

## استفاده از شبکه عصبی برای تعیین محدوده مجاز کاری موتور القائی با خطای دور به دور

ابوالقاسم راعی

استاد یار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Raie@cic.aku.ac.ir

وحید رشتچی

استادیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه زنجان

Rashtchi@mail.znu.ac.ir

(تاریخ دریافت ۸۱/۱۰/۱۴، تاریخ تصویب ۸۲/۷/۱۲)

### چکیده

امکان تغذیه موتور القائی با خطای دور به دور و نقاط کاری که در آنها خطا گسترش نیابد، در منابع پژوهشی آمده است. در این مقاله، محدوده نقاط کار مجاز برای موتور معیوب، به پایدار و گذرا طبقه بندی شده اند، که به ترتیب به معنی نقاطی هستند که برای مدت دلخواه و مدت کوتاه قابل استفاده می باشند. مطابق انتظار نشان داده شده که برای یک میزان معین از خطا، سرعتها و گشتاورهای بالاتری بصورت گذرا قابل تحمل است و این ایده برای کنترل مطلوبتر یک موتور معیوب قابل استفاده می باشد. وابستگی محدوده نقاط کار مجاز به دمای محیط و قابلیت شبکه عصبی در کوتاه کردن پروسه وقت گیر تعیین محدوده نقاط کار پایدار، نشان داده شده است. برای موتور معیوب یک مدل حرارتی ارائه شده که در دنبال کردن دمای محل خطا مورد استفاده قرار می گیرد و میتواند برای بدست آوردن محدوده نقاط کار گذرا و پایدار و در دماهای مختلف محیط استفاده شود. پارامترهای مدل بکمک الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی و نتایج تجربی بدست می آیند. صحت و دقت نتایج با آزمایشهای متعدد نشان داده شده است.

### واژه های کلیدی: موتور القائی، خطای دور به دور، شبکه عصبی، نقاط کار پایدار، نقاط کار گذرا

### مقدمه

مدت نامحدود کار کند، بدون آنکه دمای محل خطا و موتور از حد مجاز تجاوز کند و خطا گسترش یابد. این نقاط، حد بالای سرعت و گشتاور را به ازای تعداد دور خطا و در مدت کار طولانی بدست میدهند و سوال این است که بسته به نیاز و کاربرد، آیا برای زمانهای کوتاه و بعبارت دیگر گذرا نمیتوان از این حدود فراتر رفت و نقاط کار مجاز برای حالت گذرا داشت؟

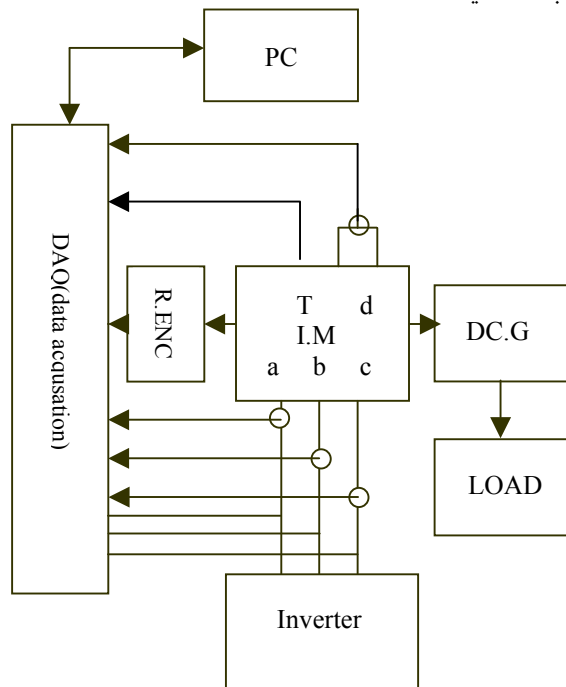
در این مقاله برای هر دو مسئله راه حلی بکمک شبکه های عصبی ارائه میشود. در بخش بستر آزمایشگاهی مورد استفاده نحوه بدست آوردن نمودار نقاط کار برای حالت پایدار، بکمک شبکه عصبی با استفاده از تعداد کمی آزمایش نشان داده میشود. پاسخ به سوال دوم نیازمند تخمین دمای موضع خطا و رعایت حد مجاز دما میباشد، که در بخش تعیین نقاط کار مدل حرارتی موتور با خطای دور به دور و ارزیابی آن با استفاده از نتایج تجربی مورد بحث قرار گرفته است.

امکان ادامه کار موتور القائی پس از وقوع خطای دور به دور در [۱] بررسی شده است. نشان داده شده است که ادامه کار مستلزم تغییر نقطه کار میباشد و نقاط کار جدید بسته به اندازه خطا، یعنی تعداد حلقه های اتصال کوتاه شده، با کاهش سرعت، بار و یا هر دوی آنها نسبت به مقادیر نامی بدست می آیند. همچنین نحوه بدست آوردن نموداری که نقاط کار مجاز بر حسب میزان خطا را بدست دهد ارائه شده است [۲].

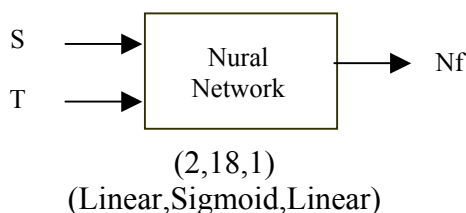
ایده ها و کارهای جدید در این مقاله، در رابطه با دو مسئله اساسی در زمینه فوق الذکر میباشد. اولاً روش ارائه شده در [۲] برای بدست آوردن نمودار نقاط کار، مستلزم صدها آزمایش زمانبر میباشد و مسئله این است که آیا راه حل سریعتری وجود دارد؟ ثانیاً نقاطی که این نمودار ارائه میدهد و منبسط آنها را نقاط کار مجاز برای حالت پایدار می نامیم، نقاطی هستند که در آنها موتور میتواند برای

میبایست به ازاء بارها و سرعت‌های مختلف در محدوده نامی، ماکزیمم میزان خطای دور به دور مجاز را بدست آورد. یعنی ماکزیمم تعداد دور خطائی که به ازاء آن در حالت پایدار دمای موضع خطا از حد مجاز دما، که در موتور مورد مطالعه ۹۵ درجه است، تجاوز نکند. کامل کردن چنین نموداری صدها آزمایش زمانبر را می‌طلبد.

روش پیشنهادی در این مقاله استفاده از شبکه عصبی برای کاهش تعداد آزمایشها می‌باشد. شبکه شکل (۲) با ورودی های  $T$  و  $S$  که به ترتیب نماینده گشتاور بار و سرعت هستند، یک شبکه  $FF$  با دو نرون خطی در ورودی، هیجده نرون سیگموئید در لایه میانی و یک نرون خطی در خروجی میباشد، که مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی شبکه ماکزیمم تعداد دور مجاز خطا را بدست میدهد.



شکل ۱: بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در انجام آزمایشها (T سنسور دمای موضع خطا می باشد).



شکل ۲: ساختار شبکه عصبی مورد استفاده.

در بخش مدل حرارتی موتور راه حلی بکمک شبکه عصبی برای تخمین پارامترهای مدل حرارتی و تخمین دمای موضع خطا ارائه میشود و نشان داده میشود که برای نقاط کار گذرا با داشتن تخمین از دمای موضع خطا میتوان تصمیم گیری مناسب نمود و صحت روش با نتایج تجربی نشان داده میشود.

### بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

آزمایشهای مورد نیاز این مقاله، بکمک بستر آزمایشگاهی معرفی شده در [۲] و با ویژگیهای ذیل صورت پذیرفته است:

- موتور القائی مورد آزمایش، موتوری دو قطبی با قدرت 1HP میباشد، که هر فاز آن از چهار کلاف متحد المركز ۹۰ دوری تشکیل شده و پارامترهای آن عبارتند از:

$$V_{L-L}=380 \text{ volt}, I_{sr}=2 \text{ A}, N_r=2775 \text{ rpm}$$

$$R_s=9 \Omega, R'_r=7.2 \Omega$$

$$X_{ls}=0.023 \text{ H}, X'_{lr}=0.027 \text{ H}, X_{ms}=0.337 \text{ H}$$

- برای ایجاد خطای مصنوعی دور به دور، یکی از فازهای این موتور به گونه ای خاص سیم پیچی شده و سر سیمهای لازم از این فاز به خارج آورده شده است. با استفاده از این سر سیمها میتوان خطاهای دور به دور را از ۱ تا ۲۱ دور به سادگی ایجاد نمود و دمای محل خطا را بکمک سنسورهای تعبیه شده اندازه گیری نمود. از آنجا که موتور دارای کلاس حرارتی B میباشد، حد مجاز دما، که در آن خطا گسترش نمی یابد ۹۵ درجه اختیار شده است.

- جمع آوری داده های لازم بکمک سیستم نشان داده شده در شکل (۱) انجام میشود. در این سیستم نمونه برداری از ورودیها و خروجی های مورد نظر، بصورت ده بیتی و با فرکانس 4KHZ توسط کارت DAQ و توسط PC صورت میپذیرد.

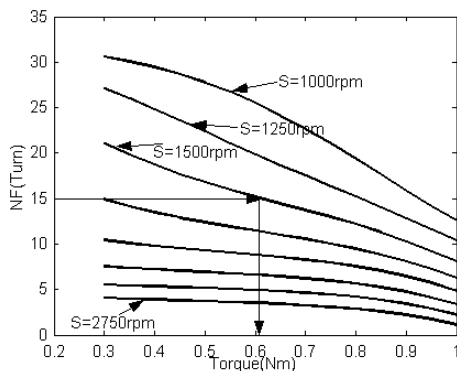
### تعیین نقاط کار مجاز در حالت پایدار با کمک شبکه عصبی برای موتوری که خطای دور به دور دارد

برای بدست آوردن نموداری که نقاط کار مجاز را در حالت پایدار میدهد، بنا بر روش پیشنهادی در [۲]

عدم پوشش کامل نقاط کار ممکن در شکل (۳) محدودیت امکانات آزمایشی و زمانبری آزمایشها بوده است. در سرعت ها و گشتاورهای پائین عملا تعداد دورهای مجاز خطای دور به دور از حد ۲۱ دور که در بستر آزمایشگاهی فراهم شده است تجاوز میکند. همچنین از دید کاربردی، اثبات موضوع برای گشتاورها و سرعتهای بسیار پائین در اولویت نبوده اند.

اطلاعات بدست آمده از شبکه عصبی میتواند بصورت دسته منحنی های شکل (۴) نیز تنظیم شود. در عمل استفاده از این منحنی ها به اینصورت است که با روش [۳] تعداد دورهای خطا مشخص میشود. بسته به نوع کاربرد و با تعیین سرعت یا گشتاور مورد نظر حد بالای دیگری تعیین میشود. مثلا در شکل (۴) نشان داده شده که به ازاء ۱۵ دور خطا و برای داشتن سرعت 1500rpm حد گشتاور مجاز ۰/۶۱ و کمتر می باشد و در شکل (۳) نشان داده شده است که به ازاء ۲۰ دور خطا و برای داشتن گشتاور ۰/۳ حد سرعت مجاز 1520rpm می باشد.

نتیجه آنکه برای هر موتور، سازنده میتواند با انجام آزمایشهای محدود و با روش ارائه شده، نمودار نقاط کار مجاز برای حالت پایدار را ارائه کند.



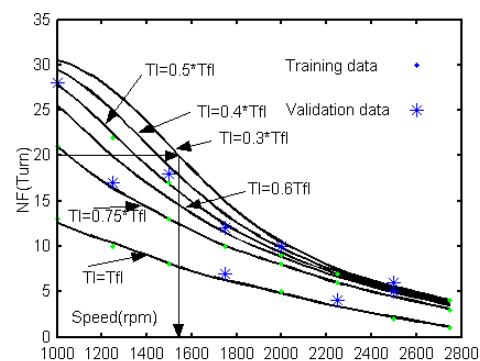
شکل ۴: ماکزیمم تعداد دورهای مجاز خطا بر حسب گشتاور بار و در سرعتهای مختلف.

### مدل حرارتی موتور با خطای دور به دور و شناسایی پارامترهای مدل حرارتی

مدل حرارتی موتور القائی با خطای دور به دور در بخش تعیین نقاط کار نحوه بدست آوردن حد مجاز گشتاور و سرعت برای تعداد دور معین از خطا نشان

برای آموزش شبکه از قانون BP استفاده شده است. داده های مورد استفاده که از آزمایش بدست آمده اند، هیجده نقطه از نمودار می باشند. این نقاط در شکل (۳) نشان داده شده اند و برای هر یک از مقادیر بار نامی، ۰/۷۵ بار نامی و ۰/۵۰ بار نامی، در شش سرعت مختلف در محدوده 1250rpm تا 2750rpm میباشند. بدیهی است که این تعداد نقطه برای آموزش چنین شبکه ای کافی نمی باشد. همچنین با توجه به فیزیک مسئله، منطقی به نظر میرسد که بتوان مقدار  $N_f$  را بین سرعتهای آزمایش شده برای یک  $T$  با دقت خوبی از طریق برازش منحنی بدست آورد. لذا، ابتدا سه منحنی با برازش منحنی درجه سوم بر داده های حاصل از آزمایش بدست آمد. سپس از هر یک از منحنی های بدست آمده، ۳۶ نقطه با گامهای سرعت 50rpm از ۱۲۵۰ تا ۲۷۵۰ دور بر دقیقه استخراج شد. این نقاط که جمعا ۱۰۸ نقطه را تشکیل میدهند، برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفتند و البته جهت اجتناب از شلوغی در شکل نشان داده نشده اند.

با استفاده از این شبکه، به ازاء هر  $T$  و  $S$  در محدوده آموزش داده شده  $N_f$  بدست می آید. منحنی های رسم شده در شکل (۳) از این شکل بدست آمده اند. ۲۸ نقطه بدست آمده از آزمایش برای ارزیابی روش بر روی شکل نشان داده شده اند. ۱۸ مورد از این نقاط در پروسه آموزش مورد استفاده قرار گرفته اند و ده مورد دیگر برای ارزیابی عملکرد شبکه در سایر نقاط اضافه شده اند. دقت این نقاط حاکی از هم صحت روش و هم صحت آموزش می باشد.



شکل ۳: ماکزیمم تعداد دورهای مجاز خطا بر حسب سرعت و در گشتاور بار های مختلف، حاصل از شبکه عصبی.

استاتور به محیط استفاده شده است و البته سایر مباحث ارتباطی به [۴] ندارند.

با فرض  $C2 \gg C1$  و  $R2 \gg R1$  که از نظر فیزیکی با توجه به جرم بسیار بیشتر استاتور نسبت به یک کلاف و مقاومت بسیار کوچکتر بین کلاف و استاتور نسبت به مقاومت حرارتی بین استاتور و محیط، معقول میباشند، میتوان پاسخ معادلات دیفرانسیل مدل را برای  $TM_E$  و  $TM_S$  بر حسب سایر پارامترها بصورت روابط (۱) و (۲) ساده نمود.

$$TM_E(t) = TM_E(0) + R_2(P_1 + P_2) - k_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - k_2 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \quad (1)$$

$$TM_S(t) = TM_S(0) + R_2(P_1 + P_2) - R_1 P_1 - k_2 \left(1 - \frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}\right) e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \quad (2)$$

با تعریف  $\alpha, \beta, \tau_1, \tau_2$  طبق روابط (۳) الی (۶)  $TM_E$  و  $TM_S$  بر حسب این پارامترها بصورت نشان داده شده در روابط (۷) و (۸) در می آیند.

$$\alpha = R_2(P_1 + P_2) \quad (3)$$

$$\beta = R_1 P_1 \quad (4)$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (5)$$

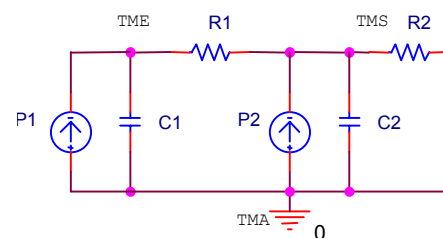
$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (6)$$

$$TM_E(t) = TM_E(0) + \alpha - k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (7)$$

$$TM_S(t) = TM_S(0) + \alpha - \beta - k_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}\right) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (8)$$

در این روابط  $\tau_2, \tau_1$  ثابت زمانی های مدل حرارتی میباشند. از آنجا که  $P_1$  نماینده تلفات حرارتی کلاف معیوب و  $P_2$  نماینده تلفات حرارتی استاتور هستند و تلفات حرارتی با جریان فازها یا عبارتی گشتاور بار، تعداد دورهای اتصال کوتاه و جریان حلقه های اتصال کوتاه شده که متناسب با سرعت است بستگی دارند، میتوان نتیجه گرفت که  $\alpha, \beta$  تابعی از سرعت، گشتاور و تعداد دورهای حلقه های اتصال کوتاه می باشند.  $k_1$  و  $k_2$  نیز با شرایط

داده شده است. بر این اساس میتوان برای موتور با میزان معین از خطای دور به دور و برای مدت زمان دلخواه در نقاط کاری مختلف و مجاز، موتور را تغذیه نمود. فراتر رفتن از حدود تعیین شده بر حسب نیاز و کاربرد و برای مدت کوتاه مستلزم اطمینان داشتن از عدم تجاوز دمای موضع خطا از حد مجاز، یعنی ۹۵ درجه سانتیگراد برای موتور مورد مطالعه است. در این بخش نحوه بدست آوردن مدل حرارتی برای تخمین دمای موضع خطا به ازاء نقاط کار مختلف نشان داده میشود. بدین ترتیب سازنده میتواند، به همراه هر نوع موتور، مدل حرارتی آنرا نیز ارائه دهد و بر حسب کاربرد مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: مدل حرارتی پیشنهادی برای موتور القائی با خطای دور به دور.

شکل (۵) مدل حرارتی پیشنهادی را نشان میدهد. فرض بر این است که گرمای تولید شده در موضع خطا به کلاف معیوب و سپس از کلاف معیوب به بدنه استاتور و از استاتور به محیط منتقل میشود. از آنجا که مقاومت حرارتی مس کوچک است، میتوان برای ساده سازی فرض کرد که دمای کلاف معیوب همان دمای موضع خطا و برابر  $TM_E$  میباشند. در این شکل  $TM_a$  و  $TM_s$  نماینده دمای استاتور و دمای محیط می باشند و پارامترهای مدل میتوانند تعابیر فیزیکی زیر را داشته باشند:

- $C1$  نماینده ظرفیت حرارتی کلاف معیوب
- $R1$  نماینده مقاومت حرارتی از کلاف معیوب به بدنه استاتور
- $P1$  نماینده تلفات حرارتی کلاف معیوب
- $C2$  نماینده ظرفیت حرارتی بدنه استاتور
- $R2$  نماینده مقاومت حرارتی از بدنه استاتور به محیط
- $P2$  نماینده تلفات حرارتی استاتور

لازم به ذکر است که شکل (۵) در [۴] برای مدل حرارتی موتور القائی و انتقال حرارت از روتور به استاتور و

## شناسائی پارامترهای مدل حرارتی برای آزمایشهای انجام شده، با استفاده از الگوریتم ژنتیک

آزمایشهای انجام شده که متجاوز از ۱۳۰ مورد میباشد در بار نامی، ۰/۷۵ بار نامی و سرعتهای مختلف در محدوده 1000-2750rpm و با تعداد دورهای مختلف خطا در محدوده ۰-۲۱ دور میباشد. همگی آزمایشها با شرایط اولیه  $T_a$  و  $TM_S(0) = TM_E(0) = T_a$  برای مدت ۴۵ دقیقه که در آنها منحنی تغییرات دمای موضع خطا، جریانهای فازها، جریان حلقه های اتصال کوتاه، سرعت و دمای محیط ثبت شده است، صورت گرفته اند.

با فرض اینکه دمای موضع ثبت شده خطا یعنی  $TM_E$  مطابق رابطه (۷) است، با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی [۳]، بهترین مقادیر ممکن برای  $\beta, \alpha, \tau_1, \tau_2$  برای تک تک آزمایشها شناسائی شدند. با توجه به شرایط اولیه برای این آزمایشها  $k_1$  و  $k_2$  از روابط (۹) و (۱۰) بر حسب پارامترها محاسبه میشوند.

$$k_1 = \frac{\beta - \alpha \frac{\tau_1}{\tau_2}}{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{\alpha - \beta}{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (10)$$

مقادیر بدست آمده انطباق بسیار خوبی را بین توابع بدست آمده و نتایج آزمایش نشان میدهند. لازم به ذکر است که استفاده از یک ثابت زمانی برای مدل حرارتی موتور [۵] مورد ارزیابی قرار گرفت که در دوره های کم خطا تطابق قابل قبولی داشته که بمعنی نزدیک بودن به موتور سالم است ولی با افزایش میزان خطای دور به دور، خطای مدل افزایش یافته و قابل قبول نمیشود.

از پارامترهای حاصل از الگوریتم ژنتیک نتایج زیر بدست آمد:

- $\tau_2$  بدست آمده برای آزمایشهای مختلف بسیار نزدیک و تفاوتها کمتر از ۱۰٪ بوده است. این ثابت زمانی

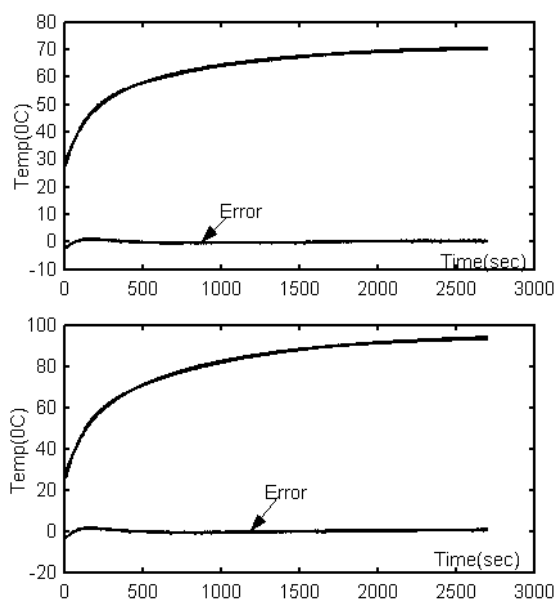
اولیه تعیین میشوند.

## روش تعیین پارامترهای مدل حرارتی

مدل حرارتی ارائه شده و معادلات  $TM_S$  و  $TM_E$  وقتی ارزشمند است، که روشی برای تعیین پارامترهای آن یعنی  $\beta, \alpha, \tau_1, \tau_2$  ارائه شود. با داشتن پارامترها و با داشتن شرایط اولیه یعنی  $TM_S(0), TM_E(0)$ ، میتوان دمای استاتور و موضع خطا را بدون استفاده از سنسور حرارتی در طی مراحل مختلف و تغییر شرایط کار موتور، محاسبه کرده و دنبال نمود. روشی که برای تعیین پارامترهای هر نوع موتور دلخواه پیشنهاد میشود و برای موتور مورد آزمایش در این مقاله صحت و کار آئی آن نشان داده میشود عبارت است از:

- ایجاد بستر آزمایشگاهی مناسب مشابه آنچه در بخش بستر آزمایشگاهی مورد استفاده آمده، یعنی سیم پیچی نمونه ای از موتور مورد مطالعه بنحوی که بتوان خطای مصنوعی دلخواه در آن ایجاد نمود و تحت شرایط مختلف کاری از نظر گشتاور و سرعت آنرا تغذیه نمود.
  - انجام آزمایشهای متعدد با میزان خطاهای مختلف و شرایط مختلف از نظر سرعت و گشتاور و ثبت منحنی تغییرات دمای موضع خطا.
  - استفاده از الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی [۳] جهت شناسائی  $\beta, \alpha, \tau_1, \tau_2$  بنحوی که معادله (۷) بر نتیجه آزمایش منطبق شود.
  - استفاده از یک شبکه عصبی با ورودیهای جریانهای فازها، تعداد دورهای خطا و سرعت و خروجیهای  $\beta, \alpha, \tau_1, \tau_2$  که با مقادیر بدست آمده از نتایج الگوریتم ژنتیک آموزش دیده و ارزیابی میشود و سپس استفاده از آن برای تخمین پارامترها در سایر شرایط کار موتور.
- روش فوق برای موتور نمونه بکار رفته در این مقاله استفاده شده است و البته با اجرای الگوریتم ژنتیک مقادیر  $\tau_2, \tau_1$  بصورت مقدار ثابت و تابعی از سرعت بدست آمده اند و لذا شبکه عصبی تنها برای تخمین  $\beta, \alpha$  استفاده خواهد شد. در ادامه نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی ارائه میشود.

$\alpha, \beta, \tau_1, \tau_2$  میباشند و با داشتن شرایط اولیه میتوان  $k_1$  و  $k_2$  را نیز محاسبه نمود. در بخش (شناسائی پارامترهای مدل حرارتی) نشان داده شد که  $\tau_1, \tau_2$  برترتیب تابعی از سرعت و مقدار ثابت میباشند. بنابر این برای شرایط کاری دلخواه  $\alpha, \beta$  میبایست تخمین زده شوند. برای این منظور شبکه ای عصبی با ورودیهای جریان فازها، سرعت و تعداد دورهای خطا و خروجیهای  $\alpha, \beta$  و با داده های حاصل از نتایج الگوریتم ژنتیک آموزش داده میشود. همانطور که قبلا در بخش (مدل حرارتی مدل القائی) ذکر شد،  $\alpha, \beta$  معرف تلفات حرارتی موتور هستند و تلفات حرارتی تابعی از بار، سرعت، تعداد دورهای خطا و جریان حلقه های اتصال کوتاه می باشد. در ورودیهای شبکه بجای بار جریان فازها که بسادگی قابل اندازه گیری هستند استفاده شده و جریان اتصال کوتاه حذف شده است چون تابعی از سرعت می باشد.



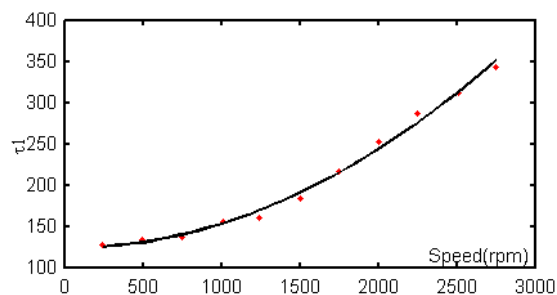
شکل ۷: دو نمونه از منحنی تغییرات دمای موضع خطا حاصل از آزمایش و مدل حرارتی.

ساختار شبکه عصبی در شکل (۸) آمده است. از ۱۳۰ مورد  $\alpha, \beta$  بدست آمده از آزمایشها ۱۱۵ مورد برای آموزش شبکه و بقیه برای ارزیابی آن استفاده شده است که تطابق کافی با حداکثر ۲٪ خطا را در ارزیابی ها نشان می دهد.

که مربوط به انتقال حرارت از استاتور به محیط است در [۵] بصورت تابعی از سرعت مطرح شده است، ثابت بودن آن در این آزمایشها میتواند به علت استفاده از فن دور ثابت تعبیه شده بر روی موتور باشد.

•  $\tau_1$  بدست آمده برای آزمایشهای مختلف در سرعتهای مشابه بسیار نزدیک بوده و تفاوتها کمتر از ۱۰٪ میباشند ولی با افزایش سرعت افزایش می یابد که میتوان آنرا بدلیل افزایش قدرت خنک کنندگی روتور دانست.

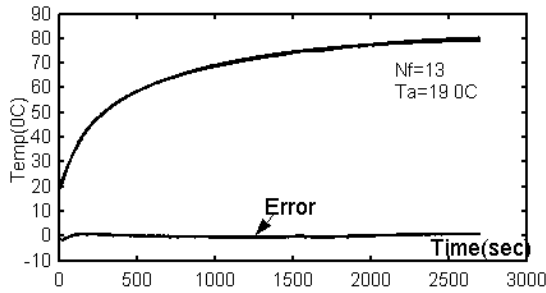
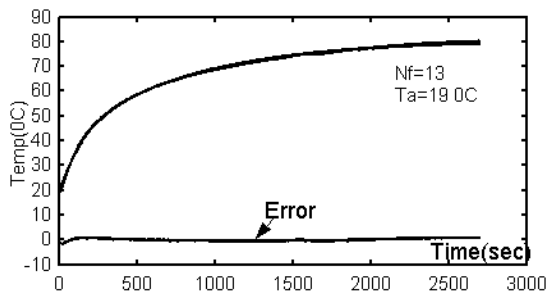
با توجه به موارد فوق  $\tau_2$  بصورت ثابت و متوسط مقادیر شناسائی شده انتخاب شد و  $\tau_1$  در هر سرعت با متوسط گیری تعیین شده و تغییرات آن با سرعت مطابق شکل (۶) بدست آمده است.



شکل ۶: منحنی تغییرات  $\tau_1$  بر حسب سرعت.

الگوریتم ژنتیک مجدداً با استفاده از منحنی  $\tau_1$  و مقدار تعیین شده برای  $\tau_2$  برای کلیه آزمایشها و برای شناسائی سایر پارامترها یعنی  $\alpha, \beta$  اجرا شد. در کلیه موارد فوق مدل و نتایج آزمایشها با دقت بالا تایید شد. شکل (۷) دو نمونه از منحنی تغییرات دمای موضع خطا حاصل از آزمایش و مدل حرارتی را نشان میدهد. ماکزیمم خطای مدل در شکل نشان داده شده است که حکایت از دقت قابل قبول آن داشته و خطای لحظات اولیه را میتوان ناشی از ساده سازی مدل و صرفنظر کردن از ثابت زمانی انتقال حرارت از حلقه های اتصال کوتاه شده به سایر حلقه های کلاف دانست.

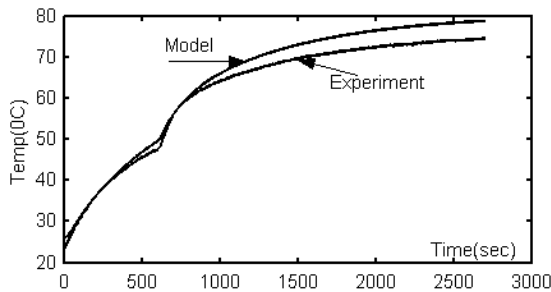
**تخمین پارامترهای مدل حرارتی با استفاده از شبکه عصبی و در شرایط کاری دلخواه**  
همانطور که ذکر شد، پارامترهای مدل شامل



(ج)

شکل ۹: منحنی تغییرات دمای موضع خطا در دماهای مختلف محیط.

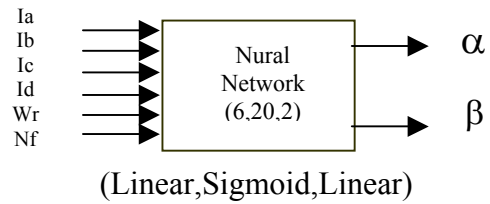
- اثر تغییرات شرایط کار موتور بر منحنی تغییرات دما، با انجام دو آزمایش در بار کامل و سرعت 1000rpm و مقایسه نتایج تجربی و حاصل از مدل در شکل (۱۰) مورد ارزیابی قرار گرفته است. هر دو آزمایش با راه اندازی موتور از حالت تعادل حرارتی و بدون خطای دور به دور شروع شده و برای ایجاد تغییر در شرایط کاری موتور، خطای مصنوعی دور به دور بمیزان ۸ دور در حین کار ایجاد شده است. در شکل (۱۰-الف) خطا پس از ۱۰ دقیقه از شروع کار ایجاد شده است. مقایسه نتایج ماکزیمم خطای مدل را در طول مدت ۴۵ دقیقه کار موتور کمتر از ۴ درجه نشان میدهد.



شکل ۱۰: منحنی تغییرات دمای موضع خطا در حالت گذرا.

### کاربردهای مدل حرارتی

مدل و شبکه عصبی برای تخمین  $\alpha, \beta$  در صورتی



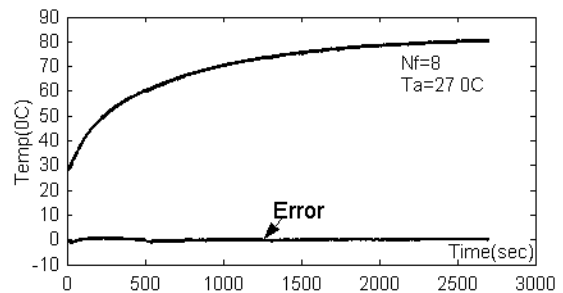
شکل ۸: ساختار شبکه عصبی بکار رفته برای تخمین  $\alpha, \beta$ .

### نتایج تجربی و کاربردهای مدل حرارتی

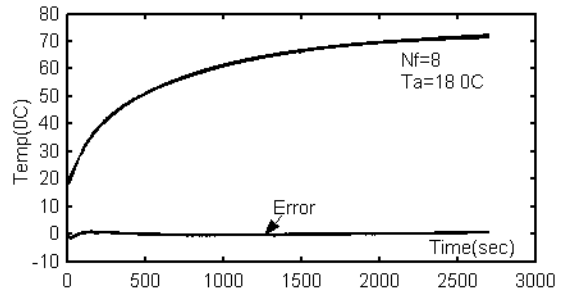
#### نتایج تجربی

برای ارزیابی کاملتر مدار و نشان دادن صحت آن برای دماهای مختلف محیط و تغییر شرایط کاری موتور، آزمایشهای ذیل انجام شده است.

- اثر دمای محیط بر منحنی تغییرات دما، با انجام سه آزمایش در بار کامل و سرعت 1000rpm و مقایسه نتایج تجربی و حاصل از مدل حرارتی در شکل (۹) مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) نشان دهنده صحت مدل و اثر دمای محیط بر منحنی تغییرات دما است. مقایسه شکل‌های (۹-الف) و (۹-ج) نشان دهنده صحت مدل در تخمین منحنی دما برای تعداد دور بیشتر خطا به ازاء همان بار و سرعت است.



(الف)



(ب)

به دو دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی و زمانبری آزمایشها بوده است.

### نتیجه گیری

امکان تغذیه موتور القائی با خطای دور به دور و تعیین محدوده کاری از نظر سرعت و گشتاور مجاز به ازاء میزان خطای دور به دور در [۱] آمده است. روش پیشنهادی برای [۱] مستلزم آزمایشهای زمانبر و متعدد است.

در این مقاله تعریف نقاط کار مجاز بر حسب پایدار و گذرا تفکیک شده اند. نقاط کار پایدار نقاطی است که برای مدت دلخواه میتواند استفاده شود و نقاط کار گذرا نقاط کاری است که بسته به سرعت و گشتاور و میزان خطا در زمانهای قابل محاسبه و کوتاه میتوانند استفاده شوند.

برای نقاط کار پایدار و بمنظور کاهش آزمایشها، استفاده از شبکه عصبی پیشنهاد گردیده و صحت و دقت عملکرد آن نشان داده شده است.

برای بدست آوردن نقاط کار گذرا، مدل حرارتی و روش تعیین پارامترهای آن بکمک الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی ارائه گردیده است. دقت و صحت مدل برای دنبال کردن دمای موضع خطا با آزمایشهای متعدد نشان داده شده است. وابستگی محدوده کار مجاز پایدار به دمای محیط و قابلیت مدل برای استفاده در تعیین محدوده کار مجاز پایدار به ازاء دماهای مختلف و نیز قابلیت مدل در دنبال کردن دمای موضع خطا با تغییر شرایط کاری و فراتر رفتن از محدوده مجاز پایدار، مورد بحث قرار گرفته و نمونه هائی از نتایج تجربی در تایید آنها آورده شده است.

قابل استفاده است که شبکه با داده هائی در محدوده مورد نظر، به لحاظ سرعت و تعداد دور خطا آموزش دیده باشد و تطابق خوب نتایج تجربی و حاصل از مدل در بخش (نتایج تجربی) بدین دلیل است. از طرفی شکل (۹) همانطور که انتظار میرفت حاکی از این است که به ازاء سرعت و گشتاور معین، با کاهش دمای محیط، تعداد دور بیشتری از خطا قابل تحمل میشود. میتوان نتیجه منطقی و قطعی گرفت که در صورتیکه آزمایشهای انجام شده در دمای پائین تر از معمول صورت گرفته باشد، شبکه عصبی برای محدوده وسیعتری از تعداد دورهای خطا آموزش می بیند.

لذا روش پیشنهادی این مقاله این است که آزمایشها برای تعیین تعداد دورهای مختلف خطاهای قابل تحمل در سرعت و گشتاورهای مختلف در دمای پائین تر از معمول مثلا صفر درجه صورت بگیرد. بدین ترتیب نمودار نقاط کار حالت پایدار در دمای صفر درجه نیز بدست می آید. این داده ها برای آموزش شبکه عصبی برای تخمین  $\beta, \alpha$  استفاده شده و محدوده وسیعتری را پوشش میدهد. موارد استفاده از چنین شبکه ای از این قرار است: - استفاده از مدل حرارتی و شبکه آموزش داده شده برای رسم نمودار نقاط کار حالت پایدار در دماهای بالاتر از صفر.

- استفاده از مدل حرارتی و شبکه عصبی برای تخمین دمای حالت گذرا در شرایط سرعت، گشتاور و تعداد دور خطای فراتر از حالت پایدار در دمای محیط و برای مدت زمان کوتاه.

اگر چه صحت روش پیشنهادی با آزمایشهای محدود نشان داده شده است، عدم انجام آزمایشها در دمای پائین،

### مراجع

- ۱ - راعی، ا. و رشتچی، و. "تحلیل و بررسی امکان ادامه کار موتور القائی پس از بروز خطای دور به دور." نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، سال چهاردهم، شماره ۵۴-آ، بهار (۱۳۸۲).
- ۲ - رشتچی، و. "تغذیه مناسب موتورهای القائی سه فاز برای جلوگیری از گسترش خطای استاتور." تز دکترا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، (۱۳۸۱).
- 3 - Raie, A. and Rashtchi, V. (2002). *Using genetic algorithm for detection and magnitude determination of turn faults in induction motor*, Electrical Engineering, springer verlag 2002, DOI 10.1007/s00202-002-0133-7.
- 4 - Hurst, K. D. and Habetler, T. G. (1996). "A self tuning thermal protection scheme for induction machine." *IEEE*, PP.1535-1541.
- 5 - Bose, B. K. and Patel, N. R. (1998). "Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction motor." *IEEE Trans on Power Electronics*, Vol. 13, No. 3, PP. 401-409.



---

## Using neural network to determine the permissible domain for operating points of an induction motor that has turn faults

V.Rashtchi  
Instructor  
Engineering Department  
Zanjan University  
**Email: Rashtchi@mail.znu.ac.ir**

A.Raie  
Assistant Professor  
Electrical Engineering Department  
Amirkabir University of Technology  
Email: Raie@cic.aku.ac.ir

### Abstract:

Practicability of driving an induction motor that has turn faults, and permissible operating points, at which no fault enlargement occurs, is shown in literature.

In this paper, the permissible domain of operating points (PDOP) for a faulty motor are classified to steady and transient PDOP, which respectively means working points for arbitrary and short periods of times. As expected, for a certain size of fault, higher speed and torque as transient are tolerable, and this idea can be used for a more suitable control of a faulty motor. Dependency of PDOP on ambient temperature and capability of neural networks in shortening the time consuming process of determining steady PDOPs are shown. A thermal model for faulty motor is proposed which assists in following the temperature of fault location, and can be used for obtaining transient PDOPs and steady PDOPs at different ambient temperatures. The parameters of the model are obtained with the aid of a GA, neural network and the results of some experiments. The validity and accuracy of results are shown with the aid of many experimental tests.

**Keywords:** Induction motor, turn to turn fault, neural network, steady operating points, transient operating points

---