



PSC 2007

98-F-TRN-614

بکارگیری الگوریتم ژنتیک جهت تحلیل حرارتی گذرا در ترانسفورماتورهای خشک رزینی

عباس لطفی^۲ابوالفضل ناطقی^۲داود عزیزیان^۱

۱-دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲-مؤسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، ترانسفورماتور خشک رزینی، تحلیل حرارتی گذرا، مدل حرارتی- الکتریکی.

چکیده:

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای خشک رزینی یکی از اساسی‌ترین اجزاء انتقال انرژی الکتریکی متناوب می‌باشند. از نظر تاریخی استفاده از ترانسفورماتورهای روغنی بسیار مرسوم بوده است ولی با توجه به اینکه ترانسفورماتورهای روغنی خطر آتش سوزی و انفجار داشته و برای استفاده در برخی مناطق مناسب نمی‌باشند، بحث ترانسفورماتورهای مقاوم در برابر آتش مطرح شد. سیر تحول اینگونه ترانسفورماتورهای غیر آتشگیر، ابتدا آنها را به سمت عایقهایی مانند آسکارل سوق داد. با اینحال سرطانزا بودن آسکارل سبب شد که استفاده از این سیال از سال ۱۹۷۰ به بعد به‌مرور از رونق بیافتد. از اینرو محققان به ساخت ترانسفورماتورهای بدون سیال یا خشک روی آوردند. این ترانسفورماتورها در عین حال که با مشکل انفجار و آتش سوزی مواجه نیستند، برخلاف انواع روغنی، سیالی نیز جهت خنک کاری ندارند. با در نظر گرفتن این مسئله که رزین مورد استفاده در ساختمان ترانسفورماتورهای خشک رزینی، عایق کلاس F با محدوده دمایی حدود ۱۵۵°C است، نیاز به مدلسازی حرارتی

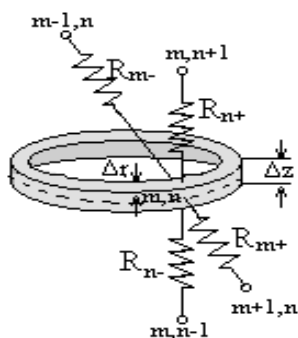
ترانسفورماتورهای خشک رزینی بعنوان یکی از مهمترین ترانسفورماتورهای مقاوم در مقابل آتش سوزی، امروزه بصورت وسیعی مورد توجه صنعت توزیع برق قرار گرفته‌اند. محدوده دما در این ترانسفورماتورها بالاتر از انواع روغنی است که این به نوبه خود حفاظت و مونیتورینگ آنها را ضروری می‌نماید. در این مقاله مدلهایی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت مدلسازی رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی در حالات گذرا ارائه و صحت آنها توسط تجربه تأیید شده‌است. آنچنان که در مقاله حاضر نشان داده شده است، مدلهای حرارتی می‌توانند جهت مونیتورینگ دمای ترانسفورماتور خشک رزینی در معرض بارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این نشان داده می‌شود که چگونه زمان طولانی تست حرارتی، توسط مدلهای ارائه شده به حدود ۰/۳ کاهش می‌یابد.

که در آن q'' شار حرارتی تولیدی (حرارت تولیدی در واحد سطح)، I شعاع در مختصات استوانه‌ای، Z ارتفاع در مختصات استوانه‌ای، t زمان، θ درجه حرارت، k ضریب هدایت حرارتی و α ضریب پخش حرارتی می‌باشند.

۲-۱- روش تفاضلات محدود جهت استخراج مدل حرارتی گذرا

حل معادله (۱) بصورت تحلیلی کاری پیچیده است، بنابراین باید از روشهای عددی در این زمینه بهره جست. بدین منظور روش تفاضلات محدود با اجزاء مقاوتی ارائه می‌شود. در این روش، ابتدا ترانسفورماتور در دو راستای شعاعی و محوری تقسیم‌بندی و هر کدام از این تقسیمات توسط یک گره نمایندگی می‌شوند. هر گره با گره‌های مجاور خود از طریق چهار مقاومت حرارتی ارتباط دارد (شکل ۲). برای دستیابی به معادله انتقال حرارت گره نشان داده شده در شکل ۲، می‌توان از قانون بقای انرژی مطابق رابطه (۲) بهره جست.

(۲) انتقال انرژی خالص = - حرارت تولیدی در جزء حرارتی به جزء حرارت انتقالی به دیگر اجزاء در صورتیکه انتقال انرژی خالص حرارتی برابر صفر باشد، رابطه (۲) بیانگر رفتار حرارتی حالت پایدار است [۱]. با اینحال در حالت ناپایدار، انتقال انرژی خالص به گره m, n بصورت افزایش انرژی داخلی آن جزء ظاهر می‌شود.



شکل ۲- شماتیک یک گره و ارتباطات مقاومتی با چهار گره مجاور

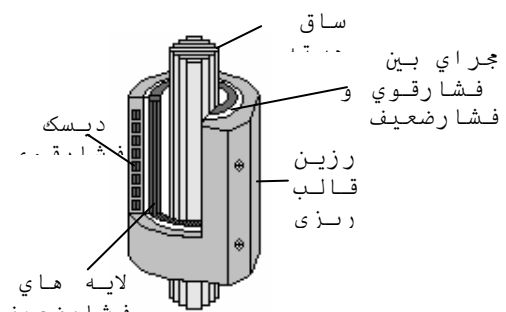
در اینگونه از ترانسفورماتورها به شدت احساس می‌شود. مدلسازی حالت پایدار حرارتی اینگونه از ترانسفورماتورها در [۱ و ۲] آورده شده است با اینحال هیچ مدلی جهت مطالعه حالات گذرای حرارتی ارائه نشده است. با توجه به اینکه [۳ و ۴] مدل‌هایی را جهت مطالعه حالات گذرای حرارتی و [۵ و ۶] روشهایی جهت محاسبه و تخمین پارامترهای این مدلها، تنها در ترانسفورماتورهای روغنی ارائه کرده‌اند، نیاز به مدلسازی حالات گذرای حرارتی در ترانسفورماتورهای خشک رزینی احساس می‌شود.

در این مقاله ضمن ارائه مدل‌هایی حرارتی، مبتنی بر اصول مدارات الکتریکی، جهت مطالعه رفتار حالت گذرای دما در ترانسفورماتورهای خشک رزینی، پارامترهای آنها توسط الگوریتم ژنتیک تخمین زده شده‌اند. پس از تأیید صحت مدل‌های حرارتی - الکتریکی توسط نتایج تجربی، کاربرد آنها جهت مونیتورینگ دما و کاهش زمان تست حرارتی در ترانسفورماتورهای خشک رزینی ارائه می‌گردد.

۲- مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی

شکل ۱، شماتیک یک ترانسفورماتور خشک رزینی را نشان می‌دهد [۷]. با توجه به تقارن استوانه‌ای، رفتار حرارتی دینامیک در سیم‌پیچی این ترانسفورماتور توسط رابطه (۱) قابل بیان است.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{q''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$



شکل ۱- شکل ظاهری ترانسفورماتور خشک رزینی

در این حالت گره رفتاری مشابه یک خازن انباشته کوچک دارد. با بهره گیری از [۷ و ۸]، می توان دید که قانون بقای انرژی در گره m,n معادل رابطه زیر است:

$$P_{m,n} - \frac{(\theta_{m,n} - \theta_{m-1,n})}{R_{m-}} - \frac{(\theta_{m,n} - \theta_{m+1,n})}{R_{m+}} - \frac{(\theta_{m,n} - \theta_{m,n-1})}{R_{n-}} - \frac{(\theta_{m,n} - \theta_{m,n+1})}{R_{n+}} = C_{m,n} \frac{\partial \theta_{m,n}}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن R_{m+} ، R_{m-} ، R_{n+} و R_{n-} مقاومت های حرارتی گره m,n نسبت به گره های مجاور [۶]، $C_{m,n}$ خازن حرارتی [۸]، $T_{m,n}$ درجه حرارت و $P_{m,n}$ تلفات گره m,n می باشند.

$$P_e - \frac{\theta_e - \theta_{amb}}{R_e} = C_e \frac{\partial \theta_e}{\partial t} \quad (5)$$

می توان نشان داد که ترکیب روابط (۴ و ۵)، توصیف کننده مدل درجه ۲ شکل ۳-ب می باشد. لازم است توجه شود که P_w در شکل ۳، به صورت رابطه (۶) با جریان بار متناسب است.

$$P_w(I) = P_w(I_0) \cdot \left(\frac{I}{I_0} \right)^{2*n} \quad (6)$$

که در آن I_0 ، جریان نامی، I جریان بار و n ضریب تصحیح تجربی است که برای ترانسفورماتورهای مختلف متفاوت می باشد [۹].

۲-۳- پارامترهای وابسته به دما

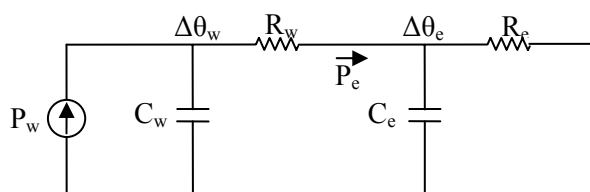
با رجوع به نحوه محاسبه مقاومتها و خازنهای معادل حرارتی [۷ و ۸]، دیده می شود که پارامترهای مربوط به سیم پیچی به آرامی با درجه حرارت تغییر می کنند، بطوریکه می توان از تأثیر دما بر روی آنها چشم پوشی کرد. با این وجود، بدلیل تغییرات شدید خواص هوا با درجه حرارت، می بایست تأثیر دما بر روی پارامترهای هوا در نظر گرفته شود. می توان نشان داد که مقاومت و خازن حرارتی معادل هوای خنک کننده بصورت روابط (۷) و (۸) با دما تغییر می کنند.

۲-۲- مدل های حرارتی - الکتریکی

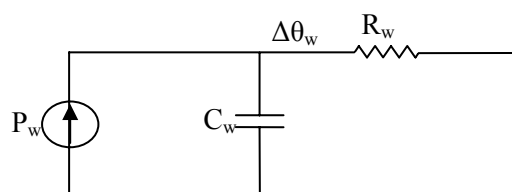
برای استخراج مدل های حرارتی، تنها یک گره در داخل سیم پیچی در نظر گرفته می شود. همانطوری که در [۱] نشان دادیم، انتقال حرارت سطوح بالا و پایین ترانسفورماتور براحتی قابل صرف نظر کردن است. بنابراین گره نماینده سیم پیچی، هیچ انتقال حرارتی در جهت عمودی نداشته و رابطه (۳) بصورت زیر قابل ارائه است:

$$P_w - \frac{\theta_w - \theta_e}{R_w} = C_w \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (4)$$

که در آن θ_w ، P_w ، R_w و C_w دما، جریان حرارتی (تلفات)، مقاومت حرارتی و خازن حرارتی معادل سیم پیچی می باشند. در صورتیکه θ_e نماینده دمای هوای محیط (θ_{amb}) فرض شود، مدار معادلی که رابطه (۴) را توصیف می نماید بصورت شکل ۳-الف قابل ارائه است. در این مدل، پارامترهای هوا بصورت نهفته در پارامترهای سیم پیچی حضور دارند. با اینحال جهت دستیابی به یک مدل دقیقتر می توان θ_e را معادل دمای هوای خنک کننده در نظر گرفت. با دنبال کردن روندی مشابه سیم پیچی و بهره گیری از [۷ و ۸]، می توان نشان داد که رفتار حرارتی هوای خنک کننده توسط رابطه زیر توصیف می شود:



(ب)



(الف)

شکل ۳- مدارهای RC، مدل کننده جهش های حرارتی سیم پیچی و هوای خنک کننده ($\Delta\theta_w = \theta_w - \theta_{amb}$ و $\Delta\theta_e = \theta_e - \theta_{amb}$)

(الف) مدل درجه ۱ - (ب) مدل درجه ۲

است که جمعیت جدید را با هدف تولید نسل بهتر (تابع هدف بزرگتر) تولید می کند.

کروموزوم انتخابی برای تخمین:

در مسئله حاضر که تخمین پارامترهای مدل حرارتی می باشد، تعداد ژنهای هر کروموزوم برابر با تعداد پارامترهای مدل در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه کروموزوم مورد استفاده در تخمین پارامترهای مدل درجه ۲ بصورت شکل ۴ می باشد:

R_w	C_w	R_e	C_e	n
-------	-------	-------	-------	-----

شکل ۴- یک کروموزوم نمونه مربوط به مدل RC درجه ۲

تابع هدف:

به منظور تخمین پارامتر در این مقاله، تابع معیار یا برازش بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$Fitt = \frac{1}{\sum_t (\alpha_{wt} |\Delta\theta_w(t) - \Delta\theta_{we}(t)| + \alpha_{et} |\Delta\theta_e(t) - \Delta\theta_{ee}(t)|)} \quad (4)$$

که در آن $\Delta\theta_{we}$ و $\Delta\theta_{ee}$ جهش های حرارتی اندازه گیری شده در سیم پیچی و هوای خروجی و α_{wt} و α_{et} ضرایب اهمیت زمانی هستند. با توجه به اینکه که داده های با مقادیر کوچکتر به نوبت حساس ترند، برای کاهش اثر نویز و دستیابی به نتایج بهتر، در زمانهایی که دمای کوچکتری نمونه برداری شده است، مقدار کمتری به ضرایب اهمیت زمانی اختصاص می یابد. لازم است توجه شود، زمانیکه تنها بخش کوچکی از داده ها جهت تخمین مورد استفاده قرار می گیرند (بخش ۵)، ضرایب اهمیت زمانی نقش بسزایی در افزایش دقت تخمین ایفا می کنند.

۴- تخمین و تأیید صحت مدل های ارائه شده: در این

بخش برای تخمین پارامترهای مدلها با کمک الگوریتم ژنتیک، پروسه بارگیری شکل ۵-الف به یک ترانسفورماتور ۴۰۰kVA [۱۰] نمونه اعمال و داده های آن جمع آوری شدند. با داده های حاصل از این پروسه تست و بهره گیری از الگوریتم ژنتیک،

$$R_e \approx (0.0046\theta_e + 0.4816)R_{e_{120^\circ C}} \quad (7)$$

$$C_e \approx (-0.0036\theta_e + 1.3592)C_{e_{120^\circ C}} \quad (8)$$

که در آنها $R_{e_{120^\circ C}}$ و $C_{e_{120^\circ C}}$ به ترتیب مقاومت و خازن حرارتی معادل هوای خنک کننده در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد می باشند. علاوه بر مقاومتها و خازنهای حرارتی، تلفات سیم پیچی نیز متناسب با دما افزایش می یابد که این افزایش به صورت زیر است [۱]:

$$P_w(\theta_w) = P_w(120^\circ C) \frac{\theta_w + \theta_k}{120 + \theta_k} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، θ_k برابر $234/5^\circ C$ برای آلومنیوم و $225^\circ C$ برای مس می باشد. در ادامه ضمن تخمین پارامترهای مدل توسط الگوریتم ژنتیک، نشان خواهیم داد که مدل های حرارتی - الکتریکی ارائه شده، با دقت بسیار مناسبی توصیف کننده رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی می باشند.

۳- الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار تخمین

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار بهینه سازی قدرتمند، در مسائل مختلف بهینه سازی و تخمین مورد استفاده قرار می گیرد. در این الگوریتم ابتدا ورودی ها و محدوده تغییرات آنها مشخص می شوند که هر یک از این ورودی ها به عنوان یک ژن برای الگوریتم ژنتیک عمل خواهند کرد. این ژنها در کنار هم تشکیل یک کروموزوم را داده و چندین کروموزوم در کنار هم تشکیل یک جمعیت را می دهند. الگوریتم ژنتیک بعنوان ابزار تخمین، پارامترها را به گونه ای تغییر می دهد که تابع هدف حداکثر و در نتیجه خطا حداقل شود.

برای راه اندازی یک الگوریتم ژنتیک، در ابتدا یک جمعیت به عنوان جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد شده و به الگوریتم داده می شود و در ادامه کار، جمعیت هر نسل جدید با توجه به نسل قبل تولید می شود. این کار با انجام عملیات باز تولید (Reproduction)، تزویج (Cross Over) و جهش (Mutation) بر روی کروموزوم های نسل قبل صورت می گیرد [۹]. روند حرکت در این الگوریتم به گونه ای

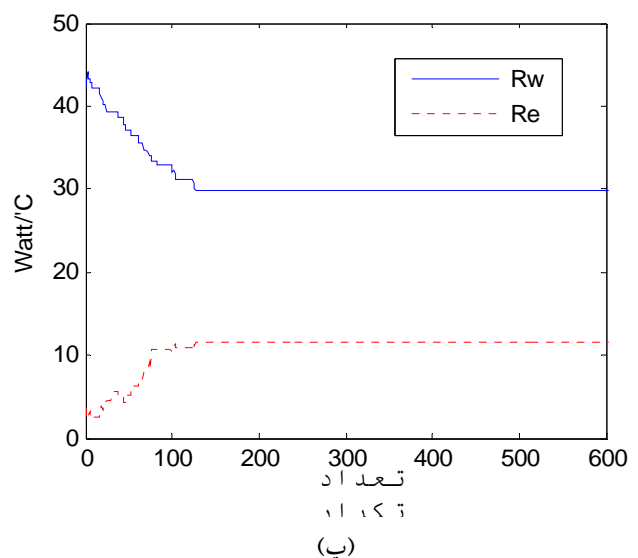
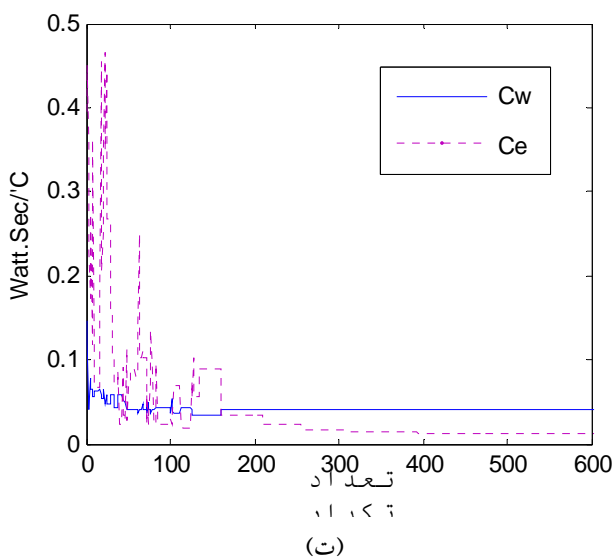
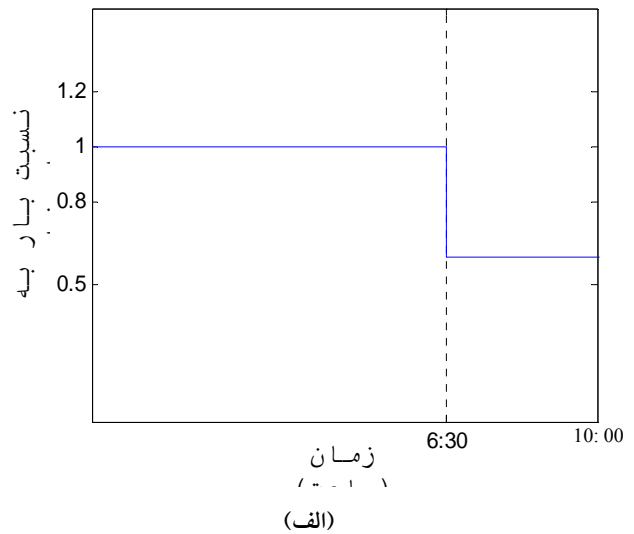
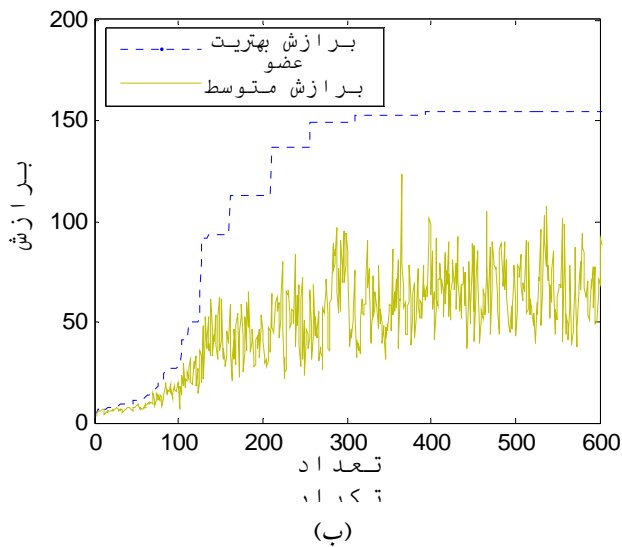
بکارگیری الگوریتم ژنتیک جهت تحلیل حرارتی گذرا در ترانسفورماتورهای خشک رزینی

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

تخمین، پارامتر n برابر مقدار $3/2$ به دست آمد.

پارامترهای مدلها تخمین و نتایج حاصل برای مدل درجه ۲ در

شکل ۵ آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این پروسه



شکل ۵- نتیجه تخمین مدل درجه ۲- الف) پروسه بارگیری، ب) تابع برازش، پ) مقاومت‌های حرارتی و ت) خازنهای حرارتی

پارامترهای مدل به دما می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد. با این وجود چنانچه در شکل ۷ نیز مشخص است، افزایش پیچیدگی مدل به افزایش دقت چندانی منجر نمی‌شود و این در حالیست که زمان تخمین پارامترها به شدت افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان در چگونگی تغییر پارامترها با دما (شکل ۸) جستجو کرد. از شکلهای ۷ و ۸ چنین بر می‌آید که مقاومتها، خازنها و جریان حرارتی آن چنان با دما تغییر می‌کنند که در نهایت اثر یکدیگر را حذف می‌کنند.

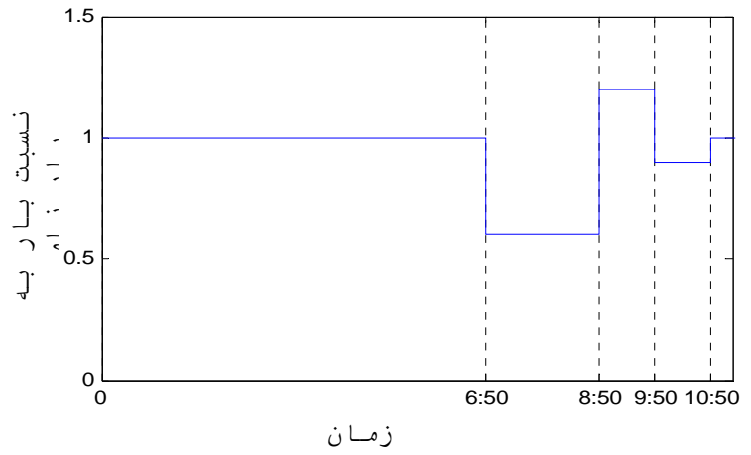
در شکل ۶ نیز نتایج حاصل از مدل‌های تخمین زده شده، برای یک بارگیری اختیاری، با نتایج تجربی و IEC [۱۱] مقایسه شده‌اند. همانگونه که از این شکل دیده می‌شود، در صورت تغییرات نه چندان زیاد بار، نتایج حاصل از این مدلها با دقت بسیار مناسبی بر نتایج تجربی منطبقند. با اینحال با افزایش تغییرات بار نسبت به بار نامی، خطای تخمین اندکی افزایش خواهد یافت. شکل ۸ نیز نتایج حاصل از مدل درجه دو را با و بدون در نظر گرفتن تأثیر دما بر روی پارامترها نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت، در نظر گرفتن وابستگی

بکارگیری الگوریتم ژنتیک جهت تحلیل حرارتی گذرا در ترانسفورماتورهای خشک رزینی

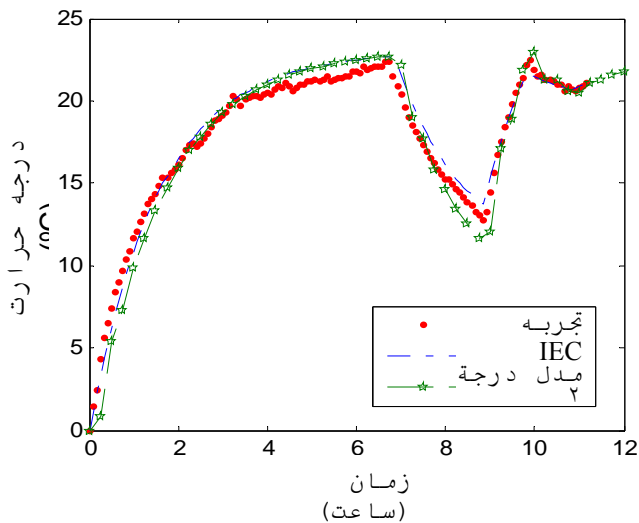
بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

جهت مدلسازی حرارتی حالات گذرا در ترانسفورماتورهای خشک رزینی مورد استفاده قرار گیرد.

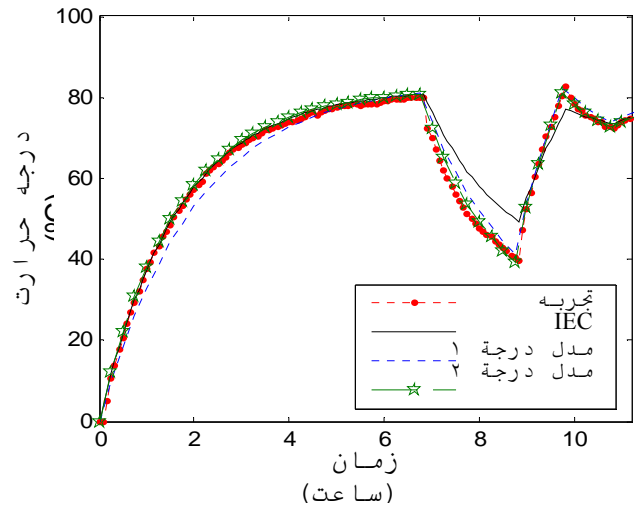
بنابراین مدل حرارتی - الکتریکی درجه ۲ (شکل ۲-ب)، بدون نیاز به در نظر گرفتن وابستگیها به دما، می تواند با دقت مناسبی



(الف)

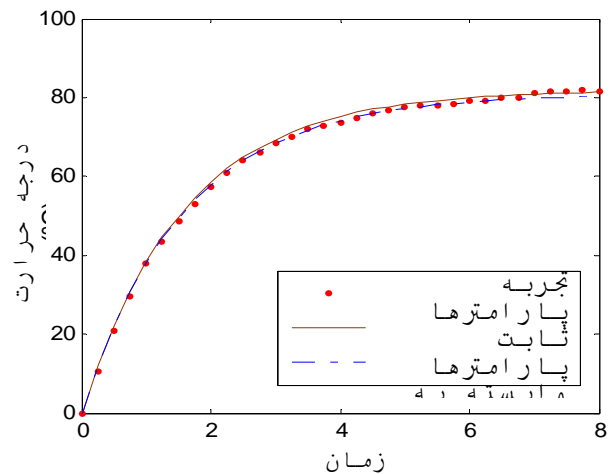
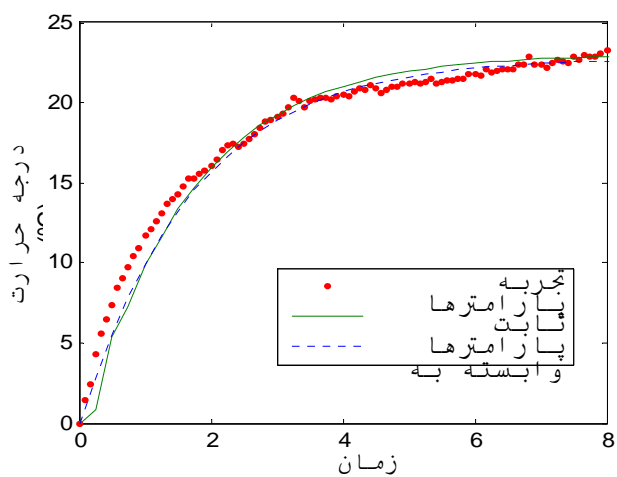


(ب)



(ب)

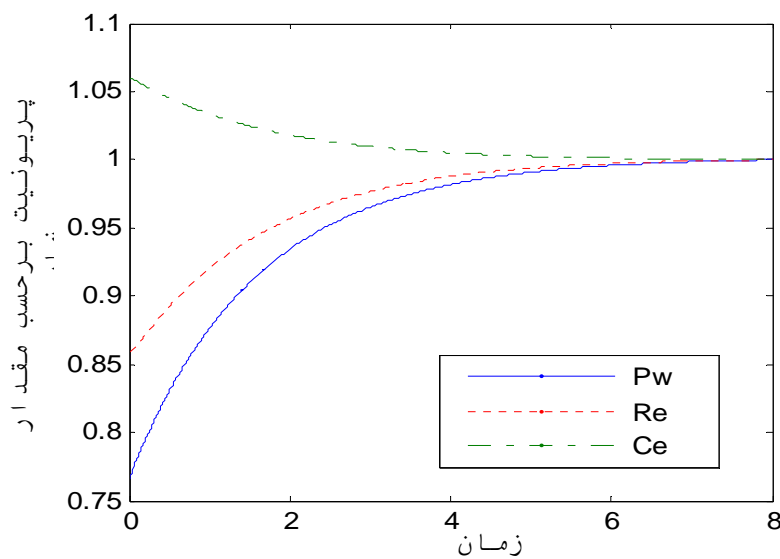
شکل ۶- الف) بارگیری اختیاری (ب) دمای سیم پیچی (پ) دمای هوای خنک کننده در بالای انکلوژر [۱۲]



(ب)

(الف)

شکل ۷- مدل درجه ۲ با و بدون در نظر گرفتن وابستگی پارامترها به دما- الف) دمای سیم پیچی و ب) دمای هوای خنک کننده در بالای انکلوژر



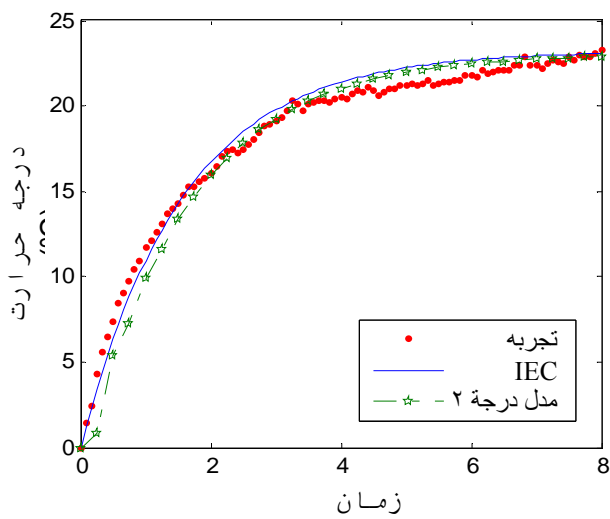
شکل ۸- تغییرات پارامترها در زمان کارکرد ترانسفورماتور

می شود که با استفاده از مدل های ارائه شده، زمان تست حرارتی ترانسفورماتور می تواند به کمتر از یک سوم کاهش یابد. این یکی از مزیت های بسیار مهم مدل های RC تخمین زده شده توسط الگوریتم ژنتیک می باشد.

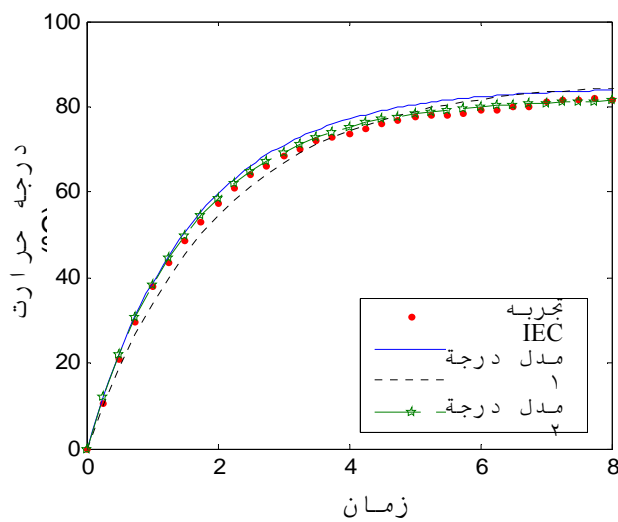
۵- کاهش زمان تست حرارتی با بهره گیری از

مدل های حرارتی - الکتریکی

شکل ۹ نتایج حاصل از تخمین مدلها را تنها با استفاده از چهار ساعت جمع آوری داده، برای مدل RC درجه ۱ و سه ساعت جمع آوری داده، برای مدل RC درجه ۲ نشان می دهد. دیده



(ب)



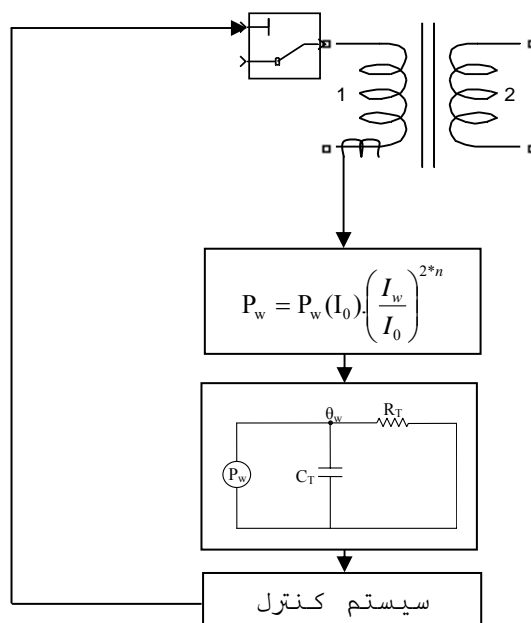
(الف)

شکل ۹- تخمین مدل درجه ۲، تنها با بخش کوچکی از داده‌های جمع آوری شده - الف) دمای سیم پیچی و ب) دمای هوای خروجی در بالای انکلوژر

۶- مونیتورینگ دمای ترانسفورماتور در محل سایت

همانطوری که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، یک ترانسفورماتور جریان (که برای مقاصد دیگر در شبکه مهیاست) از جریان ترانسفورماتور نمونه برداری کرده و با استفاده از رابطه ۳ تلفات محاسبه می‌شود. حال مدل RC با استفاده از تلفات، دما را در هر لحظه از کار ترانسفورماتور تخمین می‌زند و در صورت افزایش دمای ترانسفورماتور از حد مجاز، سیستم کنترل فرمان قطع مدار را صادر می‌کند.

یکی از مزایای مهم مدل‌های RC حرارتی از دید بهره برداران، مونیتورینگ مناسب و ساده دمای ترانسفورماتور می‌باشد. پس از اینکه یکبار تست حرارتی در محیط آزمایشگاه و یا در محل سایت انجام پذیرفت و یکی از مدل‌های RC تخمین زده شدند، می‌توان از مدل تخمینی برای پیش بینی دمای ترانسفورماتور در مقابل بارهای مختلف بهره جست.



شکل ۱۰- مونیتورینگ دمای ترانسفورماتور با استفاده از مدل‌های RC

۷- نتیجه گیری

در بر دارد، با اینحال این مدل تنها زمانی مفید خواهد بود که داده‌های مربوط به دمای هوای خروجی در دسترس باشد. ضریب تصحیح ارائه شده در رابطه ۳، برای ترانسفورماتورهای مختلف متغیر است و می‌بایست تخمین زده شود. با توجه به وابستگی پارامترها به دما، مدل حرارتی - الکتریکی ماهیت غیرخطی دارد، با اینحال تغییرات پارامترها تحت تأثیر

در مقاله حاضر دو مدل حرارتی مبتنی بر اصول مدارات الکتریکی ارائه و توسط الگوریتم ژنتیک تخمین زده شدند. نتایج حاصل از مدل‌ها با داده‌های تجربی و روابط پیشنهادی IEC مقایسه و نتایج زیر حاصل شد: نتایج حاصل از مدل‌ها با دقت بسیار مناسبی بر نتایج تجربی منطبق بودند. دیده شد که مدل RC درجه ۲ نتایج بهتری را

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

دما بگونه‌ایست که اثر یکدیگر را حذف می‌کنند. این امر سبب می‌شود که ثابت فرض کردن پارامترها در معرض دما، خطای قابل ملاحظه‌ای در مدلسازی ایجاد نکند. نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده برای بارهای با تغییرات کم کاملاً قابل قبولند، با اینحال به ازای تغییرات گسترده بار خطای تخمین کمی افزایش می‌یابد. مدل‌های RC، دارای دو مزیت عمده هستند: از دید سازندگان ترانسفورماتور، کاهش زمان تست حرارتی (تا حدود ۳ ساعت) و از دید بهره برداران شبکه، مونیتورینگ دمای ترانسفورماتور در محل سایت بسیار اهمیت دارد.

- [9].D. E. Goldenberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Maching Learning", Reading, MA: Addition-Wesley, 1989.
- [۱۰]. ایران ترانسفو، دفتر فنی ترانسفورماتورهای خشک، برگه محاسبات ترانسفورماتور ITRD025.400kVA
- [11].IEC Loading Guide for Dry-Type Power Transformers, IEC Std. 60905, 1987.
- [12].IEC Degree of Protection Provided by Enclosures, IEC Std. 60529, Nov. 1989.
- [1].E. Rahimpor, D. Azizian, "Analysis of Temperature Distribution in Cast-Resin Dry-Type Transformers", Electrical Engineering, Vol. 89, No. 4, pp. 301-309(9), March 2007.
- [۲]. د. عزیزیان، ا. رحیمپور، "تأثیر عوامل مختلف بر روی توزیع دما در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک رزینی" کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2006)، ۱۳۸۵.
- [3].Z. Randakovic, K. Feser, "A new Method for the Calculation of Hot-Spot Temperature in Power Transformers With ONAN Cooling", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, Oct, 2003.
- [4].D. Susa, J. Palola, M. Lehtonen, M. Hyvärinen, "Temperature Rises in an OFAF Transformer at OFAN Cooling Mode in Service", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, Oct. 2005.
- [5].D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman, "Dynamic Thermal Modeling of Distribution Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, Oct. 2005.
- [6].W. H. Tang, Q. H. Wu, Z. J. Richardson, "A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July. 2004.
- [۷]. د. عزیزیان، "مدلسازی حرارتی ترانسفورماتورهای خشک رزینی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، آبان ۱۳۸۴.
- [۸] اینکروپرا، فرانک پی. دویت، دیوید پی. "مقدمه ای بر انتقال حرارت". رستمی، علی اصغر. حمایت، شهرام. جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان. ۱۳۷۱.