مدلسازی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل خط انتقال چند سیمه بمنظور مکانیابی تخلیه جزئی

علی مذهب جعفری[1] **اصغر اکبری ازیرانی[2]**

۱- فارغ‌التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران، ایران
شرکت مدیریت شبکه برق ایران، تهران، ایران
jafari@kntu.ac.irMazhab

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر، تهران، ایرانشرکت مدیریت شبکه برق ایران ، تهران-ایران
akbari@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله از مدل خط انتقال چند سیمه برای مکانیابی تخلیه جزئی (PD) در سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شد. پارامترهای مدل بطور دقیق با در نظر گرفتن مسائل عملی مطرح در طراحی ترانسفورماتور محاسبه شدند. به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی مدل دو روش مختلف بکار گرفته شد و بر اساس مقایسه بین توابع انتقال اندازه گیری شده و محاسبه شده سیم پیچ فشارقوی یک ترانسفورماتور 132kV/20kV و یک ترانسفورماتور نیروگاهی 420kV/15.75kV روش مناسب انتخاب گردید. برای بررسی دقت مدل در مکانیابی PD ، پالسهای PD تولید شده بوسیله یک کالیبراتور به نقاط مختلف سیم پیچ یک ترانسفورماتور تحقیقاتی 20kV/0.4kV اعمال شده و در دو انتهای سیم پیچ اندازه گیری شدند. توابع تبدیل تکه ای سیم پیچ محاسبه شده بوسیله مدل برای ارجاع پالسهای اندازه گیری شده به نقاط داخلی سیم پیچ استفاده شدند. سپس با مقایسه سیگنالهای ارجاع داده شده به نقاط داخلی سیم پیچ ، مکان PD در داخل سیم پیچ تخمین زده شد.

کلمات کلیدی : ترانسفورماتور، مدلسازی، تابع انتقال، خط انتقال چند سیمه ، تخلیه جزئی ، مکانیابی

تاریخ ارسال مقاله: ۸۶/۵/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۱۰/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: اصغر اکبری ازیرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

۱ – مقدمه

تخلیه های جزئی (PD) از عوامل بسیار مؤثر در تخریب تدریجی عایق ترانسفورماتور هستند که در نهایت ممکن است باعث شکست کامل گردند. از آنجاییکه تخلیه های جزئی از مدتها قبل از بوجود آمدن خسارات شدید آغاز می گردند ، اندازه گیری و بررسی آنها می تواند هشدارهای لازم را ایجاد نماید که بر اساس آن می توان اقدامات پیشگیرانه را قبل از خرابی کامل انجام داد. مکان یابی فیزیکی عیب در داخل ترانسفورماتور از نظر صرفه جویی در وقت و هزینه تعمیرات بسیار حائز اهمیت است.

بر اساس باند فرکانسی اندازه گیری الکتریکی PD ، سیستمهای مرسوم از دو نوع تکنیک باند باریک و باند پهن استفاده می کنند [۱] . اما شکل پالسهای PD بوسیله هیچکدام از این دو روش قابل برداشت نیست. اخیراً تمایل به استفاده از سیستم های آشکارسازی PD با عرض باند تا چند مگاهرتز برای ترانسفورماتور بوجود آمده است [۲-۳]. به این ترتیب شکل پالسهای PD در یک بازه وسیع فرکانسی آشکارسازی و ثبت می گردد. شکل موج سیگنال علاوه بر اطلاعات مربوط به مقدار تخلیه ، حاوی اطلاعات دیگری است که برای تعیین محل عیب بسیار ارزشمند است.

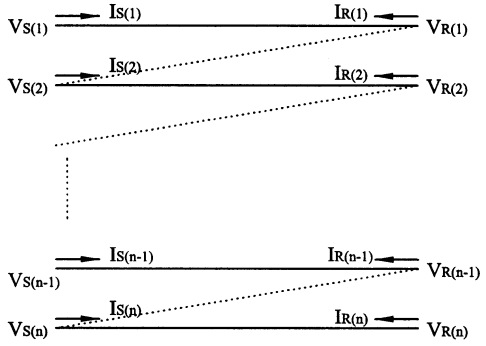
در [۴] نشان داده شده است که می توان از تابع انتقال سیم پیچ برای مکان یابی PD استفاده نمود. برای این منظور لازم است که توابع تبدیل از تمام نقاط داخلی سیم پیچ تا دو سر سیم پیچ را در اختیار داشته باشیم. اما این توابع تبدیل قابل اندازه گیری نبوده و باید از راه مدلسازی محاسبه شوند. از آنجاییکه پالسهای PD بسیار تیز هستند ، طیف فرکانسی آنها بازه ای وسیع را شامل می شود. مطالعات در [۴] نشان داده است که اگر مدل بکارگرفته شده در بازه فرکانسی عرض باند سیستم اندازه گیری PD معتبر باشد ، نتایج خوبی برای مکانیابی PD بدست خواهد آمد.

یکی از مدلهایی که تاکنون برای سیم پیچ ترانسفورماتور ارائه شده است مدل مشروح می باشد. در این مدل معمولا هر دیسک از سیم پیچ بعنوان یک واحد مدل در نظر گرفته می شود ، لذا محاسبات مدل ساده است. اما بدلیل آنکه در این مدل طول واحدهای سیم پیچ با طول موج عبوری از آنها قابل مقایسه می شود ، بازه اعتبار مدل به حدود یک مگاهرتز محدود می گردد که برای بررسی نحوه انتشار سیگنالهای PD در داخل سیم پیچ کفایت نمی کند [۵] .

در مدل خط انتقال چند سیمه (MTL) هر دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته می شود و تمام کوپلینگهای خازنی و سلفی بین دورهای مختلف در مدل لحاظ می گردند ، لذا بازه اعتبار این مدل نسبت به مدل مشروح افزایش می یابد. اما بدلیل حجم بسیار بالای محاسبات ، استفاده از این مدل در عمل بسیار محدود شده است. در این مقاله پیچیدگی محاسباتی مدل MTL تحت بررسی قرار گرفته و با ارائه اصلاحاتی جهت محاسبه پارامترهای مدل ، راهکارهای کاهش زمان محاسبات برای قابل استفاده نمودن مدل در صنعت بررسی می شوند. در قسمت محاسبه پارامترهای مدل سعی می شود مسائل عملی که در طراحی ترانسفورماتورهای قدرت وجود دارند مانند اثر ترکیب سیم پیچهای دیسکی معمولی و اینترلیو لحاظ گردند. اعتبار مدل با مقایسه نتایج اندازه گیری و شبیه سازی در دو ترانسفورماتور قدرت بررسی می شود. درنهایت با استفاده از یک ترانسفورماتور مخصوص که نقاط مختلف سیم پیچ آن برای اندازه گیری در دسترس است ، دقت مکانیابی PD با بکار بردن روش ارائه شده بررسی خواهد گردید.

۲- مدل خط انتقال چند سیمه و روش مکانیابی PD

در مدل MTL هر دور از سیم پیچ ترانسفورماتور بعنوان یک خط انتقال تک سیمه مدل می شود. شکل ۱ مدل MTL سیم پیچ یک ترانسفورماتور با n دور را نشان می دهد.



شکل (۱): مدل خط انتقال چند سیمه برای سیم پیچ

شرایط مرزی مطابق شکل ۱ عبارتند از:

$$V_R(i) = V_S(i+1) \quad \text{for i=1 to n-1} \qquad (۱)$$

$$I_R(i) = -I_S(i+1) \quad \text{for i=1 to n-1} \qquad (۲)$$

اگر فرض شود که یک پالس PD با جریان I_{PD} در k امین دور سیم پیچ رخ داده باشد داریم :

$$I_R(i-1) + I_S(i) = I_{PD} \quad \text{for i=k} \qquad (۳)$$

با حل معادلات موج با استفاده از شرایط مرزی فوق می توان جریانهای خطوط را بصورت رابطه زیر بر حسب ولتاژهای خطوط بیان نمود[۶] :

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \cdot Coth([P]l) & -Y_0 \cdot Co\sec h([P]l) \\ -Y_0 \cdot Co\sec h([P]l) & Y_0 \cdot Coth([P]l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

که در آن V_S و V_R و I_S و I_R بردارهای ولتاژ و جریان سمت فرستنده و گیرنده n خط انتقال هستند. $[P^2]=[Z].[Y]$ است و $[Z]=R.[I_n]+j.2\pi f.[L]$ و $[Y]=[G]+j.2\pi f.[C]$ به ترتیب ماتریسهای امپدانس و ادمیتانس هستند که شامل ماتریسهای مقاومت ، اندوکتانس ، خازن و هدایت می باشند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

$[Y_0]=[Z]^{-1}.[P]=[Y][P]^{-1}$ ماتریس ادمیتانس مشخصه مدل و l طول متوسط خطوط انتقال می باشد. جهت محاسبه $Coth([P]l)$ و $Cosech([P]l)$ در رابطه فوق باید با استفاده از ماتریسهای تبدیل مدال ماتریس [P] را قطری نماییم. برای این کار اگر [γ] و [Q] به ترتیب ماتریسهای شامل مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس [P] باشند ، داریم[۶] :

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & -[B] \\ -[B] & [A] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} = [F]_{2nx2n} \cdot \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

که در آن داریم:

$$[A]_{nxn}=[Y].[Q].[\gamma]^{-1}.Coth([\gamma]l).[Q]^{-1} \qquad (۶)$$

$$[B]_{nxn}=[Y].[Q].[\gamma]^{-1}.Cosech([\gamma]l).[Q]^{-1} \qquad (۷)$$

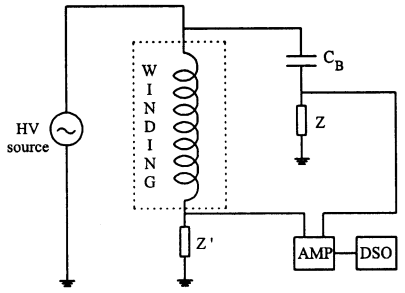
با اعمال شرایط مرزی روابط (۱) تا (۳) در رابطه (۵) و دو مرحله ساده سازی و معکوس نمودن ماتریس در نهایت داریم:

$$\begin{bmatrix} V_S(1) \\ \vdots \\ V_S(k) \\ \vdots \\ V_S(n) \\ V_R(n) \end{bmatrix}_{(n+1).1} = [T]_{(n+1).(n+1)} \begin{bmatrix} I_S(1) \\ 0 \\ \vdots \\ I_{PD} \\ 0 \\ \vdots \\ I_R(n) \end{bmatrix}_{(n+1).1} \qquad (۸)$$

شرایط ترمینالی ترانسفورماتور باید بر اساس مدار تست اندازه گیری PD در روابط در نظر گرفته شود. شکل ۲ مدار اندازه گیری PD برای برداشت همزمان پالسهای PD در دو انتهای سیم پیچ را نشان می دهد. در سمت فاز سیم پیچ ، می توان از اتصال بوشینگ تپ برای برداشت سیگنالهای PD استفاده نمود. بوشینگ ترانسفورماتور با ظرفیت خازنی C_B که به سرفاز سیم پیچ متصل شده شبیه سازی می شود. اتصال بوشینگ تپ و همچنین اتصال سمت نوترال ترانسفورماتور از طریق امپدانسهای آشکارساز که با Z و Z' نشان داده شده اند ، به زمین وصل می شوند. امپدانسهای آشکارساز از عناصر با مقادیر معلوم مقاومت ، خازن و سلف ساخته شده اند. داریم:

$$V_S(1) = -(Z + \frac{1}{j\omega C_B}) \cdot I_S(1) \qquad (۹)$$

$$V_R(n) = -Z' \cdot I_R(n) \qquad (۱۰)$$



شکل (۲): مدار تست اندازه گیری PD

پالسهای PD پس از آشکارسازی تقویت شده و سپس توسط یک دیجیتایزر فرکانس بالای چند کاناله نمونه برداری شده و برای پردازشهای بیشتر به کامپیوتر منتقل می شوند. با قرار دادن روابط (۹) و (۱۰) در رابطه (۸) ، توابع تبدیل تکه ای از محل رخ دادن PD تا سمت فاز سیم پیچ (TF_L) و نیز تا سمت نوترال سیم پیچ (TF_N) بصورت زیر بدست می آیند :

$$TF_L = \frac{I_S(1)}{I_{PD}} = \frac{T_{(1,k)}(Z' + T_{(n+1,n+1)}) - T_{(n+1,k)}T_{(1,n+1)}}{T_{(1,n+1)}T_{(n+1,1)} - (T_{(1,1)} + Z + \frac{1}{j\omega C_B})(Z' + T_{(n+1,n+1)})} \qquad (۱۱)$$

$$TF_N = \frac{I_R(n)}{I_{PD}} = \frac{-T_{(n+1,1)}TF_L - T_{(n+1,k)}}{Z' + T_{(n+1,n+1)}} \qquad (۱۲)$$

در روابط فوق مشاهده می شود که فقط صورت توابع تبدیل به مقدار k یعنی محل وقوع PD بستگی دارند و قطبهای آنها در فرکانسهای ثابتی رخ می دهند. در [۶-۷] از این خاصیت برای مکان یابی PD استفاده شده است و فرکانس صفرهای توابع تبدیل بدست آمده از مدلسازی استخراج شده و با فرکانس صفرهای بدست آمده از اندازه گیری مقایسه شده اند. اشکال این روش آن است که با تمام دقتی که در انتخاب فرکانس نمونه برداری و نیز فیلتر نمودن نویز شده است ، برای حدود یک سوم تا نصف طول سیم پیچ ، فرکانس صفرها از سیگنالهای اندازه گیری شده قابل استخراج نبوده است که باعث بوجود آمدن خطا در مکانیابی PD خواهد شد.

در آلگوریتم استفاده شده در این مقاله ابتدا سیگنالهای PD در دو ترمینال سیم پیچ مورد نظر اندازه گیری می شوند. بنابراین $I_S(1)$ و $I_R(n)$ با اندازه گیری در دسترس هستند. سپس با استفاده از مدل MTL، ماتریس [T] برای ترانسفورماتور مورد نظر محاسبه می گردد. در مرحله بعد بازاء هر یک از مقادیر مختلف k (مکانهای مختلف PD) در روابط (۱۱) و (۱۲) دو جریان I_{PD} محاسبه و سپس مقایسه می شوند. بازاء هر k که این دو I_{PD} به هم نزدیک تر بودند ، آن k نشان دهنده شماره دور محل وقوع PD در سیم پیچ است.

۳- محاسبه پارامترهای مدل

مقادیر پارامترهای مدل که شامل ماتریسهای مقاومت ، اندوکتانس ، خازن و هدایت هستند ، به ابعاد هندسی ترانسفورماتور ، موقعیت سیم پیچ ها نسبت به یکدیگر ، مشخصات هادی و مشخصات عایقهای مختلف بستگی دارد. همچنین نوع سیم پیچها که ممکن است از نوع دیسکی معمولی یا اینترلیو باشند نیز در پارامترهای مدل اثرگذار می باشد. در شکل ۳ مشخصات یک ترانسفورماتور نوع هسته ای 132kV/20kV , Y/Δ , 30 MVA بصورت شماتیک نشان داده شده است. سیم پیچ LV بلافاصله بعد از هسته قرار می گیرد و سیم پیچ HV روی آن واقع می شود. در اینجا سیم پیچ HV از ۵۰عدد

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

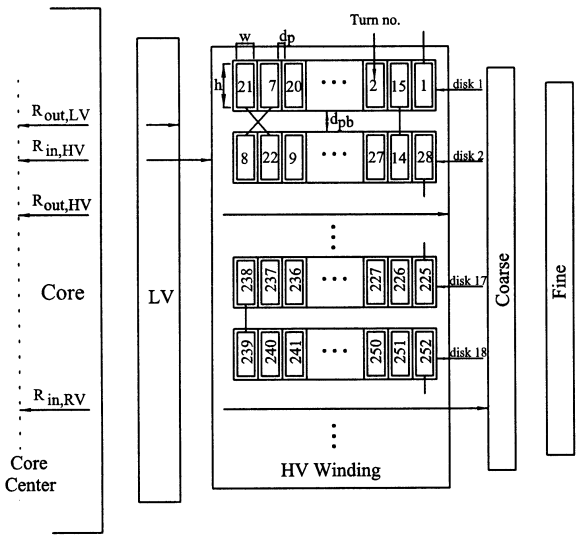
دیسک شامل ۱۶ دیسک اینترلیو و ۳۴ دیسک معمولی تشکیل شده است. روی سیم پیچ HV ، سیم پیچ تنظیم ولتاژ که از دو بخش Coarse و Fine تشکیل شده قرار گرفته است. در ادامه به نحوه محاسبه تک تک پارامترها پرداخته می شود.

۳- ۱- ماتریس ظرفیت

ظرفیتهای خازنی مختلفی بین هادیهای مختلف سیم پیچ ترانسفورماتور وجود دارد. ظرفیت خازنی بین هر دور از سیم پیچ با دورهای مجاور آن از همان دیسک با استفاده از رابطه خازن صفحه ای محاسبه می شود [۸] :

$$C_t = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_p R_{ave}(h+2d_p)}{d_p} \qquad (۱۳)$$

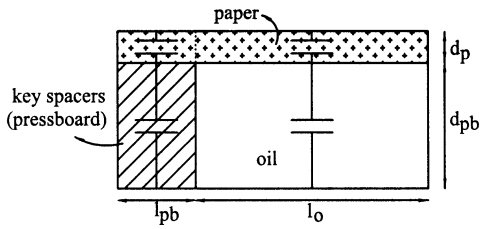
که در آن R_{ave} شعاع متوسط سیم پیچ و ε_p ضریب دی الکتریک نسبی کاغذ است. سایر ابعاد در شکل ۳ نشان داده شده اند.



h=12.5 mm	w=5 mm	$R_{out,LV}$ =389.5 mm	$R_{out,HV}$ =539.5 mm
d_p=1 mm	d_{pb}=4 mm	$R_{in,HV}$ =433.5 mm	$R_{in,RV}$ =581.5 mm

شکل (۳): ساختار ترانسفورماتور 132kV/20kV

عایق بین دو دیسک از سیم پیچ یک عایق مرکب است و از کاغذ ، روغن و spacer های ساخته شده از جنس پرسبورد تشکیل شده است. در شکل ۴ مدل هندسی ساده شده عایق بین دو دیسک برای محاسبه ضریب دی الکتریک نسبی معادل نشان داده شده است [۹] .



شکل (۴): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو دیسک

l_{pb} و l_o پهنای کل spacer ها و کانالهای روغنی هستند که بین دو دیسک مجاور قرار گرفته اند. ضریب دی الکتریک نسبی معادل مطابق رابطه زیر بدست می آید:

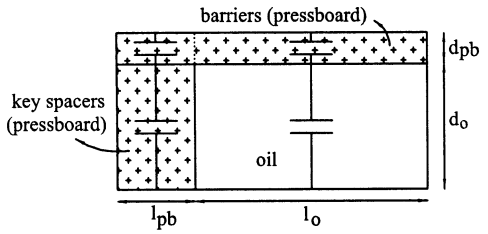
$$\frac{1}{\varepsilon_{d,eq}} = \frac{1}{\varepsilon_p}\cdot\frac{d_p}{d_p+d_{pb}} + \frac{1}{\varepsilon_{pb}\cdot\frac{l_{pb}}{l_{pb}+l_o}+\varepsilon_o\cdot\frac{l_o}{l_{pb}+l_o}}\cdot\frac{d_{pb}}{d_p+d_{pb}} \qquad (۱۴)$$

که در آن ε_0 و ε_{pb} به ترتیب ضریب دی الکتریک نسبی روغن و پرسبورد هستند. به این ترتیب ظرفیت خازنی بین دو دور مختلف از دو دیسک مجاور از رابطه زیر بدست می آید[۸]:

$$C_d = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_{d,eq}(R^2_{out,HV}-R^2_{in,HV})}{N_t.(d_p+d_{pb})} \qquad (۱۵)$$

که در آن N_t تعداد دورهای موجود در هر دیسک است و $R_{in,HV}$ و $R_{out,HV}$ نیز در شکل ۳ نشان داده شده اند.

برای محاسبه خازنهای بین سیم پیچ HV و LV و بین HV و سیم پیچ تنظیم ولتاژ نیز مانند حالت قبل با یک عایق مرکب از کاغذ ، روغن و barrier های استوانه ای و spacer های نگه دارنده ساخته شده از جنس پرسبورد سروکار داریم. در شکل ۵ مدل ساده شده عایق بین سیم پیچ HV و LV برای محاسبه ضریب دی الکتریک نسبی معادل نشان داده شده است [۹].



شکل(۵): مدل هندسی ساده شده عایق بین دو سیم پیچ HV و LV.

ضریب دی الکتریک نسبی معادل مطابق رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{\varepsilon_{l,eq}} = \frac{1}{\varepsilon_{pb}}\cdot\frac{d_{pb}}{d_{pb}+d_o} + \frac{1}{\varepsilon_{pb}\cdot\frac{l_{pb}}{l_{pb}+l_o}+\varepsilon_o\cdot\frac{l_o}{l_{pb}+l_o}}\cdot\frac{d_o}{d_{pb}+d_o} \qquad (۱۶)$$

به این ترتیب ظرفیت خازنی بین هر دور کناری از سیم پیچ HV و سیم پیچ LV با استفاده از رابطه خازن استوانه ای بصورت زیر قابل محاسبه است:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

$$C_l = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{l,eq}h}{Ln\frac{R_{in,HV}}{R_{out,LV}}} \quad (۱۷)$$

به همین ترتیب ظرفیت خازنی بین سیم پیچ HV و سیم پیچ تنظیم ولتاژ نیز قابل محاسبه است.

با داشتن C_t ، C_d ، C_l و C_r در صورتیکه هر دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال مدل شده باشد می توان ماتریس ظرفیت [C] را براحتی تشکیل داد.

۳-۲- ماتریس اندوکتانس

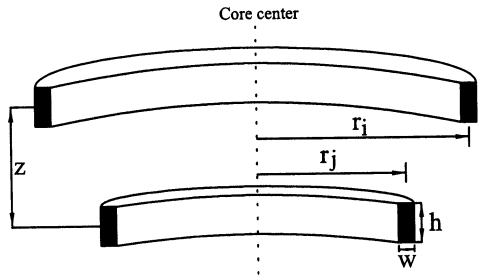
اندوکتانسهای خودی هر دور از سیم پیچ و اندوکتانسهای متقابل آن با دورهای دیگر سیم پیچ ماتریس اندوکتانس [L] را تشکیل می دهند. ابعاد ماتریس اندوکتانس $n_t x n_t$ است که n_t تعداد کل دورهای سیم پیچ می باشد. در فرکانسهای بالا می توان از نفوذ شار مغناطیسی در داخل هسته آهنی صرف نظر نمود. لذا می توان سیم پیچ را با هسته هوایی فرض کرد.

مطابق شکل ۶ اگر دو دور از سیم پیچ را بعنوان دو هادی دایره ای که بطور هم مرکز دور هسته پیچیده شده اند و شعاع آنها r_i و r_j و فاصله بین آنها z باشد را در نظر بگیریم ، اندوکتانس متقابل بین آنها بر اساس رابطه پیشنهادی ماکسول مطابق روابط زیر بدست می آید [۱۱-۱۰] :

$$L_{ij} = \mu_0\sqrt{r_i r_j}\left\{(\frac{2}{k}-k)K(k)-\frac{2}{k}E(k)\right\} \quad (۱۸)$$

$$k^2 = \frac{4r_i r_j}{\left\{(r_i+r_j)^2+z^2\right\}} \quad (۱۹)$$

K(k) و *E(k)* انتگرالهای کامل سهموی از نوع اول و دوم هستند و براحتی بوسیله دستورات نرم افزار MATLAB قابل محاسبه می باشند.



شکل (۶): دو هادی دایره ای هم مرکز برای محاسبه اندوکتانس متقابل

برای محاسبه اندوکتانسهای خودی هر یک از دورهای سیم پیچ ، در [۱۲] پیشنهاد شده است که در رابطه (۱۹) z=0.0035(h+w) قرار داده شود که در واقع شعاع متوسط هندسی (GMR) یک هادی مستطیلی شکل با طول و عرض سطح مقطع h و w می باشد.

۳-۳- مقاومت سری

رابطه زیر مقاومت واحد طول هادی را با درنظر گرفتن اثرات پوستی و مجاورتی را نشان می دهد [۶] :

$$R = \frac{1}{2(h+w)}\sqrt{\frac{\pi f\mu}{\sigma}} \quad (۲۰)$$

که در آن h و w ابعاد سطح مقطع هادی مستطیلی ، μ ضریب نفوذپذیری هادی ، σ هدایت هادی و f فرکانس می باشد.

۳-۴- هدایت موازی

ماتریس هدایت موازی برای لحاظ نمودن اثر تلفات عایقی در مدل وارد می شود و از رابطه زیر محاسبه می شود [۶] :

$$[G] = 2\pi f[C]\cdot\tan\delta \quad (۲۱)$$

۴- روشهای کاهش محاسبات مدل

مدل خطوط انتقال چند سیمه از نظر پیچیدگی محاسباتی نسبت به سایر مدلهای ترانسفورماتور یک مدل بسیار سنگین می باشد. در صورتیکه هر دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال مدل شود ، یعنی n خط انتقال داشته باشیم ، اندازه هر یک از ماتریسهای [Z] و [Y] و در نتیجه ماتریس $[P]^2$ از درجه n در n می شود. در ترانسفورماتورهای قدرت حتی اگر فقط سیم پیچ فشارقوی اصلی را در مدلسازی در نظر بگیریم و از اثر سیم پیچهای فشار ضعیف و تنظیم ولتاژ صرف نظر نماییم ، n تا ۲۰۰۰ دور نیز ممکن است برسد. لذا اولین گام پیچیده و زمانبر در محاسبات مدل ، بدست آوردن ماتریس [P] از ماتریس $[P]^2$ است. برای این کار بهترین راه قطری نمودن ماتریس $[P]^2$ با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه این ماتریس است. اگر بردارهای ویژه ماتریس $[P]^2$ ماتریس [R] و ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس [S] باشد ، داریم:

$$([P]^2)^{0.5} = [R].([S])^{0.5}.[R_t]$$

این عملیات بعنوان نمونه برای ماتریس ۷۰۰ در ۷۰۰ مربوط به ترانسفورماتور شکل ۳ با یک کامپیوتر پنتیوم IV با 512 MB RAM در نرم افزار MATLAB حدود ۶۰ ثانیه طول می کشد.

دومین گام زمانبر در محاسبات مدل ، بدست آوردن توابع *Coth([P]l)* و *Cosech([P]l)* و در نهایت محاسبه ماتریسهای [A] و [B] از روابط (۶) و (۷) است که در این روابط نیز مجددا نیاز به محاسبه ماتریس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس [P] یعنی [γ] و [Q] داریم. این عملیات نیز برای همان ماتریس ۷۰۰ در ۷۰۰ حدود ۴۰ ثانیه بطول می انجامد.

برای آنکه نتایج محاسبات از وضوح کافی برخوردار باشد ، لازم است مثلا بین فرکانسهای 10 kHz تا 5 MHz محاسبات حداقل در ۱۰۰ نقطه فرکانسی انجام شود. بنابراین کل محاسبات مدل با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای ساده سازیهای مورد نیاز و نیز زمان لازم

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

برای تشکیل ماتریسهای [C] و [L] در مجموع ۲ ساعت و ۵۶ دقیقه زمان لازم دارد که بسیار طولانی می باشد. تعداد دورهـای سـیم پـیچ برای ترانسفورماتورهای بزرگتر به عنوان نمونـه بـین ۱۰۰۰ تـا ۲۰۰۰ دور می باشد. در این حالت حتـی قـویترین کامپیوترهـای موجـود در بازار نیز از عهده انجام محاسبات بر نخواهند آمد و پیغام خطای not enough memory ظاهر خواهد شـد. بنـابراین کـاهش پیچیـدگی محاسباتی مدل ضروری می باشد.

یکی از روشهایی که برای کاهش پیچیدگی و زمان محاسبات مـدل MTL به نظر می رسد این است که بجای هر دور از سیم پـیچ ، هـر چند دور از آن بعنوان یک خط انتقال لحاظ شود. بعنوان نمونه اگر هر دو دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال مدل شود ، بجای مـاتریس ۷۰۰ در ۷۰۰ با یک ماتریس ۳۵۰ در ۳۵۰ سروکار خواهیم داشت که محاسبات را بسیار ساده می کند.

در اینصورت اگر هر s دور بعنوان یک خـط انتقـال در نظـر گرفتـه شود ، مقادیر ظرفیتهای C_t ، C_l و C_r تغییری نمی کننـد. امـا مقـدار ظرفیـت بـین دو دور روبـروی هـم از دو دیسـک مجـاور s برابـر C_d محاسبه شده بوسیله رابطه (۱۵) می شود.

در این روش برای محاسبه ماتریس اندوکتانس کاهش یافتـه بـازهم ناچـاریم ابتـدا مـاتریس انـدوکتانس دور بـه دور را تشـکیل دهـیم. اندوکتانس خودی یک واحد از مدل که شامل s دور از سیم پـیچ مـی باشد برابر است با مجموع اندوکتانسهای خـودی هـر یـک از دورهـای تشکیل دهنده آن واحد بعلاوه اندوکتانس متقابل هـر دور نسـبت بـه تمام دورهای دیگر همان واحد. لذا داریم[۱۰]:

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^{s} L_{ii} + \sum_{i=1}^{s}\sum_{\substack{j=1 \\ i\neq j}}^{s} L_{ij} \qquad (۲۲)$$

بهمین ترتیب اندوکتانس متقابل معادل بین دو واحد از سـیم پـیچ که هر یک شامل s دور باشـد بـا اسـتفاده از رابطـه زیـر بدسـت مـی آید[۱۰]:

$$M_{eq} = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=s+1}^{2s} L_{ij} \qquad (۲۳)$$

بعنوان روشی دیگر جهت کاهش زمان محاسبات مدل در [۱۳-۱۴] از این فرض استفاده شده اسـت کـه مـاتریس انـدوکتانس را در یـک سیستم عایقی بدون تلفات و همگن می توان بـا اسـتفاده از مـاتریس ظرفیت بصورت رابطه زیر محاسبه نمود:

$$[L] = \frac{[C^{-1}]}{v_S^2} \qquad (۲۴)$$

که در آن v_S سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی در عایق اسـت و از رابطه زیر بدست می آید:

$$v_S = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (۲۵)$$

که در آن c سرعت نور در خلا و ε_r ثابـت دی الکتریـک معـادل کـل سیستم عایقی است. با این فرض ماتریس $[P]^2$ به یک ماتریس قطری به فرم $\Gamma^2.[I_n]$ تبدیل خواهد شد که در آن $\Gamma=j.\omega/v_S$ می باشد. به این ترتیب محاسبات مدل بسیار ساده تر و سـریعتر مـی شـود. البتـه جهت لحاظ نمودن تلفات ،Γ بصورت زیر اصلاح شده است [۱۳-۱۴]:

$$\Gamma = \frac{j\cdot\omega}{v_S} + \frac{\omega\cdot\tan\delta}{2\cdot v_S} + \frac{1}{v_S\cdot d}\cdot\sqrt{\frac{\omega}{2\cdot\sigma\cdot\mu}} \qquad (۲۶)$$

جمله دوم نشانگر تلفات عایقی و جمله سوم نشانگر اثر همجواری مـی باشد.

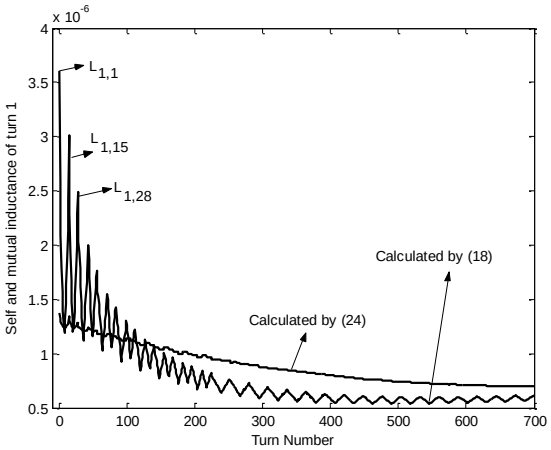
به این نکته باید توجه نمود که درصورتی مـی تـوان از رابطـه (۲۴) برای محاسبه اندوکتانس استفاده کرد که سیم پـیچ را تعـدادی خـط انتقال بدون تلفات فرض نمود که بوسیله یک عایق همگن احاطه شده اند. اما این فرض در عمل فرض درستی نمی باشد. زیرا اگرچـه عـایق بین دورهای مختلف در یک دیسک از کاغذ تشکیل شـده اسـت ، امـا عایق بین دو دیسک مجاور و همچنین عایق بین دو سیم پیچ مختلف از ترکیبی از کاغذ ، روغن و پرسبورد تشکیل شده اسـت. لـذا سـرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در عایق بـین دو دور از یـک دیسـک بـا سرعت انتشار امواج در عایق بین دو دور از دو دیسـک مختلـف یـا دو دور از دو سیم پیچ مختلف متفـاوت اسـت. بنـابراین احتمـالا در نظـر گرفتن یک سرعت انتشار امواج معادل برای کل سیستم عایقی از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. ضمن آنکه بدلیل ساختار پیچیده سیسـتم عایقی ترانسفورماتور ، محاسبه یک ضریب دی الکتریک معـادل بـرای کل سیستم کار آسانی نمی باشد و روش مشخصی بـرای محاسـبه آن ارائه نشده است.

برای بررسی میزان اختلاف بوجود آمده وقتی که از رابطـه (۱۸) یـا رابطه (۲۴) برای محاسبه ماتریس اندوکتانس استفاده شود ، مـاتریس اندوکتانس سیم پیچ فشارقوی ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از هر دو رابطه محاسبه و مقایسه گردید. بعنوان نمونه در شکل ۷ مؤلفه های سطر اول مـاتریس انـدوکتانس یعنـی انـدوکتانس خودی و اندوکتانسهای متقابـل دور اول سـیم پـیچ نسـبت بـه تمـام دورهای دیگر با استفاده از دو رابطـه (۱۸) و (۲۴) رسـم شـده اسـت. مشـاهده مـی شـود کـه بـا اسـتفاده از هـر دو روش رونـد تغییـرات اندوکتانس متقابل مشابه هم بدسـت آمـده اسـت. امـا بـازه تغییـرات اندوکتانس وقتی که از رابطـه (۱۸) اسـتفاده شـود ، بسـیار بزرگتـر از حالتی است که از رابطه (۲۴) استفاده شده است.

واضح است که هریک از روشهای کاهش محاسبات مدل ، باعث بروز خطا در محاسبات می شود. بنابراین در اینجـا بـه یـک مصـالحه بـین خطای مدلسازی و پیچیدگی محاسباتی مدل نیاز داریم. برای انتخاب روش مناسب بطوریکه هم حجم محاسبات قابـل توجیـه باشـد و هـم دقت مدل در حد قابل قبول باشد ، لازم است که نتایج مدلسازی هـر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

دو روش با یکدیگر مقایسه شوند تا در نهایت به یک روش بهینه دست یافت.

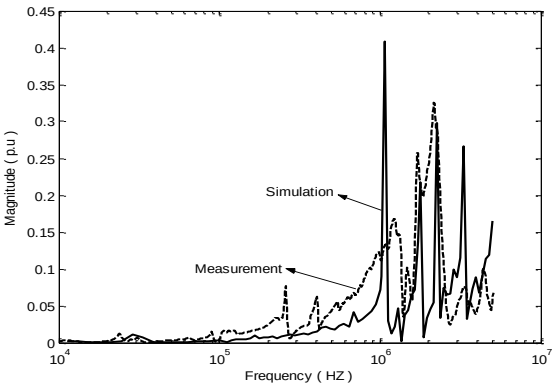


شکل (۷): اندوکتانس خودی و متقابل دور یکم سیم پیچ

۵- بررسی اعتبار مدل

در راستای بررسی اعتبار مدل خطوط انتقال چند سیمه ، تابع انتقال ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل ۳ بوسیله یک دستگاه network analyzer که قابلیت اندازه گیری توابع انتقال تا فرکانس 20MHz را داشت ، اندازه گیری و ثبت گردید. اندازه گیری تابع انتقال روی فاز U سیم پیچ فشارقوی در شرایطی انجام گرفت که سیم پیچ LV زمین شده بود ، بنابراین در مدلسازی ولتاژ سیم پیچ LV صفر در نظر گردید. سیگنال ورودی که شامل سینوسیهای با فرکانس متغیر با دامنه ثابت می باشد به ابتدای سیم پیچ فشارقوی فاز U اعمال گردید. سمت نوترال سیم پیچ از طریق یک مقاومت ۵۰ اهم به زمین متصل شده بود. عدد تپ طوری انتخاب شده بود که تمام سیم پیچ تنظیم ولتاژ شامل بخشهای coarse و fine ازمدار خارج بود. بنابراین ولتاژ سیم پیچ تنظیم ولتاژ در مدلسازی برابر ولتاژ نقطه نوترال سیم پیچ HV اصلی فرض گردید. ولتاژ دو سر مقاومت ۵۰ اهم بعنوان سیگنال خروجی اندازه گیری و ثبت گردید.

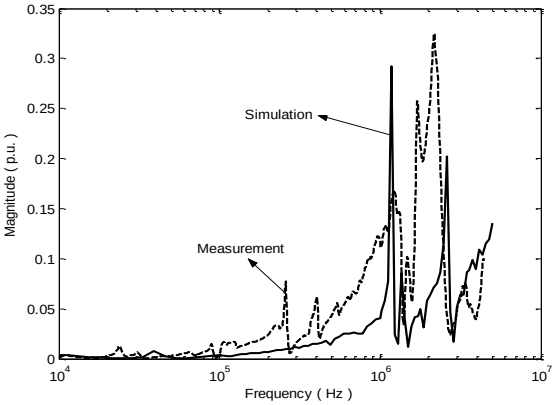
در شکل ۸ منحنی نقطه چین دامنه تابع انتقال سیم پیچ ترانسفورماتور مذکور را در بازه فرکانسی از ۱۰ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز در مقیاس لگاریتمی نشان می دهد. منحنی توپر نتایج شبیه سازی را وقتی که هر دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده نمایش می دهد. مشاهده می شود که در این حالت اگرچه تمام صفر و قطبهای سیستم واقعی بطور دقیق بوسیله مدل دنبال نشده اند ، اما در بیشتر بازه فرکانسی هر دو منحنی بهم نزدیک هستند.



شکل (۸): دامنه تابع تبدیل اندازه گیری شده و محاسبه شده در حالتیکه هر دور سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده باشد

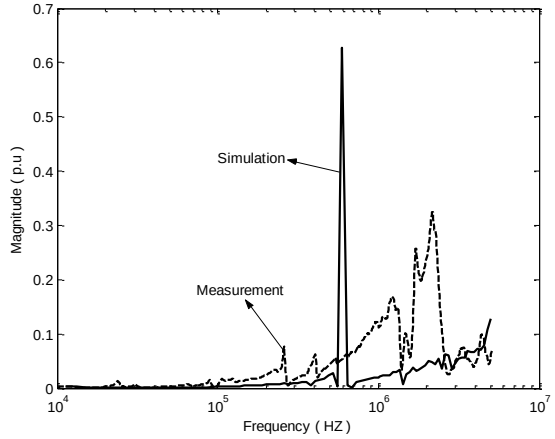
شکلهای ۹ و ۱۰ دامنه تابع تبدیل اندازه گیری شده را وقتی که به ترتیب هر دو دور یا هر هفت دور از سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انقال در نظر گرفته شده باشند را نشان می دهند. تابع تبدیل اندازه گیری شده نیز برای مقایسه آورده شده است. همانطور که انتظار می رفت خطای مدلسازی بخصوص در فرکانسهای بالا در مقایسه با مدلسازی دور به دور زیاد شده است. اما علیرغم افزایش خطای مدلسازی ، در شکل ۹ مشاهده می شود که در بازه فرکانسی انتخاب شده دو منحنی حاصل از اندازه گیری و شبیه سازی تا حدودی به هم نزدیک هستند. اما در مورد شکل ۱۰ فقط تا فرکانس چند صد کیلوهرتز بین دو منحنی ارتباط وجود دارد و از آنجا به بعد دو منحنی از هم دور می شوند و خطای مدلسازی خیلی زیاد می شود.

بعنوان آخرین حالت هر دور از سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شد ، درحالیکه ماتریس اندوکتانس با معکوس نمودن ماتریس ظرفیتها (رابطه (۲۴)) محاسبه گردید. در شکل ۱۱ مشاهده می شود که در این حالت نیز مانند حالت قبل مدل فقط تا فرکانس زیر یک مگاهرتز معتبر می باشد.

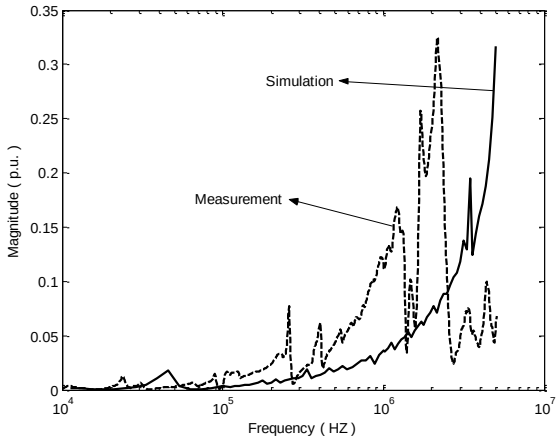


شکل (۹): دامنه تابع تبدیل اندازه گیری شده و محاسبه شده در حالتیکه هر دو دور از سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده باشد

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]



شکل (۱۰): دامنه تابع تبدیل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در حالتیکه هر هفت دور از سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده باشد



شکل(۱۱): دامنه تابع تبدیل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در حالتیکه هر دور از سیم‌پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده باشد و ماتریس اندوکتانس با استفاده از معکوس نمودن ماتریس ظرفیت محاسبه شده باشد

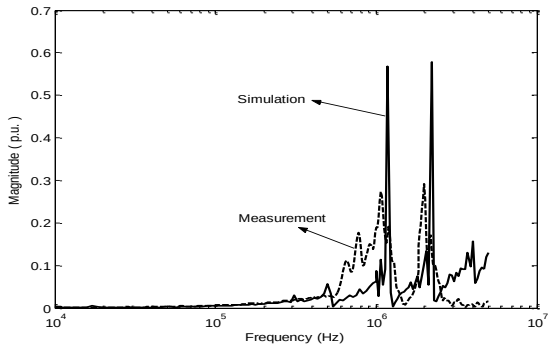
در جدول ۱ کل زمان لازم برای شبیه سازی کامپیوتری و متوسط مربعات خطای هر یک از چهار روش فوق آورده شده است. در بین این چهار روش ، بهترین مصالحه بین زمان محاسبات و دقت مدلسازی در روش دوم که در آن هر دو دور سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال مدل شده است دیده می شود. بطور کلی تصمیم گیری در مورد تعداد دورهای در نظر گرفته شده بعنوان یک خط انتقال باید طوری صورت پذیرد که ۱- حافظه کامپیوتر برای انجام محاسبات کافی باشد. ۲- زمان شبیه سازی متناسب با موقعیت و شرایط باشد. توانایی یا عدم توانایی انجام محاسبات و نیز زمان شبیه سازی تقریبی را می توان با کمک خود برنامه مدلسازی و براساس تجربیات پیشین تخمین زد.

جدول (۱): مقایسه چهار روش مدلسازی

تعداد دورهای سیم پیچ که بعنوان یک خط انتقال مدل شده اند	کل زمان شبیه سازی	متوسط مربعات خطای مدل
یک	۲ ساعت و ۵۶ دقیقه	0.0053
دو	۲۵ دقیقه	0.0058
هفت	۲ دقیقه	0.0091
یک (استفاده از رابطه (۲۴))	۲۰ دقیقه	0.0089

جهت بررسی بیشتر دقت و اعتبار مدل و نیز بررسی بیشتر میزان تاثیر روشهای کاهش پیچیدگی محاسباتی مدل ، از یک ترانسفورماتور نیروگاهی 420kV/15.75kV ,Y/Δ ,200 MVA استفاده گردید و تابع انتقال فاز U سیم پیچ فشارقوی آن با شرایط مشابه حالت قبل اندازه گیری و ثبت گردید. سیم پیچ HV این ترانسفورماتور دارای ۱۱۶ دیسک است که ۴۰ دیسک ابتدای سیم پیچ از نوع اینترلیو و بقیه از نوع معمولی می باشند و هر دیسک از ۱۶ عدد دور تشکیل شده است.

با استفاده از اطلاعات فوق ماتریسهای [Z] و [Y] از درجه ۱۸۵۶ در ۱۸۵۶ بدست می آیند. اگر در مدلسازی هر دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال لحاظ گردد ، محاسبات مدل بسیار حجیم شده و یک کامپیوتر پنتیوم IV با RAM 512 MB حتی قادر نیست محاسبات را برای یک نقطه فرکانسی به اتمام برساند و پس از چندین دقیقه پیغام not enough memory صادر خواهد شد. لذا ناچاریم هر چند دور را بعنوان یک خط انتقال در نظر بگیریم. در شکل ۱۲ منحنی نقطه چین دامنه تابع انتقال اندازه گیری شده سیم پیچ ترانسفورماتور مذکور و منحنی توپر نتایج شبیه سازی را وقتی که هر دو دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده است نمایش می دهد. در این حالت شبیه سازی برای ۱۰۰ نقطه فرکانسی حدود ۶ ساعت بطول می انجامد. در این شکل مشاهده می شود که دو منحنی در بازه فرکانسی انتخاب شده حدودا به یکدیگر نزدیک هستند ، اما دقت این روش باید در مکانیابی PD نیز مورد بررسی قرار گیرد.



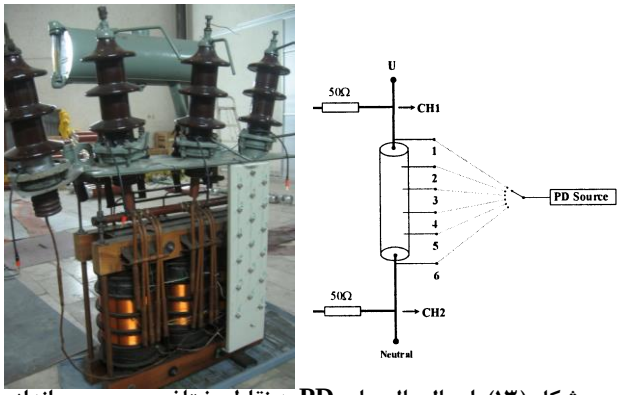
شکل (۱۲): دامنه تابع تبدیل اندازه گیری شده و محاسبه شده ترانسفورماتور 420/15.75 kV در حالتیکه هر دو دور از سیم پیچ در مدلسازی بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شده باشد

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

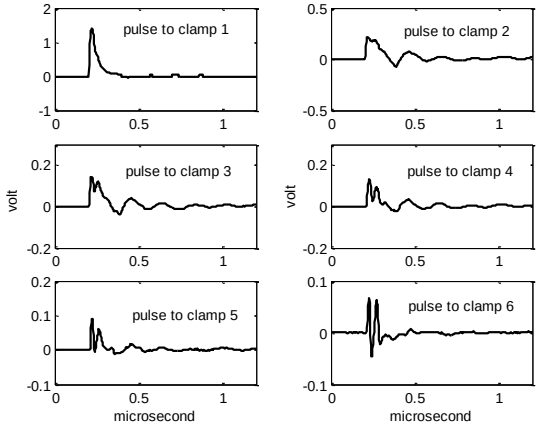
۶- نتایج مکانیابی PD

به منظور بررسی صحت و دقت آلگوریتم بیان شده جهت مکان یابی PD از یک ترانسفورماتور سه فاز 20kV/0.4kV , 50 kVA استفاده شد. هسته و سیم پیچ این ترانس از داخل تانک آن بیرون کشیده شده تا دسترسی به نقاط مختلف در طول سیم پیچ برای اهداف تحقیقاتی امکانپذیر باشد. سیم پیچ فشارقوی آن بصورت ستاره بسته شده است و همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده ، ۶ نقطه در طول هر فاز قابل دسترسی است. بوسیله یک کالیبراتور تخلیه جزئی ، پالسهای PD به نقاط مختلف ۶ گانه سیم پیچ فاز u اعمال گردید و توسط دو کانال یک اسیلوسکوپ دیجیتال که دارای عمق حافظه کافی بود با نرخ نمونه برداری 500 Msample/Second و با دقت 8bit اندازه گیری بعمل آمد. برای اندازه گیری در دو انتهای سیم پیچ ، از دو مقاومت ۵۰ اهم بعنوان امپدانس آشکارساز استفاده شد. در شکل ۱۴ سیگنالهای اندازه گیری شده در نقطه ابتدای سیم پیچ وقتیکه پالس PD به نقاط ۱ تا ۶ اعمال شده باشند ، نمایش داده شده اند.

ساختار سیم پیچ فشارقوی ترانسفورماتور مذکور از ۵ قسمت سری باهم تشکیل شده است. سیم پیچ هر قسمت بصورت لایه ای است و از ۱۹ لایه تشکیل شده است ، بنابراین کل سیم پیچ متشکل از ۹۵ لایه می باشد. هر لایه از ۴۶ دور ساخته شده است و هادی هر دور از نوع هادی گرد با سطح مقطع 0.9 mm و عایق روی هر هادی از نوع لاک با ضخامت 0.1 mm می باشد. در مدلسازی هر لایه بعنوان یک خط انتقال در نظر گرفته شد و توابع تبدیل داخلی سیم پیچ محاسبه گردید. در شکل ۱۵ دامنه تابع تبدیل نقطه ۶ سیم پیچ با استفاده از اندازه گیری و شبیه سازی در بازه فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز رسم شده است. مشاهده می شود که دو منحنی تا حدود زیادی به هم نزدیک هستند ، اما دقت مدلسازی باید در مکان یابی PD بیشتر محک زده شود.



شکل (۱۳): اعمال پالسهای PD به نقاط مختلف سیم پیچ و اندازه گیری آنها در دو انتهای سیم پیچ



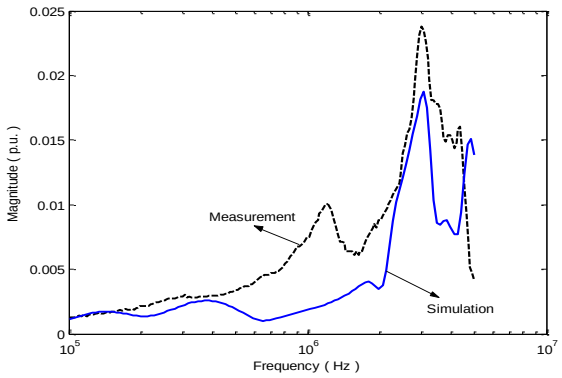
شکل (۱۴): پالسهای اندازه گیری شده در ابتدای سیم پیچ

پس از مدلسازی سیم پیچ ترانس و محاسبه توابع تبدیل داخلی ، طبق آلگوریتم بیان شده برای مکان یابی PD ، جریان I_{PD} با استفاده از هر دو رابطه (۱۱) و (۱۲) و بازاء تمام نقاط داخلی سیم پیچ (بازاء k های مختلف) محاسبه می شوند. برای این کار $I_S(1)$ و $I_R(n)$ انتقال یافته سیگنالهای اندازه گیری شده در نقاط ابتدا و انتهای سیم پیچ به حوزه فرکانس هستند.

بعنوان نمونه شکل ۱۶ مربوط به حالتی است که پالس PD به نقطه ۴ سیم پیچ تزریق شده است و در دو انتهای سیم پیچ اندازه گیری شده است. در این شکل مشاهده می شود که بیشترین شباهت بین دو I_{PD} محاسبه شده بازاء نقطه ۴ وجود دارد. المانهای بردار زیر فاصله اقلیدسی نرمالیزه شده بین دو سیگنال جریان I_{PD} محاسبه شده در شکل ۱۶ است.

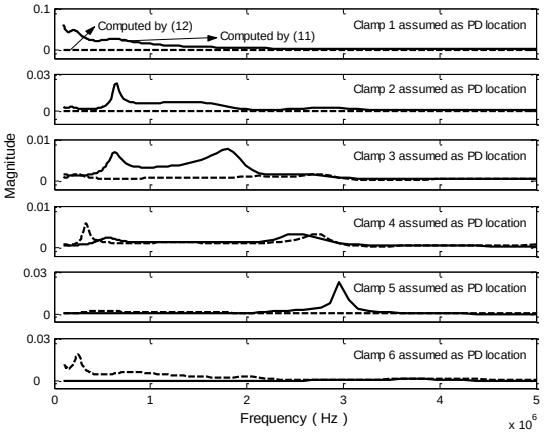
$$[1.0000 \quad 0.2629 \quad 0.0590 \quad 0.0143 \quad 0.0318 \quad 0.3551]$$

مشاهده می شود که المان چهارم در میان سایر المانها مینیمم می باشد که نشانگر آن است که مکان رخ دادن PD نقطه ۴ تخمین زده شده است و مکان یابی صحیح می باشد. همچنین این نکته قابل توجه است که هرچه از المان چهارم دور می شویم ، فاصله بین دو سیگنال زیادتر می شود که نشان می دهد این روش یک روش قابل اطمینان است.



شکل (۱۵): تابع تبدیل اندازه گیری شده و محاسبه شده نقطه ۶ نسبت به ابتدای سیم پیچ

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.6- No.1- Spring and Summer 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]



شکل (۱۶): دو سیگنال محاسبه شده بوسیله (۱۱) و (۱۲) وقتیکه PD به نقطه ۴ سیم پیچ اعمال شده باشد

نتایج کلی مکانیابی PD در جدول ۲ نشان داده شده است. ستون سمت راست جدول محل واقعی تزریق پالسهای PD برحسب شماره لایه مربوط به نقاط ۶ گانه سیم پیچ می باشد. در ستون سمت چپ جدول محل تخمین زده شده PD برحسب شماره لایه سیم پیچ آورده شده است. مشاهده می شود که مکان یابی PD برای تمام نقاط سیم پیچ با دقت خوبی انجام شده است. حداکثر خطای مکان یابی ۸,۴٪ طول سیم پیچ بوده است که برای نقطه ۴ سیم پیچ اتفاق افتاده است.

جدول (۲): مقایسه مکان واقعی و تخمین زده شده PD

محل واقعی PD	محل تخمین زده شده PD
لایه شماره ۱ سیم پیچ (نقطه ۱)	لایه شماره ۳
لایه شماره ۲۰ سیم پیچ (نقطه ۲)	لایه شماره ۱۳
لایه شماره ۳۹ سیم پیچ (نقطه ۳)	لایه شماره ۴۱
لایه شماره ۵۸ سیم پیچ (نقطه ۴)	لایه شماره ۶۶
لایه شماره ۷۷ سیم پیچ (نقطه ۵)	لایه شماره ۷۵
لایه شماره ۹۵ سیم پیچ (نقطه ۶)	لایه شماره ۹۵

۷- نتیجه گیری

مدل خطوط انتقال چند سیمه یکی از مدلهایی است که برای مطالعه انتشار PD در ترانسفورماتور کاربرد دارد ، اما پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد سبب شده است که در عمل استفاده از آن در ترانسفورماتورهای با قدرت بالا محدود و گاهی غیرممکن شود. به منظور کاهش حجم محاسبات مدل دو روش ممکن است بکار گرفته شود: ۱- به جای هر دور ، هر چند دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال مدل شود. ۲- ساده نمودن معادلات مدل با فرض همگن بودن عایق سیم پیچ. جهت بررسی اعتبار مدل و دقت هر یک از روشهای کاهش محاسبات ، در یک ترانسفورماتور 132/20kV و یک ترانسفورماتور 420/15.75kV پارامترهای مدل با در نظر گرفتن مسائل عملی طراحی محاسبه گردیدند. مقایسه توابع انتقال اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در دو ترانسفورماتور فوق نشان داد که با در نظر گرفتن هر دو دور از سیم پیچ بعنوان یک خط انتقال پیچیدگی محاسباتی مدل به نحو چشمگیری کاهش می یابد و ضمنا خطای مدلسازی افزایش زیادی نمی یابد.

نتایج مکانیابی PD با استفاده از روش ارائه شده در یک ترانسفورماتور تحقیقاتی نشان داد که اگرچه حداکثر بازه فرکانسی ۵ مگاهرتز در محاسبات لحاظ گردید و نیز توابع تبدیل محاسبه شده کاملا بر توابع تبدیل اندازه گیری شده منطبق نبود ، اما مکانیابی PD با حداکثر خطای ۸,۴٪ طول سیم پیچ به انجام رسید که نشان می دهد این روش می تواند بعنوان یک روش عملی برای مکان یابی PD در صنعت استفاده شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از شرکت ایران ترانسفو جهت فراهم کردن امکان اندازه گیری و پشتیبانی‌های لازم تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] "Partial discharge measurements," IEC 60270-99, 1999.
[2] P.Werle, A. Akbari, H. Borsi, and E. Gockenbach, "An enhanced system for partial discharge diagnosis on power transformer", in proc. 13th Int. Symposium On High Voltage Engineering, Rotterdam, Delft, 2003.
[3] M.A.Elborki, P.A. Crossley, Z. D. Wang, A. Darwin, and G. Edwards, "Detection and characterization of partial discharges in transformer defect models", in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, July 2002.
[4] A. Akbari, P.Werle, H.Borsi, and E. Gockenbach, "Transfer function-based partial discharge localization in power transformers: A feasibility study", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 5, pp. 22-32, 2002.
[5] G. B. Gharehpetian, H. Mohseni, and K. Moller, "Hybrid modeling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient overvoltage studies", IEEE Transactions on Power delivery, vol. 13, no.1, pp.157-163, January 1998.
[6] S. N. Hettiwatte, P. A. Crossley, Z. D. Wang, A. Darwin, and G. Edwards, "Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation studies", in Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 1394 -1399, 2002.
[7] S. N. Hettiwatte, Z. D. Wang, P. A. Crossley, A. Darwin, and G. Edwards, "Experimental investigation into the propagation of partial discharge pulses in transformers", in Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 1372 -1377, 2002.
[8] R. M. D. Vecchio, B. Poulin, and R. Ahuja, "Calculation and measurement of winding disk capacitances with wound-in-shields", IEEE Transactions on Power delivery, vol. 13, no.2, pp.503-509, April 1998.
[9] K. G. Nilanga, B. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk, S. M. Gubanski "Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA)", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no.3, pp. 1375-1382, July 2006.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]

[10] K. A. Wirgau, “Inductance calculation of an air-core disk winding”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 95, no.1, pp. 394-400, January/February 1976.
[11] Y. Shibuya and S. Fujita, “High frequency model and transient response of transformer windings”, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, vol . 3, pp. 1839-1844, 2002.
[12] D. J. Wilcox, W. G. Hurley, and M. Conlon, “Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings”, in Proc. Inst. Elect. Eng. C, vol. 136, pp. 308-314, September 1989.
[13] Y. Shibuya, S. Fujita, and N. Hosokawa, “Analysis of very fast transient overvoltages in transformer winding”, in Proc. Inst. Elect. Eng.-Gen. Transm. Dist., vol. 144, no. 5, pp. 461-468, September 1997.
[14] M. Popov, L. V. D. Sluis, G. C. Paap and H. D. Herdt, “Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no.4, pp. 1268-1274, October 2003.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-31]