مدل‌سازی حالت گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مبتنی بر روش تفاضلات محدود و شبکه‌های عصبی مصنوعی

داود عزیزیان[1]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران

d.azizian@abhariau.ac.ir

چکیده: **ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه به‌طورعمده‌ای در صنایع ریلی و کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترانسفورماتورهای مورداستفاده در این سیستم‌ها دارای ساختار ویژه‌ای (دوطبقه) بوده و از لحاظ حرارتی و مغناطیسی مشکلات و پیچیدگی‌هایی را به همراه دارند. با توجه به ساختار ویژه ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه، تحلیل حالت گذرای حرارتی سیم‌پیچی‌های این ترانسفورماتور از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله ابتدا یک مدل مبتنی بر روش تفاضلات محدود جهت مدل‌سازی ریاضی رفتار حرارتی سیم‌پیچی‌ها در شرایط گذرا معرفی شده است. با تأیید صحت مدل‌سازی با کمک نتایج تجربی، یک بارگیری نمونه به ترانسفورماتور دوطبقه نوعی اعمال و درجه حرات سیم‌پیچی‌های آن در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری می‌شود. در ادامه با ارائه مدل‌هایی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و آموزش آن‌ها با کمک داده‌های حرارتی به دست آمده در قسمت اول مقاله، مدل‌هایی دینامیک جهت مطالعه رفتار حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه پیشنهاد می‌شود. چنانچه نشان داده شده است، مدل‌های ارائه شده بر مبنای شبکه‌های عصبی، از دقت بالایی جهت مدل‌سازی حالت گذرای حرارتی در ترانسفورماتور دوطبقه برخوردارند.**

کلمات کلیدی: **ترانسفورماتور چند سیم پیچه، ساختار دوطبقه (سیم‌پیچی‌های مجزا)، مدل‌سازی حرارتی گذرا، روش تفاضلات محدود، شبکه‌های عصبی مصنوعی.**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

نام نویسنده مسئول: دکتر داود عزیزیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران- زنجان- ابهر-کیلومتر ۴ جاده ترانزیت ابهر-خرمدره- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر- گروه مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۱- مقدمه

ترانسفورماتور با ساختار دوطبقه که اصطلاحاً بـه آن ترانسـفورماتور بـا سیم‌پیچی‌های مجزا (split-winding)گفته می‌شود، امروزه به صـورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های کششـی (متـرو) و کارخانه‌های فولادسازی به‌طور گسـترده‌ای از سیسـتم‌هـای یکسوسـاز استفاده می‌کنند. یکی از اجزای اصـلی ایـن سیسـتم‌هـای یکسوسـاز، ترانسفورماتور است.ترانسفورماتورهای اسـتفاده شـده در سیسـتم‌هـای یکسوساز دوازده پالسه می‌توانند ساختارهای متفـاوتی داشـته باشـند. یکی از ساختارهای متداول این ترانسفورماتورها، ساختار دوطبقه است که در آن دو جفت سیم‌پیچی فشار ضـعیف و فشـارقوی روی‌هـم و بـر روی یک هسته مشترک ساخته می‌شوند. با وجود مزایای بسیار زیادی که ساختار مورد اشاره دارد، طراحی آن نیز پیچیدگی‌هایی دارد [۱]. از آن جمله می‌توان به توزیع حرارتی پیچیده و خطرناک در ایـن نـوع از ترانسفورماتورها اشاره کرد.

پیش‌تر مطالعات چندی در مورد مدل‌سازی حالت پایدار حرارتـی در انواع ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه خشک انجام شده اسـت [۲-۱۱]. مراجع [۲ و۳] مطالعه‌ای را مبتنی بر نتایج تجربی بـرای بررسـی رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی با سیم‌پیچی‌های هـم‌محـور انجام داده‌اند. مدل‌هایی نیز ریاضی جهت محاسـبه دمـای ایـن‌گونـه از ترانسفورماتورها در بارهای خطی و غیرخطی ارائه شده‌اند [۴- ۱۱]. بـا توجه به اهمیت مطالعه رفتار حرارتـی ترانسـفورماتور در حالـت گـذرا، مدل‌هـایی نیـز جهـت تحلیـل رفتـار گـذرای حرارتـی انـواع مختلـف ترانسفورماتور در مراجع [۱۲- ۲۰] ارائـه شـده‌انـد. مراجـع [۱۳- ۱۸] مدل‌هایی مبتنی بر مدارهای RC را جهت بررسی رفتار گذرای حرارتی در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک ارائـه و مراجـع [۱۳-۱۵]ایـن مدل‌ها را جهت تخمین عمر و قابلیت اطمینان ترانسـفورماتور خشـک رزینی استفاده کرده‌اند. مراجع [۱۹ و ۲۰] نیز مدل جدیدی را مبتنـی بـر شـبکه‌هـای عصـبی مصـنوعی جهـت مـدل‌سـازی رفتـار حرارتـی ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه خشک در حالت گذرا ارائه کرده است.

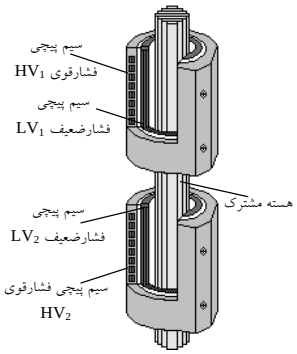
مطالعـات محـدودی در خصـوص رفتـار مغناطیسـی و حرارتـی ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه کششی انجام پذیرفتـه اسـت [۲۱-۲۵]. مرجع [۲۴] مطالعه جامعی از توزیع درجه حرارت سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور کششی دوطبقه را در حالت پایدار ارائه کرده اسـت. ایـن مقاله روش تفاضلات محدود را جهت مدل‌سازی ریاضی ترانسـفورماتور دوطبقه کششی مورد استفاده قـرار داده و بـه بررسـی رفتـار حرارتـی حالت پایدار در سیم‌پیچی‌هـای آن پرداختـه اسـت. بـاوجود مطالعـات گسترده در خصوص مدل‌سـازی حرارتـی ترانسـفورماتورهای دو سـیم پیچه روغنی و خشک، هیچ‌گونه مطالعه‌ای در خصوص مدل‌سازی رفتار گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم پیچه بـا سـاختار دوطبقـه انجام نشده و هیچ مدل حرارتی دینامیکی برای آن ارائه نشده است.

به این منظور در این مقاله، یـک مـدل ریاضـی مبتنـی بـر روش تفاضلات محدود جهت مدل‌سازی رفتار حرارتـی ترانسـفورماتور چنـد سیم‌پیچه دوطبقه در حالت گذرا معرفی شده است. با کمک داده‌هـای تجربی و نتایج گرفته شده از سـازنده، صـحت نتـایج ارزیـابی و اعتبـار مدل‌سازی تأیید می‌شود. با اعمال یـک بـارگیری نمونـه و دلخـواه بـه نرم‌افزار مدل‌سازی حرارتی (توسعه یافته مبتنی بر مدل‌سـازی ریاضـی ارائه شده)، تغییرات دما در سـیم‌پیچـی‌هـا انـدازه‌گیـری و بـه عنـوان داده‌های آزمایش حرارتی جمع‌آوری می‌شوند.

با توجه به قابلیت بسیار بـالای شـبکه‌هـای عصـبی مصـنوعی در مدل‌سازیسریع و برخط رفتار سیستم‌های پیچیده، در ادامه این مقالـه، دو مـدل دینامیـک مبتنـی بـر شـبکه‌هـای عصـبی مصـنوعی، جهـت مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچـه دوطبقـه ارائـه شـده است. با کمک داده‌های حرارتی جمع‌آوری شده، این مدل‌های حرارتی آموزش دیده و پارامترهای آن‌ها تخمین زده می‌شود. پـس از آمـوزش مدل‌های حرارتی دینامیـک، کـارایی و اعتبـار نتـایج آن‌هـا بـا کمـک داده‌هایی اضافی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. چنانچه در انتهـای مقالـه نشان داده شده است، مدل‌های ارائه شده از دقت و کارایی بسیار بالایی جهت تخمین رفتار گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چند سـیم پیچـه دوطبقه برخوردارند. مدل‌های پیشـنهادی و آمـوزش دیـده بـه‌راحتـی می‌توانند جهت ارزیابی و پیش‌بینی دمای سیم‌پیچ‌های ترانسـفورماتور دوطبقـه در شـرایط مختلـف بـارگیری (بـه خصـوص در مانیتورینـگ حرارتی برخط و سـریع) مـورد اسـتفاده متخصصـان در سیسـتم‌هـای کششی و ذوب فلزات قرار گیرند.

۲- مدل‌سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه جهت محاسبه دمای سیم‌پیچی‌ها

ساختار سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ترانسفورماتور یک جفت سیم‌پیچیفشار ضعیف و فشارقوی به صورت محوری روی یک ساق هسته مونتاژ شـده و ساختاری دوطبقه را شکل می‌دهند [۱].



شکل (۱): شکل شماتیک ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه

۲-۱- معادلات حرارتی سیم‌پیچی‌ها

برای ساده‌سازی مدل و کوتـاه کـردن زمـان محاسـبه، ترانسـفورماتور به‌صورت تکفاز مدل می‌شود [۸].انتقال حرارت در ترانسفورماتور چنـد

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]

سیم‌پیچه دوطبقه خشک در بخش‌های مختلف بررسی می‌شود [۷-۱۰]. مهم‌ترین بخش انتقال حرارت در داخل سیم‌پیچی سلب رخ می‌دهد. این انتقال حرارت از نوع هدایت بوده و معمولاً در مختصات استوانه‌ای بیان می‌شود:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{q}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۱)$$

که T درجه حرارت، q چگالی تلفات و k و α ضرایب هدایت و نفوذ حرارتی هستند.

در این تحقیق برای حل رابطه (۱) از روش تفاضلات محدود استفاده شده و ساختار ترانسفورماتور به واحدهایی (که توسط گره‌هایی نمایندگی می‌شوند) در راستای شعاعی (r) و محوری (z) تقسیم می‌شود [۷].

اساس روش تفاضلات محدود و استخراج معادلات مربوطه در تک‌تک گره‌ها، بر قانون بقای انرژی استوار است:

$$\begin{matrix}\text{حرارت}\\ \text{تولیدی واحد}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{انرژی حرارتی}\\ \text{انتقالی به واحد}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{حرارت انتقالی به}\\ \text{دیگر واحدها}\end{matrix} \qquad (۲)$$

حرارت انتقالی از یک جزء به جزء دیگر به صورت نسبتا ختلاف دما بر مقاومت حرارتی بیند و جزء مشخصمی گردد.

در حالت پایدار، انرژی حرارتی انتقالی به واحد برابر صفر است؛ با این حال در شرایط گذرا، این کمیت به صورت افزایشی در مجموع انرژی واحد ظاهر می‌شود.

در این حالت، واحد به صورت یک خازن مجتمع رفتارمی‌کند. بنابراین با اعمال قانون بقای انرژی (۲) به واحد (ij)، رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\sum_{\substack{(i'j')\in\\(ij\pm1)\\(i\pm1j)}}\frac{T_{ij}-T_{i\prime j\prime}}{R_{ij-i\prime j\prime}}+h_{ij}\left(T_{ij}-T_{air}\right)+C_{ij}\frac{\partial T_{ij}}{\partial t}=q_{ij} \qquad (۳)$$

که T_{ij} دمای مطلق واحد، $T_{i\prime j\prime}$ دمای مطلق واحدی مجاور در سیم‌پیچی، T_{air} دمای محیط، $R_{ij-i\prime j\prime}$ مقاومت حرارتی واحد نسبت به واحدی مجاور در سیم‌پیچی، h_{ij} ضریب انتقال حرارت واحد نسبت به محیط (برای گره‌های سطحی)، C_{ij} خازن حرارتی واحد و q_{ij} حرارت تولیدی (تلفات) واحد است. مقاومت، خازن و حرارت تولیدی واحدها در ادامه تشریح می‌شوند.

در بسیاری موارد بجای دمای مطلق (T)، کمیتی به نام جهش حرارتی($\theta=T-T_{air}$) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استخراج رابطه‌ای مبتنی بر جهش حرارتیθ، رابطه (۳) را می‌توان با جایگذاری $T\leftarrow\theta+T_{air}$ بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sum_{\substack{(i'j')\in\\(ij\pm1),(i\pm1j)}}\frac{\theta_{ij}-\theta_{i\prime j\prime}}{R_{ij-i\prime j\prime}}+h_{ij}\theta_{ij}+C_{ij}\frac{\partial\theta_{ij}}{\partial t}=q_{ij} \qquad (۴)$$

از آنجایی که $T_{ij}-T_{i\prime j\prime}=\theta_{ij}-\theta_{i\prime j\prime}$ و $\frac{\partial T_{ij}}{\partial t}=\frac{\partial\theta_{ij}}{\partial t}$ تنها عبارت دوم سمت چپ تغییر کرده و دمای محیط از روابط حذف می‌شود.

با فرض تغییرات حوزه زمان (Δt) بسیار کوچک، می‌توان تقریب $\frac{\partial\theta_{ij}}{\partial t}\approx\frac{\theta_{ij}(t+1)-\theta_{ij}(t)}{\Delta t}$ را به کار برده و رابطه (۴) را به صورت رابطه گسسته (۵) باز نویسی کرد. با اعمال رابطه (۵) به تمامی گره‌ها، شکل ماتریسی (۶) برای محاسبه دما در هر لحظه از زمان به دست می‌آید.

$$\theta_{ij}(t+1)=\theta_{ij}(t)+C_{ij}^{-1}\Delta t\times\{q_{ij}-\sum R_{ij-i'j'}^{-1}\left(\theta_{ij}(t)-\theta_{i'j'}(t)\right)-h_{ij}\theta_{ij}(t)\} \qquad (۵)$$

$$\boldsymbol{\theta}(t+1)=\boldsymbol{\theta}(t)+\boldsymbol{C}^{-1}\Delta t\times\{\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{G\theta}(t)-\boldsymbol{H\theta}(t)\} \qquad (۶)$$

که $\boldsymbol{\theta}$ و $\boldsymbol{Q}$ آرایه ستونی دما و حرارت تولیدی، $\boldsymbol{G}$ماتریس هدایت حرارتی، $\boldsymbol{H}$ ماتریس قطری انتقال حرارت به محیط و $\boldsymbol{C}$ ماتریس قطری خازن در گره‌هامی‌باشند.

۲-۲- مقاومت‌ها ($R_{ij-i\prime j\prime}$) و خازن (C_{ij}) حرارتی

با توجه به ساختار جامد سیم‌پیچی (متشکل از هادی‌های آلومینیومی و عایق‌های جامدی چون دی‌ام‌دی، مایلار و رزین)، تنها راه انتقال حرارت در داخل آن از طریق هدایت بوده ومقاومت حرارتی مرتبط با گره‌های میانی سیم‌پیچی می‌تواند از (۷) محاسبه شود.

$$R_{ij-i'j'}=Ak/L_{ij-i'j'} \qquad (۷)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی معادلسیم‌پیچی، A سطح عمود بر جریان حرارتی (شعاع متوسط دو گره×۲π) و $L_{ij-i\prime j\prime}$ طول مسیر جریان حرارتی (فاصله بین دو گره) می‌باشند.

خازن حرارتی معادل هر واحد نیز از (۸) محاسبه می‌شود که ρ چگالی وزنی معادل، c_pظرفیت حرارتی و V حجم واحد سیم‌پیچی می‌باشند.

$$C_{ij}=\rho c_p/V \qquad (۸)$$

۲-۳- ضرایب انتقال حرارت به محیط (h_{ij})

تشعشع در سطوح خارجی محوری: بخشی از حرارت به روش تشعشعی از سطوح خارجی ترانسفورماتور به محیط بیرون منتقل می‌شود. شار حرارتی انتقالی توسط تشعشع را می‌توان به صورت(۹) بیان کرد [۲۴].

$$h=\varepsilon\sigma(T_s^3+T_sT_{air}^3+T_s^3T_{air}+T_{air}^3) \qquad (۹)$$

کهT_s دمای مطلق سطح، ε ضریب تشعشع از دیواره و σ ثابت استفان بولتزمن [۲۴] هستند.

جابه‌جایی آزاد در سطوح خارجی محوری: جابه‌جایی طبیعی هوا در این بخش ناشی از نیروهای ارشمیدس در سیال بوده، به‌طوری که هوای گرم و سبک ترجیح می‌دهد به سمت بالا فرار کرده و جای خود را به هوای سرد و سنگین بدهد. در واقع با افزایش ارتفاع، لایه‌های مرزی سرعت و حرارت از سطح صفحه فاصله می‌گیرند. دورتر شدن لایه‌مرزی از سطح سبب افزایش مقاومت حرارتی (و در نتیجه دمای) دیواره نسبت به محیط می‌شود. در این تحقیق، جهت ساده‌سازی مدل حرارتی از روابط تجربی جابجایی طبیعی در سطوح عمودی با طول بی‌نهایت که پیش‌تر در مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور خشک دو سیم پیچه مورد استفاده قرار گرفته بودند[۷]، استفاده شده است:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

$$h = \sqrt[5]{\frac{4Pr^2 g\beta k^4 \overline{q''_{co}}}{(36+45Pr)v^2}\frac{1}{Z}} \qquad (۱۰)$$

که دراین روابط، g شتاب جاذبه، k ضریب هدایت حرارتی هوا، Pr عدد پرانتل، $\overline{q''_{co}}$ شار حرارتی متوسط سطح، Z ارتفاع از پایین، β ضریب انبساط حرارتی هوا و v ویسکوزیته هوا می‌باشند.

جابه‌جایی آزاد در مجاری هوای محوری: جابه‌جایی در اینجا تا حدودی متفاوت از جابه‌جایی در سطح خارجی استوانه عمودی بوده و به جریان داخلی معروف است. تا نقطه‌ای در ارتفاع معین لایه مرزی مشابه دو صفحه عمودی مجزا است، این ناحیه به ناحیه ورودی معروف است. ناحیه‌ای که بلافاصله بعد از طول ورودی به دلیل برخورد و هم‌پوشانی لایه‌های مرزی رخ می‌دهد به نام ناحیه کاملاً توسعه یافته خوانده می‌شود. مشابه قبل جهت ساده‌سازی مدل‌سازی حرارتی، از روابط تجربی برای توصیف جابه‌جایی طبیعی در فواصل هوایی محوری استفاده شده است [۷]:

$$h = \frac{k}{b}\begin{cases} C_1\sqrt[6]{(1+R)\varphi_Z^2} & \varphi_Z \le 60^\circ \\ \dfrac{C_2}{\left[(1+R)\left(\frac{1}{\varphi_Z}\sqrt{\frac{24}{1+R}}-\frac{9}{70}\right)+\frac{1}{2}\right]} & \varphi_Z \ge 60^\circ \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$\varphi_Z = \sqrt{\frac{g\beta PrLb^5\overline{q''_{cd}}}{kv^2}\frac{1}{Z}} \qquad (۱۲)$$

که Rبرای هر دیواره، نسبت شار حرارتی دیواره مقابل به دیواره مورد مطالعه، $\overline{q''_{cd}}$ شار حرارتی متوسط هر دیواره، b پهنای مجرا، L ارتفاع کل مجرا هستند. C_1 و C_2 ضرایب ثابتی هستند که به‌صورت تجربی تعیین می‌شوند [۲۴].

سطوح خارجی شعاعی (بالا و پایین سیم‌پیچی‌ها): در سطوح بالا و پایین سیم‌پیچی‌ها، انتقال حرات از دو طریق جابه‌جایی و تابش انجام می‌شود، و تا حدود زیادی ناشناخته و وابسته به شرایط محیطی است. مشکلی که در اینجا با آن روبه‌رو هستیم، این است که در محیط‌های مختلف، با ضرایب جابه‌جایی و تشعشع متفاوتی مواجه هستیم که فرموله کردن آن‌ها تقریباً غیرممکن و تنها از طریق تجربی مقدور است. خوشبختانه چنانچه در مرجع [۷] نشان داده است، انتقال حرارت از سطوح بالا و پایین سیم‌پیچی‌ها با تقریب بسیار خوبی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. تنها مشکلی که در مدل‌سازی فاصله سطح میانی سیم‌پیچی‌های بالا و پایین وجود دارد، میزان دبی هوای ورودی از طریق این فاصله به مجاری هوایی سیم‌پیچی‌های بالا است. باوجود ناشناخته بودن میزان هوای ورودی از طریق این فاصله (که سبب تغییر در لایه‌های مرزی مجاری هوا در سیم‌پیچی‌های بالایی می‌شود)، بهتر است بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شده و از این هوای ورودی صرف‌نظر شود. البته توجه شود که در بسیاری موارد این فاصله به دلایل فنی و تولیدی حذف و یا پوشانده می‌شود و بنابراین عملاً هیچ هوایی از این طریق وارد مجاری نمی‌گردد.

۲-۴- تلفات سیم‌پیچی (q_{ij})

روش‌های متعددی جهت محاسبه میدان مغناطیسی و تلفات سیم‌پیچی‌ها ارائه شده‌اند که از آن‌جمله می‌توان به مراجع [۷ و ۲۴] اشاره کرد. در این تحقیق، از یک روش تلفیقی سریع و دقیق جهت محاسبه این کمیت استفاده شده است:

- ابتدا جریان سیم‌پیچی‌ها با استفاده از مدار معادل ترانسفورماتور [۲۱] و متناسب با بارگیری محاسبه می‌شود.
- سپس با کمک مدل ساده اجزای محدود، توزیع میدان مغناطیسی در نقاط مختلف محاسبه می‌شود [۲۱ و ۲۵].
- با کمک شدت میدان‌های شعاعی و محوری محاسبه شده در هر هادی، تلفات هر واحد از (۱۳) محاسبه می‌شود:

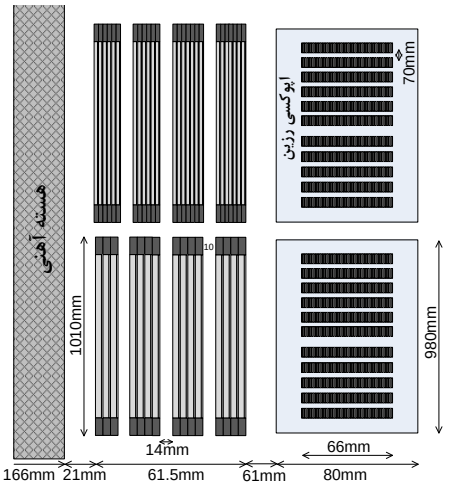
$$q_{ij} = \left(1+K_{eddy}\right)P_{dc} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه P_{dc} تلفات اهمی ثابت وK_{eddy} ضریب تلفات فوکو است که از [۷ و ۸] قابل محاسبه است.

مشخص است که تلفات سیم‌پیچ‌ها مرتبط با جریان گذرنده از آنهاست.

۲-۵- نتایج مدل‌سازی حرارتی و اعتبار سنجی آن

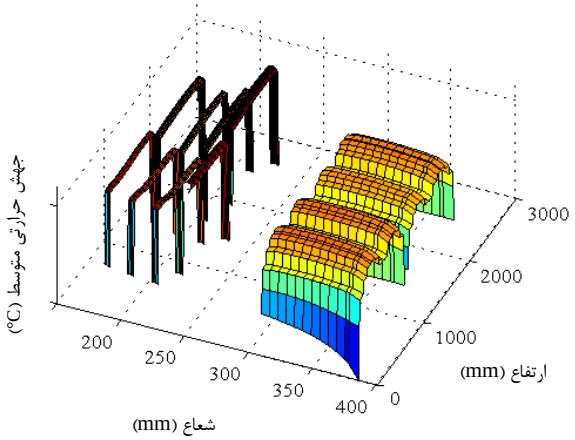
در این مقاله، یک ترانسفورماتور ۴۰۰۰kVA، ۲۰kV/۲×۷۵۰V [۲۲] مطابق شکل ۲ انتخاب و رفتار حرارتی آن مطالعه شده است.



شکل (۲): شکل دوبعدی و ابعاد ترانسفورماتور مرود مطالعه

شکل۳، توزیع دمای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]



شکل (۳): توزیع جهش حرارتی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور

چنانچه از جدول ۱ دیده می‌شود، مدل‌سازی ارائه شده با دقت مناسبی دمای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه را تخمین می‌زند.

جدول (۱): جهش حرارتی سیم‌پیچی‌ها در حالتی که سیم‌پیچی‌های بالا و پایین به‌صورت دو ترانسفورماتور مجزا باشند

	جهش حرارتی متوسط سیم‌پیچی			
	LV_1	HV_1	LV_2	HV_2
کارخانه	۶۰	۴۵	۵۳	۴۵
روش تفاضلات محدود	۶۲	۴۷	۵۳	۴۵
روش اجزای محدود	۶۱	۴۵	۵۴	۴۶

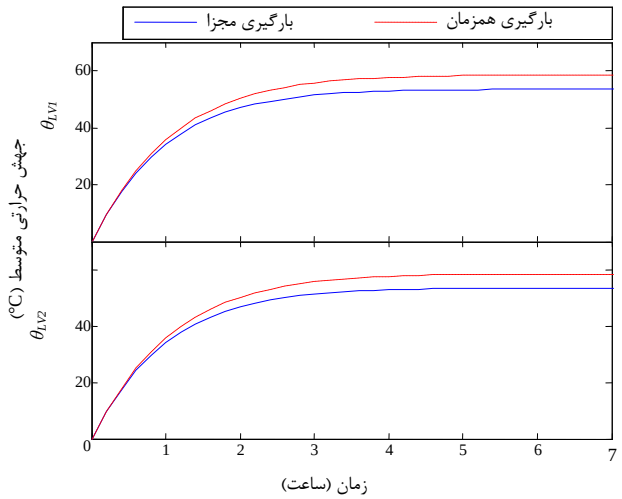
جدول ۲ جهش حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه را با نتایج حاصل از بارگیری سیم‌پیچی‌های بالا و پایین به‌صورت دو ترانسفورماتور مجزا مقایسه می‌کند.

جدول (۲): جهش‌های حرارتی متوسط و نقطه داغ در سیم‌پیچی‌ها

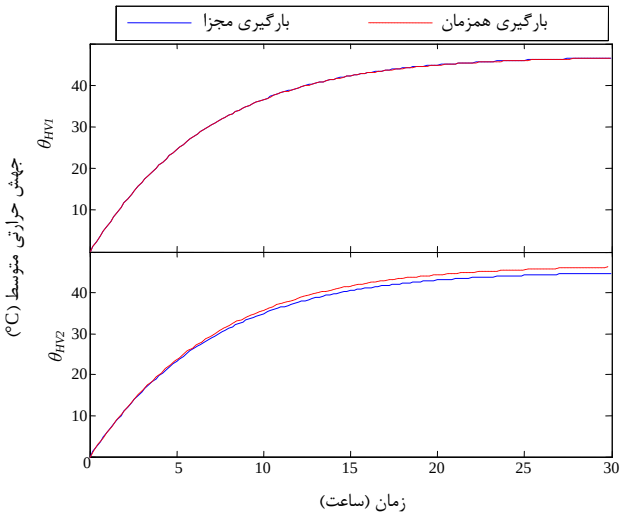
بارگیری ترانسفورماتور	جهش حرارتی متوسط				جهش حرارتی نقطه داغ			
بالا و پایین	LV_1	HV_1	LV_2	HV_2	LV_1	HV_1	LV_2	HV_2
مجزا	۶۲	۴۷	۵۳	۴۵	۷۱	۵۶	۶۷	۵۵
دوطبقه (هم‌زمان)	۶۰	۴۷	۵۸	۴۷	۷۱	۵۶	۷۴	۵۶

شکل ۴ نیز حالت گذاری حرارتی سیم‌پیچی‌ها را در بارگیری هم‌زمان و مستقل دو ترانسفورماتور بالا و پایین نشان می‌دهد. در حالت بارگیری همزمان دو ترانسفورماتور به صورت دوطبقه، دمای سیم‌پیچی‌های بالا بیشتر و دمای سیم‌پیچی‌های پایین کمتر از حالتی است که دو ترانسفورماتور به صورت مجزا ساخته و بارگیری می‌شوند. دمای پایین‌تر ترانسفورماتور پایینی را می‌توان مرتبط با افزایش ارتفاع مجاری هوا در روابط مربوط به جابجایی طبیعی هوا (افزایش L) توجیه نمود. با این‌حال و با وجود افزایش ارتفاع مجاری هوا که می‌تواند سبب بهبود انتقال حرارت ترانسفورماتورها شود، ارتفاع بالاتر سیم‌پیچی‌های بالایی (افزایش z) سبب کاهش انتقال حرارت و افزایش دما در سیم‌پیچی‌ها (تا ۱۱ درصد) شده و شرایط خطرناکی را پدید می‌آورد.

دیده می‌شود که ثابت زمانی حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی بیشتر از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف است. این ثابت زمانی بیشتر، سبب می‌شود که حساسیت جهش حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی به تغییرات بار ترانسفورماتور کمتر از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف باشد. بنابراین چنانچه در بخش ۴ نیز نشان داده شده است، عملاً اضافه بارگیری‌های کوتاه مدت، روی جهش حرارتی سیم‌پیچ‌های فشارقوی تأثیر بسیار کمتری داشته و خطر کمتری را ایجاد می‌کنند. برای درک بهتر مدلسازی حرارتی در حالت پایدار و مطالعه بیشتر درخصوص نتایج مسئله مدلسازی و توزیع درجه حرارت حالت پایدار مرتبط با ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه، خواننده می‌تواند به مرجع [۲۴] مراجعه نماید.



(الف)



(ب)

شکل (۴): دمای سیم‌پیچی‌های الف) فشارضعیف و ب) فشارقوی در بارگیری‌های مجزا و هم‌زمان ترانسفورماتورهای بالا و پایین

۳- مدل‌های حرارتی مبتنی بر شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از نورون‌های به‌هم پیوسته‌اند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

بیولوژیک واقعی استفاده می‌کنند [۲۷ و ۲۸]. در یک شبکه عصبی مصنوعی، نورون‌های مصنوعی توسط وزن‌های قابل تنظیم به یکدیگر متصل می‌شوند تا بتوانند ارتباطات پیچیده بین ورودی و خروجی‌ها مدل کنند. یک شبکه عصبی می‌تواند برای تولید خروجی یا خروجی‌ها به ازای مجموعه مشخصی از ورودی‌ها آموزش ببیند.

چنانچه در قسمت قبل (رابطه (۶)) نشان داده شد، جهش حرارتی سیم‌پیچ در هر لحظه تابعی از تلفات و در نتیجه جریان گذرنده از سیم‌پیچی(یا نسبت جریان سیم‌پیچی به جریان نامی آن)، دمای لحظات قبل و مشخصات حرارتی سیم‌پیچی می‌باشد. از طرف دیگر پارامترهای حرارتی سیم‌پیچی و به‌خصوص هوا بستگی شدید به دما دارند. بنابراین مدلی غیرخطی و دینامیک برای مطالعه رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور نیاز است.

توجه شود که چون هدف محاسبه جهش حرارتی است، از تأثیر دمای محیط در رابطه (۶) صرفنظر شده و ورودی این مدل غیرخطی و دینامیک می‌بایست جریان سیم‌پیچی باشد. خروجی‌ها نیز با توجه به هدف مسئله، از نوع جهش حرارتی در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب و ارائه جهش حرارتی سیم‌پیچ‌ها به جای دمای مطلق امری متداول در مطالعات حرارتی پایدار [۲۴] و گذرا [۱۴-۱۶] است. اصولاً انتخاب جهش حرارتی به جای دمای مطلق سیم‌پیچ‌ها برای کاهش متغیر دمای محیط و حذف آن در مطالعات حرارتی می‌باشد که به سادگی معادلات و مطالعات می‌انجامد. پیشتر نیز در مطالعات دیگر [۱۴-۱۶] اشاره شده است که می‌توان تأثیر دمای محیط را در مدل جهش حرارتی (و نه دمای مطلق) نادیده گرفت. قطعاً اضافه کردن دمای محیط به ورودی‌های مؤثر در مدل حرارتی ساده بوده و می‌تواند سبب افزایش بیشتر دقت مدل حرارتی شود. اما باعث پیچیدگی مدل جهت کاربردهای مانیتورینگ حرارتی شده و نیاز به نمونه‌برداری‌های بیشتر توسط بهره‌بردار را ضروری می‌نماید که امری مطلوب نیست.

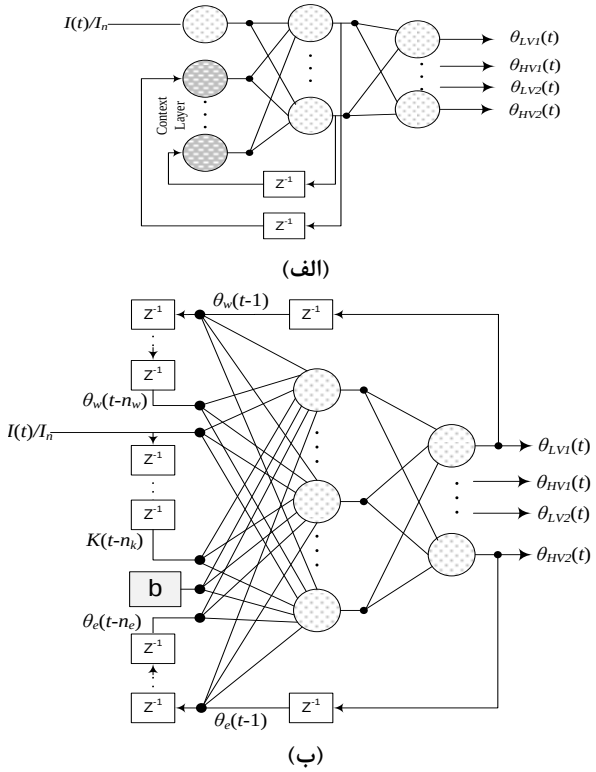
حالت اول: اگر سیم‌پیچی‌ها مستقل از یکدیگر فرض شوند، می‌توان چهار مدل حرارتی دینامیک با یک ورودی و تنها یک خروجی برای مدل‌سازی رفتار حرارتی ترانسفورماتور دوطبقه در نظر گرفت.

حالت دوم: اگر ارتباط بین سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و فشارقوی هم‌محور در نظر گرفته شود (این ارتباط می‌تواند از طریق مجرای هوای بین این سیم‌پیچی‌ها باشد) و از ارتباط مغناطیسی و حرارتی ترانسفورماتورهای بالا و پایین صرف‌نظر شود، دو مدل با ورودی ضریب جریان سیم‌پیچی (فشارضعیف پایین یا بالا) و دو خروجی دما مطلوب‌اند.

حالت سوم: اگر ارتباطی حرارتی بین سیم‌پیچی‌های بالا و پایین در نظر گرفته شود، یک مدل حرارتی با دو ورودی ضریب جریان سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف پایین و بالا و چهار خروجی دما مورد نیاز است. در این مدل یکپارچه، ارتباط بین جریان‌های سیم‌پیچی‌ها، در ارتباط بین نرون‌ها نهفته خواهد بود.

در این تحقیق ضمن در نظر گرفتن حالت سوم (البته در انتهای مقاله، نتایج با حالت اول مقایسه شده‌اند)، فرض شده است که جریان همه سیم‌پیچی‌ها متناسب با یکدیگر تغییر داده می‌شود و بنابراین تنها یک ورودی ضریب جریان کافی است. این فرض برای سادگی محاسبات در نظر گرفته شده است؛ در غیر این صورت می‌بایست آزمایش‌های پیچیده‌تری ترتیب داده می‌شد. برای دستیابی به اهداف مورد اشاره، دو مدل شبکه عصبی بازگشتی ارائه شده است:

* اولین مدل، شبکه عصبی بازگشتی المان (ELRN) است که به‌صورت گسترده‌ای برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ELRN از لایه‌های ورودی، پنهان، زمینه و خروجی تشکیل می‌شود (شکل ۵-الف). شاخه‌های بازگشتی در لایه زمینه سبب حساسیت شبکه ELRN به گذشته خروجی شده و رفتاری دینامیک را ایجاد می‌کند.
* دیگر شبکه عصبی مورد استفاده، مدل NARXاستکه یکی از شبکه‌های عصبی دینامیک قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و وابسته به زمان است. پروسه یادگیری NARX بسیار مؤثر بوده و با سرعت بالایی همگرا می‌شود. در مدل‌سازی سیستم‌های با وابستگی‌های زمانی طولانی مدت، مدل NARX بهتر از سایر شبکه‌هاست. یکی از ساده‌ترین روش‌های به‌کارگیریاین مدل‌ها، استفاده از یک شبکه با تغذیه پیشرو با ورودی‌های تأخیردار شده به‌علاوه شاخه‌هایی از خروجی‌های تأخیردار شده در ورودی است (شکل ۵-ب).



شکل (۵): ساختار مدل‌های الف) ELMAN و ب) NARX

در این تحقیق، روش‌های مختلف آموزش بر روی دو عصبی ارائه شده آزمایش و تعداد لایه‌های پنهان، نوع توابع تبدیل و تعداد تکرارها

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]

به واسطه روش سعی و خطا تعیین شده‌اند. هر دو شبکه توسط روش 'Marquardt-Levenberg' آموزش داده شدند و توابع تبدیل 'logsig' و 'purelin'به ترتیب برای لایه‌های مخفی و لایه‌های خروجی انتخاب شده‌اند. لایه مخفی نیز با ۶ نورون انتخاب شده است.

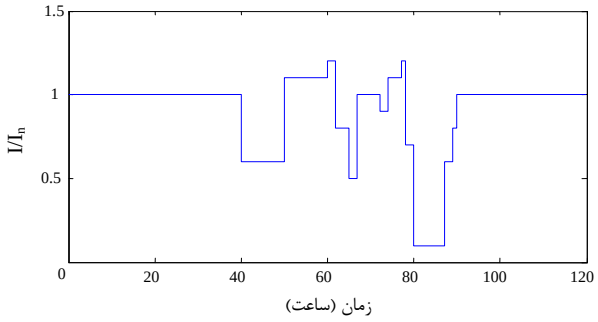
در حالت ایده‌آل برای تخمین و آموزش مدل‌های حرارتی ارائه شده بهتر است از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های حرارتی در حالت‌های گذرا و با اعمال بارگیری‌های مشخصی استفاده شود. با این حال از آنجایی که هدف مقاله حاضر مدلسازی دمای متوسط سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به صورت مجزا است و اندازه‌گیری‌های مرتبط با آن بسیار پرهزینه و در موارد عملی ناممکن هستند. لذا در این مقاله مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبل جهت مدلسازی آزمایش‌های حرارتی در حالت گذرا مورد استفاده قرار گرفته است.

ضمناً توجه شود که هدف تحقیق حاضر استخراج مدلی سریع و دقیق مبتنی بر داده‌های مستخرج از مدل ریاضی، جهت مانیتورینگ حرارتی برخط در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه است. در این حالت چنانچه در مقالات پیشین [۲۴ و ۲۶] و مقاله حاضر، تا حد امکان دقت مدل‌های ریاضی ارزیابی و تأیید شده‌اند، این مدل‌ها به عنوان مرجعی جهت انجام آزمایش‌های حرارتی گذرا در ترانسفورماتور مورد اشاره در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌های مانیتورینگ حرارتی سریع ارائه شده مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی با کمک نتایج حاصل از این آزمایش‌ها تخمین و درنهایت ارزیابی می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای مدل‌های ارائه شده تنها یک بار تخمین زده شده و در حین بهره‌برداری می‌توانند به سرعت جهش حرارتی سیم‌پیچ‌ها را متناسب با میزان بارگیری تخمین زده و برای امور حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. قطعاً در صورت وجود امکان اندازه‌گیری‌های جامع حرارتی به صورت تجربی، می‌توان داده‌های تجربی گذرا را به جای داده‌های مدلسازی ریاضی مورد استفاده قرار داده و نتایج قابل اعتمادتری را از مدل‌های ارائه شده انتظار داشت. با این حال حتی در صورت امکان، در عمل چنین آزمایش‌های تجربی برای سازندگان و بهره‌برداران ترانسفورماتور مقدور و به صرفه نمی‌باشد.

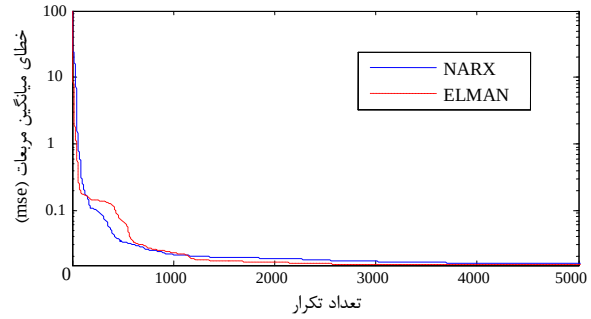
۴- تحلیل نتایج و ارزیابی مدل‌های حرارتی

با کمک نرم‌افزار مدلسازی حرارتی ریاضی ارائه شده در بخش قبل و اعمال یک بارگیری نوعی (شکل ۶-الف) به آن، داده‌های حرارتی گردآوری و برای آموزش مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (گام زمانی اندازه‌گیری‌ها هر ۱۵ دقیقه می‌باشد). با توجه به انتخاب این سیکل ترکیبی با تغییرات مکرر میزان بار و جریان سیم‌پیچ‌ها (برخلاف بارگیری ثابت)، عملاً مدل تحت شرایط مختلف قرار گرفته و آموزش شبکه با کارایی خوبی انجام می‌شود. از شکل ۶-ب دیده می‌شود که مدل حرارتی مبتنی برNARX با سرعت بالاتری آموزش دیده و پارامترهای آن تخمین زده شده‌اند.

با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش حرارتی، هر دو مدل ارائه شده مبتنی بر شبکه‌های عصبی آموزش دیدند. حال این مدل‌های آموزش دیده، می‌توانند جهت تخمین دمای حالت گذرای ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه در هر نوع شرایط بارگیری مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه جهت تأیید صحت و اعتبار نتایج مدل‌های ارائه شده، یک بارگیری آزمایشی مطابق با شکل ۷ به مدل‌ها اعمال و دمای سیم‌پیچی‌ها استخراج شده‌اند. از آنجایی که این سیکل بارگیری جدید که هیچ ارتباطی به سیکل آموزش ندارد، جهت ارزیابی مدل آموزش دیده استفاده شده، نتایج اعتبارسنجی قابل اعتماد خواهند بود.

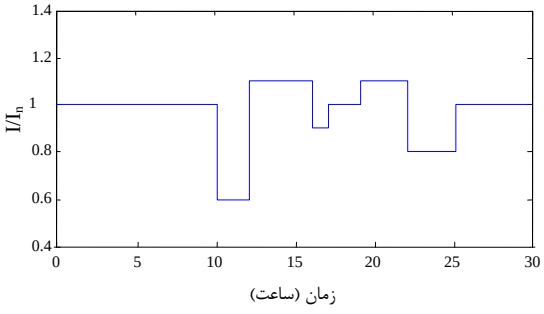


(الف)



(ب)

شکل (۶): الف) آزمایش حرارتی برای آموزش مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی- الف) بارگیری و ب) پروسه آموزش



شکل (۷): بارگیری آزمایشی برای تأیید صحت مدل‌سازی

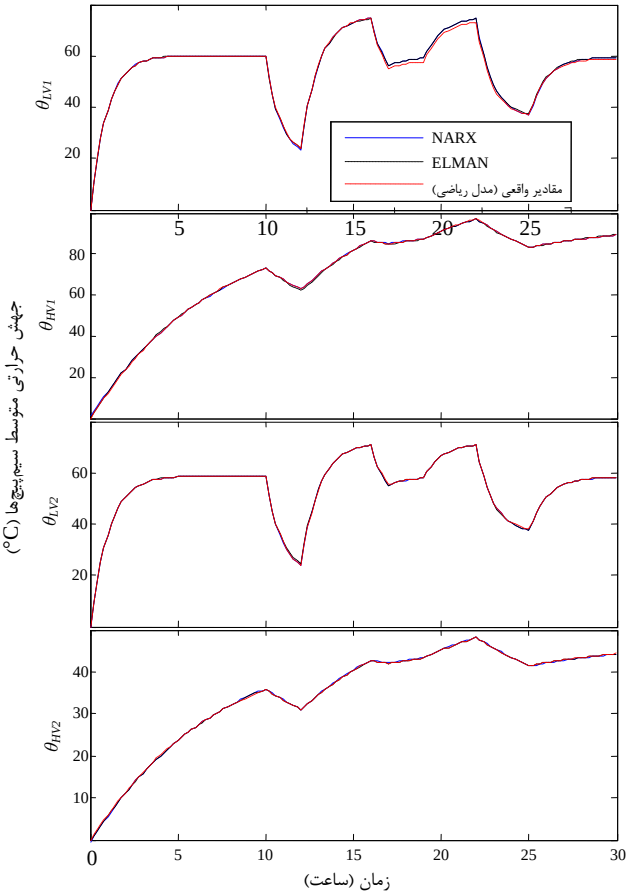
نتایج تخمین جهش حرارتی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه توسط مدل‌های ارائه شده با نتایج واقعی (محاسبه شده توسط نرم‌افزار مدل‌سازی ریاضی بخش ۲) در شکل ۸ مقایسه شده‌اند.

از این شکل‌ها دیده می‌شود که هر دو مدل ارائه شده با دقت بسیار بالایی رفتار حرارتی گذرا را در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مدل می‌کنند. تفاوت معناداری در دقت مدل‌سازی مدل‌های حرارتی مبتنی بر ELRN و NARX وجود ندارد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

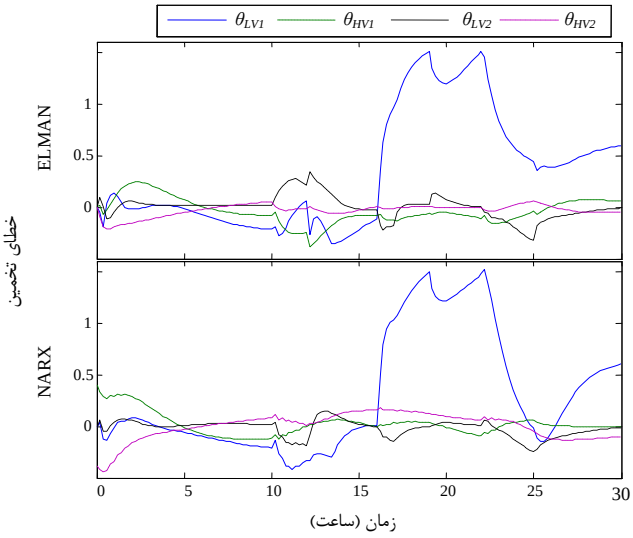
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

هر دو مدل با خطای بسیار ناچیزی دما را تخمین می‌زنند و تنها در سیم‌پیچی فشارضعیف پایین و در زمان‌هایی خاص این خطا به حدود ۳٪می‌رسد. علاوه بر دقت بالای تخمین دما، این مدل‌ها از پیچیدگی کمی در مدل‌سازی رفتار حراتی گذرای ترانسفورماتور برخوردارند.



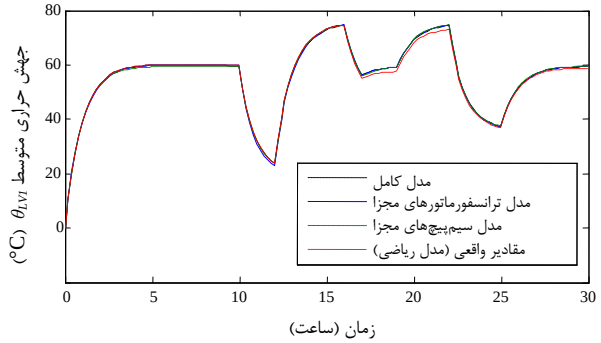
شکل (۸): تخمین جهش حرارتی سیم‌پیچی‌هایترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه

شکل ۹ نیز خطای تخمین را در هر دو مدل نشان می‌دهد.



شکل (۹):خطای تخمین دمای سیم‌پیچی‌ها در مدل‌هایELMAN و NARX

نهایتاً توجه شود که مدل حرارتی ترانسفورماتور چند سیم پیچه دوطبقه به‌صورت یکپارچه (حالت سوم) و با تنها یک ورودی جریان در نظر گرفته شده است. این مسئله می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در تخمین دمای سیم‌پیچی‌ها در بارگیری‌های نامتقارن و خطاها شود. بنابراین در صورت نیاز می‌توان تعداد ورودی‌های ضریب جریان را در مدل یکپارچه افزایش داده یا از مدل‌های ترانسفورماتور مجزا (حالت دوم) و سیم‌پیچی‌های مجزا (حالت اول) استفاده کرد. برای نمونه، شکل ۱۰ نتایج تخمین دمای سیم‌پیچی فشارضعیف پایین را که توسط مدل‌های مجزا و یکپارچه استخراج شده‌اند، مقایسه می‌کند. چنانچه مشخص است، هر سه حالت مدل‌سازی با دقت بسیار بالایی رفتار حرارتی گذرا را در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مدل کرده‌اند.



شکل (۱۰):مقایسه تخمین دما در مدل‌های مختلف ELMAN

مدل‌سازی ریاضی از دقت بالایی برخوردار است و می‌تواند برای بررسی رفتار حرارتی گذرای ترانسفورماتور در شرایط مختلف بارگیری به کار رود. با این‌حال با توجه به پیچیدگی و زمان‌بر بودن آن، گزینه مناسبی در کاربردهای پایش (مانیتورینگ) درجه حرارت سیم‌پیچی‌ها در حالت برخط نیست. در چنین مواردی، مدل‌های دینامیک ارائه شده بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند راهگشا بوده و در عین سادگی با دقت بالایی رفتار حرارتی گذرای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه را تخمین بزنند.

مجدداً از شکل ۸ دیده می‌شود که حساسیت دمای سیم‌پیچ‌های فشارقوی (بشقابی با رزین قالب ریزی شده) به تغییرات بار بسیار کمتر بوده و بارگیری‌های کوتاه مدت و سریع، تأثیر بسیار کمی روی جهش حرارتی این سیم‌پیچ‌ها می‌گذارند.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، در ابتدا مدل‌سازی ریاضی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه بر مبنای روش تفاضلات محدود جهت مطالعه رفتار گذرای حرارتی سیم‌پیچی‌ها ارائه شد. بعد از تأیید اعتبار مدل ریاضی، با کمک نرم‌افزار مدل‌سازی حرارتی نوشته شده، رفتار حرارتی سیم‌پیچی‌ها تحت شرایط مختلف بارگیری مورد مطالعه قرار گرفت.

چنانچه نشان داد شد، مدل ریاضی و نرم‌افزار مربوطه، از دقت بالایی برخوردارند. با وجود دقت بالای مدل ریاضی، در عمل نیاز به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]

مدل‌هایی ساده و کاربردی جهت مانیتورینگ حرارتی ترانسفورماتور است. بنابراین در ادامه مقاله، دو مدل حرارتی دینامیک مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت مدل‌سازی رفتار حرارتی گذرا در ترانسفورماتور دوطبقه ارائه شدند. با کمک یک سری داده حرارتی که از نرم‌افزارمدل‌سازی حرارتی ریاضی استخراج شدند، پارامترهای دو مدل شبکه عصبی ارائه شده آموزش دیده و با بهره گیری از داده‌های حرارتی اضافی، نتایج این مدل‌ها ارزیابی و تأیید شدند.

همان‌طور که از نتایج مقاله حاضر برمی‌آید، مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی از دقت مناسبی جهت تحلیل حرارتی گذرای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه برخوردارند. بنابراین مدل‌های ارائه شده می‌توانند به راحتی در پایش برخط رفتار حرارتی در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

[۱] داود عزیزیان، طراحی ترانسفورماتورهای یکسوساز مترو، گزارش پروژه، مؤسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران، ۱۳۸۶.

[2] Pierce, L. W., "Thermal Consideration in Specifying Dry–Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 1090-1097, 1994.

[3] Pierce, L. W., "An Investigation of the Temperature Distribution in Cast-Resin Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 920-926, 1992.

[4] Pierce, L. W., "Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1160-1172, 1994.

[5] Nabhani, F., Hodgson, S., Warnakulasuri, K., "Estimation of Temperature Rise in MVA Range Dry-Type Transformers and Practical Verification Based on Simulated Loading", World Congress on Engineering (WCE2015), Vol. 1, 2015, London, U.K.

[6] Cho, H. G., Lee, U. Y., Kim, S. S., Park, Y. D., "The Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Pole Cast Resin Transformer for Power Distribution", IEEE Conference International Symposium on Electrical Insulation, pp. 384-386, 2002.

[7] E.Rahimpor, Azizian, D.,"Analysis of Temperature Distribution in Cast-Resin Dry-Type Transformers", Electrical Engineering, Vol. 89, No. 4, pp.301-309, 2007.

[۸] داود عزیزیان، مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- قدرت، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، آبان ماه ۱۳۸۴.

[۹] داود عزیزیان و ابراهیم رحیم‌پور، "تأثیر عوامل مختلف بر روی توزیع دمادر سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک رزینی"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2006)، تهران، ۱۳۸۵.

[10] Eslamian, M., Vahidi, B., Eslamian, A., "Thermal Analysis of Cast-Resin Dry-Type Transformers", Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 7, pp. 2479-2488, 2011.

[11] Azizian, D.,"Temperature Prediction in Cast-Resin Transformer Due to Non-Linear Loads", Journal of Electrical Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 23-249, 2014.

[12] Rao, S. D., "Dynamic Loading of Substation Distribution Transformers: Detecting Unreliable Thermal Models and Improving the Accuracy of Predictions", MSc Thesis, Arizona State University, USA, 2014.

[13] Taghikhani, M. A.,"Power transformer top oil temperature estimation with GA and PSO methods", Energy and Power Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 41-46, 2012.

[14] Azizian, D., Bigdeli, M., Fotuhi-Firuzabad, M.,"A Dynamic Thermal based Reliability Model of Cast-Resin Dry-Type Transformers", International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010.

[15] Azizian, D., Bigdeli, M., "Cast-Resin Dry-Type Transformer Thermal Modeling Based on Particle Swarm Optimization", Advances in Intelligent Systems and Computing 356, DOI 10.1007/978-3-319-18296-4_12, pp. 141-153, 2016.

[16] Azizian, D., Bigdeli, M., "Application of Heuristic Methods for Dynamic ThermalModelling of Cast-Resin Transformer", International Journal of Advanced Intelligence Paradigms, Vol. 8, No. 3, 2016.

[17] Najafi, A., Iskender, I., "Thermal Modeling and Electromagnetic Analysis of1000 kVA Distribution Transformer Based on Electrical–Thermal Equivalent Circuit and FEM", Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation, Vol. 4, No. 2, pp. 24-30, 2015.

[18] Najafi, A., Iskender, I., "An Improved Thermal Model for Distribution Transformer under Unbalanced Voltage Conditions", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 104, pp. 373–385, 2016.

[19] Najafi, A., Iskender, I., "Dry type transformer winding thermal analysis using different neural network methods", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol. 26, No. 4, pp. 905-913, 2011.

[20] Azizian, D., Bigdeli, M.,"A New Cast-Resin Transformer Thermal Model Based on Recurrent Neural Networks", Archives of Electrical Engineering, Accepted, 2016.

[21] Azizian, D., Vakilian, M., Faiz, J., "New Multi-Winding Traction Transformer Equivalent Circuit for Short-Circuit Performance Analysis", International Transaction on Electrical Energy Systems, Vol. 24, pp. 186–202, 2014.

[22] Azizian, D.,"Nonlinear Behavior Analysis of Split-Winding Dry-Type Transformer Using a New Star Model and a Coupled Field-Circuit Approach", Archives of Electrical Engineering, Vol. 65, No. 4, pp. 773-787, 2016.

[۲۳] داود عزیزیان، "مدلسازی حرارتی ترانسفورماتورهای سه سیم‌پیچهٔ خشک با ساختار دوطبقه"، بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق (PSC2013)، تهران، ایران، ۱۳۹۲.

[24] Azizian, D.,"Windings Temperature Prediction in Split-Winding Traction Transformer", Turkish Journal of Electrical engineering & Computer Sciences, Vol. 24, No. 4, pp. 3011-3022, 2016.

[25] Azizian, D., "Leakage Inductance Calculations in Different Geometries of Traction Transformers", ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.12, No.2, pp. 28-34, 2014.

[۲۶] حُسنی توراج زن، داود عزیزیان و مهدی بیگدلی، "مدل‌سازی حرارتی ترانسفورماتور کششی با کمک روش اجزاء محدود" همایش مدلی مدل‌سازی ریاضی در مهندسی ، ابهر، ایران، ۱۳۹۳.

[۲۷] مهرداد حجت، محمد حسین جاویدی و سعیدرضا گلدانی، "تخصیص تلفات انتقال در محیط ترکیبی قراردادهای دوجانبه- حوضچه توان با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

[۲۸] رحمت اله هوشمند و مجید معظمی، "پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت تراکم گرهی در یک سیستم قدرت بزرگ تجدید ساختار یافته با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با بهینه سازی آموزش ژنتیکی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۳۹۳.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.3.5]