

بررسی تغییر شکل (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 مسافت های طولانی مورد استفاده قرار می گیرند. قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت در این میان نقشی اساسی در تغذیه مطمئن انرژی ایفا می کند. بنابراین، شناسایی هر چه سریع تر عیب های رخ داده در داخل ترانسفورماتورهای قدرت ضروری به نظر می رسد. یکی از چنین عیب هایی که به سختی قابل تشخیص است، تغییرات مکانیکی (به شکل جابجایی های محوری و جابجایی های شعاعی) در ساختار سیم پیچ های 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 پیچ های ترانسفورماتور قدرت به منظور مانتورینگ با روش تابع تبدیل مطالعه و شبیه سازی شده است. برای این کار مدل مشروح سیم پیچ ها مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شده است که این مدل توانایی مدل سازی 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
 * نویسنده مسئول، Pejman.Shakeri @ gmail.com

مقدمه

ترانسفورماتورهای مرتبط کننده سطوح ولتاژ مختلف از مهم‌ترین عناصر شبکه انتقال به حساب می‌آید که خروج آنها از مدار به قابلیت اطمینان توزیع انرژی آسیب جدی وارد می‌کند 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 نامناسب ممکن است ایجاد شود، روش تابع تبدیل مورد بحث است [۳، ۵]. 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 می‌دهد 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 نتیجه 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 اندازه‌گیری‌های 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 مدل‌سازی ترانسفورماتورهای 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 می‌توان مشاهده کرد). سپس به بررسی دقیق‌تر روابط حاکم بر بعضی از پارامترهای مدل مشروح پرداخته شده است. اولین گام شبیه‌سازی، محاسبه جریان همه قسمت‌ها و واحدهای مدل صورت گرفته و محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی بین واحدهای مختلف و توزیع آنها در طول سیم پیچ‌ها (برای به دست آوردن مکان‌های مستعد جهت ایجاد

جابجایی) است. در ادامه، شبیه سازی و محاسبه توابع تبدیل ترانسفورماتور در حالت‌های مختلف عیب در مکان‌های مستعد بدست آمده در مرحله قبل انجام گرفته و در نهایت، مقایسه توابع تبدیل بدست آمده از نتایج 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 مطالعه حالت گذرا

مدل سازی، ساختار پیچیده‌ای دارد مانند بخش فعال ترانسفورماتورها و مصالحه بین هزینه محاسبات و دقت آنها را می‌طلبد. تعداد عناصر قابل تعریف در مدل و دقت مدل سازی محدود است. در میان روش‌های زیاد مدل سازی، مدل‌های زیر بیشتر مطرح است [۳۶]:

مدل‌های جعبه سیاه (Black-Box):

(a) آنالیز مُدال

(b) مدل سازی بر پایه وضعیت‌های قطب‌ها و صفرها

مدل‌های فیزیکی:

(a) مدل خط انتقال n فازه

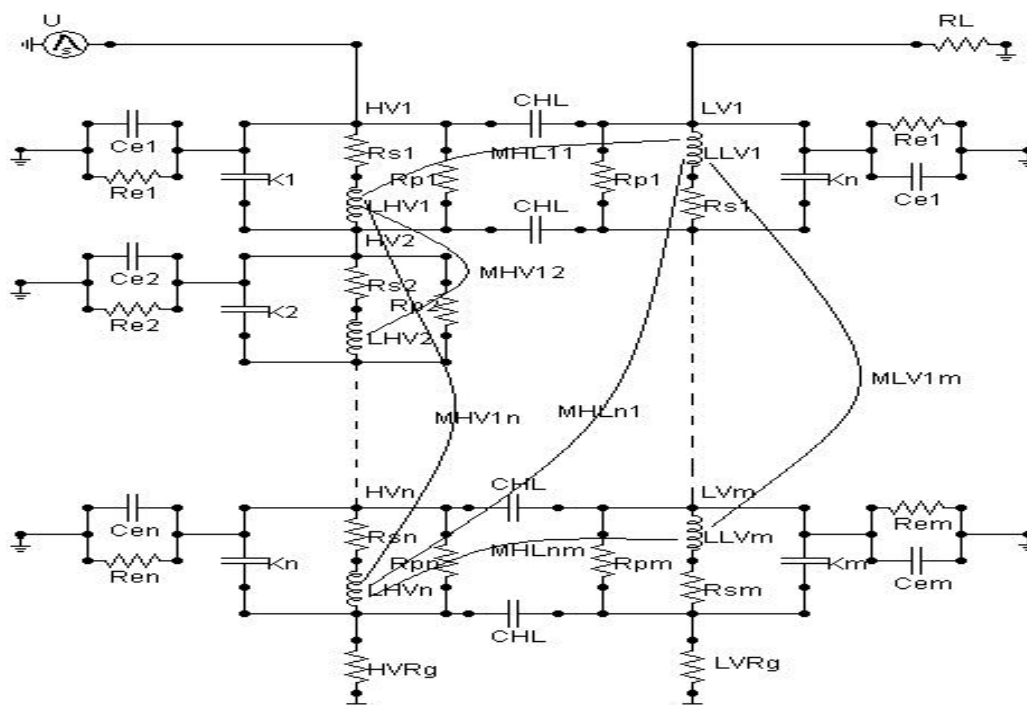
(b) مدل مشروح

برای مدل سازی تغییرات بوجود آمده در سیم‌پیچ‌ها، مدل‌های جعبه سیاه مناسب نیست. زیرا برای چنین مدلسازی می‌باید وابستگی بین قطب‌ها و صفرهای سیستم و ساختار سیم‌پیچ ترانسفورماتور معلوم باشد. در حالی که مدل جعبه سیاه از روی نتایج اندازه‌گیری شده در پایانه‌های ترانسفورماتور ساخته می‌شود. در مدل سازی فیزیکی، ابعاد هندسی سیم‌پیچ‌ها برای توصیف محاسباتی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های فیزیکی که به صورت مدار معادل است در محدوده مشخصی در حوزه فرکانسی معتبر است. با مدل سازی سیم پیچ‌ها به صورت یک مدار RLCM (مدل مشروح) می‌توان مقادیر جریان‌ها و ولتاژها را محاسبه کرد و همچنین بر خلاف مدل خط انتقال چند فازه، مدل مشروح می‌تواند پدیده‌های غیرخطی (هیستریزس، اشباع) و وابسته به فرکانس (تلفات جریان‌های فوکو، تلفات عایقی) را نیز محاسبه کند. علاوه بر این، بکارگیری مدل مشروح نشان داده که ساختار دشوار سیم‌پیچ‌های با تعداد حلقه‌های بیشتر را می‌توان تا حد قابل قبولی شبیه سازی کرد (مدل خط انتقال n فازه تاکنون چنین کاربردهایی نداشته است) با توجه به معایب و محاسن ذکر شده، مدل مشروح در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است [۷،۵،۳].

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 دیسک‌ها 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 حوزه فرکانسی مورد نظر این عناصر رفتار خطی دارد. پارامترهای مدل برای واحد سیمپیچی به شرح زیر تعریف می‌شود:

L_i اندوکتانس معادل واحد i ام سیمپیچ است که شار پراکندگی حلقه‌های i ام را نمایش می‌دهد. (L_{ij}) القای متقابل بین واحد i و j است. (K_i) ظرفیت طولی معادل برای واحد i ام است. این ظرفیت، تمام ظرفیت‌های خازنی موجود بین حلقه‌های واحد i ام را بصورت یک خازن بازنمایی می‌کند. (C_e) نیز ظرفیت خازنی بین واحد i ام و پتانسیل زمین را برآورد می‌کند. (R_i) تلفات الکتریکی را در عایق‌بندی واحد i ام مدل می‌کند [۲].



شکل ۱: مدار معادل سیمپیچ در مدل مشروح ترانسفورماتور

تعیین پارامترهای مدل مشروح

القای متقابل

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

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

صورت گرفته است که m_i القای متقابل بین دو تک حلقه i ام و j ام است. در مدل سازی که بر روی این 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 M_{mn} القای متقابل واحدهای m ام و n ام است که می تواند در قسمت سیم پیچ فشار قوی و یا ضعیف باشد. m و n تعداد حلقه های موجود به ترتیب در واحد m ام و n ام است و $m(i, j)$ القای متقابل بین i امین حلقه از واحد m ام و j امین حلقه از واحد n ام است. در ادامه برای مشاهده مقادیر عددی پارامترها و همچنین تأثیر عیب بر مقدار این پارامترها فرض شده که جابجایی محوری به اندازه ۵ سانتی متر از هشتمین واحد فشار قوی رخ داده است. در نتیجه این جابجایی مقادیر القای متقابل واحدهای مختلف در صورتی که تغییر در فاصله نسبی این واحد ایجاد شده باشد، تغییر کرده است. در جدول (۱) مقادیر نمونه ای از ماتریس اندوکتانس آورده شده است.

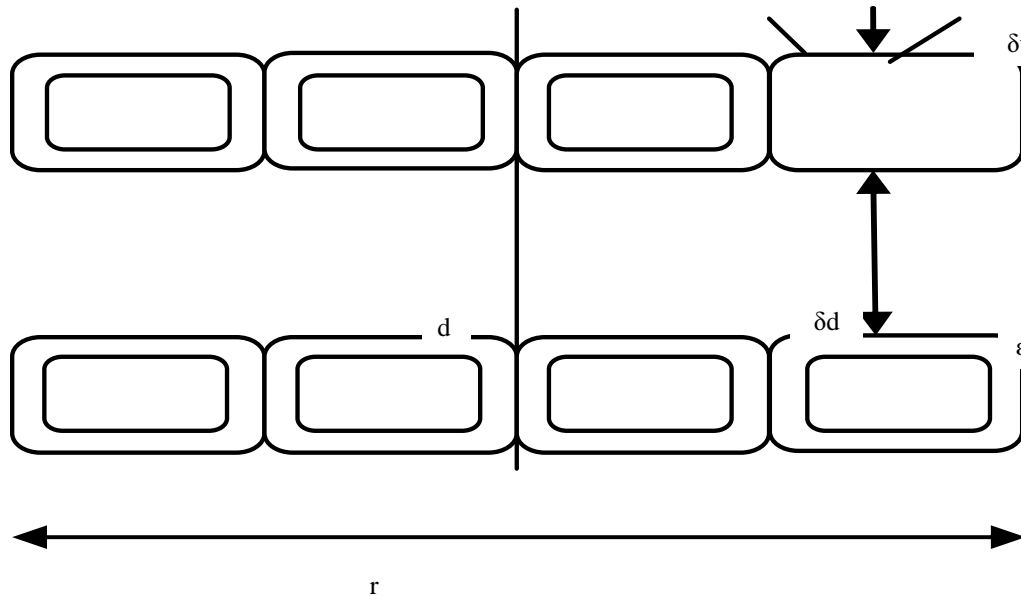
جدول ۱: مقادیر نمونه ای از ماتریس اندوکتانس

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 می شود مقادیر اندوکتانس خودی واحدهای مختلف تغییر نکرده است. چرا که جابجایی فرض شده هیچ گونه تغییری در چیدمان نسبی واحدهای مختلف ایجاد نکرده است. همچنین به عنوان مثال در واحدهای ۶ ام و ۲۸ ام فشار قوی به دلیل افزایش نسبی فاصله محوری این دو قسمت القای متقابل کاهش یافته است.

خازن های طولی و موازی

محاسبه خازن های طولی که در واقع مدل کننده انرژی الکترواستاتیکی ذخیره شده در بین حلقه های مجاور در یک واحد است به روش تحلیلی قدری مشکل است. فرض می شود ولتاژ در طول یک دیسک به صورت یکنواخت توزیع شده است. در شکل (۲) تصویر یک جفت دیسک، شامل دو قسمت و شبکه خازنی آن نشان داده شده است. برآیند خازن های سری این سیم پیچ دیسکی شامل دو قسمت C_t Intern turn capacitance و C_d Inter-section capacitance است. محاسبه برآیند خازنی سیم پیچ دیسکی روی این اصل که جمع انرژی های انباشته شده در قسمت های 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 دیسک ها h باشد و ضخامت عایق بین دیسک ها δ_t و نفوذپذیری الکتریکی آن ϵ_t باشد و طول شعاعی سیم پیچ r باشد و ضخامت Spacer بین دیسک ها δ_d و نفوذپذیری الکتریکی روغن و پارچه عایق به ضخامت δ_d و ϵ_t باشد، C_t و C_d از فرمول های زیر محاسبه می شود.



شکل ۲: مدار معادل سیم پیچ در مدل مشروح ترانسفورماتور

$$C_t = \epsilon_0 \epsilon_t \left(D \pi \frac{h + 2\delta_t}{2\delta_t} \right) \quad (2)$$

$$C_d = \left(\frac{1}{3} \right) \epsilon_0 D \pi \left(\frac{r + \delta_d}{\frac{2\delta_t}{\epsilon_t} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \right) \quad (3)$$

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

$$K = 10^{12} \left(\frac{27.8D}{N} \right) \left(\frac{\epsilon_i (h + 2\delta_i)}{2n\delta_i} + \left(\frac{4}{S} \right) \frac{r + \delta_d}{\frac{2\delta_i}{\epsilon_i} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}} \right) \quad (4)$$

که n تعداد حلقه های هر دیسک و N تعداد دیسک های سیم پیچ است. خازن های موازی C_{ei} معرف میدان الکتریکی بین دیسک ها و زمین (تانک و هسته) است همچنین C_{hi} معرف میدان الکتریکی بین دو سیم پیچ است. با توجه به شکل سیم پیچ ها محاسبه این خازن ها روی میدان های استوانه ای پایه گذاری شده است و به هر شکل، ضریب تصحیح گوشه ای 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 می باید 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 استاندارد به پایانه فشار قوی ترانسفورماتور برخورد کند. زمان پیشانی این موج $1/2 \mu s$ و زمان فرود $25 \mu s$ آن است. با توجه به سرعت بالای موج فوق مشاهده می شود که هر چه فاصله از پایانه 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 می شود.

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 می شود.

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

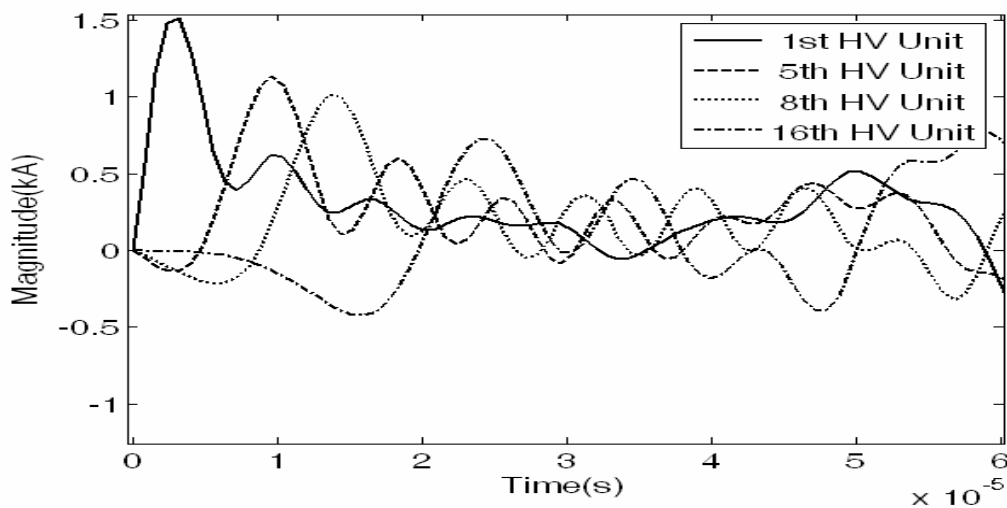
که در آن $E(k)$ و $K(k)$ به ترتیب انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم و ضریب k عددی ثابت بوده و به صورت زیر

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - k^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{تعریف می شود [۲،۱]:} \quad (۷)$$

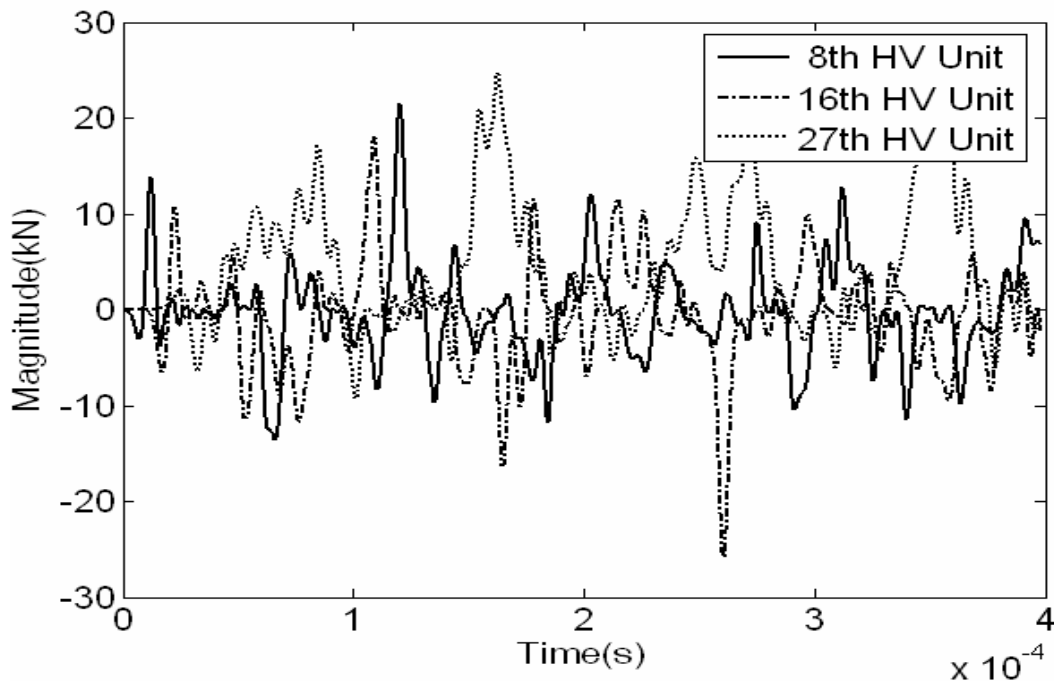
$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (۸)$$

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

در نهایت می توان نیروی کل وارد بر هر حلقه را از رابطه $F_i = \sum_i \sum_j F(m,n)$ 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 ۱۶



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 می‌شود 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 الکترومغناطیسی 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

عیب در این نقطه زیاد است. جهت سادگی انجام محاسبات و سهولت در مراحل تنها سه نقطه ۸، ۱۶ و ۲۷ به عنوان نقاط 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 نقاط رخ داده است. خروجی نهایی این بخش تعدادی پاسخ فرکانسی است که متناظر با عیب های مختلف در نقاط کلیدی است. مرحله بعد تحلیل FRA است و از بین جابجایی های مختلف نقاط کلیدی، نقطه ای انتخاب خواهد شد که پاسخ فرکانس آن نقطه شباهت بیشتری با پاسخ فرکانسی مرجع یعنی پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور مورد آزمایش دارد. به عنوان مثال جابجایی های محوری به میزان ۸، ۱۶ و ۲۷ سانتی متر در واحد های ۸، ۱۶ و ۲۷ شبیه سازی می شود. در نتیجه ۱۲ پاسخ فرکانس مختلف خواهیم داشت. در این تحقیق به دلیل عدم وجود نمونه آزمایشگاهی فرض شده که جابجایی به اندازه ۵ سانتی متر در جفت دیسک ۸ ام رخ داده و در واقع پاسخ فرکانسی متناظر با آن به عنوان مبنا در نظر گرفته می شود و ۱۲ پاسخ فرکانسی می باید با آن مقایسه شود. در ادامه باید الگوریتمی مشخص شود که بتواند شبیه ترین پاسخ فرکانس را از بین پاسخ فرکانس های منتخب انتخاب کند. به طور کلی محققان در این زمینه روش های مختلفی برای مشخص کردن میزان شباهت یا ضریب همبستگی دو منحنی ارائه می دهند [۴]. از میان روش های مختلف، روش خطای قدر مطلق مجموع لگاریتمی (Absolute Sum of) Logarithmic Error (ASLE) بدلیل اینکه بر اساس مقایسه مقادیر بر مبنای لگاریتمی طرح شده انتخاب می شود، زیرا پاسخ فرکانسی نیز بر اساس محور افق لگاریتمی تهیه شده است.

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

جدول ۲: مقدار ASLE برای حالت های مختلف جابجایی

محل جابجایی	مقدار جابجایی				
	δ_{ASLE}	۲ cm	۴ cm	۶ cm	۸ cm
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

در نهایت مقادیر ASLE برای ۱۲ حالت برگزیده در جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول فوق مقدار می نیمم مربوط به جابجایی ۴ سانتی متر در دیسک هشتم است یعنی کمترین مقدار این ۱۲ عدد متناظر با حالتی است که تابع تبدیل 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 مهم ترین اجزای انتقال انرژی الکتریکی، مانیتورینگ ترانسفورماتور از اهمیت بسزایی برخوردار است. تحقیق حاضر تلاشی در راستای ارائه روشی مناسب و نوین جهت تشخیص بموقع محل دقیق و مقدار جابجایی سیم پیچ های ترانسفورماتور است. در روش پیشنهادی به کمک مدل سازی دقیق ترانسفورماتور و مدل مشروح و شبیه سازی توزیع نیروهای الکترومغناطیسی در طول سیم پیچ ها با استفاده از روش پتانسیل برداری و با استفاده از پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور به شناسایی عیوب سیم پیچ ها پرداخته شد. در پایان، بر لزوم پیاده سازی این روش بر نمونه های آزمایشگاهی تاکید می شود.

منابع

- [۱] رحیم پور، ابراهیم، ۱۳۸۱. "مدل سازی سیم پیچ ترانسفورماتور به منظور تشخیص تغییر شکل آن" پایان نامه دکترا، دانشگاه تهران.
- [۲] شیروانی، علی. "تشخیص جابجایی مکانیکی سیم پیچ فشار قوی ترانسفورماتور قدرت به کمک مدل مشروح" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [۳] قره پتیان، گئورگ. "مدل سازی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت" پایان نامه 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. Kerévi 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.

-
- [9] R. Malewski 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.