

## پیاده‌سازی حفاظت بار زیاد موتورهای الکتریکی با استفاده از مدل‌سازی حرارتی

مجتبی خدرزاده

دانشگاه صنعت آب و برق  
khederzadeh@pwut.ac.ir

حامد گل‌زاده

دانشگاه صنعت آب و برق  
hdgh60@yahoo.com

چکیده - حفاظت بار زیاد ماشین‌های الکتریکی (ژنراتورها یا موتورها) در گذشته توسط وسایل اندازه‌گیری مانند RTDها و یا سنسورهای مادون قرمز انجام می‌شد که بدلیل محدودیت‌های آنها، کم‌کم روش‌های جدیدتری توسعه یافتند که اغلب مبتنی بر الگوریتم‌های نرم-افزاری هستند. در این مقاله علاوه بر بررسی و دسته‌بندی روش‌های موجود، نتایج حاصل از پیاده‌سازی حفاظت بار زیاد بر اساس مدل-سازی حرارتی، آورده شده است. این پیاده‌سازی بر روی بستر سخت‌افزاری مبتنی بر DSP انجام شده است و هدف از آن، نشان دادن توانایی‌های آن در ایجاد یک حفاظت کامل برای ماشین‌های الکتریکی است. کلید واژه- آسیب سیم‌پیچ، حفاظت بار زیاد، مدل‌سازی حرارتی

### ۱- مقدمه

گفت که یک سیم‌پیچی زمانی از شرایط جریان زیاد آسیب دیده است که یا این آسیب مانع از کار آن شود و یا بطور غیر قابل قبولی از عمر آن کاسته باشد. از کار افتادن سیم-پیچ مشخص است، زمانبست که موتور نمی‌تواند خروجی مناسبی برای استفاده تجهیزات مربوطه بدهد. اما کاهش غیرقابل قبول طول عمر، تعریف دقیق مهندسی برای آسیب سیم‌پیچ نیست. اغلب سازندگان موتورها، منحنی‌هایی مربوط به هر سیم‌پیچ، را تهیه می‌کنند که نشان دهنده میزان و مدت جریان سه فازی است که موجب آسیب دیدن سیم‌پیچ و یا کاهش بیش از اندازه عمر سیستم عایقی آن نخواهد شد.

از آنجا که افزایش دمای سیم‌پیچ یکی از دلایل آسیب آن است، به نظر می‌رسد که یک روش که می‌تواند آسیب را آشکار کند، اندازه‌گیری سرتاسر دمای سیم‌پیچ توسط تجهیزات اندازه‌گیری دما (مانند ترموکوپل‌ها)، و سپس تعریف نقطه آسیب بر حسب رسیدن دمای هر ترموکوپل به یک دمای از قبل تعریف شده است. این در حالی است که پاسخ مشخصه آشکارسازهای جاسازی شده دما و دستگاه-های مونیتورینگ مربوطه برای تشخیص شرایط آسیب پیش از آسیب واقعی سیم‌پیچ، مناسب نیستند. حتی با فرض این موضوع که این تجهیزات می‌توانند به سرعت پاسخ مناسبی بدهند، ماشین ممکن است بر اثر شرایط دیگری، مانند آسیب روتور (میدان) بر اثر خطاهای نامتقارن، آسیب ببیند.

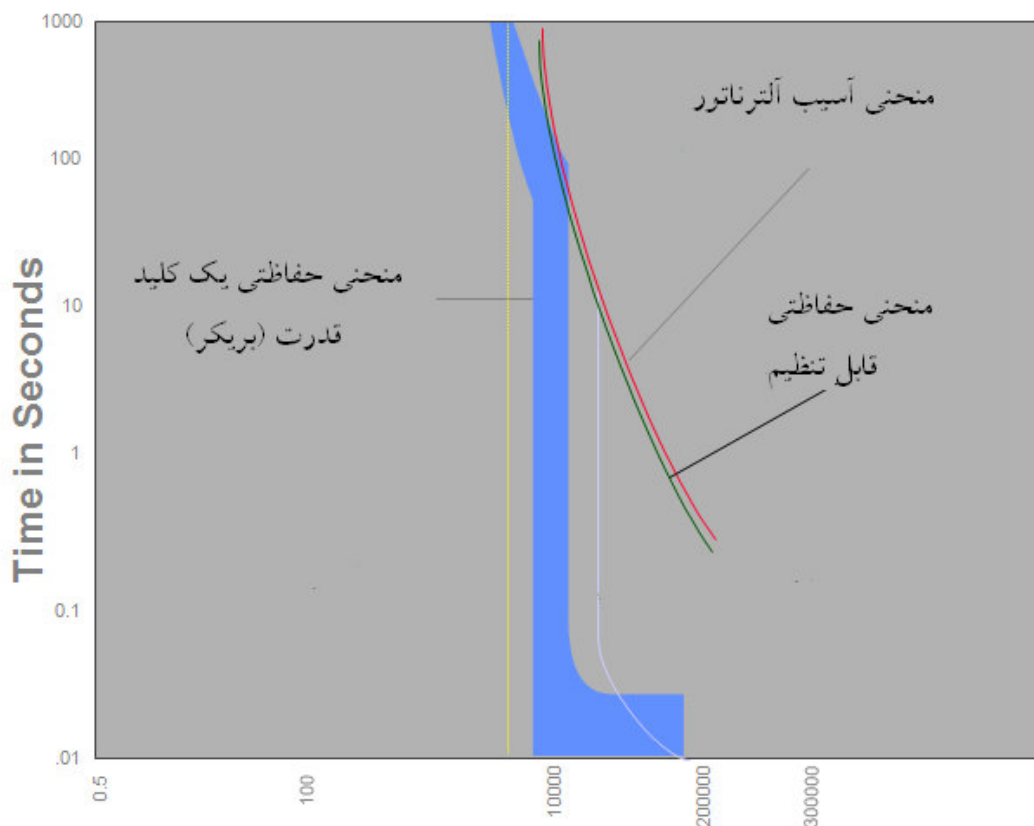
حفاظت سیستم‌های توزیع برق در برابر شرایط بار زیاد و اتصال کوتاه تقریباً در همه جا امری پذیرفته شده است، چرا که در صورت عدم رعایت آن، می‌تواند پیامدهایی مانند خسارت‌های مالی و جانی جبران نشدنی داشته باشد. استفاده از حفاظت‌های جریان زیاد و اتصال کوتاه بخوبی در مورد تجهیزات برقی شبکه توزیع انجام می‌گیرد، اما در عین حال توجه ویژه‌ای باید در مورد حفاظت ماشین‌های الکتریکی به سبب مشخصه سیم‌پیچی و عایقی آنها بشود. استانداردهای مختلفی در مورد حفاظت‌های مورد نیاز ژنراتورها و موتورها در کاربردهای مختلف وجود دارند (مراجع [1] و [2]) که نشان دهنده اهمیت رعایت حفاظت مناسب و کافی در عملکرد ژنراتور هستند.

### ۲- آسیب سیم‌پیچ‌ها

برای پیش‌گیری از آسیب دیدن سیم‌پیچ، لازم است که عوامل این آسیب‌ها شناخته شوند. سیم‌پیچ موتورها، همانند سایر هادی‌های الکتریکی، با افزایش بار دچار افزایش حرارت می‌شوند. در شرایط بار زیاد، افزایش دما می‌تواند به حدی باشد که باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و در نهایت موجب آسیب دیدن عایق (و سیم‌پیچ) شود. حتی اگر سیم‌پیچ آسیب فوری نبیند، به ازای هر بار زیادی که ایجاد شود، عمر مفید آن به شدت کاهش می‌یابد. به زبان ساده می‌توان

تخریب بر اثر شرایط جریان زیاد، چگونگی آسیب را در شرایط بار زیاد تعریف می‌کنند.

سازندگان موتور، بر اساس تخمین‌های محافظه‌کارانه و مهندسی از میزان توانایی سیم‌پیچ برای مقاومت در برابر



شکل ۱: منحنی آسیب سیم‌پیچ و منحنی‌های حفاظتی قابل استفاده (جریان بر حسب زمان)

اغلب نمی‌توانند حفاظت کاملی را در همه شرایط برای موتورها تامین کنند. استفاده از حفاظت جریان زیاد، هر قدر هم که دقیق باشد، نمی‌تواند در شرایطی مانند بار زیادهای دوره‌ای، که در طول زمان و به طور متناوب باعث افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها می‌شوند از آنها حفاظت کنند. همچنین استفاده از RTDها هم برای مونیتورینگ دمای سیم‌پیچ‌ها، همانطور که گفته شد، نمی‌تواند حفاظت کاملی محسوب شود چراکه هم پاسخ مناسبی نداشته و هم در نقاط محدودی می‌توانند دمای سیم‌پیچ را اندازه‌گیری کنند. همچنین از اندازه‌گیری دمای روتور ناتوان هستند. در ضمن نصب و استفاده از آنها هم مشکل و در بعضی موارد ناممکن می‌شود.

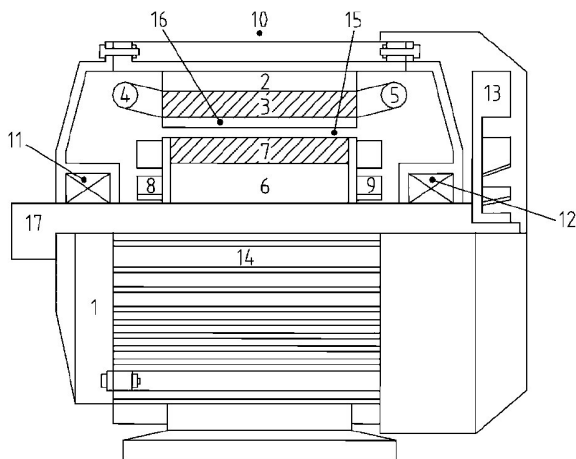
با توجه به این موارد، در حال حاضر تلاش‌هایی در جهت توسعه روش‌های جایگزین جهت رفع محدودیت‌های ذکر شده در حال انجام است. این روش‌ها اغلب بر پایه مدل‌سازی حرارتی ماشین بر اساس مشخصات فیزیکی و حرارتی آنها و

این تخمین‌ها مبتنی بر آزمایش‌هایی است که بر روی موتورها در شرایط اتصال کوتاه، و با اندازه‌گیری جریان‌ها و دماهای داخل ماشین، و در ضمن داشتن اطلاعات کافی در مورد مشخصه سیستم عایقی بکار رفته در ماشین، انجام می‌گیرد.

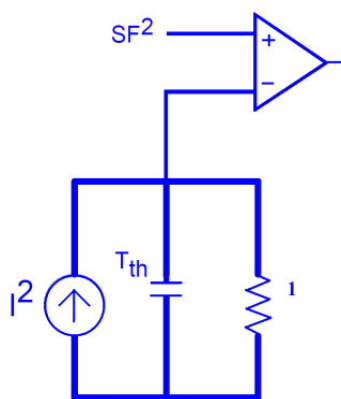
با استفاده از همین منحنی‌هاست که طراحان باید حفاظت کافی را بگونه طراحی کنند که پیش از عبور حرارت سیم-پیچ از مقادیر مشخص شده توسط این منحنی‌ها، واکنش مناسبی در جهت جلوگیری از آسیب آن داشته باشد. به کمک این منحنی‌ها (همانند شکل ۱) علاوه بر آنکه می‌توان از حفاظت موتور مطمئن بود، می‌توان از حداکثر ظرفیت آن بدون ایجاد تریپ‌های بی‌مورد به دلیل حفاظت‌های بسیار محافظه‌کارانه، استفاده برد.

### ۳- حفاظت‌های معمول

حفاظت‌هایی که بطور معمول در ماشین‌ها استفاده می‌شوند،



شکل ۲: ساختار یک ماشین القایی قفس سنجابی، ۱= قاب، ۲= هسته آهنی استاتور، ۳= سیم پیچ استاتور، ۴ و ۵= انتهای سیم پیچ ها، ۶= هسته آهنی روتور، ۷= سیم پیچ روتور، ۸ و ۹= حلقه های انتهایی، ۱۰= هوای محیط، ۱۱ و ۱۲= پاتاقان، ۱۳= فن، ۱۴= شیارهای خنک کاری، ۱۵= فاصله هوایی، ۱۶= دندانه های استاتور، و ۱۷= محور



شکل ۳: مدار الکتریکی معادل با مدل حرارتی موتور

در این روش با استفاده از معادلات حرارت که از روی داده های مربوط به موتور بدست می آید، دمای نقطه داغ محاسبه می شود و با مقایسه آن با حداکثر دمای مجاز، عمل حفاظتی مناسب انجام می شود.

در روش دیگر برآورد دما که در آنها دما را بصورت پارامتری بدست می آورند، در ابتدا با استفاده از معادلات دینامیکی مقاومت استاتور بدست می آید، سپس از روی آن با توجه به میزان تغییر مقاومت بر اثر تغییر دما، دمای استاتور محاسبه می شود. در این روش ها مشخص بودن تمام پارامترهای موتور، مانند اندوکتانس های مختلف لازم است و این خود یکی از معایب این روش ها است چرا که این مقادیر همواره

یا استفاده از روابط و معادلات دینامیکی ماشین استوار است که در نهایت دمای نقطه داغ ماشین را جهت اعمال حفاظت تعیین می کنند.

#### ۴- حفاظت حرارتی مبتنی بر برآورد دما

همانگونه که گفته شد، در این روش ها برآورد دما می تواند توسط مدلسازی حرارتی و یا استفاده از معادلات دینامیکی ماشین انجام شود.

مدلسازی حرارتی ماشین، خود نیز می تواند روش های مختلفی داشته باشد؛ این مدلسازی می تواند بصورت جزء به جزء انجام شود، به این معنی که بطور دقیق قسمت های مختلف ماشین (شکل ۲)، مانند هسته روتور، سیم پیچ روتور، هسته استاتور و ... مدلسازی شده و در نهایت توسط ضرایب خاصی که از روی مشخصات فیزیکی مربوط به ساخت ماشین بدست می آیند، به یکدیگر متصل شده و مدل کلی ماشین را ارائه کنند [3]. توسط این مدل و اعمال توان ورودی به این شبکه (معادله ۱)، می توان دمای قسمت های مختلف ماشین را بطور جداگانه بدست آورد. در این معادله نمونه، فرض شده است که ماشین به ۱۱ جزء داخلی تقسیم شده است.

$$C_i \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R_{ji}} (\theta_j - \theta_i) + u_i \quad (1)$$

$$i, j = 1, \dots, 11$$

که در آن C ظرفیت حرارتی، R مقاومت حرارتی،  $\theta$  دمای قسمت های مختلف و U هم به عنوان انرژی یا توان ورودی است که باعث ایجاد گرما می شود.

در روش دیگر مدلسازی حرارتی، کل ماشین را بصورت یک جسم یکپارچه در نظر می گیرند و یک مدل حرارتی برای کل موتور بر اساس مشخصات حرارتی نقطه داغ ماشین بدست می آورند. مزیت این روش، کاربردی تر بودن و قابل پیاده سازی بودن آن و همچنین سرعت بالاتر محاسبات مربوط به دما و در عین حال دقت قابل قبول آن است. مدل حرارتی بدست آمده معادل با مدار الکتریکی مقاومت (به عنوان مقاومت حرارتی) و خازنی (به عنوان ظرفیت حرارتی) است که توسط یک منبع جریان (به عنوان منبع تولید گرما) تغذیه می شود (شکل ۳).

در دسترس کاربران نیست.

حقیقت در این روش، همواره مقداری عددی که نشان دهنده دمای نقطه داغ موتور است در حافظه رله نگهداری می‌شود. با توجه به جریان ورودی به موتور، این دما در طول زمان ممکن است افزایش و یا کاهش بیابد. با مقایسه این دما با حدود حرارتی موتور، می‌توان مانع از آسیب سیستم عایقی بر اثر ایجاد گرمای بیش از حد ناشی از شرایط بار زیاد شد.

برای اطمینان از کارکرد درست الگوریتم طراحی شده، ابتدا شبیه‌سازی مدل توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها، در حالت‌های مختلف کاری که ممکن است برای یک ماشین الکتریکی بوجود بیاید انجام می‌گیرد. این حالت‌ها شامل قفل روتور، شتاب‌گیری طولانی مدت، بارهای دوره‌ای، وجود توالی منفی و کارکرد در مقدار نامی است. در صورتیکه نتایج این شبیه‌سازی‌ها بصورت دلخواه و مناسب باشد، می‌توان از حفاظت ماشین الکتریکی در برابر بار زیاد تا حد زیادی مطمئن شد، هر چند که مزیت روش‌های مبتنی بر نرم‌افزار در رله‌های میکروپروسسوری، ماژولار بودن آنها است به این معنی که می‌توان به راحتی قابلیت‌های بیشتری به آن اضافه کرد، مانند قابلیت در نظر گرفتن هارمونیک‌ها در جریان ورودی به موتور که این خود در افزایش دمای موتور تاثیر مهمی دارد.

در ادامه نتایج این شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. در ابتدا شرایط قفل روتور برای موتور القایی نشان داده شده است. در این شرایط به دلیل اینکه موتور چرخش ندارد و خنک‌کاری انجام نمی‌شود و در ضمن جریان راه‌اندازی چندین برابر جریان نامی موتور است، دمای موتور به سرعت بالا می‌رود، و در صورتی که در این شرایط راه‌اندازی ناموفق باشد، باید قبل از آسیب دیدن موتور فرمان مناسبی از سوی رله صادر شود. شکل (۴) افزایش دمای موتور را در حالت سرد (موتور در دمای اولیه محیط قرار داشته باشد) و همچنین مقدار آستانه (یا حد تریپ) را نشان می‌دهد و به محض اینکه دما به مقدار آستانه رسید با صدور فرمان قطع جریان، دیگر دما بالا نرفته و با توجه به ثابت زمانی خنک شدن موتور، در طول زمان شروع به کاهش می‌کند. مشابه این آزمایش برای حالت گرم (موتور در حالت اولیه، در دمای نامی قرار داشته باشد) نیز باید انجام بگیرد [۵].

آزمایش بعدی مربوط به شرایط بار دوره‌ای است. در این

$$v_{qs}^{es} = \omega_e \left( \sigma L_s i_{ds}^{es} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{es} \right) \quad (2)$$

$$v_{ds}^{es} = R_s i_{ds}^{es} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qr}^{es} \quad (3)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qr}^{es} + s \omega_e \lambda_{dr}^{es} \quad (4)$$

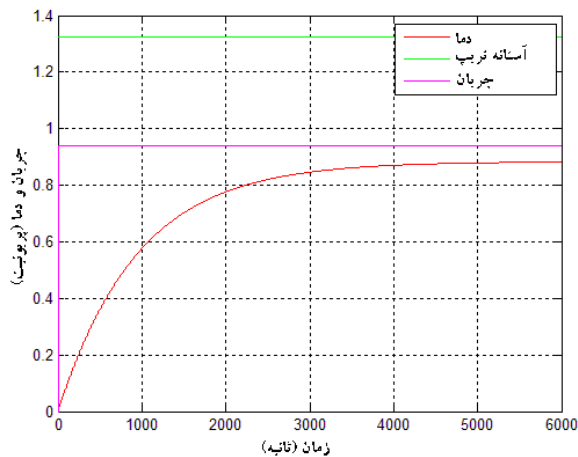
$$0 = \frac{R_r}{L_r} (\lambda_{dr}^{es} - L_m i_{ds}^{es}) - s \omega_e \lambda_{qr}^{es} \quad (5)$$

معادلات (۲) تا (۵) معادلات دینامیکی ماشین هستند که همانطور که مشخص است، معادله (۳) شامل پارامتر مقاومت استاتور است. که با حل این چهار معادله، در نهایت مقاومت استاتور و از روی آن دمای استاتور محاسبه می‌شود [4].

## ۵- پیاده‌سازی حفاظت بار زیاد توسط مدلسازی حرارتی

روش مدلسازی حرارتی، که در آن کل جسم موتور به عنوان یک جسم یکپارچه در نظر گرفته می‌شود، برای پیاده‌سازی توسط الگوریتم مناسب طراحی شده و بر روی بستر سخت-افزاری DSP ساخت شرکت TI، مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. ورودی‌های این مدل، اطلاعاتی است که اغلب از روی پلاک موتور قابل دریافت است. این اطلاعات، مشخصه مربوط به نقطه داغ موتور را بدست می‌دهند که با انجام آزمایش‌های مختلف و با توجه به مشخصات فیزیکی مواد بکار رفته در ساخت موتور توسط سازنده آن بدست آمده‌اند. با دانستن این موضوع که با داشتن این داده‌ها می‌توان مرز آسیب حرارتی موتور (برای نقطه داغ) را بدست آورد، نگرانی در مورد یکپارچه در نظر گرفتن جسم موتور، از بین می‌رود؛ زیرا اولین بخش از موتور که زودتر از بقیه به حد حرارتی خود و مرز آسیب می‌رسد، نقطه داغ موتور است و جلوگیری از آسیب آن به منزله حفاظت از کلیه اجزای موتور است. دیگر ورودی اصلی این الگوریتم، جریان ورودی به موتور است که از روی این جریان و سایر پارامترهای موجود موتور (که برای بدست آوردن ثابت زمانی‌های موتور بکار می‌روند)، می‌توان دمای موتور را در هر لحظه محاسبه کرد. در

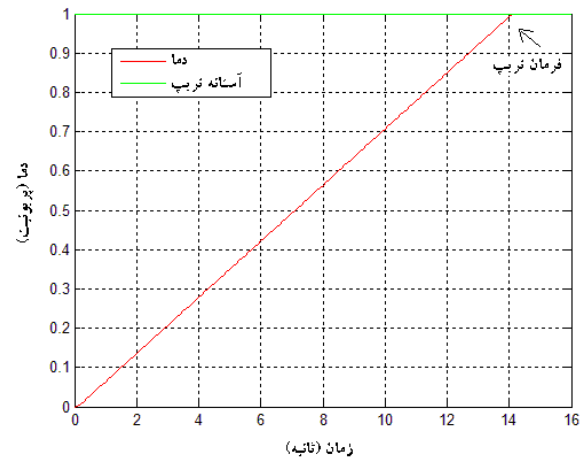
حالت بعدی کار ماشین، شرایط جریان نامی است که در این شرایط دمای ماشین بصورت نمایی افزایش می‌یابد تا به یک دمای نهایی برسد که این دما، دمای نامی ماشین است. شکل (۶) نشان دهنده افزایش دما با وجود جریانی کمتر از جریان نامی است که باعث افزایش دمای موتور به یک مقدار نهایی می‌شود. این شرایط شامل جریان‌هایی کمتر از جریان ضریب سرویس ماشین (معمولا ۱۱۵٪ جریان نامی) می‌شود. لازم به گفتن است که برای جریان‌های کمتر از ضریب سرویس موتور، گرمای تولید شده در نهایت با خنک‌کاری انجام شده در دمایی پایین‌تر از حد آسیب به تعادل می‌رسند، ولی برای جریان‌های بالاتر از ضریب سرویس، پس از گذشت زمان، بر حسب میزان جریان، دما از حد آسیب خواهد گذشت.



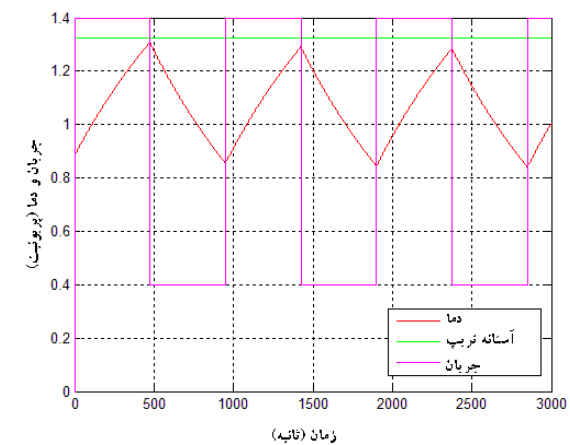
شکل ۶: افزایش دما بصورت نمایی با جریانی کمتر از جریان نامی (در حدود ۰.۹۳ جریان نامی)

در آخرین مرحله وجود جریان توالی منفی بر پاسخ حرارتی الگوریتم بررسی می‌شود. عدم تقارن ولتاژ، باعث بوجود آمدن جریان توالی منفی می‌شود. جریان توالی منفی دارای اثر گرمایی بیشتری نسبت به توالی مثبت است چرا که جهت چرخش توالی منفی مخالف جهت چرخش روتور بوده و این باعث وجود فرکانس دو برابر یعنی ۱۰۰ هرتز می‌شود که گرمای تولید شده توسط اثر پوستی در این فرکانس باید در نظر گرفته شود. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نشان دهنده شرایط جریانی یکسانی هستند با این تفاوت که در شکل (۷) جریان توالی منفی وجود ندارد و در شکل (۸) جریان توالی منفی وجود دارد و همانطور که مشخص است در حالت اول الگوریتم فرمان تریپ صادر نمی‌کند بدلیل

شرایط اگر الگوریتم سیستم حفاظتی نتواند بخوبی مدل حرارتی موتور را در نظر بگیرد، نمی‌تواند از تمام ظرفیت موتور استفاده کند و فرمان‌های تریپ ناخواسته‌ای صادر خواهد کرد. ولی توسط مدلسازی حرارتی ماشین الکتریکی، و محاسبه دمای آن می‌توان تا جای ممکن از توانایی ماشین بدون آسیب دیدن آن استفاده برد. همانطور که در شکل (۵) مشخص است، بار دوره‌ای بین مقادیر ۱.۴ و ۰.۴ جریان نامی بطور متناوب تغییر می‌کند ولی در این شرایط دمای موتور از حد مجاز فراتر نمی‌رود و نیازی برای قطع کار آن نیست (این در حالی است که همانطور که در مرجع [۵] نشان داده شده است، یک رله جریان زیاد در این شرایط فرمان تریپ را صادر می‌کند، بدون اینکه موتور در معرض آسیب باشد).



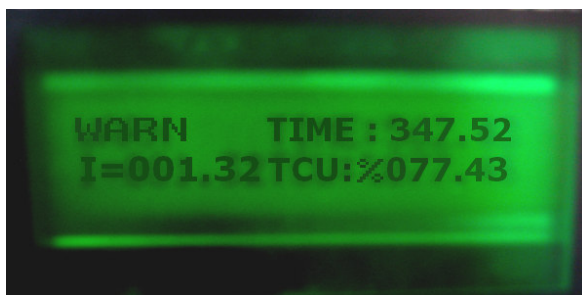
شکل ۴: پاسخ الگوریتم در شرایط قفل روتور سرد، که در آن دما بر حسب آستانه حرارتی پیرونیست شده است.



شکل ۵: بار دوره‌ای و دمای محاسبه شده در این شرایط، دمای محاسبه شده به حد حرارتی که در حدود ۱.۳۵ است نمی‌رسد.

نظر گرفته شده (از نوع TMS320C25) بارگذاری شده و بصورت عملی کارکرد رله آزمایش می‌شود.

شکل (۹) نمونه‌ای از نمایشگر این رله را در زمان کار نشان می‌دهد. نمایشگر رله قابل برنامه‌ریزی برای نمایش پارامترهای مورد نظر است؛ پارامترهای نشان داده شده در شکل (۹) شامل جریان ورودی به موتور بر حسب پریونیت، درصد ظرفیت حرارتی پر شده (TCU)، زمان باقیمانده تا صدور فرمان تریپ (محاسبه شده بر حسب جریان ورودی بر حسب ثانیه) و پیغام خروجی رله (به عنوان نمونه، پیام هشدار) است.



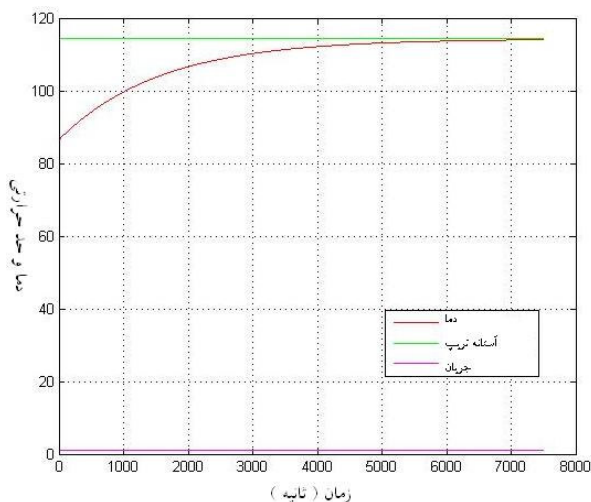
شکل ۹: نمایشگر رله که در آن جریان اندازه‌گیری شده، دمای محاسبه شده، زمان باقی مانده تا فرمان تریپ نشان داده شده است.

### ۵-۱- بهبود عملکرد مدل حرارتی

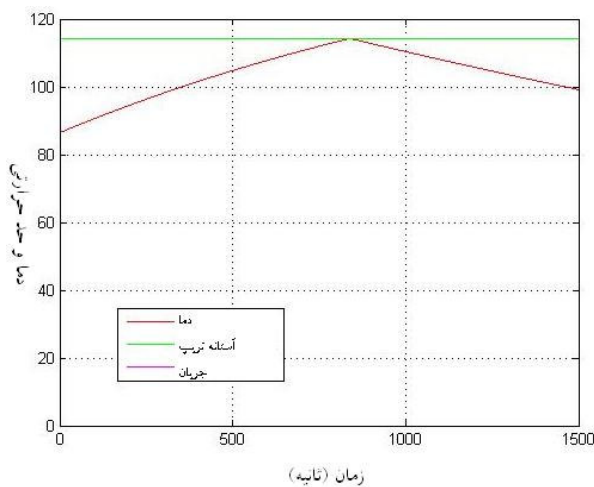
برای بدست آوردن یک حفاظت کامل و یکپارچه، باید شرایط زیر در مدل حرارتی لحاظ شوند [۵]:

- باید همواره یک تخمین عددی متناسب با انرژی گرمایی در موتور، محاسبه و نگهداری شود. این یکی از ویژگی‌های مهم رله‌های میکروپروسسوری است که کمک می‌کند در شرایطی نظیر بار زیادهای دوره‌ای که نیاز به مشخص بودن شرایط دمایی قبلی موتور است، الگوریتم بخوبی دمای واقعی را محاسبه و نسبت به آن واکنش مناسب نشان دهد (داشتن حافظه حرارتی).
- تخمین گرما باید با توجه به توالی‌های مثبت و منفی جریان موتور تنظیم شود. اثر توالی‌های مثبت و منفی در شرایط مختلف کار موتور با هم متفاوت است. در شرایط راه‌اندازی، به دلیل سکون موتور، اثر حرارتی توالی مثبت و منفی مشابه است، بنابراین در این شرایط گرمای تولید شده توسط این دو جریان با وزن برابر با هم جمع می‌شوند. این در حالی است که در شرایط

اینکه در این جریان، موتور هنوز به حد حرارتی خود نرسیده است و در حالت دوم جریان توالی منفی موجود، دمای موتور را افزایش می‌دهد و الگوریتم بخوبی به این افزایش پاسخ داده و فرمان تریپ را صادر کرده است.



شکل ۷: نزدیک شدن دما به حد حرارتی ولی عدم عبور از آن پس از گذشت بیش از ۷۰۰۰ ثانیه، بدون وجود توالی منفی



شکل ۸: عبور دما از حد حرارتی بخاطر وجود جریان توالی منفی و فرمان قطع توسط الگوریتم

همانطور که گفته شد، برای اطمینان از کارکرد درست الگوریتم ابتدا توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری بررسی می‌شود. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مدارک و آزمایشات موجود در مراجع مربوطه، از عملکرد صحیح شبیه‌سازی اطمینان حاصل می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تایید عملکرد رله مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از نتیجه بخش بودن این مرحله، الگوریتم طراحی شده بر روی DSP در

تریپ می‌تواند به عنوان یک حاشیه امنیت برای عملکرد رله باشد. به طور نمونه در صورتیکه مقدار ۰.۹ برای آن در نظر گرفته شود، زمانیکه دمای محاسبه شده برای موتور به ۹۰٪ حد حرارتی واقعی موتور برسد، رله فرمان تریپ را صادر خواهد کرد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

حفاظت‌های سنتی و جریان زیاد همواره نمی‌توانند ماشین‌های الکتریکی را در برابر بار زیاد محافظت کنند و نیاز به روش‌هایی است که با شناخت پاسخ حرارتی موتور بتوانند بهترین حفاظت را در برابر افزایش بیش از حد دمای ماشین انجام دهند. به همین منظور اغلب شرکت‌های اصلی تولیدکننده سیستم‌های حفاظتی صنعت برق به دنبال روش‌های کاربردی تخمین دمای ماشین‌ها در زمان کار آنها هستند و این قابلیت را در سیستم‌های حفاظتی میکروپروسسوری خود قرار می‌دهند. با استفاده از این روش‌ها، محدودیت‌های ناشی از بکارگیری سنسورهای تشخیص دما، مانند پاسخ کند و یا محدودیت در نصب آنها در محل‌های دلخواه و حتی هزینه‌های مورد نیاز برای نصب آنها تا حد زیادی رفع می‌شود. علاوه بر آن، این رله‌ها امکان یکپارچه سازی توابع حفاظتی مختلف (از جمله حفاظت خطای زمین) را امکان پذیر می‌کنند و در نهایت منجر به بهبود سطح حفاظتی موتور می‌شوند.

#### مراجع

- [1] *IEEE Guide for AC Motor Protection*, IEEE Std, C37.96-2000.
- [2] *Motors and Generators*, NEMA Standards Publication No. MG 1-1998, Rev 2, 2001
- [3] Mellor PH, Roberts D, Turner DR., "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", IEE Proceedings 1995; B-138(5):205-218.
- [4] Sang-Bin Lee, Thomas G. Habetler, "A Remote and Sensorless Thermal Protection Scheme for Small Line-Connected AC Machines", IEEE transactions on industry applications, vol. 39, no. 5, September/October 2003

[۵] گل‌زاده حامد، « طراحی و پیاده‌سازی حفاظت بار زیاد موتور القایی کار دائم با استفاده از مدلسازی حرارتی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق، ایران، ۱۳۸۶.

چرخش موتور، بدلیل ایجاد اثر پوستی شدید برای جریان توالی منفی، اثر حرارتی آن پنج برابر جریان توالی منفی خواهد شد [۵]. در نتیجه، تشخیص شرایط کار موتور (قفل روتور، شتاب‌گیری و یا Running) و همچنین محاسبه جداگانه توالی‌های مثبت و منفی جریان باید، برای عملکرد صحیح رله، در الگوریتم آن در نظر گرفته شوند.

- اثر اتلاف گرما به محیط اطراف در زمان کار موتور در نظر گرفته شود. یکی از ویژگی‌های مهمی که می‌تواند عملکرد رله حفاظتی موتور را بهبود ببخشد، اطلاع از وضعیت سیستم خنک‌کاری موتور است. برای این موضوع می‌توان از سنسورهایی برای تشخیص نحوه کارکرد سیستم خنک‌کاری استفاده کرد. با توجه به اطلاعاتی که سنسور می‌تواند در اختیار رله قرار دهد، الگوریتم حفاظتی می‌تواند در شرایط نقص عملکرد خنک‌کاری، دمای موتور را بدرستی محاسبه و مانع از آسیب موتور شود.

- بر اساس حالت کار موتور، تخمین گرمایی بدست آمده را با آستانه تریپ راه‌اندازی و یا کارکرد (Running) مقایسه کند. در صورتیکه به نمودار حد حرارتی یک موتور الکتریکی دقت شود، مشاهده می‌شود که حداقل دو منحنی بر روی آن قابل تشخیص است که یکی نشان دهنده مشخصه حرارتی در شرایط راه‌اندازی و دیگری مربوط به کارکرد عادی موتور (Running) است [6]. در نتیجه رله باید بتواند با تشخیص هر کدام از این شرایط، روابط خود را بر حسب آن تغییر دهد. لازم به ذکر است حد حرارتی در هر یک از این حالات ممکن است با هم متفاوت باشند؛ به این معنی که در یکی از آنها روتور محدود کننده دما و در دیگری استاتور محدود کننده دما باشد [۵]. در هر حالت می‌توان دو سطح آستانه را تعریف کرد یکی مربوط به هشدار و دیگری مربوط به تریپ.

- برای ایجاد یک حاشیه امنیت مناسب برای صدور فرمان تریپ قبل از رسیدن دما به مقدار مخرب، پارامتری را می‌توان تعریف کرد به عنوان ضریب مجاز حرارتی (Time Dial) که می‌تواند مقداری بین ۰.۱ تا ۱.۵ را داشته باشد. این پارامتر، با ضرب شدن در مقدار آستانه

- [6] *IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines*, IEEE Std. 620-1996.