بررسی تغییرشکل (مکانیکی) سیم پیچ در پارامترهای ترانسفورماتور قدرت

پژمان شاکری بروجنی*[۱]، دکتر ابراهیم برزآبادی[۲]، دکتر غضنفر شاهقلیان[۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۸۸/۵/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۸۸/۸/۳۰

چکیده:

ترانسفورماتورهای قدرت به فراوانی در شبکه های برق برای انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به مسافت‌های طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت در این میان نقشی اساسی در تغذیه مطمئن انرژی ایفا می‌کند. بنابراین، شناسایی هر چه سریع‌تر عیب‌های رخ داده در داخل ترانسفورماتورهای قدرت ضروری به نظر می رسد. یکی از چنین عیب‌هایی که به سختی قابل تشخیص است، تغییرات مکانیکی (به شکل جابجایی های محوری و جابجایی های شعاعی) در ساختار سیم پیچ‌های ترانسفورماتورهای قدرت است . اندازه گیری تابع تبدیل تنها روشی است که در حال حاضر برای شناسایی این عیب معرفی شده است. در این مقاله سیم پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت به منظور مانیتورینگ با روش تابع تبدیل مطالعه و شبیه سازی شده است. برای این کار مدل مشروح سیم پیچ‌ها مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شده است که این مدل توانایی مدل‌سازی تغییرات مکانیکی بوجود آمده در سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتورهای قدرت را دارد. در نهایت با شبیه سازی به کمک مدل مشروح و همچنین استفاده از تابع تبدیل ترانسفورماتور نشان داده شده که می توان تغییرات مکانیکی در سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت را تشخیص داد و محل آن را تعیین کرد.

کلمات کلیدی:
ترانسفورماتورهای قدرت، تغییر شکل (مکانیکی)، مدل مشروح

۱)کارشناس ارشد برق قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۲)دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه اصفهان
۳) استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
* نویسندهٔ مسئول، Pejman.Shakeri @ gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

مقدمه

ترانسفورماتورهای مرتبط کنندهٔ سطوح ولتاژ مختلف از مهم‌ترین عناصر شبکه انتقال به حساب می‌آید که خروج آنها از مدار به قابلیت اطمینان توزیع انرژی آسیب جدی وارد می کند و باعث هدر رفتن سرمایه زیادی می‌شود[۱]. به منظور افزایش قابلیت اطمینان تغذیه انرژی برق، شناسایی سریع عیب‌های رخ داده در ترانسفورماتورها الزامی است. یکی از عیب‌های ترانسفورماتور که کمتر به آن پرداخته شده است، ایجاد تغییر شکل سیم پیچ‌های ترانسفورماتور است[۱،۵]. امروزه برای تشخیص تغییر شکل در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور (تغییر شکل شعاعی یا جابجایی محوری) که بر اثر بروز اتصال کوتاه در نزدیکی ترانسفورماتور و یا حمل و نقل نا مناسب ممکن است ایجاد شود، روش تابع تبدیل مورد بحث است[۵و۳]. تابع تبدیل یک روش مقایسه‌ای است. یعنی اندازه‌گیری‌های جدید را با اندازه‌گیری‌های مرجعی در کنار هم نهاده و در صورت وجود مغایرت زیاد در نتایج، این مغایرت را مورد بررسی و تحلیل قرار داده و تشخیص می دهد که آیا عیبی رخ داده است یا خیر؟ همچنین اگر عیبی رخ داده است، آیا می‌توان نوع و محل آن را شناسایی کرد؟ [۲]

تابع تبدیل را می‌توان برای هر کدام از اهداف زیر مورد استفاده قرار داد:

اگر هیچگونه نتیجهٔ اندازه‌گیری از ترانسفورماتور در حالت سالم موجود نباشد، نتایج محاسباتی را می‌توان به عنوان مرجع به منظور مقایسه با نتایج اندازه‌گیری جدید مورد استفاده قرار داد.

اثرات عیب‌های شناخته شده روی توابع تبدیل را می‌توان به کمک شبیه‌سازی‌ها بررسی و تحلیل کرد.

با استفاده از نتایج محاسباتی و مقایسه آنها با اندازه گیری های انجام شده می‌توان نوع و محل عیب در ترانسفورماتور معیوب را تعیین کرد.

به منظور دستیابی به اهداف یاد شده در بالا، اقدامات زیر صورت گرفته است:

ابتدا به بررسی اجمالی روش‌های گوناگون مدل سازی ترانسفورماتور های قدرت پرداخته و پس از بررسی معایب و محاسن هر یک از روش‌ها، روش بسیار مناسب مدل‌سازی مشروح ترانسفورماتور انتخاب شده است (به طور کلی موارد بسیار زیادی از کاربرد این روش را در تحقیقات می توان مشاهده کرد). سپس به بررسی دقیق‌تر روابط حاکم بر بعضی از پارامترهای مدل مشروح پرداخته شده است. اولین گام شبیه سازی، محاسبه جریان همه قسمت ها و واحدهای مدل صورت گرفته و محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی بین واحدهای مختلف و توزیع آنها در طول سیم پیچ‌ها (برای به دست آوردن مکان های مستعد جهت ایجاد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جابجـایی) اسـت. در ادامـه، شـبیه سـازی و محاسـبهٔ توابـع تبـدیل ترانـسفورماتور در حالـت‌هـای مختلـف عیـب در مکان‌های مستعد بدست آمـده در مرحلـه قبـل انجـام گرفتـه و در نهایـت، مقایـسه توابـع تبـدیل بدسـت آمـده از نتـایج شبیه سازی با تابع تبدیل ترانسفورماتور واقعی محل عیب در سیم پیچ را مشخص می کند[۱۰].

روش‌های گوناگون مدل سازی ترانسفورماتور های قدرت برای مطالعهٔ حالت گذرا

مـدل‌سـازی، سـاختار پیچیـده‌ای دارد ماننـد بخـش فعـال ترانـسفورماتورها و مـصالحهٔ بـین هزینـهٔ محاسـبات و دقت آنها را می‌طلبد. تعداد عناصر قابـل تعریـف در مـدل و دقـت مـدل‌سـازی محـدود اسـت. در میـان روش‌هـای زیـاد مدل‌سازی، مدل‌های زیر بیشتر مطرح است[۳و۶]:

مدل‌های جعبه سیاه (Black-Box):

a) آنالیز مُدال

b) مدل‌سازی بر پایهٔ وضعیت‌های قطب‌ها و صفرها

مدل‌های فیزیکی:

a) مدل خط انتقال n فازه

b) مدل مشروح

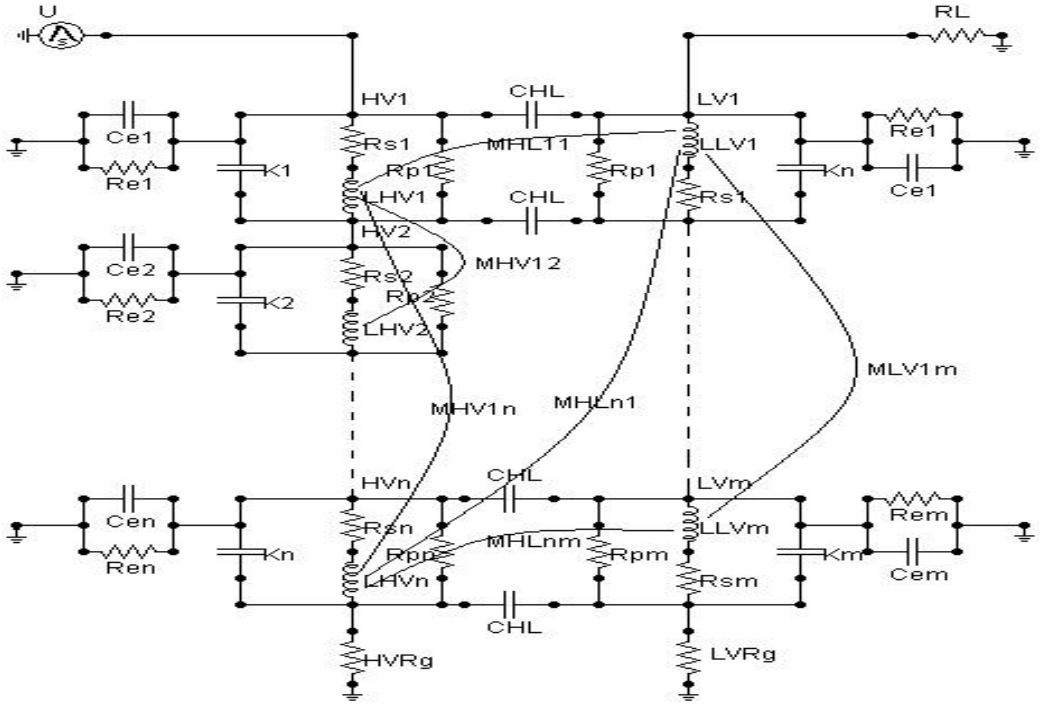
برای مدل‌سازی تغییرات بوجود آمده در سیم‌پیچ‌ها، مدل‌های جعبه سیاه مناسـب نیـست. زیـرا بـرای چنـین مدلـسازی می‌باید وابستگی بین قطب‌ها و صفرهای سیستم و ساختار سیم‌پیچ ترانسفورماتور معلوم باشد. در حالی که مدل جعبه سـیاه از روی نتایج اندازه‌گیری شده در پایانه‌های ترانسفورماتور ساخته می‌شود. در مدل‌سازی فیزیکی، ابعاد هندسی سـیم‌پـیچ‌هـا برای توصیف محاسباتی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های فیزیکی که بـه صـورت مـدار معـادل اسـت در محدودهٔ مشخصی در حوزهٔ فرکانسی معتبر است. با مدل‌سازی سیم پیچ‌ها به صورت یک مـدار RLCM (مـدل مـشروح) می‌توان مقادیر جریان‌ها و ولتاژها را محاسبه کرد و همچنین بر خلاف مدل خط انتقال چند فازه، مدل مـشروح مـی‌توانـد پدیده‌های غیرخطی (هیسترزیس، اشباع) و وابسته به فرکانس (تلفات جریان‌های فوکو، تلفات عایقی) را نیز محاسـبه کنـد. علاوه بر این، بکارگیری مدل مشروح نشان داده که ساختار دشوار سیم‌پیچ‌های با تعداد حلقه‌های بیشتر را می‌تـوان تـا حـد قابل قبولی شبیه‌سازی کرد (مدل خط انتقال n فازه تاکنون چنین کاربردهایی نداشته است) با توجه به معایـب و محاسـن ذکر شده، مدل مشروح در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است[۳،۵،۷].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

***مدل مشروح* (Detailed)**

کوچکترین جزء سیم‌پیچ فشار قوی حلقه‌های آن است. از روی هم قرار گرفتن حلقه‌ها در جهت افقی، دیسک‌ها بوجود می‌آید و همچنین از اتصال دیسک ها در جهت عمودی سیم‌پیچ فشار قوی حاصل می‌شود. هر دو دیسک مجاور که بر روی هم قرار گرفته است، تشکیل یک جفت دیسک را می‌دهد. در مدل سازی مشروح اجزاء مدل در رابطه مستقیم با این واقعیت فیزیکی است. یعنی سیم‌پیچ فشار قوی در مدل به اجزائی قسمت می‌شود که هر جزء آن دارای مفهوم فیزیکی است. این اجزاء را واحد سیم‌پیچ می‌نامند. شکل (۱) نشان دهنده یکی از این واحدهاست. در حوزهٔ فرکانسی مورد نظر این عناصر رفتار خطی دارد. پارامترهای مدل برای واحد سیم‌پیچی به شرح زیر تعریف می‌شود:

Li اندوکتانس معادل واحد i اُم سیم‌پیچ است که شار پراکندگی حلقه‌های i اُم را نمایش می‌دهد. (Lij) القای متقابل بین واحد i و j است. (Ki) ظرفیت طولی معادل برای واحد i اُم است. این ظرفیت، تمام ظرفیت‌های خازنی موجود بین حلقه‌های واحد i اُم را بصورت یک خازن بازنمایی می‌کند. (Ce) نیز ظرفیت خازنی بین واحد i اُم و پتانسیل زمین را برآورد می‌کند. (Ri) تلفات الکتریکی را در عایق‌بندی واحد i اُم مدل می‌کند[۲].



شکل ۱: مدار معادل سیم‌پیچ در مدل مشروح ترانسفورماتور

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

تعیین پارامترهای مدل مشروح

القای متقابل

محاسبهٔ القای متقابل بین یکایک حلقه های موجود در ترانسفورماتور مطابق رابطه:

$$M_{mn} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} m(i , j) \qquad (۱)$$

صورت گرفته است که mi القـای متقابـل بـین دو تـک حلقـه i ام و j ام اسـت. در مـدل سـازی کـه بـر روی ایـن ترانسفورماتور صورت پذیرفته، طبق تحقیقات مشابه قبلی هر لایه فشار ضعیف و هر جفت دیسک فشار قوی به عنوان یک واحد مدل سازی فرض شده است. در رابطه فوق Mmn القای متقابل واحدهای m ام و n ام است که می‌تواند در قـسمت سیم پیچ فشار قوی و یا ضعیف باشد. m و n تعداد حلقه هـای موجـود بـه ترتیـب در واحـد m ام و n ام اسـت و m(i,j) القای متقابل بین i امین حلقه از واحد m ام و j امین حلقـه از واحـد n ام اسـت. در ادامـه بـرای مـشاهده مقـادیر عـددی پارامترها و همچنین تأثیر عیب بر مقدار این پارامترها فرض شده که جابجایی محوری به انـدازه ۵ سـانتی‌متـر از هـشتمین واحد فشار قوی رخ داده است. در نتیجه این جابجایی مقادیر القای متقابل واحدهای مختلف در صورتی که تغییر در فاصـله نسبی این واحد ایجاد شده باشد، تغییر کرده است. در جدول (۱) مقادیر نمونه ای از ماتریس اندوکتانس آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر نمونه‌ای از ماتریس اندوکتانس

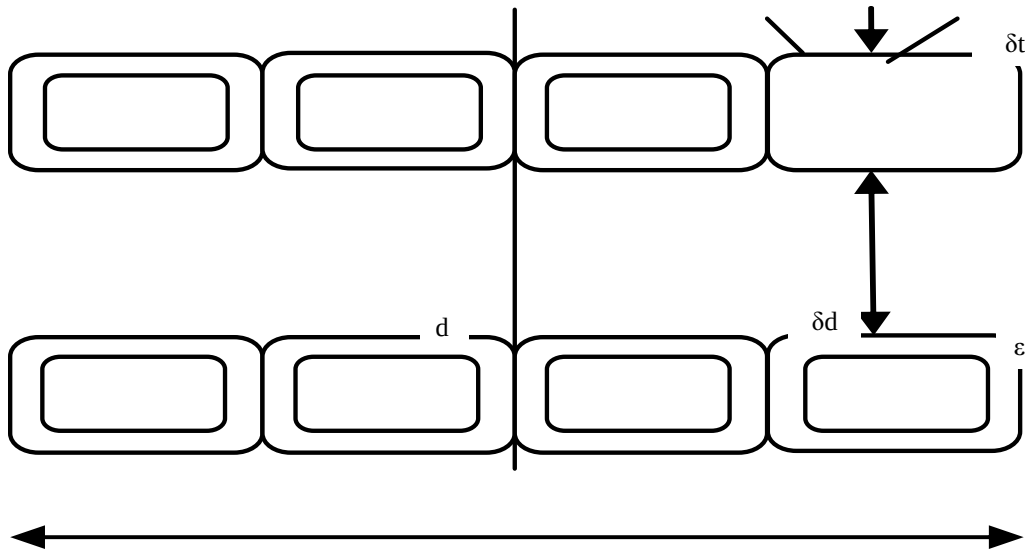
القای متقابل(μH)	HV Disc ۶ ام		LV layer ۲ ام	
	قبل از جابجایی	بعد از جابجایی	قبل از جابجایی	بعد از جابجایی
HV Disc ۶ ام	۵/۰۰۶		۳/۰۱۲	۳/۸۰۲
HV Disc ۲۶ ام	۱/۰۱۱	۰/۹۵۱	۳/۰۰۸	۲/۸۲۴
LV layer ۲ ام	۳/۰۱۲	۳/۸۰۲	۹/۰۱۰	

همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر اندوکتانس خودی واحدهای مختلف تغییر نکرده است. چرا کـه جـابجـایی فـرض شده هیچ‌گونه تغییری در چیدمان نسبی واحدهای مختلف ایجاد نکرده است. همچنین به عنوان مثـال در واحـدهای ۶ ام و ۲۸ ام فشار قوی به دلیل افزایش نسبی فاصله محوری این دو قسمت القای متقابل کاهش یافته است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

خازن های طولی و موازی

محاسبه خازن های طولی که در واقع مدل‌کننده انرژی الکترواستاتیکی ذخیره شده در بین حلقه های مجاور در یک واحد است به روش تحلیلی قدری مشکل است. فرض می‌شود ولتاژ در طول یک دیسک به صورت یکنواخت توزیع شده است. درشکل (۲) تصویر یک جفت دیسک، شامل دو قسمت و شبکه خازنی آن نشان داده شده است. برآیند خازن‌های سری این سیم پیچ دیسکی شامل دو قسمت Intern turn capacitance (Ct) و Inter-section capacitance (Cd) است. محاسبه برآیند خازنی سیم پیچ دیسکی روی این اصل که جمع انرژی های انباشته شده در قسمت‌های خازنی برابر کل انرژی ذخیره شده در سیم پیچ دیسکی است پایه گذاری شده است. اگر متوسط ضخامت سیم پیچ D باشد و قطر هادی های استفاده شده برای دیسک‌ها h باشد و ضخامت عایق بین دیسک‌ها δ_t و نفوذپذیری الکتریکی آن ε_t باشد و طول شعاعی سیم پیچ r باشد و ضخامت Spacer بین دیسکها δ_d و نفوذپذیری الکتریکی روغن و پارچه عایق به ضخامت δ_d و ε_t باشد، C_t و C_d از فرمول‌های زیر محاسبه می شود.



شکل ۲: مدار معادل سیم‌پیچ در مدل مشروح ترانسفورماتور

$$C_t = \varepsilon_0 \varepsilon_t \left(D\pi \frac{h+2\delta_t}{2\delta_t} \right) \quad (۲)$$

$$C_d = \left(\frac{1}{3}\right) \varepsilon_0 D\pi \left(\frac{r+\delta_d}{\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t} + \frac{\delta_d}{\varepsilon_d}} \right) \quad (۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بر پایه رابطه یاد شده در بالا و بعد از انجام عملیات ریاضی خازن سری در دیسک نرمال از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$K = 10^{12}\left(\frac{27.8D}{N}\right)\left(\frac{\varepsilon_t(h+2\delta_t)}{2n\delta_t}+\left(\frac{4}{S}\right)\frac{r+\delta_d}{\frac{2\delta_t}{\varepsilon_t}+\frac{\delta_d}{\varepsilon_d}}\right) \quad (۴)$$

که n تعداد حلقه های هر دیسک و N تعداد دیسک‌های سیم پیچ است. خازن‌های موازی C_{ei} معرف میدان الکتریکی بین دیسک‌ها و زمین (تانک و هسته) است همچنین C_{hl} معرف میدان الکتریکی بین دو سیم پیچ است. با توجه به شکل سیم پیچ‌ها محاسبه این خازن‌ها روی میدان‌های استوانه ای پایه گذاری شده است و به هر شکل، ضریب تصحیح گوشه‌ای برای لبه ها لازم است.

تعیین نوع حادثه و محاسبه جریان ها

در ابتدا لازم است بررسی شود که چه عاملی و چه حادثه ای برای ترانسفورماتور رخ داده است. در واقع منظور عاملی است که بهره بردار ترانسفورماتور را نگران ساخته، به طور مثال آیا جابجایی در سیم پیچ ترانسفورماتور ایجاد شده است یا خیر؟ پس از مشخص شدن نوع تحریک می‌باید از توزیع جریان در لحظات بعد از تحریک در تمامی واحدهای سیم پیچ اطلاع حاصل گردد. برای تحلیل مدل ترانسفورماتور در این تحقیق از برنامه EMTP استفاده شده است. به عنوان مثال در شکل (۳) جریان واحدهای اول، پنجم و هشتم نشان داده شده است. در این شبیه سازی فرض شده که موج ضربه استانداردی به پایانهٔ فشار قوی ترانسفورماتور برخورد کند. زمان پیشانی این موج ۱/۲ µsو زمان فرود ۲۵ µs آن است. با توجه به سرعت بالای موج فوق مشاهده می شود که هر چه فاصله از پایانهٔ فشار قوی افزایش یابد زمان رسیدن قله موج جریان به نقطه مورد نظر نیز افزایش می یابد. همچنین به علت وجود سلف و خازن متعدد در این مسیر و ایجاد تشدید بر نوسانات شکل موج جریان افزوده می‌شود.

محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی

در ادامه پس از تعیین جریان های الکتریکی به محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی پرداخته می شود. در محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی اگر چه امکان استفاده از نرم افزارهای مناسب و همچنین روش های مختلف وجود دارد. [۴، ۱۰۶] ولی در این تحقیق از روش تحلیلی و پتانسیل برداری استفاده شده است. طبق رابطه زیر نیروهای الکترومغناطیسی بین یکایک حلقه های حامل جریان محاسبه می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

$$F_{21} = -a_z\left(\frac{\mu_0 I_1 I_2 z k}{2\sqrt{ab}(1-k^2)}\right)\left[(1-k^2)K(k) - (1-\frac{1}{2}k)E(k)\right] \quad (۶)$$

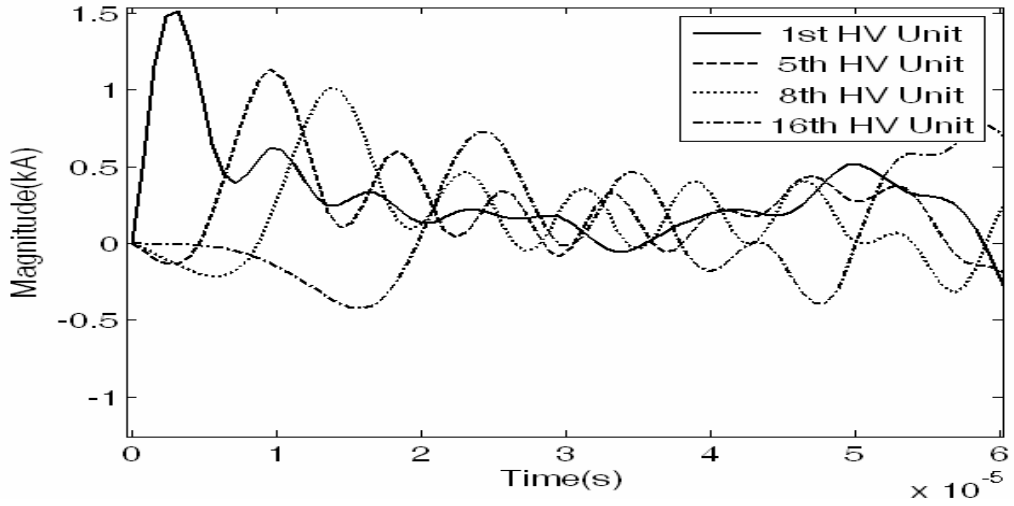
که در آن K(k) و E(k) به ترتیب انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم و ضریب k عددی ثابت بوده و به صورت زیر تعریف می شود[۲،۱]:

$$K(k) = \int_0^{+\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - k^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (۷)$$

$$E(k) = \int_0^{+\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (۸)$$

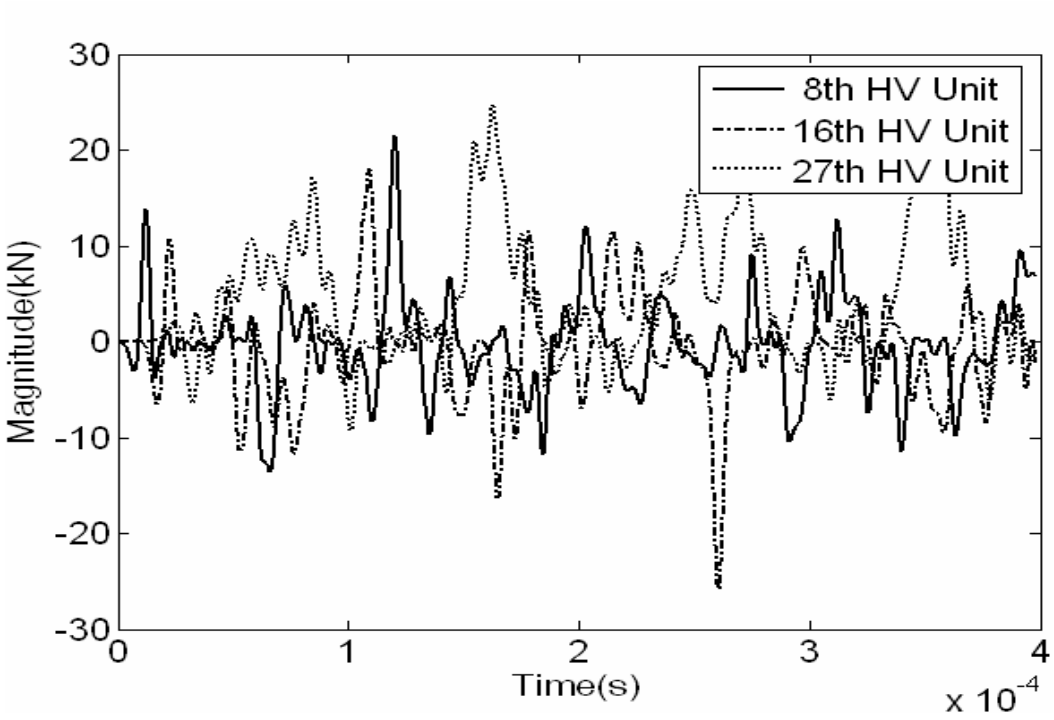
$$k = \sqrt{\frac{4ab}{(a+b)^2 + z^2}} \quad (۹)$$

در نهایت می توان نیروی کل وارد بر هر حلقه را از رابطه $Fi=\sum i\sum jF(m,n)$ بدست آورد. به عنوان مثال در شکل (۴) نیروی الکترومغناطیسی وارد بر دیسک های هشتم، شانزدهم و بیست و هفتم سیم پیچ فشار قوی نشان داده شده است.



شکل ۳: جریان واحدهای ۱، ۵، ۸ و ۱۹

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۴: نیروی وارد بر دیسک‌های ۸، ۱۶ و ۲۷

در حالت کارکرد نرمال ترانسفورماتور در فرکانس ۵۰ Hz به دلیل توزیع کاملاً یکنواخت جریان در طول سیم پیچ، نیروهای الکترومغناطیسی نیز دارای توزیع یکنواختی است و با فرکانس ۵۰ Hz نوسان می‌کند. در صورتی که در حالت‌های گذرا به دلیل بروز تشدید و همچنین انعکاس متعدد، حالت منظم سینوسی وجود ندارد و در واقع به هم ریختگی شدید نیروها وجود دارد. این به هم ریختگی نیرویی سبب می شود که در لحظاتی نیروهای بسیار شدیدی در نقاطی از سیم پیچ وارد شود و حتی باعث جابجایی آن شود.

نقاط انتخابی

در این مرحله نیاز به شناسایی نقاطی است که در طول سیم پیچ و در لحظاتی بعد از تحریک متحمل نیروهای الکترومغناطیسی شدیدتر شده است. در این نقاط احتمال بروز عیب بیشتر است و اگر عیبی در ترانسفورماتور رخ داده باشد در این نقاط است. برای پیدا کردن این نقاط می‌باید توزیع نیروهای الکترومغناطیس در طول سیم پیچ و در لحظات مختلف محاسبه شود. به عنوان مثال در لحظه ۲۶۰ ms نیرو در جفت دیسک ۱۶ ام مقدار ماکسیمم را دارد و بنابراین احتمال بروز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

عیب در این نقطه زیاد است. جهت سادگی انجام محاسبات و سهولت در مراحل تنها سه نقطه ۸ ، ۱۶ و ۲۷ به عنوان نقـاط کلیدی برگزیده خواهد شد.

بکارگیری FRA و کشف نقطه معیوب

پس از انتخاب نقاط کلیدی، در این مرحله فرض می شود که انواع جابجایی با مقدارهای مختلف در این نقـاط رخ داده است. خروجی نهایی این بخش تعدادی پاسخ فرکانسی است که متناظر با عیب های مختلف در نقاط کلیدی است. مرحلـه بعد تحلیل FRA است و از بین جابجایی‌های مختلف نقاط کلیدی، نقطه‌ای انتخاب خواهد شد که پاسخ فرکانس آن نقطه شباهت بیشتری با پاسـخ فرکانـسی مرجـع یعنـی پاسـخ فرکانـسی ترانـسفورماتور مـورد آزمـایش دارد. بـه عنـوان مثـال جابجایی‌های محوری به میزان ۸ ، ۱۶ و ۲۷ سانتی‌متر در واحد های ۸ ، ۱۶ و ۲۷ شبیه سـازی مـی شـود. در نتیجـه ۱۲ پاسخ فرکانس مختلف خواهیم داشت. در این تحقیق به دلیل عدم وجود نمونه آزمایشگاهی فرض شده کـه جـابجـایی بـه اندازه ۵ سانتی‌متر در جفت دیسک ۸ ام رخ داده و در واقع پاسخ فرکانسی متناظر با آن به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و ۱۲ پاسخ فرکانسی می‌باید با آن مقایسه شود. در ادامه باید الگوریتمی مشخص شود که بتواند شبیه‌ترین پاسخ فرکانس را از بین پاسخ فرکانس‌های متنخب انتخاب کند. به طور کلی محققان در این زمینه روش‌های مختلفی برای مشخص کردن میزان شباهت یا ضریب همبستگی دو منحنی ارائه می‌دهنـد [۴]. از میـان روش‌هـای مختلـف، روش خطـای قـدر مطلـق مجموع لگاریتمی(Absolute Sum of) Logarithmic Error (ASLE) بدلیل اینکه بر اساس مقایـسه مقـادیر بـر مبنای لگاریتمی طرح شده انتخاب می‌شود، زیرا پاسخ فرکانسی نیز بر اساس محور افق لگاریتمی تهیه شده است.

$$\delta_{ASLE*x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| 20\log_{10} y_i - 20\log_{10} x_i \right|}{N} \qquad (۱۰)$$

جدول ۲: مقدار ASLE برای حالت های مختلف جابجایی

محل جابجایی \ مقدار جابجایی	۲ cm	۴ cm	۶ cm	۸ cm
δASLE				
۸ th	۹/۰۶۲	۷/۵۶۹	۷/۹۱۷	۹/۰۶۲
۱۶ th	۱۴/۰۰۶	۱۱/۷۸۳	۱۰/۰۵۱	۱۴/۰۰۶
۲۷ th	۱۱/۰۳۴	۹/۵۸۰	۱۱/۴۱۷	۱۱/۰۳۴

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در نهایت مقادیر ASLE برای ۱۲ حالت برگزیده در جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول فوق مقدار می‌نیمم مربوط به جابجایی ۴ سانتی‌متر در دیسک هشتم است یعنی کمترین مقدار این ۱۲ عدد متناظر با حالتی است کـه تـابع تبـدیل آن کمترین اختلاف را با تابع تبدیل مرجع دارد و در واقع محل و میزان عیب مربوط به آن حالت است[۱۰].

نتیجه گیری

با توجه به نیاز روزافزون استفاده از انرژی برق و همچنین اهمیت ترانسفورماتورهای قدرت به عنوان یکی از مهم‌تـرین اجزای انتقال انرژی الکتریکی، مانیتورینگ ترانسفورماتور از اهمیـت بـسزایی برخـوردار اسـت. تحقیـق حاضـر تلاشـی در راستای ارائه روشی مناسب و نوین جهت تشخیص بموقع محـل دقیـق و مقـدار جابجـایی سـیم‌پـیچ هـای ترانـسفورماتور است. در روش پیشنهادی به کمـک مـدل‌سـازی دقیـق ترانـسفورماتور و مـدل مـشروح و شـبیه سـازی توزیـع نیروهـای الکترومغناطیسی در طول سیم پیچ‌ها با استفاده از روش پتانسیل برداری و با استفاده از پاسـخ فرکانـسی ترانـسفورماتور بـه شناسایی عیوب سیم‌پیچ‌ها پرداخته شد. در پایان، بر لزوم پیاده سازی این روش بر نمونه های آزمایشگاهی تاکید می‌شود.

منابع

[۱]رحیم‌پور، ابراهیم،۱۳۸۱. "مدل‌سازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور به منظور تشخیص تغییر شکل آن" پایان‌نامـه دکتـرا، دانـشگاه تهران.

[۲]شیروانی، علی. " تشخیص جابجایی مکانیکی سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت به کمک مـدل مـشروح " پایـان نامـه کارشناسی ارشد ، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[۳]قره‌پتیان، گئورگ. "مدل سازی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت" پایان‌نامه دکترا، دانشگاه تهران

[4] F. De Leon and A. Semlyen, 1994. “Detailed Modeling of Eddy Current Effects for Transformer Transients”, IEEE Transactions on Power Delivery.

[5] G. B. Gharehpetian, H. Mohseni, and K. Möller, 1998. “Hybrid Modeling of Inhomogeneous Transformer Windings for Very fast Transient Overvoltage Studies,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, pp. 157–163.

[6] K. Feser, J. Christian, C. Neumann, U. Sundermann, T. Leibfried, A. Kachler, and M. Loppacher, 2000.“The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers After Transport, Short Circuit or 30 Years of Service”. in CIGRE 12/33-04.

[7] K Karsai. D. Kerénvi and L. Kiss,1987. “Large Power Transformers”. Elsevier Science Publishing Company. Amsterdam. Oxford, New York. Tokyo.

[8] O. Moreau, Y. Guillot and B. Barre.1999 “FRA Diagnosis Method: Simulation Applied to Feasibility Study and Efficiency Improvement”. Power Engineering Society . Meeting. IEEE. Vol.2 pp. 1059-10064.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[9] R. Ma1ewski and B. Poulin,1988. “Impulse Testing of Power Transformers using the Transfer Function Method”. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.3. No.2 pp. 476-489.

[10] Malewski, E. Gockenbach, R. Maier, K. H. Fellmann and A. Claudi,1992,Five Years of Monitoring the Impulse Test of Power Transformers with Digital Recorders and the Transfer Function Method”. CIGRE,. WG 12—201.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]