روشی دقیق برای محاسبه و تخمین مقاومتهای سری و موازی مدل مشروح ترانسفورماتور بر اساس نتایج آزمایش تست ضربه

مهدی صلای نادری
دانشجوی دکترا

گئورک باباملک قره‌پتیان
استادیار

مهرداد عابدی
استاد

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یکی از دشوارترین مسائل در مدلسازی سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حالت گذرا، مدلسازی تلفات در مدل مشروح است. در این مقاله روشی دقیق برای تعیین مقادیر مقاومتهای سری و موازی در مدل مشروح ترانسفورماتور ارائه شده است. براساس این روش، به کمک نتایج حاصل از تست ضربه می‌توان مدل جعبه سیاه سیم‌پیچ ترانسفورماتور و به دنبال آن مقادیر ویژه سیم‌پیچ را محاسبه و سپس متناظراً براساس مفاهیم فیزیکی می‌توان مقادیر مقاومتهای سری و موازی را به ترتیب در پایین‌ترین و بالاترین فرکانس طبیعی به دست آورد و آنها را به عنوان بهترین تقریب در مدل مشروح وارد نمود. اهمیت موضوع در این است که بدین ترتیب طراح بعد از ساخت نمونه به کمک تست ضربه می‌تواند مقادیر طراحی را اصلاح نموده و قبل از تولید انبوه اشکالات طرح را برطرف نماید. مقایسه نتایج اندازه‌گیری و مدل‌سازی تایید‌کننده روش ارائه شده در این مقاله بوده است.

کلمات کلیدی

مدل مشروح وجعبه سیاه، مقاومتهای سری و موازی، فرکانسهای طبیعی ترانسفورماتور، تست ضربه

An Accurate Method For Estimation of Series and Parallel Resistance in Detailed Model of Power Transformer Using Impulse Test Results

M. S.Naderi
Ph. D. Student

G.B. Gharehpetian
Assistant Professor

M. Abedi
Professor
Electrical Engineering Department
Amirkabir University of Technology

Abstract

In this paper a novel and accurate method is presented in order to evaluate the series and parallel resistances for detailed model of power transformers. In the proposed method the black box model of power transformers and eigenvalues of its winding are estimated by impulse test. Then the series and parallel resistances can be evaluated for the most upper and lower natural frequencies with the reasonable accuracy to be implemented in the detailed model. The proposed

model enables the designers to correct the design data sheets before the mass production by performing the impulse test on the sample benchmark. In present study the comparison between the simulation and test results verifies the proposed method.

Keywords

Detailed Model, Black Box Model, Power Transformers, Series and Parallel Resistance, Natural Frequencies, Impulse Test

مقدمه

انواع مدلسازی ترانسفورماتور قدرت را می‌توان به دو صورت مدل جعبه سیاه (Black Box) و مدل مشروح دسته‌بندی نمود. مدلسازی به روش جعبه سیاه در موارد خاصی نظیر تعیین هماهنگی عایقی سیستم‌های HV و EHV بکار برده می‌شود. مدلهای جعبه سیاه را می‌توان از طریق اندازه‌گیری در حوزه زمان و فرکانس و یا با استفاده از مدل مشروح ترانسفورماتور استخراج نمود. بدون مشخص نمودن توپولوژی و ساختار دقیق، این مدلها به توابع پیچیده و با تقریب زیاد تبدیل می‌شوند. مدل جعبه سیاه برای طراحان ترانسفورماتور مناسب نیستند. زیرا که آنها باید اطلاعاتی در مورد توزیع ولتاژ در داخل سیم‌پیچ ترانسفورماتور در شرایط کلیدزنی و یا تحریکاتی که باعث تولید ولتاژهای سریع و غیر عادی می‌شوند داشته باشند[۱]. حالتهای گذرای سریع در سیستمهای GIS دارای مولفه‌هایی تا ۱۰ مگا هرتز اند[۲]. این مولفه‌ها می‌توانند باعث بوجود آمدن تشدید به علت تطابق مقدار یکی از آنها با فرکانس‌های طبیعی سیم‌پیچ گردند[۳]. برای مطالعه این گونه پدیده‌ها کارخانجات سازنده ترانسفورماتور، برنامه‌های کامپیوتری بسیار پیچیده‌ای را تهیه کرده‌اند تا بتوانند پدیده‌های فیزیکی را همراه با مشخصات مواد بکار رفته با المانهای فشرده RLC مدلسازی نمایند. مدل حاصله به نام مدل مشروح (Detailed) مشهور است. پارامترهای مدل مشروح بر اساس روشهای آنالیز عددی (بطور مثال روش المان محدود)، روشهای تحلیلی و یا روشهایی که مبتنی بر شبیه‌سازی است مشخص می‌شوند. توانایی مدل مشروح برای بازسازی هرچه دقیق‌تر مشخصه‌های گذرای ترانسفورماتور بستگی به دقت مقادیرRLC و فرکانسهای موجود دارد. بنابراین در مدل مشروح برای معتبر بودن مدل در فرکانسهای محدوده مگاهرتز باید هر دور سیم‌پیچ بطور کامل با تمام کوپلینگهای القایی و خازنی (با دورهای دیگر) مدلسازی شود. انجام چنین کاری نیازمند برنامه‌ها و کامپیوترهایی بزرگ با تواناییهای بسیار بالا است. بنابراین در عمل نیازمند به کاهش درجه مدل تا حد ممکن می‌باشیم. مدلهای جعبه سیاه، مدلهای کاهش مرتبه یافته‌ای هستند که مستقیما از اندازه‌گیری بر روی ترانسفورماتور بدست می‌آیند و یا بوسیله تکنیکهایی در حوزه زمان و یا فرکانس مرتبه آنها کاهش داده می‌شود. نکته اصلی آن است که هر مدل کاهش یافته باید شامل اهم قطبها و صفرهایی باشد که در ادمیتانس ترمینال وجود دارد.

مساله‌ای که این مقاله آنرا دنبال می‌کند تعیین مقاومتهای مدل مشروح با دقت بالاست. در مورد پارامترهای دیگر این مدل و روشهای محاسبه آنها مقالات گوناگونی ارائه شده است[۴،۵،۶]. ولی یکی از بزرگترین مشکلات این مدل، مدلسازی تلفات یا مقاومتها در مدل مشروح است[۴].

۱ـ مدل مشروح سیم‌پیچ

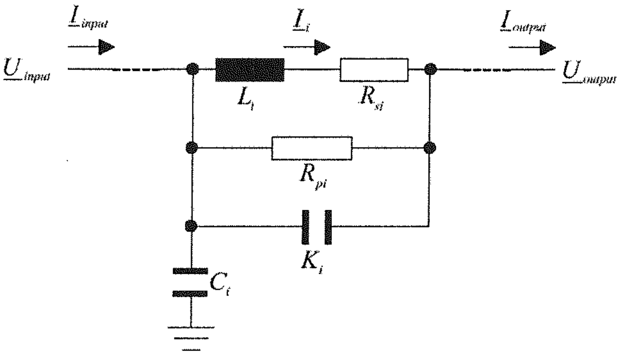
مدلسازی ترکیب پیچیده‌ای مانند اکتیو پارت یک ترانسفورماتور مصالحه‌ای بین دو عامل دقت و پیچیدگی است. همانطور که بیان شد کارخانجات سازنده ترانسفورماتور، در مدلسازی از روش مدل مشروح استفاده می‌کنند. معمولا المان اصلی و پایه مدل مشروح یک دیسک یا یک جفت دیسک است. در شکل(۱) مدل مربوط به یک جفت دیسک نشان داده شده است. هر جفت دیسک (جفت دیسک i) به وسیله یک مقاومت سری (R_{si})، یک اندوکتانس خودی (L_i)، یک مقاومت موازی (R_{pi})، یک خازن سری (K_i) و یک خازن متصل به زمین (C_i) مدل می‌شود. در اینجا اندوکتانس متقابل با هر جفت دیسک دیگر (L_{ij}) در نظر گرفته شده است ولی در شکل (۱) نشان داده نشده است. بردار متغیرهای حالت مدل، بردار جریان شاخه‌های اندوکتیو $[I]=[i_1,i_2,...,i_{n+1}]^T$ و بردار ولتاژ گره $[V]=[v_1,v_2,...,v_{n+1}]^T$ می‌باشد[۵]. سیم‌پیچ را می‌توان بصورت

معادلات حالت تشریح نمود. دراین حالت معادله بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} U^{\bullet} \\ I^{\bullet} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C^{-1}G & C^{-1}A \\ -M^{-1}A^{T} & -R_s M^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^{-1} & M^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق M، G و C به ترتیب ماتریس اندوکتانس گره‌ها، ماتریس هدایت گرهها، ماتریس خازن گره‌ها می‌باشند. R_s و A ماتریسهای مقاومت سری و ماتریس تلاقی مدار اندوکتیو هستند. مشخصات جزئی این ماتریسها و بردارهای B_1 و B_2 در [۵] آورده شده است. اگر پارامترهای مدل و در نتیجه ماتریس ضرایب معادلات حالت مشخص و یا تخمین زده شوند می‌توان معادلات اخیر را با روشهای مختلف عددی حل نمود.

در رابطه با تعیین ظرفیتهای طولی و عرضی (C_i, K_i)، مقالات گوناگونی منتشر شده است[۴،۵،۶]. همچنین در رابطه با محاسبه اندوکتانسهای خودی و متقابل نیز روشهای مختلفی با موفقیت بکار رفته است[۴،۵،۶]. تمامی محققین در این نکته متفق‌القول‌اند که یکی از مشکل‌زاترین و دشوارترین بحثها در مدل مشروح تعیین یا تخمین مقاومتهای سری (R_{si}) و موازی (R_{pi}) است. چون این مقاومتها وابسته به فرکانس می‌باشند و در فرکانس‌های گوناگون دارای مقادیر گوناگونی هستند[۴].



شکل(۱) مدل مشروح سیم‌پیچی ترانسفورماتور.

۲ـ روش معمول محاسبه مقاومتهای سری و موازی

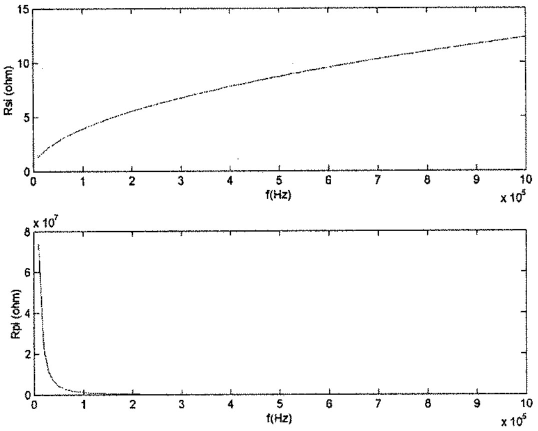
نشان داده شده است که با انتخاب مقادیر صحیح برای مقاومتهای سری و موازی می‌توان نتایج شبیه‌سازی را به نتایج اندازه‌گیری نزدیک نمود[۶،۷]. یک روش نسبتا ساده که بطور معمول در زمان طراحی برای تعیین مقدار مقاومتهای سری و موازی استفاده می‌شود به گونه‌ای است که آنها را می‌تواند بصورت وابسته به فرکانس مدل کند. در این روش با استفاده از روابط تحلیل ـ تقریبی زیر مقدار R_{si} از مجموعه معادلات (۲) و R_{pi} از معادله(۳) بدست می‌آید[۵]. در این روابط برای یک سیم‌پیچ به مشخصات هندسی ارائه شده در جدول(۱) مقاومتهای فوق محاسبه و در شکل (۲) نتایج محاسبه نمایش داده شده است. با توجه به شکل(۲) و با توجه به وابستگی این مقادیر به فرکانس این سوال مهم پیش می‌آید که برای شبیه‌سازی رفتار سیم‌پیچ چه مقداری را باید به R_s و R_p اختصاص داد.

در جهت پاسخ به سوال فوق در این مقاله روش جدیدی برای محاسبه مقاومتهای سری و موازی ارائه شده است. با توجه به نحوه قرار گرفتن مقاومتهای سری و موازی در مدل مشروح (که در شکل(۱) نشان داده شده است) و تغییرات مقاومتهای سری و موازی نسبت به فرکانس (شکل (۲)) مشاهده می‌شود که در فرکانسهای بالا مقدار مقاومت موازی (R_p) به شدت کاهش یافته و نیز به علت راکتانس بالا تاثیر مقاومت سری کم بوده و می‌توان تنها مقاومت موازی را به عنوان عنصر تلف‌کننده در نظر گرفت و نیز در فرکانسهای پایین به علت راکتانس کم، مقدار بسیار زیاد مقاومت موازی و خازن موازی، تاثیر مقاومت سری به عنوان مقاومت اهمی غالب خواهد بود. بنابراین برای محاسبه مقاومتهای سری و موازی ـ که وابسته به فرکانس می‌باشند ـ می‌توان آنها را به ترتیب متناظر با کوچکترین و بزرگترین فرکانس طبیعی سیستم در نظر گرفت. در این مقاله برای تعیین

فرکانسهای طبیعی و حدود بالا و پایین آن، از مدل جعبه سیاه استفاده می‌شود. بدین منظور باید تابع تبدیل سیم‌پیچ را برای یافتن فرکانسهای طبیعی سیستم به دست می‌آورد. پارامترهای A_1 الی A_{13} ، σ ، δ ، k_s در جدول یک تعریف شده‌اند.

$$a_p = A_1 + 2A_7 \quad , \quad b_p = A_2 + A_4$$
$$a_h = A_{10}(A_1 + 2A_7) \quad , \quad b_h = A_4 + 2A_2 + 2A_7)$$
$$x_l = A_1\sqrt{\pi\mu_0\delta A_2 / b_p} \quad , \quad x_q = A_2\sqrt{\pi\mu_0\delta A_1 / a_p}$$
$$s_l = \frac{x_l(Sinh(2x_l) + Sin(2x_l))}{Cosh(2x_l) - Cos(2x_l)} \quad , \quad s_q = \frac{x_q(Sinh(2x_q) + Sin(2x_q))}{Cosh(2x_q) - Cos(2x_q)}$$
$$r_l = \frac{2x_l(Sinh(x_l) - Sin(x_l))}{Cosh(x_l) + Cos(x_l)} \quad , \quad r_q = \frac{2x_q(Sinh(x_q) - Sin(x_q))}{Cosh(x_q) + Cos(x_q)}$$
$$H_y = \frac{\frac{b_h}{2}\log\frac{{a_h}^2 + {b_h}^2}{{b_h}^2} + a_h\tan^{-1}(\frac{b_h}{a_h})}{2\pi a_h b_h} \quad , \quad H_x = \frac{\frac{a_h}{2}\log\frac{{a_h}^2 + {b_h}^2}{{a_h}^2} + b_h\tan^{-1}(\frac{a_h}{b_h})}{2\pi a_h b_h}$$
$$p_l = \frac{A_{11}b_pH_y}{A_{10}a_pH_x + A_{11}b_pH_y} \quad , \quad p_q = \frac{A_{10}a_pH_x}{A_{10}a_pH_x + A_{11}b_pH_y}$$
$$\kappa_f = 1 + {p_l}^2(s_l - 1 + ({A_{10}}^2 - 1)r_l/3) + {p_q}^2(s_q - 1 + ({A_{11}}^2 - 1)r_q/3)$$
$$R_{si} = \frac{k_f A_{13}}{A_{12}\sigma} \qquad (۲)$$

$$R_{pi} = \frac{1}{2\pi f \times \tan(\delta) \times k_s} \qquad (۳)$$



شکل(۲) مقاومتهای سری و موازی برحسب فرکانس.

۳ـ تخمین پارامترهای تابع تبدیل سیستم (مدل جعبه سیاه)

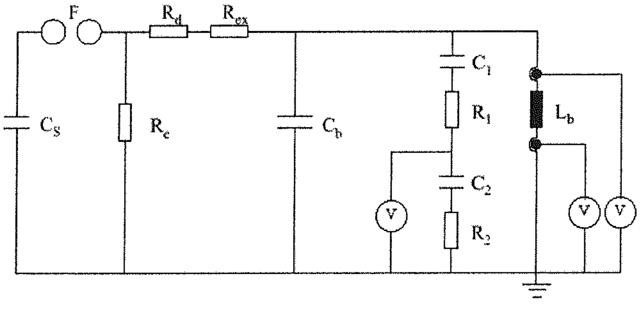
۳ـ۱ـ set up آزمایشگاهی و عنصر مورد آزمایش

شکل (۳) set up آزمایشگاهی بکار برده شده برای مطالعه رفتار ترمینالی سیم‌پیچی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد[۸]. همانطور که در شکل(۳) مشاهده می‌شود جریان سیم‌پیچی L_b به وسیله دو ترانسفورماتور جریان (CT) با پهنای باند عریض اندازه‌گیری می‌شود. یکی از CT ها در ترمینال ورودی ولتاژ فشار قوی و دیگری بر روی ترمینال نوترال قرار گرفته است. عنصر تحت آزمایش، سیم‌پیچ مربوطه به یک ترانسفورماتور، با قدرت ۱.۲ MVA است و سیم‌پیچی آن از نوع دیسکی واژگون (Inverted Double Coil) می‌باشد. مشخصات سیم‌پیچ ترانسفورماتور در شکل (۴) نشان داده شده است. سیم‌پیچ مذکور

شامل ۶۰ دیسک و هر دیسک شامل ۱۱ دور می‌باشد. برای تعیین پارامترهای تابع تبدیل سیستم از نتایج اندازه‌گیری شده مربوط به ورودی (ولتاژ ضربه ترمینال ورودی) و خروجی (جریان ورودی سیم‌پیچ) استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات سیم‌پیچ نمونه.

نام پارامتر	نماد	مقدار پارامتر	واحد
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
پهنای هادی	A_1	2.5	mm
ارتفاع هادی	A_2	9	mm
فاصله هادی شعاعی	A_3	0.4	mm
فاصله دیسکها	A_4	4.9	mm
فاصله سیم‌پیچ از هسته	A_5	35.2	mm
مقدار متوسط قطر هسته و سیم‌پیچ	A_6	263.2	mm
ضخامت کاغذ	A_7	0.2	mm
ضخامت پرس اشپان	A_8	5	mm
مقدار متوسط قطر سیم‌پیچ	A_9	330.8	mm
تعداد دیسکهای سیم‌پیچ	A_{10}	11	$turn$
تعداد واحدها در دیسک	A_{11}	2	–
سطح مقطع هادی	A_{12}	22.5	mm^2
طول هادی زوج دیسک	A_{13}	7277.6π	mm
ضریب تلفات عایقی	$\tan(\delta)$	0.073	–
ظرفیت ایده‌ال موازی با مقاومت موازی	k_s	1.4563×10^{-10}	F
هدایت هادی زوج دیسک	σ	5.8411×10^{7}	S



شکل(۳)set-up آزمایشگاهی مورد استفاده.

ساختار مدل مورد استفاده برای سیستم Box-Jenkins می‌باشد[۹] . علت این امر آنست که نسبت به ساختار مدلهای دیگر دارای انعطاف بیشتری برای تابع تبدیل سیستم و تابع تبدیل نویز است. مدل Box-Jenkins بصورت پارامتریک در رابطه (۴) تشریح شده است [۹].

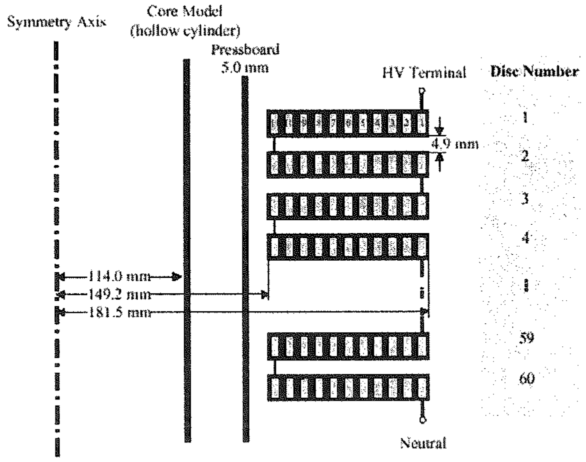
$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - n_k) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \tag{۴}$$

در رابطه (۴) ریشه‌های چند جمله ایهای $B(q)$، $F(q)$، $C(q)$ و $D(q)$ به ترتیب صفر و قطبهای تابع تبدیل سیستم و تابع تبدیل نویز می‌باشند که در روابط (۵) بصورت پارامتریک بیان شده‌اند.

$e(t)$ ، بردار نویز سفید بوده و مقدار n_k نیز بیان‌کننده تاخیر در سیستم می‌باشد.

$$\begin{aligned} B(q) &= b_1 + b_2 q^{-1} + \ldots + b_{n_b} q^{-n_b+1} \\ F(q) &= 1 + f_1 q^{-1} + \ldots + f_{n_f} q^{-n_f} \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + \ldots + c_{n_c} q^{-n_c} \\ D(q) &= 1 + d_1 q^{-1} + \ldots + d_{n_d} q^{-n_d} \end{aligned} \tag{۵}$$

در روابط فوق n_f، n_b، n_c، n_d بیان کننده درجه هرکدام از چند جمله‌ای‌ها می‌باشند.



شکل(٤) عنصر مورد آزمایش: سیم‌پیچی ترانسفورماتور.

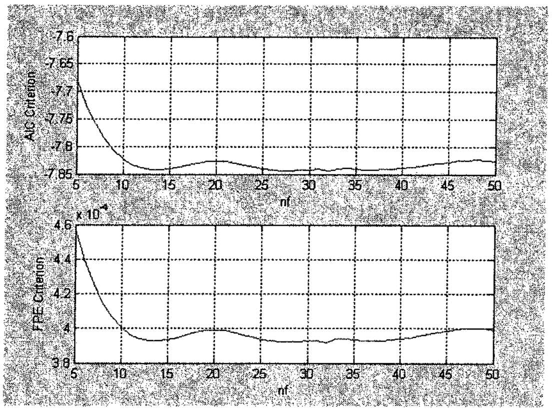
۳-۲ـ تعیین درجه تابع تبدیل سیم‌پیچ

برای‌تعیین‌درجه‌تابع‌تبدیل‌سیستم(سیم‌پیچ)وتابع‌تبدیل نویز از دو معیار AIC (Akaike's Information Theoretic Criterion) و FPE (Akaike's Final Prediction_Error Criterion) [۹] استفاده شده است. در معیارهای AIC و FPE نیز برای بدست آوردن بهترین تابع تبدیل سیستم از دو اصل برازندگی (Fitting) و سادگی (Parsimonity) استفاده می‌شود. به عبارت دیگر در دو معیار فوق با سهیم قرار دادن هر دو اصل به روشهای مختلف، مقادیر AIC و FPE بدست می‌آیند. درجه‌ای از مدل بهترین درجه برای توابع تبدیل در مدل انتخاب شده می‌باشد که دارای کمترین مقدار AIC و FPE باشد[۹]. در رابطه (۶) عبارتی را که با مینیمم کردن آن مقدار AIC بدست می‌آید بیان شده است. همچنین در رابطه (۷) عبارتی را که با مینیمم کردن آن مقدار FPE بدست می‌آید آورده شده است. در هر دو رابطه، مینیمم کردن نسبت به پارامتر θ صورت می‌گیرد. θ برداری است که شامل تمام پارامترهای مجهول (ضرایب تاخیرها) در رابطه(۵) می‌باشد. در روابط (۶) و (۷) d_M، طول بردار θ (متناسب با درجه سیستم) ، N تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده و ε خطای خروجی بوده و بنا به تعریف اختلاف بین بردارهای خروجی اندازه‌گیری شده و خروجی حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد. مقادیر مختلف AIC و FPE برحسب درجه سیستم (n_f) در شکل (۵) نشان داده شده است. از شکل (۵) نتیجه می‌شود که بهترین درجه برای سیستم از نظر معیارهای AIC و FPE برابر $n_f = 32$ می‌باشد. باید توجه داشت که درجه صورت و مخرج تابع تبدیل یکسان در نظر گرفته شده است [۹] . همچنین مقدار تاخیر نیز صفر می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار تاخیر از معیار باقی مانده‌ها که در بخش (۴-۳) تشریح خواهد شد استفاده شده است. با تغییر مقدار n_k، در صورتی که تاخیر انتخاب شده بیش از مقدار واقعی

در سیستم باشد، کورولیشن بین ورودی و خطای خروجی در خارج ازمحدوده بیان شده قرار می‌گیرد. با استفاده از روش سعی و خطا به راحتی مقدار تاخیر برابر صفر یافته شد

$$\log\left[\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left(\frac{1}{2}\varepsilon^{2}(t,\theta)\right)\right]+\frac{2d_M}{N} \qquad (۶)$$

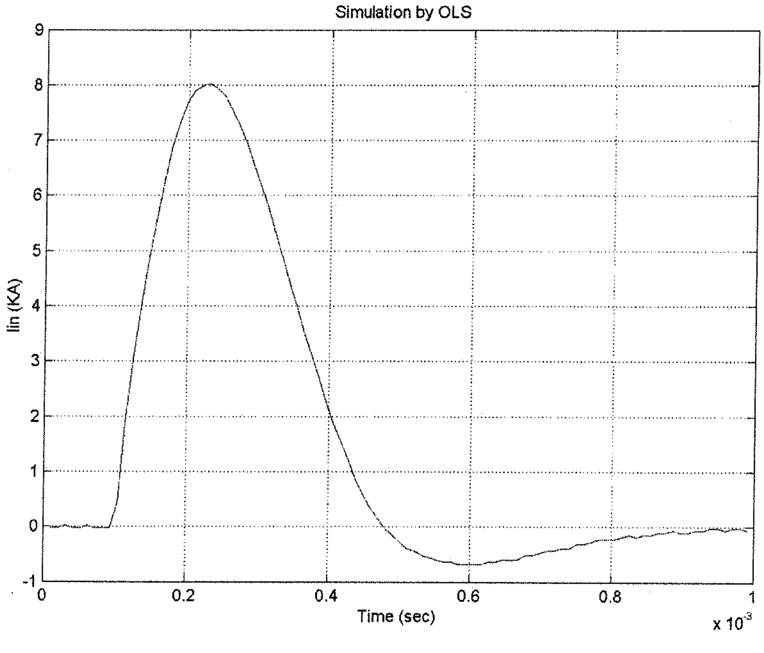
$$\frac{1+d_M/N}{1-d_M/N}\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left(\frac{1}{2}\varepsilon^{2}(t,\theta)\right) \qquad (۷)$$



شکل(۵) تعیین درجه سیستم به روش AIC و FPE.

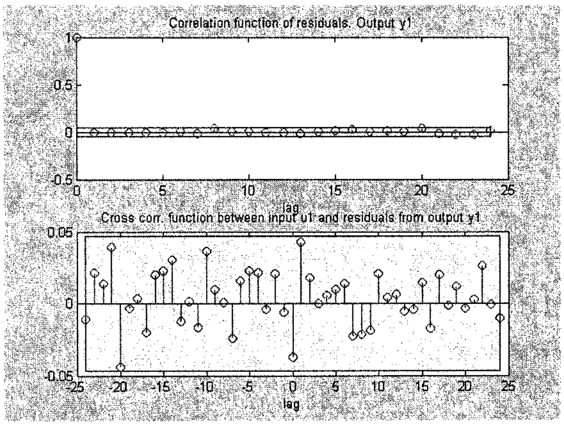
۳-۳ـ ارزیابی مدل بدست آمده (تابع تبدیل سیم‌پیچ)

آخرین مرحله در شناسایی سیستم، ارزیابی مدل جعبه سیاه به دست آمده می‌باشد. اولین روش ارزیابی مدل، مقایسه خروجی سیستم شناسایی شده (شبیه‌سازی شده) و خروجی اندازه‌گیری شده (طبق بند ۴-۱) می‌باشد. در شکل (۶) دو شکل موج جریان ورودی اندازه‌گیری شده و حاصل از تابع تبدیل تخمین زده شده نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل موج اخیر ـ که تا حد بسیار زیادی بر هم منطبق می‌باشند ـ معتبر بودن مدل جعبه سیاه مشخص می‌شود.



شکل(۶) شکل موجهای حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی.

روش دیگر برای ارزیابی مدل، استفاده از روش آماری است. این روش به نام روش مانده‌ها (Residuals) معروف می‌باشد. در این روش اتوکورولیشن خطای خروجی و نیز کورولیشن بین ورودی و خطای خروجی محاسبه می‌شود. هرکدام از کورولیشن‌های فوق باید در محدوده معینی ـ که وابسته به درجه مدل و واریانس هرکدام از پارامترهای محاسبه شده می‌باشد ـ قرار بگیرد. محدوده‌ها توسط نرم افزار Matlab 6.5 و بر اساس مرجع [۹] محاسبه و ترسیم می‌شوند. برای درجه بدست آمده از بند(۴-) معیار باقی مانده‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. بنابراین تابع تبدیل به دست آمده برای سیستم (ادمیتانس سیم‌پیچ ورودی) به عنوان مدل جعبه سیاه معتبر می‌باشد.



شکل(۷) ارزیابی مدل به روش آماری (روش باقی مانده‌ها یا Residuals).

۴ـ تعیین مقاومتهای سری و موازی مدل مشروح

برای محاسبه مقاومتهای سری و موازی که وابسته به فرکانس می‌باشند، باید بیشترین و کمترین فرکانسهای طبیعی را محاسبه نمود. برای محاسبه فرکانسهای مذکور از ریشه های چند جمله‌ای $F(q)$ استفاده می‌کنیم. باید توجه داشت که ریشه‌های مذکور در حوزه گسسته بوده و باید به فرکانسهای طبیعی در حوزه پیوسته تبدیل نمود. سپس مقدار مقاومت سری و موازی را به ترتیب به ازای پایین‌ترین و بالاترین فرکانس طبیعی به کمک روابط ارائه شده در بخش (۳) مشخص می‌سازیم. نتیجه محاسبه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول(۲) مقادیر مقاومتهای سری و موازی مدل مشروح برای سیم‌پیچ ترانسفورماتور تحت آزمایش.

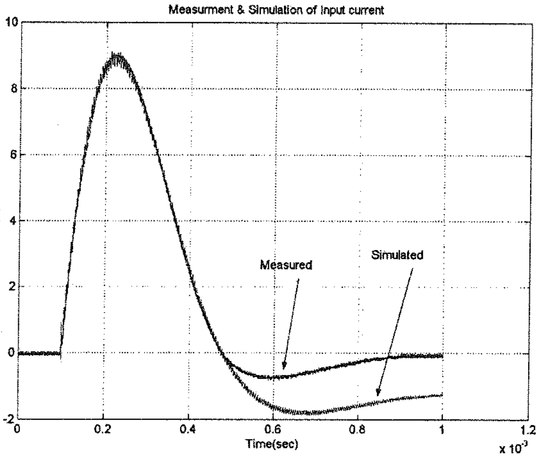
R	F	
0.2519(Ω)	1.932(kHz)	مقاومت سری
516(Ω)	5.55 (MHz)	مقاومت موازی

مقادیر اندوکتانسهای خودی و متقابل و نیز خازنهای طولی وعرضی وابسته به فرکانس فرض نشده و در تعیین مقادیر آنها از روابط مطرح در [۶] استفاده شده است. باید توجه داشت که با داشتن ضرایب ثابت معادله (۱)، می‌توان آن را در حوزه زمان حل کنیم.

۵ـ مقایسه نتایج مدلسازی و اندازه‌گیری

با بکار بردن مدل فضای حالت (رابطه (۱)) برای سیم‌پیچی ترانسفورماتور مطرح شده در شکل(۴)، جریان ورودی سیم‌پیچی می‌تواند بصورت عددی محاسبه شود. برای ولتاژ ایمپالس اندازه‌گیری شده شکل موجهای جریان ورودی اندازه‌گیری شده و نیز شکل موج جریان ورودی حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. همچنانکه دیده می‌شود تطابق خوبی از نتایج در ms ۰/۵ اول وجود دارد که مشخص کننده اعتبار مدل سیم‌پیچی ترانسفورماتور از دیدگاه حالت گذرای

سریع است. باید توجه داشت که مقاومت سری بر روی پیک شکل‌موج و مقاومت موازی بر روی اعوجاجات فرکانس بالای شکل موج اثر می‌گذارند. با دقت در شکل (۸) مشاهده می‌شود که از لحاظ پیک شکل‌موج و مقدار اعوجاج، دو شکل موج نظیر هم می‌باشند. ولی در خطا در لحظات بعد از ms ۰/۵ غیر قابل چشم‌پوشی است. باید توجه داشت که از دیدگاه حالات گذرا و توزیع امواج ضربه بر روی سیم‌پیچ این موضوع بسیار کم اهمیت است و تطابق نتایج در ms ۰/۵ اول تایید بسیار خوبی بر اعتبار روش است.



شکل(۸) مدلسازی پاسخ گذرای ترانسفورماتور بوسیله مدل مشروح و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده.

۶- نتیجه‌گیری

مدلسازی ترانسفورماتور را می‌توان به دو روش مدل مشروح و مدل جعبه سیاه دسته‌بندی نمود. در مدل مشروح میزان دقت و قابلیت بازسازی رفتار ترانسفورماتور در شرایط گذرا، بستگی به دقت در محاسبه مقدار المانهای فشرده RLC دارد. یکی از مسائل پیچیده در مطالعات بر مبنای مدل مشروح، وابستگی مقادیر مقاومتهای سری و موازی به فرکانس است. در این مقاله نشان داده شده است که مقاومتهای سری و موازی به ترتیب متناظر با کوچکترین و بزرگترین فرکانس طبیعی سیم‌پیچ باید انتخاب شوند. در این راستا مدل جعبه سیاه ترانسفورماتور (تابع تبدیل ادمیتانس ورودی ترانسفورماتور) محاسبه شده است. این مدل با دقت بسیار بالایی مدل حالت گذرای سیم‌پیچ را شبیه‌سازی می‌کند. با استفاده از تابع تبدیل سیستم و تبدیل آن به مدل فضای حالت مقادیر فرکانسهای ماگزیمم و مینیمم محاسبه شده است و بر این اساس مقاومتهای متناظر سری و موازی محاسبه شده است. این روش می‌تواند برای ترانسفورماتورهای مختلف با ظرفیتهای گوناگون مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تاییدکننده دقت و صحت روش پیشنهادی است.

مراجع

[1] R.C. Degeneff, M. Vakilian, M. Guttierez, P. Soderberg, P.J. McKenny, R.S. Girgis and J.M.Schneider, “Modeling Transformer for Transient Voltage Calculation” CIGRE paper No. 12-304, 1992.

[2] CIGRE Working Group 33/13-09, “Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substation”, CIGRE Paper No. 12-204, 1192

[3] R.J. Musil, G. Preininger, E. Schopper and S. Wenger, “Voltage Stress Produced by Apriodic and Oscilating System Over Voltage in Transformer Winding “ ، IEEE Trans. On Power App. & Sys . Vol. PAS-100, No. 1, Jan 1981, pp. 431-441

[4] بهروز طوسی، ”مدلسازی سیم‌پیچ فشار قوی ترانسفورمر قدرت در حالت گذرای سریع و خیلی سریع به کمک روش اجزاء محدود (FEM)“ رساله دکترا، زمستان ۱۳۸۰، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[5] ابراهیم رحیم‌پور، ”مدلسازی سیم‌پیچ ترانسفورمر به منظور تشخیص تغییر شکل آن“ رساله دکتری، اردیبهشت ۱۳۸۱، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

[6] G.B. Gharehpetian, “Modellierung von Transformatorwicklungen zur Untersuchung schnellverںnderlicher transienter Vorgnge ،"Dissertation, RWTH Aachen and University of Tehran, 1996.

[7] G.B. Gharehpetian, H. Mohseni and K. Moller“ ‹Hybrid Modelling of Inhomogeneous Transformer Winding for Very Fast Transient Overvoltage Studies”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 13, No. 1, Jan.1998, pp. 157-163.

[8] M. Lenz, K. Feser, G. B. Gharehpetian “Detection and localization of short circuits in transformer windings based on wavelet analysis ”,

[9] Lennarr L.Jung. “System Identification, Theory for the user” University of linkoping, Sweden, Prentice Hall Inc., 1987.