، مبالغ قابل توجهی برای جلوگیری از توقف فرایند تولید و تشخیص انواع خطا در موتورهای الکتریکی و به خصوص موتورهای القایی هزینه می‌شود. بر همین اساس در طول دو دهه اخیر تحقیقات فراوانی در جهت تشخیص خطا صورت گرفته است.

مهمترین خطاهای موتورهای القایی را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد [۱]:

- خطاهای سیم‌پیچی استاتور
- شکستگی در میله‌ها و یا حلقه‌های انتهایی رتور قفس سنجابی

و تحلیل این مولفه‌های فرکانسی استفاده می‌شود. برای این منظور پس از نمونه برداری از جریان با استفاده از FFT^۵ با پنجره هنینگ^۶ مقادیر مرتبه و دامنه مؤلفه‌های فرکانسی محاسبه شده، و از تغییرات این مؤلفه‌ها به عنوان معیاری برای تشخیص خطا استفاده شده است. از آنجا که حتی در حالت سلامت ماشین، به دلیل اختلالات جزئی در مرحله ساخت میله‌های رتور دارای مقداری عدم تقارن‌اند که باعث ایجاد مؤلفه‌های هارمونیک فرعی می‌شود. در نمونه موتور واقعی باید یک حد مرزی برای تمایز بین موتور معیوب و موتور سالم در نظر گرفته شود. وجود مؤلفه‌های هارمونیک در اطراف مؤلفه اصلی ناشی از عوامل دیگر، از جمله نوسانات موجود در بار مکانیکی نیز حائز اهمیت بوده و باید به نحو مقتضی این مؤلفه‌ها را از مؤلفه‌های اصلی مورد نظر جدا کرد تا در تشخیص خطا دچار اشتباه نشویم [۱]. با توجه به این موارد استفاده از سیستمهای هوشمند برای تشخیص خطا اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد.

مراجع علمی اخیر نشان می‌دهند که شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN^۷ کاربردهای بسیار موفقیت آمیزی در آشکارسازی خطا، کنترل و پردازش سیگنال داشته‌اند، و همچنین ثابت شده است که این شبکه‌ها در موتورهای که روابط میان متغیرهای آنها غیرخطی است، به خوبی قادر به آشکارسازی خطا هستند.

قابل توجه ترین امتیاز این روش تشخیص خطا، صرفه‌جویی در زمان مورد نیاز برای پردازش سیگنال، به صورت در خط است، زیرا اثر تمام پیچیدگیهای محاسباتی مربوط به زمان آموزش شبکه است که به صورت خارج از خط انجام می‌پذیرد [۹]. همچنین ANNها نیاز به مدل ریاضی سخت^۸ برای آشکارسازی خطا ندارند و برای یادگیری و تطبیق خود برای حل دقیق یک مسئله خاص، انعطاف پذیرند [۱۰]، علاوه بر این، بکارگیری ANNها در آشکارسازی خطای موتور نسبت به روشهای کنترل فرکانس^۹ و تحلیل ذره^{۱۰} ارزانتر بوده و امکان آشکارسازی خطا به صورت در خط وجود دارد.

- استفاده از عیب یاب گرولر^۲
- اندازه‌گیری دما
- تحلیل‌های شیمیایی
- آشکار سازی به کمک تشعشعات رادیویی
- تحلیل ولتاژ القایی در سیم‌پیچ استاتور بعد از جدا شدن از منبع تغذیه

ب) روشهای در خط^۳

در این روشها تشخیص در حالت کار عادی موتور صورت می‌گیرد. برای این منظور معمولاً سیگنال مناسب نمونه‌برداری شده، با تجزیه و تحلیل آن به بروز خطا پی می‌برند. مهمترین روشهای این دسته عبارت‌اند از [۳-۸]:

- تحلیل حوزه زمان و فرکانس ولتاژهای القایی در سیم‌پیچهای جستجوگر داخلی
 - تحلیل حوزه زمان و فرکانس شار نشستی که توسط سیم‌پیچهای جستجوگر خارجی نمونه‌برداری می‌شود.
 - تحلیل حوزه فرکانس توان لحظه‌ای
 - تحلیل بردار پارک
 - تحلیل موجک سیگنال جریان یا دیگر سیگنالهای موتور
 - تحلیل حوزه فرکانس گشتاور و سرعت موتور
 - تخمین پارامتر
 - تحلیل حوزه فرکانس جریان استاتور MCSA^۴
 - روشهای مبتنی بر سیستمهای هوشمند
- هریک از روشهای فوق دارای معایب و محاسن خاص خود است که بسته به نوع کاربرد و شرایط موتور می‌توان انتخاب یا تلفیقی از بین روشهای فوق داشت.
- از بین این روشها، روش MCSA دارای کاربرد وسیعتری است، چون اولاً از خود سیم بندی استاتور به عنوان سیم‌پیچ جستجوگر استفاده می‌کند و ثانیاً این روش تا حدود زیادی به حضور انواع دیگر خطاها وابستگی ندارد [۳].

در این روش با توجه به اینکه بروز شکستگی در میله‌ها یا حلقه انتهایی باعث ایجاد مؤلفه‌های فرکانسی در اطراف مؤلفه اصلی جریان استاتور می‌شود، لذا برای تشخیص خطا از تجزیه

در این تحقیق برای تشخیص شکستگی میله‌ها و حلقه‌ انتهای رتور، از شبکه‌های عصبی استفاده شده است. این شبکه قادر خواهد بود با دریافت نتایج حاصل از تحلیل طیف فرکانسی جریان استاتور، وضعیت رتور را از نظر سلامت یا شکستگی در میله یا حلقه‌ انتهای به همراه تعداد میله‌های شکسته مشخص کند.

مطالبی که در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند به شرح زیر خواهد بود: ابتدا خطای شکستگی رتور و نحوه مدل سازی موتور با استفاده از تابع سیم‌پیچ توضیح داده شده است. در این روش امکان مدل کردن شکستگی میله‌ها و یا حلقه‌ انتهای فراهم است. سپس اثرات شکستگی بر روی سیگنالهای مختلف موتور و از جمله جریان توضیح داده شده، و در ادامه نحوه پردازش سیگنال جریان و استفاده از شبکه‌های عصبی به عنوان ابزار تشخیص خطا بیان شده است. در پایان پاسخ شبکه عصبی بر روی سیستم شبیه سازی شده و نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است.

۲ - خطای شکستگی در رتور

در بهره‌وری بهینه موتوره‌های القایی، پیشگیری از شکستگی در رتور جایگاه ویژه‌ای دارد و لذا لازم است به عوامل مؤثر در بروز اولین شکستگی در رتور اشاره کنیم، مهمترین این عوامل عبارت‌اند از [۱۱]:

- تنشهای گرمایی در اثر اضافه بار، وجود نقاط داغ، تلفات و جرقه
- تنشهای مغناطیسی در اثر نیروی نامتقارن مغناطیسی ^{11}UMP و نویزهای الکترومغناطیسی
- تنشهای پسماند از مرحله ساخت
- تنشهای دینامیکی ناشی از گشتاور روی محور 12 و نیروهای گریز از مرکز
- تنشهای دینامیکی ناشی از خستگی مکانیکی قطعات و خرابی بلبرینگها
- تنشهای محیطی ناشی از رطوبت و مواد شیمیایی محیط کار موتور

قابل توجه است که پس از بروز اولین شکستگی، به دلیل افزایش جریان گذرنده از میله‌های مجاور یا ایجاد جرقه در محل شکستگی نواحی اطراف شکستگی به طور موضعی گرم می‌شوند، و در نتیجه میله‌های مجاور نیز به تدریج دچار شکستگی شده و یا حتی ذوب خواهند شد. از طرف دیگر ایجاد جرقه الکتریکی در محل شکستگی باعث آسیب رساندن به سیم‌پیچ‌های استاتور و یا حتی هسته مغناطیسی رتور می‌شود، این امر باعث افزایش هزینه و زمان تعمیرات خواهد شد. بدین ترتیب نیاز صنایع به روشهایی که با سرعت و قابلیت اطمینان بالا بتوانند خطا را در اولین مراحل آن تشخیص دهند کاملاً روشن می‌شود.

۳ - مدل سازی موتور القایی به روش تابع

سیم پیچی

مرحله اول در هر مدل سازی مشخص کردن اهداف مورد انتظار از آن است. در بحث تشخیص شکستگی، لازم است که هر میله و هر بخش از حلقه‌ انتهای، جایگاهی در مدل داشته باشند تا بتوان شکستگی را در هر بخش رتور، مدل کرد.

برای این منظور می‌توان از مدل دینامیکی مبتنی بر تابع سیم‌پیچی استفاده کرد [۱۲]، در این روش توری را که شامل N_r میله است را به شکل یک مدار با N_r حلقه در نظر می‌گیریم که هر حلقه متشکل از دو میله و دو بخش اتصال دهنده حلقه‌ انتهای است. برای استاتور نیز یک سیستم سه فاز در نظر می‌گیریم و اثرات شیارهای استاتور و سیم‌پیچ توزیع شده را به حساب می‌آوریم. پارامترهای مدار رتور و استاتور و ابعاد آنها عبارت‌اند از ماتریس مقاومت رتور $R_{rr} [N_r \times N_r]$ ، ماتریس اندوکتانس رتور $L_{rr} [N_r \times N_r]$ ، ماتریس مقاومت استاتور $R_{ss} [3 \times 3]$ و ماتریس اندوکتانس استاتور $L_{ss} [3 \times 3]$. تزویج مغناطیسی استاتور و رتور نیز توسط ماتریس $L_{sr} [3 \times N_r]$ نشان داده می‌شود. کلیه ماتریسهای اندوکتانس فوق بر اساس روش تابع سیم‌پیچ قابل محاسبه‌اند.

۳-۱- محاسبه اندوکتانسها براساس روش تابع سیم پیچ

در مدل سازی موتور القایی برای محاسبه اندوکتانسهای مختلف از روش تابع سیم پیچی استفاده می شود [۱۲]. محاسبه اندوکتانسها در این روش دارای این ویژگی است که دقیقاً توزیع مکانی سیم پیچهای استاتور و میله های رتور در نظر گرفته شده و اندوکتانسها با دقت مناسبی محاسبه می شوند. در این روش برای هر سیم پیچ با هر توزیع مکانی دلخواه تابعی به نام تابع دور $N(\varphi)$ تعریف می شود. این تابع معرف آن است که چه تعداد هادی در چه مکانهایی مستقر شده اند و سوی جریان آنها چگونه است. تابع دیگری که معرف توزیع آمپر دور مغناطیسی در فضا است و از تفاضل مقدار متوسط تابع دور هر سیم پیچ از خود تابع دور حاصل می شود، معروف به تابع سیم پیچی $n(\varphi)$ می باشد به طوری که:

$$n(\varphi) = N(\varphi) - \langle N(\varphi) \rangle \quad (1)$$

برای محاسبه L_{xy} اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ X و Y ، از حاصلضرب تابع دور یک سیم پیچ در تابع سیم پیچی دیگری در فاصله $[0, 2\pi]$ انتگرال گرفته و نتیجه را در مقدار ثابتی که به مشخصات فیزیکی هسته وابسته است ضرب می کنیم:

$$L_{xy} = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_x(\varphi) \cdot n_y(\varphi) d\varphi \quad (2)$$

در این معادله g طول شکاف فاصله هوایی، l طول محور ماشین، r شعاع متوسط فاصله هوایی و φ موقعیت زاویه ای است.

با استفاده از این روش اندوکتانسهای موتور مورد نظر که مشخصات آن در پیوست (الف) آمده است محاسبه شدند. این موتور دارای ۴۴ میله در رتور و ۳۶ شیار در استاتور بوده و سیم پیچ آن از نوع تک لایه و قطری است.

به عنوان مثال اگر بخواهیم L_{ar1} یعنی اندوکتانس متقابل فاز a استاتور با حلقه اول رتور را محاسبه کنیم، باید ابتدا تابع دور حلقه اول رتور را در موقعیت θ_{rm} که مطابق شکل

(۱- الف) است در نظر گرفته، آن را در تابع سیم پیچی فاز a استاتور که مطابق شکل (۱- ب) است، ضرب کرد و سپس از نتیجه در فاصله یک سیکل انتگرال گیری کرد. لازم به ذکر است که بر حسب مقدار θ_{rm} در ۱۲ حالت مختلف می توان این اندوکتانس را محاسبه کرد که مثلاً در حالت $\frac{21\pi}{22} \leq \theta_{rm} < \pi$ حاصلضرب توابع دور حلقه رتور و تابع سیم پیچ فاز a استاتور مطابق شکل (۱- ج) خواهد بود، و با انتگرال گیری از آن بر اساس قواعد تابع سیم پیچ مقدار L_{ar1} از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$L_{ar1} = \frac{\mu_0 r l}{g} \cdot \frac{-N}{6} \left(-2\theta_{rm} + \frac{45\pi}{22} \right) \quad (3)$$

همچنین اندوکتانس متقابل فاز a و b استاتور از معادله زیر محاسبه می شود:

$$L_{ab} = \frac{30rl}{g} \times \frac{-N^2\pi}{6} \quad (4)$$

و به طور مشابه اندوکتانسهای متقابل حلقه های رتور قابل محاسبه اند. مثلاً اندوکتانس متقابل حلقه اول و سوم رتور عبارت است از:

$$L_{r1r3} = \frac{20rl}{g} \times \frac{-2\pi}{(44)^2} \quad (5)$$

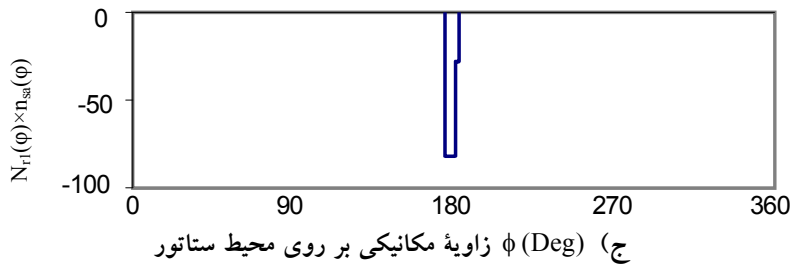
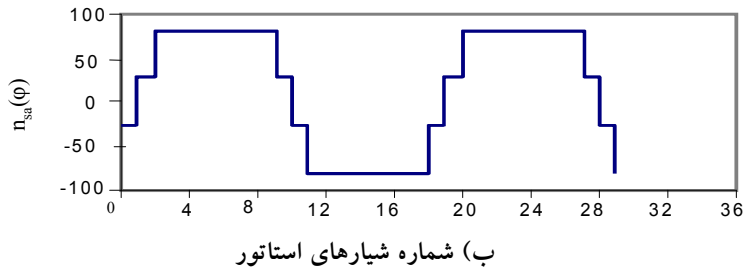
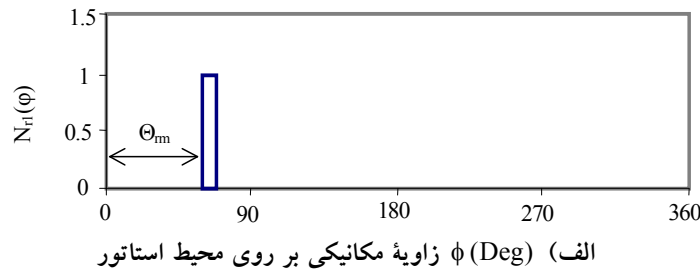
از این روش برای محاسبه اندوکتانس مغناطیس کننده یک کلاف نیز استفاده می شود، برای این منظور از حاصلضرب تابع دور و تابع سیم پیچ همان کلاف در فاصله یک سیکل انتگرال گیری می شود. به عنوان مثال اندوکتانس مغناطیس کننده سیم پیچ x عبارت است از:

$$L_{mx} = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_x(\varphi) \cdot n_x(\varphi) d\varphi \quad (6)$$

با توجه به این معادله اندوکتانس مغناطیس کننده هر فاز استاتور و همچنین اندوکتانس مغناطیس کننده حلقه های رتور با استفاده از معادلات زیر محاسبه می شوند:

$$L_{ms} = \frac{30rl}{g} \times \frac{65\pi N^2}{16z} \quad (7)$$

$$L_{mr} = \frac{30rl}{g} \times \frac{86\pi}{(44)^2} \quad (8)$$



شکل ۱- فاصله مراحل مربوط به محاسبه اندوکتانس L_{ar1} :

الف) تابع دور حلقه اول رتور در موقعیت زاویه ای θ_{rm}

ب) تابع سیم پیچ فاز a استاتور

ج) حاصلضرب تابع دور حلقه اول رتور و تابع سیم پیچ فاز a استاتور

$$\lambda = L I \quad (13)$$

$$I = L^{-1} \lambda \quad (14)$$

با توجه به معادله گشتاور الکتریکی و معادله مکانیکی سیستم، مقدار سرعت و زاویه وضعیت به ترتیب زیر محاسبه می شوند:

$$T_e = I_s^T \left(\frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_{rm}} \right) I_r \quad (15)$$

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} \quad (16)$$

$$\omega_{rm} = \frac{d\theta_{rm}}{dt} \quad (17)$$

۲-۳- معادلات دینامیکی موتور القایی

معادلات ولتاژی و شارژ استاتور و رتور به ترتیب عبارت اند

از [۱۳]:

$$V_s = R_{ss} I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (9)$$

$$0 = R_{rr} I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (10)$$

$$\lambda_s = L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \quad (11)$$

$$\lambda_r = L_{rs} I_s + L_{rr} I_r \quad (12)$$

در ادامه معادله کلی شار و مقادیر جریان بر حسب شار محاسبه می شوند

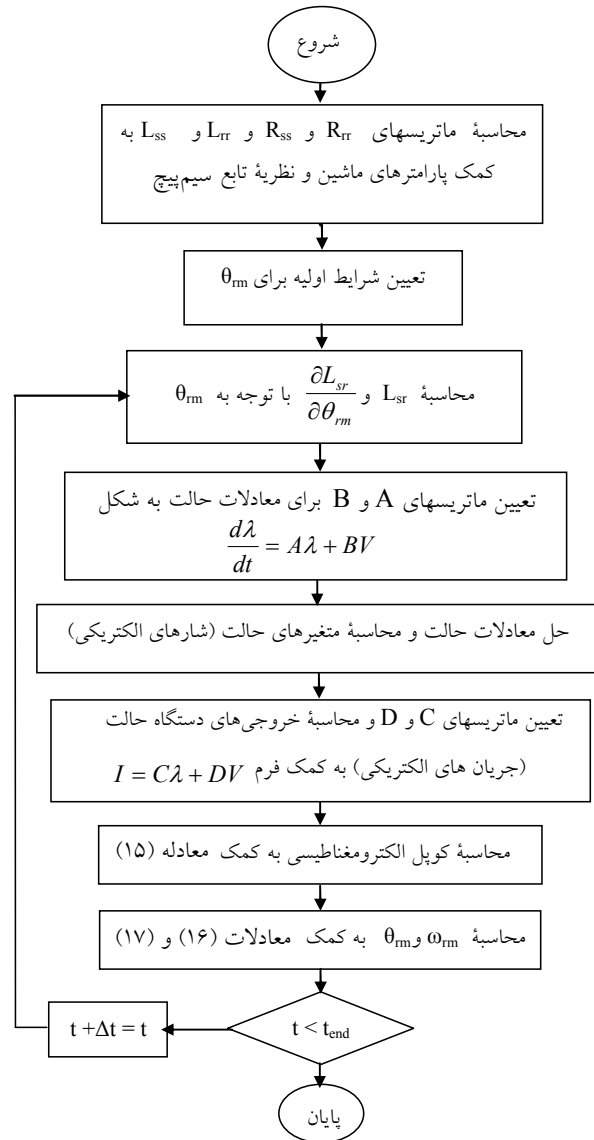
نامتعادل می‌شوند. لذا می‌توان جریان‌های مربوط به این مدار را به دو مؤلفه تجزیه کرد، در نتیجه دو میدان گردان با فرکانسهای $\pm sf_s$ در دو جهت مخالف در فاصله هوایی به وجود می‌آیند. حضور همزمان این دو میدان همزمان باعث می‌شود که در طیف فرکانسی شار فاصله هوایی، مؤلفه‌هایی به شکل $f_b = \pm sf_s$ ایجاد شود. دامنه این مؤلفه‌ها به مشخصات ساختمانی و سایر متغیرهای موتور وابسته‌اند. وجود این مؤلفه‌های شار باعث ایجاد مؤلفه‌هایی با فرکانس متناظر در جریان استاتور می‌شوند. از طرف دیگر به دلیل اثر متقابل مؤلفه $f_s(1-2s)$ در جریان خط و مؤلفه اصلی شار فاصله هوایی اعوجاجی با فرکانس $2sf_s$ در سرعت حاصل می‌شوند، این پدیده به نوبه خود منجر به ایجاد مؤلفه‌های اضافی دیگری به شکل $f_s(2k-1) \pm$ در میدان فاصله هوایی، و نوساناتی با فرکانس $2ksf_s$ در سرعت و همچنین مؤلفه‌هایی با فرکانس $f_s(1 \pm 2ks)$ در جریان استاتور و مؤلفه‌هایی با فرکانس $f_s(2k-1)$ در جریان رتور می‌شود.

اساس روش MCSA در تشخیص خطای مربوط به شکستگی رتور، تجزیه و تحلیل میزان تغییرات در دامنه و فرکانس این هارمونیکهای باند کناری^{۱۳} در اطراف مؤلفه اصلی در طیف جریان استاتور است [۳].

۵ - استفاده از شبکه‌های عصبی برای تشخیص شکستگی

با توجه به کارآمدی شبکه‌های عصبی، از این روش برای تشخیص خطا استفاده می‌شود. برای طراحی یک شبکه عصبی مناسب عوامل متعددی باید مد نظر قرار گیرد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- الف- آموزش شبکه: مواردی چون تعیین متغیرهای ورودی و خروجی و انتخاب اندازه مجموعه داده‌های آموزشی
- ب - ملاحظات عملی: مواردی چون دقت شبکه، مقاوم بودن شبکه و عملی بودن پیاده سازی
- ج- طراحی شبکه: مواردی چون تعداد گره‌های ورودی و خروجی، تعداد لایه‌های مخفی در شبکه و تعداد گره‌های مخفی

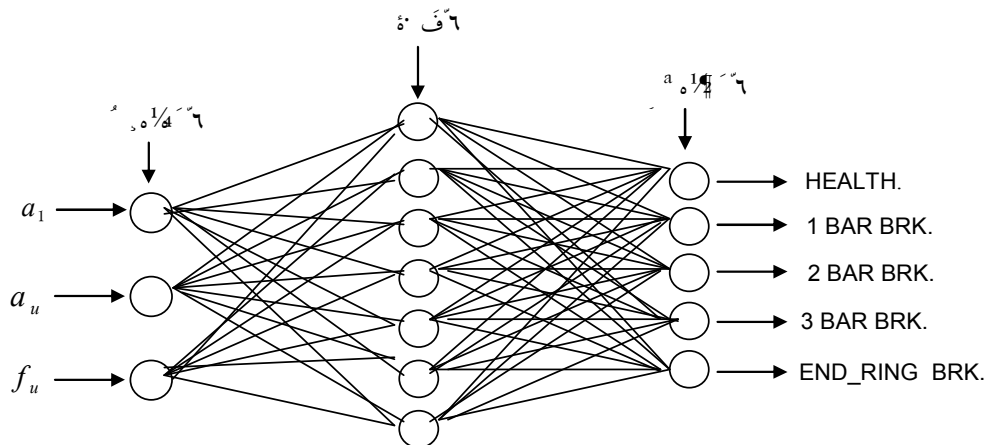


شکل ۲- روندنمای شبیه سازی ماشین القایی با انتخاب شار به عنوان متغیرهای حالت

با توجه به مقدار اندوکتانسها که در هر لحظه محاسبه می‌شود، مقدار جریان، شار، گشتاور، سرعت و موقعیت زاویه‌ای مطابق شکل (۲) به دست می‌آید.

۴ - روش تجزیه و تحلیل سیگنال جریان در تشخیص شکستگی رتور

در اثر بروز شکستگی در میله‌های رتور یا حلقه‌های انتهایی، مدار رتور از حالت تقارن خارج گشته و جریانهای رتور



شکل ۳- ساختار شبکه عصبی برای تشخیص شکستگی رتور موتور القایی

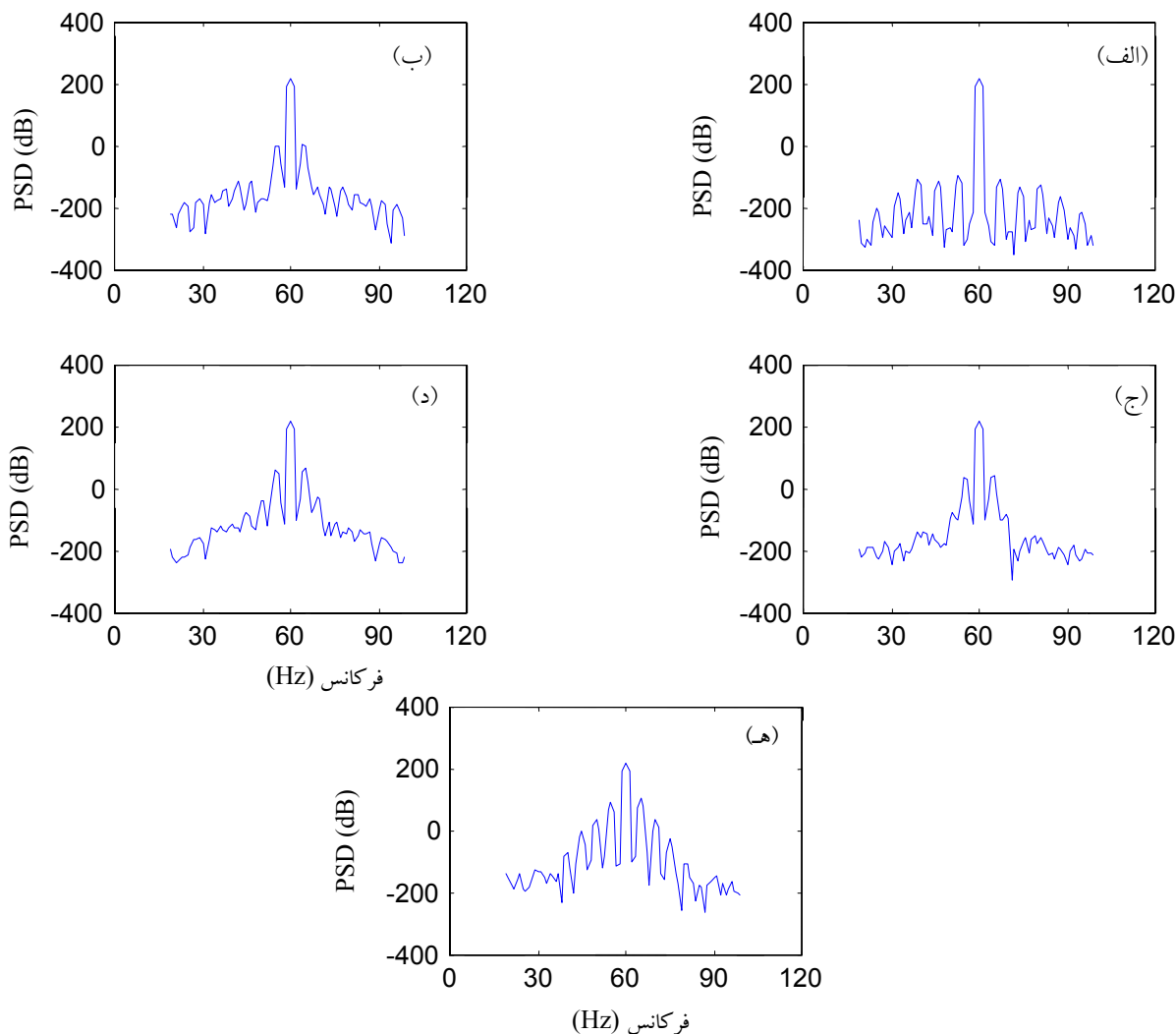
ساختار این شبکه عصبی در شکل (۳) آمده است. تابع به کار گرفته شده در نرونهای لایه مخفی از نوع سیگموئید به صورت تانژانت هیپربولیک سیگموئید^{۱۷} بوده و نرونهای لایه خروجی به صورت خطی است. برای آموزش شبکه انتخاب وزنه‌های اولیه به طور تصادفی صورت گرفته، سپس با استفاده از الگوریتم رودی مقادیر خروجی محاسبه می‌شوند، این مقادیر با خروجیهای مطلوب مقایسه شده و مقادیر خطا تعیین می‌شود، سپس از مقادیر خطا برای تنظیم وزنه‌ها استفاده می‌شود.

۶- نتایج موتور شبیه سازی شده

شبیه سازی موتور القایی با استفاده از نمودار جریانی شکل (۱) انجام گرفت. برای این منظور از پارامترهای مربوط به یک موتور القایی به قدرت ۳ اسب بخار که مشخصات کامل آن در پیوست (الف) آمده است استفاده شد. در مدل کردن شکستگی رتور مقاومت هر بخش شکسته در ماتریس مقاومت رتور عددی بزرگ در نظر گرفته شدند، به این ترتیب با تغییر مقاومت هر بخش، اثرات شکستگی جزئی نیز قابل بررسی است. در ادامه گشتاور بار 12N.m به موتور اعمال شده و در وضعیتهای مختلف سلامت، حلقه انتهایی شکسته و یک تا سه میله شکسته و نتایج شبیه سازی ذخیره شد. سپس طیف فرکانسی جریان استاتور در حالت‌های مختلف با استفاده از FFT به دست آمد.

که در هر لایه مخفی به کار می‌رود. تعیین بسیاری از این پارامترها یک فرایند سعی و خطایی دارد اما در مواردی، قواعدی سرانگشتی وجود دارد، به عنوان مثال در شبکه‌های عصبی سه لایه، نرونهای لایه مخفی بزرگتر از مجموع نرونهای ورودی و خروجی است [۱۴]. اگر تعداد داده‌های آموزشی کم باشد شبکه به طور صحیح آموزش نخواهد دید. همچنین، اگر تعداد داده‌های آموزشی زیاد باشد زمان آموزش شبکه طولانی خواهد بود [۱۵].

هدف از طراحی شبکه عصبی در این مقاله آن است که بتوان در شرایط و نقاط کار مختلف، با در اختیار داشتن اطلاعات ورودی به نوع شکستگی در رتور دست یافت. برای این منظور از یک شبکه عصبی سه لایه از نوع انتشار به عقب^{۱۴} و پیش‌تغذیه^{۱۵} که تعداد نرونهای لایه ورودی آن ۳ و تعداد نرونهای لایه خروجی ۵ است استفاده شده است. برای ورودی این شبکه باید از مجموعه اطلاعات مستقلی^{۱۶} استفاده شود که در عین حال بتوانند وضعیت رتور را به طور کامل مشخص کنند. برای این منظور از دامنه هارمونیک اصلی جریان استاتور، a_{II} دامنه هارمونیک کناری $f_s(1+2)$ و f_{II} فرکانس این هارمونیک استفاده شده است. خروجیهای این شبکه بیان‌کننده وضعیتهای مختلف رتور یعنی سلامت و شکستگی یک میله، دو میله، سه میله و یا یک حلقه انتهایی رتور است. در هر حالت تنها یکی از خروجیها "۱" و بقیه "۰" است.



شکل ۴- طیف فرکانسی جریان استاتور

(الف) حالت سلامت رتور (ب) رتور با یک میله شکسته

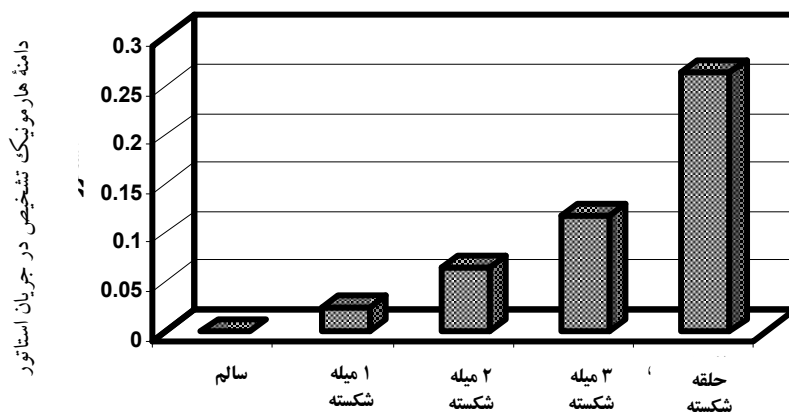
(ج) رتور با دو میله شکسته (د) رتور با سه میله شکسته (هـ) رتور با یک شکستگی در حلقه انتهایی

داده شود، دامنه هارمونیک مربوط به باندهای کناری افزایش خواهد یافت. در شکل (۶) تغییرات دامنه این هارمونیک به ازای چهار گشتاور بار مختلف و در حالت سه میله شکسته نشان داده شده است.

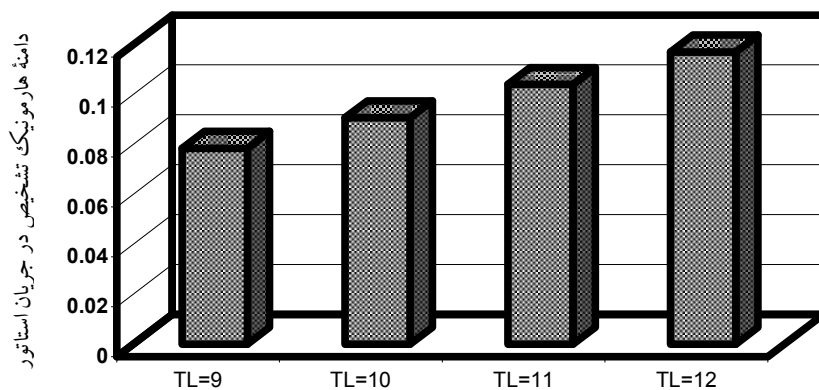
در جدول (۱) نتایج حاصل از تحلیل حوزه فرکانس جریان استاتور در حالات مختلف شکستگی و مقادیر مختلف گشتاور بار، سرعت پایدار موتور، لغزش و مرتبه و دامنه هارمونیکهای باند کناری ثبت شده است.

در شکل (۴) این طیف فرکانسی به ترتیب برای حالت‌های سلامت، یک میله، دو میله، سه میله شکسته و حلقه انتهایی شکسته نشان داده شده است.

همان گونه که ملاحظه می‌شود با گسترش شکستگی، دامنه هارمونیک‌های $(1 \pm 2ks)f_s$ مربوط به باندهای کناری افزایش می‌یابند. در شکل (۵) تغییرات دامنه این هارمونیک برحسب نوع شکستگی و به ازای گشتاورهای بار یکسان نشان داده شده است. از طرف دیگر چنانچه گشتاور بار در هر وضعیت رتور افزایش



شکل ۵- مقایسه دامنه هارمونیک $f_s(1+2s)$ برای انواع حالات رتور و گشتاور بار مشابه



شکل ۶- مقایسه دامنه هارمونیک $f_s(1+2s)$ در حالت سه میله شکسته و گشتاورهای بار مختلف

۱-۶- آموزش و به کارگیری شبکه عصبی

از هارمونیکهای باند کناری به عنوان معیاری برای سنجش وضعیت رتور استفاده می شود و دامنه این هارمونیکها تابع میزان گشتاور بار و همچنین نوع شکستگی بوده و امکان تداخل نتایج است، از طرف دیگر علاوه بر فرکانسهای فوق فرکانسهای طبیعی دیگری هم به دلیل اثر شیارهای رتور و استاتور، و در مدل عملی به دلیل نویز محیط صنعتی و نوسانات بار مکانیکی ایجاد می شود، همچنین به دلیل اختلالات هنگام ساخت، حتی در حالت سلامت موتور، فرکانسهای جانبی وجود دارند، پس با بررسی مستقیم این فرکانسها تشخیص وضعیت موتور امکانپذیر نیست و استفاده

از شبکه های عصبی برای رفع این مشکلات مناسب به نظر می رسد.

برای آموزش شبکه عصبی که ساختار آن در مبحث (۵) توضیح داده شد، از نتایج مندرج در جدول (۱) استفاده شد. تابع آموزشی به کار رفته از نوع لونیبرگ- مارکوآرت^{۱۸} است که به صورت آموزش گروهی^{۱۹} عمل می کند و حداکثر خطای مجاز در مرحله آموزش ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

پس از آموزش شبکه و برای آزمودن آن، موتور مورد نظر به ازای چند گشتاور بار متفاوت جدول (۱) شبیه سازی شده، نتایج آن به شبکه عصبی اعمال شد. نتایج حاصل منطبق بر

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل سیگنالهای موتور القایی شبیه‌سازی شده در حالات مختلف شکستگی

تعداد میله شکسته رتور	تعداد بخشهای شکسته endring	گشتاور بار N.m	سرعت چرخش مکانیکی RPM	لغزش	فرکانس (1-2s)f (هرتز)	فرکانس (1+2s)f (هرتز)	دامنه (1-2s)f (آمپر)	دامنه (1+2s)f (آمپر)	دامنه هارمونی اول (آمپر)
1	0	9	1751.8	.0268	56.79	63.21	.0163	.0185	3.538
1	0	10	1745.7	.0302	56.38	63.62	.0179	.0208	3.872
1	0	11	1739.2	.0338	55.95	64.05	.0199	.0231	4.216
1	0	12	1732.9	.0373	55.53	64.47	.0230	.0244	4.57
2	0	9	1750.9	.0272	56.73	63.27	.0405	.0435	3.553
2	0	10	1744.6	.0308	56.31	63.69	.0445	.0504	3.889
2	0	11	1737.8	.0345	55.86	64.14	.0495	.0568	4.237
2	0	12	1731.5	.0381	55.43	64.57	.0528	.0647	4.593
3	0	9	1750	.0278	56.66	63.33	.0703	.0784	3.577
3	0	10	1742.7	.0318	56.19	63.81	.0791	.0907	3.918
3	0	11	1736	.0355	55.74	64.26	.088	.104	4.27
3	0	12	1729	.0394	55.28	64.72	.096	.117	4.633
0	1	9	1744.9	.0306	56.33	63.67	.157	.1773	3.613
0	1	10	1740.6	.033	56.04	63.96	.1771	.2048	3.958
0	1	11	1731.5	.038	55.43	64.57	.1973	.2338	4.312
0	1	12	1723.2	.0427	54.88	65.12	.2187	.2646	4.681
0	0	9	1752.3	.0265	-----	-----	-----	-----	3.539
0	0	10	1746.4	.0298	-----	-----	-----	-----	3.865
0	0	11	1740.2	.0332	-----	-----	-----	-----	4.208
0	0	12	1733.8	.0368	-----	-----	-----	-----	4.562

واقعیت بوده و صحت عملکرد شبکه مورد تأیید قرار گرفت.

تغییر جریان تحریک ژنراتور استفاده می‌شود.

ج- کارت A/D: برای نمونه برداری جریان: کارت داده برداری با مشخصات $\text{Memory} = 1k \text{ FIFO}, \text{Gain} = 1V, 100kHz$ است که تحت سیستم عامل WIN NT و نرم‌افزار Visual C++ عمل می‌کند. فرکانس نمونه برداری معادل ۱۰۲۴ و تعداد نمونه برداشته شده معادل ۶۵۵۳۶ عدد است.

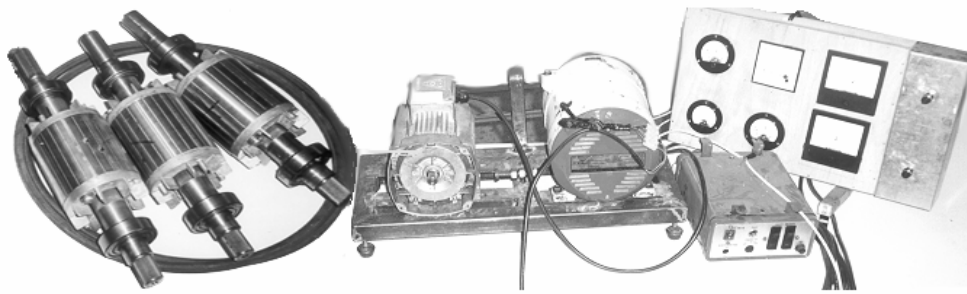
نمودار آزمایش در شکل (۸) نشان داده شده است، همان گونه که ملاحظه می‌کنید با راه‌اندازی این سیستم، ابتدا از جریان و سرعت نمونه‌برداری شده و اطلاعات در فایل ذخیره می‌شود. این کار را برای رتور سالم، رتور میله شکسته و رتور با حلقه انتهایی شکسته و به ازای مقادیر مختلف بار مکانیکی انجام دادیم. برای ایجاد حالت شکستگی در رتور، بخش

۷- نتایج مجموعه آزمایشگاهی

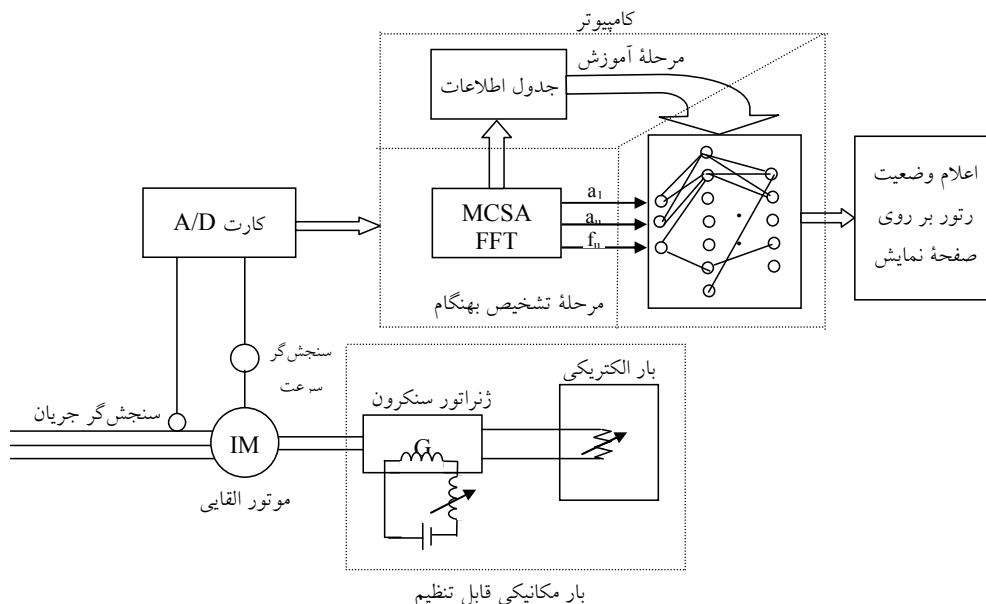
برای بررسی عملکرد سیستم شبکه عصبی طراحی شده، از مجموعه‌ای آزمایشگاهی مطابق شکل (۷) که شامل اجزاء زیر است استفاده شد:

الف- موتور القایی قفس سنجابی: سه فاز ۴ قطب به قدرت 1/1 kW با تعداد ۳۶ شیار استاتور و ۲۸ شیار رتور همراه با سه رتور اضافی، برای انجام آزمون در حالت‌های شکستگی میله‌های رتور و حلقه انتهایی

ب- بار مکانیکی: یک ژنراتور سنکرون متصل به محور موتور القایی همراه با بار الکتریکی برای تغییر گشتاور بار به موتور، از



شکل ۷- مجموعه آزمایشگاهی شامل موتور القایی مورد آزمایش، ژنراتور به عنوان گشتاور بار و سه عدد رتور اضافی برای ایجاد انواع شکستگی



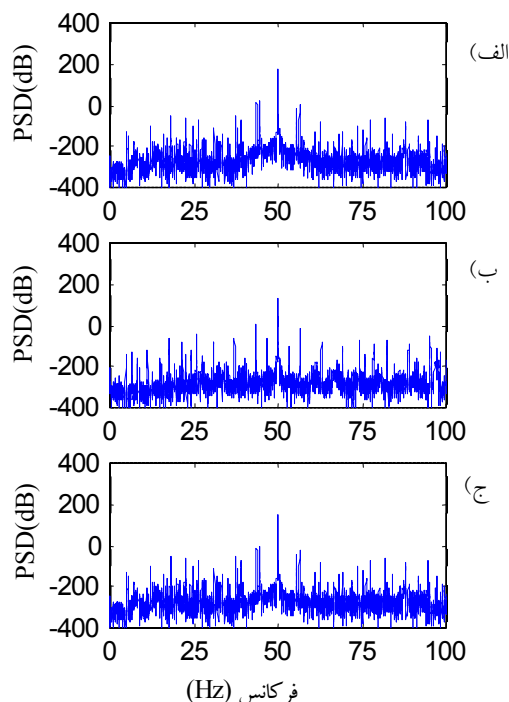
شکل ۸- مجموعه سخت افزار و نرم افزار و مراحل مختلف آزمایش برای تشخیص شکستگی رتور

شد. سپس با استفاده از طیف فرکانسی حاصل، دامنه و فرکانس اصلی جریان و دامنه و فرکانس باندهای کناری به دست آمد. با بکارگیری اطلاعات به دست آمده مربوط به وضعیتهای مختلف رتور و مقادیر مختلف گشتاور بار جدولی مشابه جدول (۱) برای موتور آزمایشگاهی آماده شد. در ادامه کار از این جدول اطلاعات مطابق شکل (۸)، برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد.

پس از اتمام مرحله آموزش برای امتحان عملکرد سیستم تشخیص خطا، موتور را به ازای گشتاورهای بار متفاوت با

موردنظر را برش زدیم. سپس با استفاده از نرم افزار تهیه شده طیف فرکانسی جریان نمونه برداری شده به روش FFT تولید شد. در شکل‌های (۹-الف) تا (۹-ج) نتایج طیف فرکانسی موتور آزمایشگاهی در فاصله صفر تا ۱۰۰ هرتز برای رتور سالم، رتور با حلقه انتهایی برش زده شده و رتور با دو میله برش زده شده، نمایش داده شده است.

در مرحله بعدی با توجه به سرعت اندازه‌گیری شده مقدار لغزش و فرکانس باندهای کناری موردنظر مشخص شده، امکان تفکیک این باندهای فرکانسی از سایر باندهای فرکانسی فراهم



شکل ۹- نتایج طیف فرکانسی موتور آزمایشگاهی در فاصله 0-100 Hz

(الف) رتور سالم (ب) رتور با حلقه انتهایی برش زده شده (ج) رتور با دو میله برش زده شده

جدول ۲- نمونه‌ای از نتایج مربوط به اعلام وضعیت رتور موتور آزمایشگاهی توسط شبکه عصبی

گشتاور بار	وضعیت رتور مورد آزمایش	دامنه هارمونی اصلی	دامنه هارمونی باند کناری	فرکانس هارمونی باند کناری	خروجی شبکه عصبی اعلام وضعیت رتور
90%	سالم	4.048	0.031	54.07	HEALTH
30%	دو میله شکسته	3.158	0.280	53.00	2 BAR BRK.
60%	حلقه انتهایی شکسته	3.581	0.110	53.27	END.RING BRK.

از اثرات این خطا بر روی سیگنالهای مختلف موتور از قبیل سرعت، گشتاور و جریان، موتور القایی به روش تابع سیم پیچ مدل سازی شد. سپس با استفاده از نتایج شبیه سازی و تحلیل عملکرد موتور القایی در شرایط بروز خطا ثابت شد که وجود خطا در موتور، باعث ایجاد فرکانسهای در اطراف فرکانس اصلی می شود که میزان فرکانس و دامنه آنها تابعی از نوع اختلال و گشتاور بار است، لذا از این مقادیر به عنوان پارامترهای اصلی برای تشخیص خطا استفاده شد. با توجه به اینکه علاوه بر فرکانسهای فوق، در اثر عواملی

گشتاور باری که برای مرحله آموزش مورد استفاده قرار گرفته بودند مورد آزمایش قرار دادیم و صحت عملکرد سیستم تشخیص خطا مورد تأیید قرار گرفت. نمونه‌ای از نتایج حاصل برای انواع حالت‌های شکستگی رتور در جدول (۲) آمده است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا انواع خطاهای موتورهای القایی و روشهای تشخیص آنها و خصوصاً خطای شکستگی میله‌ها یا حلقه انتهایی رتور مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای اطلاع

نتایج شبیه سازی و همچنین نتایج آزمایشگاهی مؤید قابلیت عملکرد سیستم طراحی شده برای تشخیص وضعیت رتور از نظر سلامت، شکستگی حلقه‌های انتهایی و یا میله‌های رتور به صورت بهنگام^{۲۰} است. ضمناً این روش را برای تشخیص سایر خطاهای موتور القایی می‌توان به کار برد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بدین وسیله مراتب تشکر خود را از آقایان دکتر سعید صدری، مهندس حسن فتوحی، مهندس سیدعلی جعفرزاده، مهندس احمد یزدان پرست، خانم مهندس قاسمی، مهندس علی مسعودی‌نیا، مهندس حسین نیلی و مهندس علی شریعتمداری که به انحاء مختلف در اجرای این پروژه همکاری داشته‌اند اعلام می‌دارند.

از قبیل: ساختمان موتور، اختلالات جزئی موقع ساخت و نويز محیط صنعتی فرکانسهای کناری دیگری هم ایجاد می‌شود و در شرایط تغییر گشتاور بار و به ازای انواع مختلف شکستگی امکان تداخل اطلاعات وجود دارد بنابراین با استفاده از این اطلاعات، تشخیص وضعیت رتور به سادگی امکانپذیر نیست، لذا برای تشخیص خطا از شبکه عصبی استفاده شد. برای این منظور ابتدا از جریان استاتور و سرعت در شرایط مختلف گشتاور بار و وضعیت رتور نمونه برداری شد و با توجه به آنها اندازه و فرکانس هارمونیک اصلی و باندهای کناری محاسبه شد. از بخشی از این اطلاعات برای آموزش شبکه و از بخش دیگری از آن به عنوان ورودی‌های آزمایشی شبکه عصبی استفاده شد. از مزایای سیستم تشخیص خطای طراحی شده، سرعت آموزش، حداقل تعداد ورودی و امکان تشخیص تعداد میله‌های شکسته است.

واژه نامه

- | | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| 1. off - line | 11. unbalanced magnetic pull |
| 2. growler | 12. shaft torque |
| 3. on - line | 13. sideband frequency |
| 4. motor current signature analysis | 14. back propagation |
| 5. fast fourier transform | 15. feed - forward |
| 6. hanning | 16. feature |
| 7. artificial neural network | 17. tansig |
| 8. rigorous | 18. levenberg - marquart |
| 9. frequency monitoring | 19. batch |
| 10. particle analysis | 20. on-line |

مراجع

1. Nandi, S. "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines-a Review," in *IEEE Thirty-Fourth IAS Meeting*, Vol. 1, pp. 197-204, 1999.
۲. مشکین کلک، ه.، "مدل‌سازی همزمان سه بعدی موتور القایی قفسه سنجابی در صورت بروز خطاهای متداول در رتور،" رساله دکترا، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۵.
3. Kliman, G. B. and R. A. Koegl, "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. EC-3, No. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.
4. Filippetti, F. and Franceschini, G. "A Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect," *IEEE-IAS Annual Meeting Conference*, San Diego, pp. 655-662, Oct. 6-10, 1996.
5. Filippetti, F. and Franceschini, G. "Broken Bar Detection in Induction Machines: Comparison Between Current Spectrum Approach and Parameter Estimation Approach," *Proceedings of the IEEE-IAS Annual Meeting Conf, Denver, Colorado, USA*, Vol. 1, pp. 95-102, 1994.
6. Bardour A. and Thomsn, W.T. "Finite Element Study of Rotor Slot Designs with Respect to Current Monitoring for Detecting Static Air Gap Eccentricity in Squirrel-Cage Induction Motor," *Proceedings of*

- the *IEEE-IAS Annual Meeting Conference*, New Orleans, LA, pp. 112-119, Oct. 5-9, 1997.
7. Kyusung, K. "Induction Motor Fault Diagnosis Based on Neuro Predictors and Wavelet Signal," *Processing IEEE Trans. Mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 201-219, 2002.
 8. Masoud, H. "Pattern Recognition-A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 16, No. 4, 2001.
 9. Rokonzaman, M. and Ranman, M.A. "Neural Network Based Incipient Fault Detection of Induction Motors," *IEEE-IAS*, pp. 199-202, 1995.
 10. Goode, P. V. "Neural Fuzzy Systems for Incipient Fault Detection in Induction Motors," *IEEE-IECON*, Vol. 1, pp. 332-337, 1993.
 11. Bonnet, A. H. "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, pp. 921-937, July-August 1992.
 12. Toliyat, H. A. "Analysis of Concentrated Winding Induction and Reluctance Motors for Adjustable Speed Drive Applications," *Ph. D. dissertation*, University of Wisconsin Madison, Madison, Wisconsin, USA, February 1991.
 13. Toliyat, H. A. and Lipo, T.A. "Transient Analysis of Cage Induction Machines under Stator, Rotor Bar and End Ring Fault," *IEEE Trans on EC.*, Vol. 10, No. 2, pp. 241-247, June, 1995.
 14. Filippetti, F. and Franceschini, G. "Neural Networks Aided On-Line Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults," *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 31, No. 4, pp. 892-899, Jul. Aug., 1995.
 15. Chow, M. Y. "Design Considerations for a Motor Fault Detection Artificial Neural Network," *IEEE, Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*, Conference on Nov, vol. 3, pp. 1455-1459. 1992.

پیوست الف

مشخصات موتور شبیه سازی شده

۳ اسب، ۳ فاز، ۴ قطب، ۴۶۰ ولت و ۶۰ هرتز

طول محوری استاتور و رتور: ۲ اینچ

پهنای دهانه باز شیار: ۰/۱۲ اینچ

قطر داخلی استاتور: ۴/۸۷۵ اینچ

طول فاصله هوایی: ۰/۱۳ اینچ

تعداد شیارهای استاتور: ۳۶

تعداد میله های رتور: ۴۴

مقاومت هر فاز استاتور: ۳/۷ اهم بر فاز

مقاومت هر میله رتور: ۵۰/۰۶ میکرواهم

مقاومت هر قطعه از حلقه انتهای رتور: ۲/۶۷۴۸ میکرواهم

ممان اینرسی موتور: ۰/۰۱۱۳ کیلوگرم متر مربع

آرایش سیم‌بندی استاتور از نوع تک لایه متمرکز با ۵۴ دور

سیم در هر شیار