مدلسازی پدیدهٔ فرورزونانس در ترانسفورماتورها با استفاده از مدل جدید هیسترزیس هسته

افشین رضائی زارع، مجید صنایع پسند، حسین محسنی، شاهرخ فرهنگی
دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران
تهران – ایران

چکیده: در این مقاله، پدیدهٔ فرورزونانس در ترانسفورماتورها مورد مطالعه و مدلسازی قرار می گیرد. با استفاده از تئوری **Preisach** یک مدل جدید هیسترزیس معرفی می شود که برخلاف بیشتر مدلهای موجود که مدلهای صرفاً ریاضی بوده، این مدل بر اساس تئوری فیزیکی هیسترزیس بیان می شود. در نتیجه با استفاده از این مدل دقیقتر می توان حلقه های هیسترزیس مواد فرومغناطیس را مدلسازی کرد. تست آزمایشگاهی فرورزونانس بر روی یک ترانسفورماتور ولتاژ (VT) تشریح شده و نتایج آن ارائه می گردد. با استفاده از مدل پیشنهادی، تست فرورزونانس VT مورد شبیه سازی قرار گرفته و رفتار مدل پیشنهادی با نتایج اندازه گیری شده مقایسه می گردد. همچنین رفتار مدل هیسترزیس برنامهٔ حالت گذرای EMTP که به عنوان یکی از بهترین مدلهای هیسترزیس موجود شناخته می شود، جهت مقایسه ارائه می گردد. نتایج این بررسی نشان می دهند که در مطالعات فرورزونانس، در نظر گرفتن اثر هیسترزیس هسته ترانسفورماتور الزامی بوده و مدل هیسترزیس پیشنهادی دقیقتر از سایر مدلهای موجود مانند مدل برنامهٔ EMTP قادر به مدلسازی پدیدهٔ فرورزونانس است.

واژه های کلیدی: ترانسفورماتور, فرورزونانس, هسته, هیسترزیس, تئوری **Preisach**.

Ferroresonance Modeling in Transformers Based on a Novel Hysteretic Core Model

Afshin Rezaei-Zare, Majid Sanaye-Pasand, Hossein Mohseni, Shahrokh Farhangi

School of Electrical and Computer Engineering
University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract :

Based on the Preisach theory in hysteresis, this paper presents a novel transformer core model. Unlike existing mathematical-based hysteresis models, the proposed model is based on a physically correct hysteresis model and can precisely represent the actual behaviors of magnetic materials. In addition, the experimental results of a ferroresonance test of a Voltage Transformer (VT) are presented. The accuracies of the proposed model and the EMTP hysteretic model in duplicating the experimental results are investigated. This paper concludes that in studying ferroresonance phenomenon, the hysteresis of the transformer core must be accurately represented. Furthermore, the proposed model presents more accurate results, compared with the EMTP hysteresis model.

Keywords: Transformer, Ferroresonance, Iron Core, Hysteresis, Preisach Theory.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

۱- مقدمه

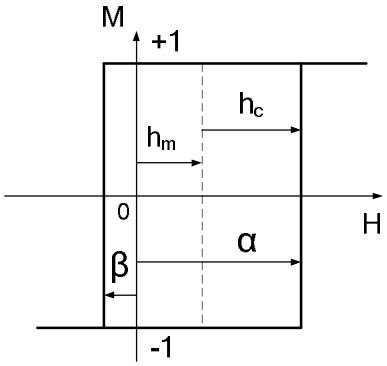
یکی از پدیده های جالب و پیچیده مرتبط با ترانسفورماتورها، پدیدهٔ فرورزونانس است. سالهای متمادی است که این پدیده در سطوح مختلف ولتاژی شبکه های کشورهای مختلف رخ می‌دهد [3]-[1] که عمدتاً به از بین رفتن تجهیزات شبکه منجر شده است ولی هنوز نمی توان پیش بینی کرد که مورد بعدی فرورزونانس کی و در چه محلی ممکن است رخ دهد. از علل اصلی آن می‌توان به ناکافی بودن دانش امروزی در زمینه رفتار مواد مغناطیسی در شرایط گذرای الکترومغناطیسی، عدم امکان تحلیل قوی و جامع سیستم‌های غیر خطی و در دست نبودن مدل مناسب ترانسفورماتور جهت تحلیل فرورزونانس اشاره کرد. علاوه بر این مشکلات، عدم امکان شبیه سازی همهٔ ترکیبات مختلف شرایط اولیه و حالت های گذرا باعث می شود که تجزیه و تحلیل و پیش بینی فرورزونانس چندان با اطمینان انجام نشود.

تحقیقات انجام شده در زمینهٔ فرورزونانس نشان می دهند که نتایج شبیه سازی حساسیت زیادی به روش تعریف مشخصهٔ اشباع مغناطیسی و تلفات هسته داشته و مدلهای ترانسفورماتور موجود دارای خطای زیادی در مدلسازی و شبیه سازی فرورزونانس هستند [1]. تلفات هسته از تلفات جریان گردشی و هیسترزیس تشکیل می شود. تلفات جریان گردشی با توان دو شار مغناطیسی و فرکانس متناسب است. در نتیجه یک مقاومت ثابت با دقت خوبی می تواند این تلفات را مدل کند [4]. ولی تلفات هیسترزیس به فرکانس و سطح محصور در منحنی هیسترزیس و در نتیجه به مدل هیسترزیس وابسته است. بنابراین برای مدلسازی دقیق مشخصهٔ مغناطیسی و تلفات هسته که دو پارامتر اصلی در مطالعهٔ پدیدهٔ فرورزونانس هستند و همچنین برای تکمیل مدلهای موجود ترانسفورماتور، باید مدل دقیقی از هیسترزیس به این مدلها اضافه شود.

در این مقاله بر اساس یکی از دقیق ترین تئوری های فیزیکی هیسترزیس که به تئوری Preisach موسوم است [5] یک مدل جدید هیسترزیس با فرمول بندی جدید ارائه شده و در برنامهٔ حالت گذرای PSCAD/EMTDC پیاده سازی شده است که در ذیل مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

۲- مدل جدید هیسترزیس بر اساس تئوری Preisach

در تئوری Preisach یک المان دوقطبی پایه معرفی می شود که مشخصهٔ آن در شکل (۱) نشان داده شده است. ماده مجموعه ای از این المان ها است که دارای رفتار مستقلی هستند و در سراسر ماده بصورت تصادفی توزیع شده اند. این دو قطبی دو وضعیت مغناطیسی نسبی ۱+ و ۱- می تواند داشته باشد. برای یک میدان مغناطیسی افزایشی، وقتی میدان



شکل ۱- مشخصهٔ مغناطیسی دوقطبی پایهٔ مدل Preisach

اعمال شده به این دو قطبی به مقدار $H=\alpha$ می‌رسد، این المان بطور ناگهانی از حالت منفی به حالت مثبت در می آید. از طرف دیگر برای یک میدان کم شونده تغییر وضعیت دو قطبی در $H=\beta$ رخ میدهد. در مواد مغناطیسی همیشه α از β بزرگتر است و حالت $\alpha=\beta$ حالت برگشت پذیری مغناطیسی ماده را مدلسازی می کند.

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، می توان برای این دو قطبی، دو میدان h_m که میدان جابجایی و h_c که میدان Coercive نامیده می شوند، تعریف کرد. تعداد دوقطبی هایی که در محدودهٔ $(h_c, h_c+dh_c, h_m+dh_m)$ تا $h_m)$ هستند از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$dn = g(h_c, h_m)\,dh_c\,dh_m \qquad (۱)$$

تابع γ تابع چگالی توزیع دو قطبی ها در ماده است و دارای مشخصات زیر است:

$$g(h_c, h_m) = 0 \qquad \text{برای } h_c<0 \qquad (۲)$$
$$g(h_c, h_m) = g(h_c, -h_m) \qquad \text{برای سایر مقادیر } h_c$$

این تابع چگالی برای مواد مختلف متفاوت بوده و برای بیشتر مواد به صورت تابع توزیع نرمال زیر است [6]:

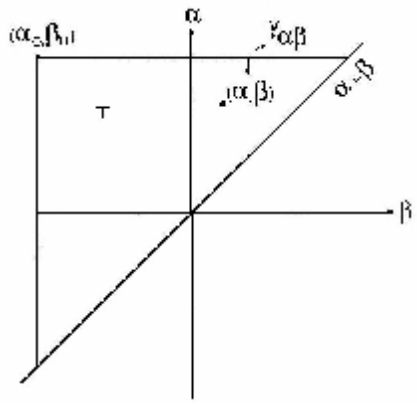
(۳)

$$g(h_c, h_m) = \frac{1}{2p\,s_c s_m}\exp\left[-\frac{(h_c-\bar{h}_c)^2}{2s_c^{\,2}}\right]\exp\left[-\frac{h_m^2}{2s_m^{\,2}}\right]$$

که در این رابطه $\bar{h}_c$ میدان coercive متوسط و σ_c و σ_m به ترتیب انحراف معیار میدان coercive و میدان تحریک در تابع توزیع نرمال هستند.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

با معلوم بودن تابع توزیع چگالی دوقطبی های γ، مغناطیس شدن ماده در مدل Preisach بوسیلهٔ دیاگرام Preisach تعیین می شود. با توجه به

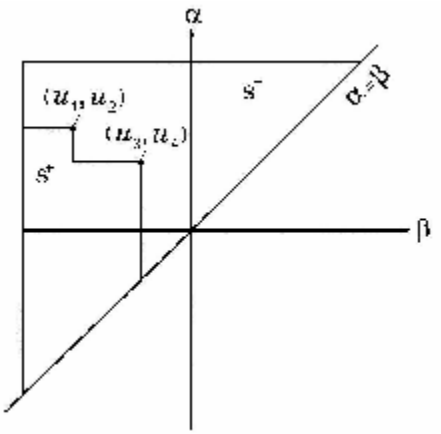


شکل۲- دیاگرام Preisach و مثلث حدی T

این نکته که β نمی تواند از α بزرگتر باشد، در صفحهٔ α-β که در شکل (۲) نشان داده شده است و به دۀاگرام Preisach موسوم است ناحیهٔ معتبر قرار گرفتن دو قطبی های مغناطۀسی، قسمت سمت چپ و بالای خط α=β است. همچنۀن به علت متناهی بودن تعداد دوقطبی ها، ناحیهٔ بالای این خط بوسیلهٔ مثلث T که به مثلث حدی موسوم است، محدود می شود. بنابراین کل دو قطبی های ماده در ناحیهٔ داخل مثلث T قرار دارند. مختصات راس مثلث T که با (α_0,β_0) مشخص می شود معرف دامنهٔ بزرگ میدان مغناطیسی است که به ازاء آن ماده بطور کامل اشباع می شود.

بطور کلی با یک میدان مغناطیسی متغیر که دامنهٔ نقاط ماکزیمم محلی آن ، به صورت یکنوا در حال کاهش و نقاط مینیمم محلی آن، به صورت یکنوا در حال افزایش است دیاگرام Preisach به صورت شکل (۳) خواهد بود. در این نمودار نقاط $\{u_1, u_3\}$ نقاط ماکزیمم و نقاط $\{u_2, u_4\}$ نقاط مینیمم میدان مغناطیسی اعمال شده به ماده هستند. مقدار مغناطیس شدگی ماده در هر لحظه به دو ناحیهٔ تقسیم شدهٔ مثلث حدی T در آن لحظه وابسته بوده و بر اساس نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ تعیین می شود. با توجه به تعریف مرز بین دو ناحیه بر اساس ماکزیمم و مینیمم های محلی و قبلی میدان مغناطیسی، مقدار مغناطیس شدگی ماده در هر لحظه به سابقهٔ مغناطیسی ماده وابسته است. در عمل نیز هیسترزیس مواد، ویژگی اثر پذیر بودن از شرایط مغناطیسی قبلی را از خود نشان می دهند. بنابراین مدل Preisach به خوبی قادر به مدلسازی سابقهٔ مغناطیسی مواد است در حالی که مدلهای صرفاً ریاضی فاقد این ویژگی می باشند. مقدار مغناطیس شدگی ماده در هر لحظه از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$f(t)=\iint_{S^+(t)} g(a,b)\,da\,db - \iint_{S^-(t)} g(a,b)\,da\,db \qquad (۴)$$



شکل۳- دیاگرام Preisach به ازاء یک میدان مغناطیسی با ماکزیمم ها و مینیمم های نزولی

۳- پیاده سازی مدل Preisach در برنامهٔ حالت گذرا

مدل Preisach می تواند با استفاده از روابط (۳) و (۴) به صورت عددی پیاده سازی شود ولی استفاده مستقیم از این روابط در یک برنامهٔ حالت گذرا دارای دو مشکل اساسی است. اولین مشکل، محاسبهٔ یک انتگرال دوگانه به روش عددی است که بسیار وقت گیر است. مشکل بعدی مربوط به محاسبهٔ تابع چگالی توزیع دوقطبی های γ است. جهت بدست آوردن این تابع از داده هایی که از اندازه گیری بدست آمده است باید مشتق گیری نمود. این کار باعث ایجاد نویز در محاسبات شده و دقت محاسبات را کاهش می دهد. لذا بهتر است نتیجه انتگرال (۴) را به صورت یک تابع تحلیلی F بدست آورد. در این صورت محاسبات بسیار ساده تر و سریعتر خواهد بود.

مرز بین دو ناحیهٔ S^+ و S^- توسط یک مرز پله ای شکل تعیین می شود که مختصات نقاط آن یک سری از ماکزیمم ها و مینیمم های محلی میدان مغناطیسی است که در شکل (۴) آنها را به ترتیب با M_k و m_k نشان می دهیم. با معلوم بودن تابع F مقدار مغناطیس شدگی ماده به ازاء یک میدان افزایشی برابر است با [۷]:

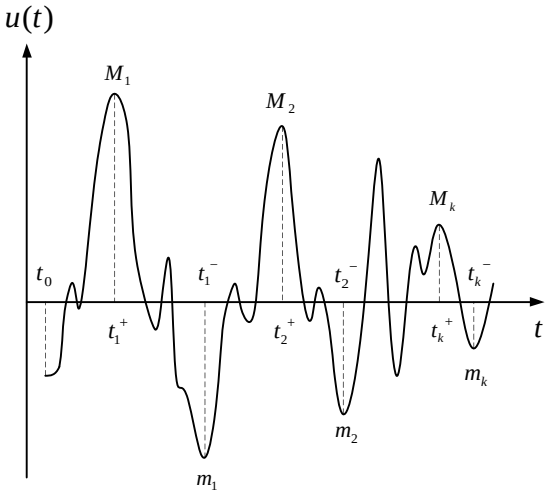
$$f(t)=-F(a_0,b_0) + 2\sum_{k=1}^{n(t)-1}\left[F(M_k,m_{k-1})-F(M_k,m_k)\right] + 2\left[F(M_n,m_{n-1})-F(M_n,u(t))\right] \qquad (۵)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

همچنین می توان نشان داد که برای یک میدان مغناطیسی در حال کاهش، مقدار مغناطیس شدگی ماده برابر است با:



شکل ۴- یک میدان مغناطیسی نمونه با نقاط اکسترمم محلی به عنوان حافظهٔ مدل Preisach

$$f(t) = -F(a_0, b_0) + 2\sum_{k=1}^{n(t)-1}\left[F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)\right] + 2F(u(t), m_{n-1}) \qquad (۶)$$

در مدل پیشنهادی، تابع F به صورت زیر در نظر گرفته شده و پارامترها و تعداد جمله های آن با برازش منحنی به داده های اندازه گیری شدهٔ حلقهٔ هیسترزیس بدست می آید:

(۷)

$$F(x(a,b)) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{q} l_i\left[\tanh(P_i x) + c\,\mathrm{sech}^2(P_i x)\right]$$

که در رابطهٔ اخیر:

برای قسمت بالایی حلقهٔ اصلی $x = b\ ,\quad 0 \le c \le 0.5$

برای قسمت پایینی حلقهٔ اصلی $x = a\ ,\quad -0.5 \le c \le 0$

$\sum l_i = l_s \qquad l_i > 0 \qquad P_i > 0$

برای اینکه اثر متقابل حوزه های مغناطیسی ماده در نظر گرفته شود، یک میدان مغناطیسی موثر به صورت زیر تعریف و در مدل در نظر گرفته می شود:

$$H_e = H + k_B.l(H_e) \qquad (۸)$$

که در آن k_B ضریب شار پیوندی λ و ثابت اثر متقابل مغناطیسی است. با توجه به روابط بالا، می توان اندوکتانس متغیر هسته را با محاسبهٔ پرمابلیته متغیر ماده تعیین کرد. پرمابلیته ماده برای میدان مغناطیسی در حال افزایش و کاهش به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{dl}{dH} = \left(\frac{\frac{\partial F(a,b)}{\partial a}}{1 - k_B.\frac{\partial F(a,b)}{\partial a}}\right)_{a=H_e(t),\,b=m_{n-1}} \qquad (۹)$$

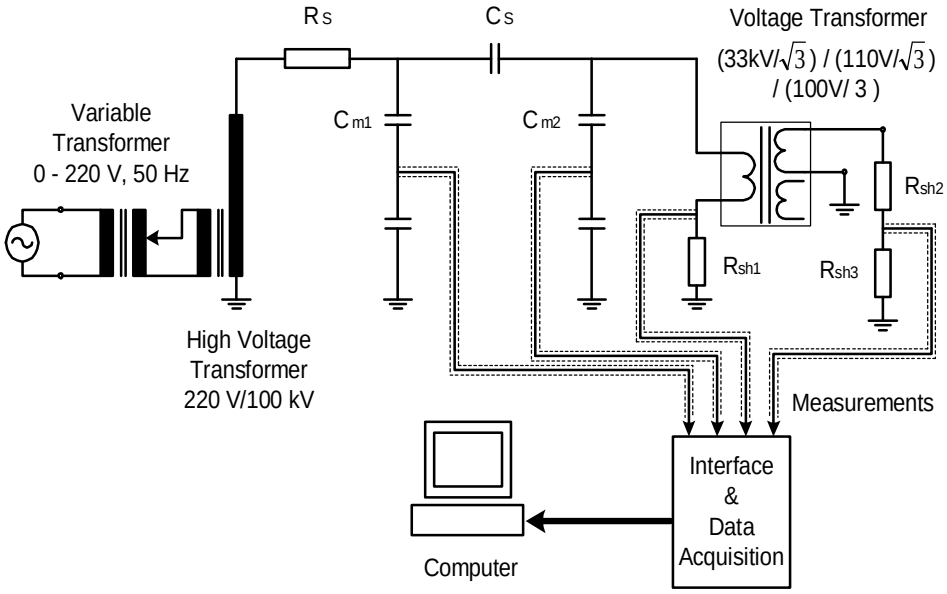
$$\frac{dl}{dH} = \left(\frac{\frac{\partial F(a,b)}{\partial b}}{1 - k_B.\frac{\partial F(a,b)}{\partial b}}\right)_{b=H_e(t),\,a=M_n} \qquad (۱۰)$$

۴- تست فرورزونانس ترانسفورماتور ولتاژ

جهت مطالعهٔ پدیدهٔ فرورزونانس با مدل پیشنهادی، یک ترانسفورماتور ولتاژ سه سیم پیچه با ولتاژهای نامی (۳۳kV/√۳)/(۱۱۰V/√۳)/(۱۰۰V/۳) و توان نامی ۹۰VA مورد آزمایش قرار گرفت. مدار تست در شکل (۵) نشان داده شده است. در این مدار منبع ولتاژ فشار قوی یک ترانسفورماتور تکفاز فشارقوی با ولتاژ نامی ۲۲۰V/۱۰۰kV است که ولتاژ ورودی آن توسط یک ترانسفورماتور متغیر از صفر تا ولتاژ ۲۲۰V قابل تغییر می باشد. مقاومت سری R_S جهت محدود کردن جریان عبوری در هنگام فرورزونانس مورد استفاده قرار می گیرد. خازن C_S نیز در واقع خازنی است که با اندوکتانس غیر خطی ترانسفورماتور ولتاژ، مدار اصلی فرورزونانس را تشکیل می دهند.

جهت اندازه گیری جریان و ولتاژهای نقاط مختلف از دو مقسم خازنی و یک مقسم مقاومتی و یک شنت جریان استفاده شده است. ولتاژ ترمینال فشار قوی ترانسفورماتور ولتاژ و ولتاژ سمت منبع با استفاده از دو مقسم خازنی با مقدار ظرفیت موثر C_{m1} و C_{m2} اندازه گیری شده است. این مقادیر در مقابل اندازه ظرفیت C_S کوچک می باشند. ولتاژ سمت ثانویهٔ ترانسفورماتور ولتاژ به علت فشار ضعیف بودن ولتاژ به راحتی با یک مقسم مقاومتی R_{sh2} و R_{sh3} با اندازه های مقاومتی چند صد کیلو اهم قابل اندازه گیری است. این مقاومت ها باید در حد امکان بزرگ انتخاب شوند تا بصورت بار برای ترانسفورماتور ظاهر نشوند. جریان عبوری از اولیه VT نیز با قرار دادن یک مقاومت کوچک در سمت ترمینال زمین سیم

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

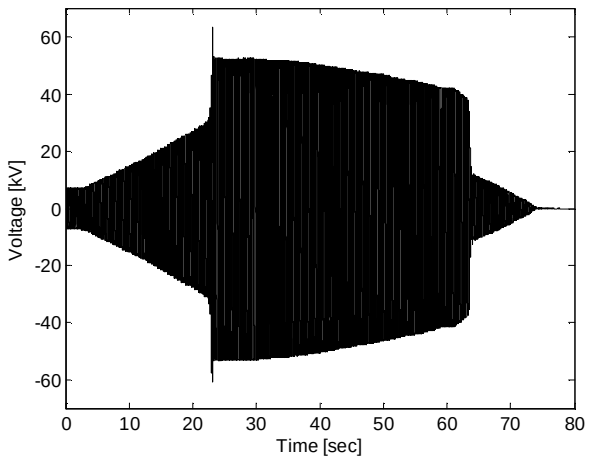


شکل ۵- مدار تست فرورزونانس ترانسفورماتور ولتاژ

پیچ اولیه قابل اندازه گیری است. مقدار این مقاومت بسته به ترانسفورماتور ولتاژ در محدودهٔ چند اهم تا چند ده اهم مناسب می باشد.

در این آزمایش جهت اندازه گیری و ثبت سیگنال های جریان و ولتاژ از یک مجموعهٔ سیستم دیجیتال متشکل از یک مدار واسط و یک کامپیوتر استفاده شده است. مدار واسط که در آزمایشگاه فشارقوی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده است، از دو بخش تشکیل می شود. بخش اول دارای ترمینالهایی جهت اتصال کابل های اندازه گیری است. در این مدار سیگنالهای دریافتی پس از دریافت به خروجی که به بخش دوم مدار واسط متصل است فرستاده می شود. همچنین این قسمت به وریستورهای محدود کنندهٔ ولتاژ مجهز می باشد تا قسمت دوم و کامپیوتر را در مقابل اضافه ولتاژهای گذرای احتمالی محافظت کند. بخش دوم مدار واسط یک کارت Data Acquisition شامل یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) با سرعت نمونه برداری ۱۰۰ kHz و یک حافظه برای ذخیره کردن موقت داده های تبدیل شده است. این فرکانس جهت ثبت تغییرات ولتاژ وجریان فرورزونانس کافی است زیرا مولفه های فرکانسی فرورزونانس که در تست های عملی دیده شده است زیر ۲ kHz و عمدتاً زیر ۱ kHz است [8]. اندازهٔ پارامترهای مدار تست، در پیوست (الف) داده شده است.

در این آزمایش ولتاژ منبع از صفر به آرامی بالا برده شد تا فرورزونانس رخ دهد. سپس به آرامی ولتاژ منبع تا صفر کاهش داده شد و سیگنالهای ولتاژ و جریان اندازه گیری شد. تغییرات ولتاژ VT در طول این تست در شکل (۶) نشان داده شده است. در حالتی که ولتاژ منبع حدود kV ۲۱/۷۱ (۱/۱۴ pu) و پیک ولتاژVT به kV ۳۰/۶ (۱/۱۳۶pu) می رسد، فرورزونانس اتفاق می افتد و ولتاژ VT در مدت کوتاهی به حدود ۱/۷ برابر جهش پیدا می کند. پس از شروع فرورزونانس ولتاژ منبع با مکث کوتاهی در ولتاژ kV ۲۱/۷۱ ، به آرامی پایین آورده می شود. همانطور که در شکل نشان داده شده است، فرورزونانس بلافاصله قطع نمی شود و تا وقتی که ولتاژ منبع به kV ۹/۶۵ (۰/۵۱ pu) برسد، ادامه می یابد. در لحظهٔ قطع فرورزونانس ولتاژ VT از مقدار پیک kV ۳۸/۴ (۱/۴۳ pu) به kV ۱۱/۸ جهش پیدا می کند.



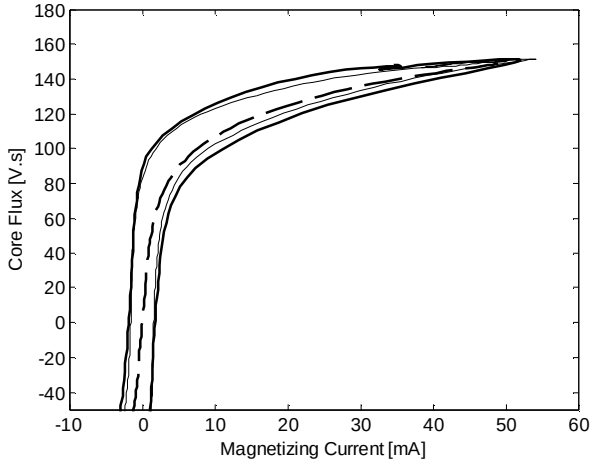
شکل ۶- تغییرات ولتاژ VT در طول تست فرورزونانس

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

۵- مقایسهٔ نتایج شبیه سازی با اندازه گیری

به منظور بررسی اثر هیسترزیس بر فرورزونانس و تفاوت روشهای مختلف مدلسازی مشخصهٔ مغناطیسی هسته، رفتار مدل پیشنهادی و مدل برنامهٔ EMTP با نتایج تست فرورزونانس VT مقایسه می گردد. حلقهٔ اصلی هیسترزیس مدل EMTP بر اساس نتایج اندازه گیری تعریف می شود. همچنین با برازش منحنی به داده های اندازه گیری شده هیسترزیس، پارامترهای مدل پیشنهادی روابط (۷) و (۸) به صورت ارائه شده در پیوست (ب) بدست می آیند.

شکل (۷) مشخصهٔ مغناطیسی مدل هیسترزیس پیشنهادی را در مقایسه با هیسترزیس اندازه گیری شدهٔ VT نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشهود است، مدل پیشنهادی با دقت خوبی می تواند



اندازه گیری

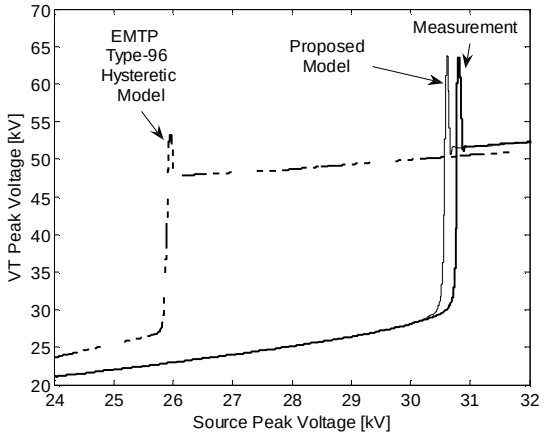
مدل هیسترزیس پیشنهادی

شکل ۷- مشخصهٔ مغناطیسی مدل پیشنهادی در مقایسه با هیسترزیس اندازه گیری شده

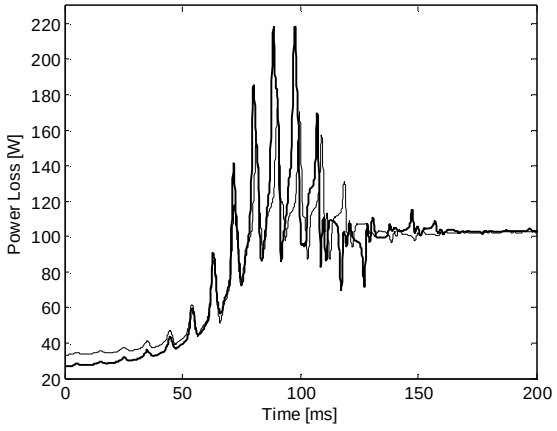
حلقهٔ اصلی هیسترزیس را مدل کند. هیسترزیس هسته در قسمت زانو دارای عرض بیشتری نسبت به قسمت های دیگر است. مدل پیشنهادی نیز به خوبی این وضعیت را نشان می دهد. همچنین شیب نهایی مشخصهٔ هیسترزیس نیز به خوبی توسط مدل پیشنهادی مدل می شود.

مدار تست فرورزونانس شکل (۵) با استفاده از مدل پیشنهادی و مدل EMTP مورد شبیه سازی قرار گرفت. این شبیه سازی ها با شرایط اولیه یکسان شار پسماند صفر و دامنهٔ اولیه ولتاژ منبع برابر صفر انجام شد. شکل (۸) تغییرات پیک ولتاژ VT را که از اندازه گیری و دو مدل تحت مطالعه بدست آمده است را نشان می دهد. این تغییرات در طول تست فرورزونانس و بر حسب پیک ولتاژ منبع بدست آمده است. این شکل نشان می دهد که اگرچه مدل پیشنهادی و مدل EMTP بر اساس یک مجموعه داده های تست تعریف شده اند، ولی ولتاژ شروع فرورزونانس آنها بسیار متفاوت است. ابتدا مدل EMTP و سپس مدل پیشنهادی به ترتیب با افزایش ولتاژ منبع به حالت فرورزونانس می روند. دامنهٔ ولتاژ منبع در هنگام شروع فرورزونانس برای این مدل ها به ترتیب برابر kV ۲۵/۸۵ و kV ۳۰/۵ می باشد. نتایج تست نشان می دهد که VT در ولتاژ بالاتر kV ۳۰/۷ به حالت فرورزونانس می رود. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، نزدیک ترین نتایج شبیه سازی به نتایج تست از مدل پیشنهادی بدست می آید. مطابق این شکل پیک ولتاژ بدست آمده از مدل پیشنهادی در حالت قبل از فرورزونانس، حالت گذرای تغییر مد و حالت فرورزونانس بسیار به نتایج آزمایش نزدیک است.

شکل های (۹) تا (۱۱) نتایج بدست آمده از مدل EMTP را در مقایسه با نتایج تست نشان می دهد. شکل (۹) تغییرات تلف توان VT را در هنگام تغییر مد از حالت عادی به حالت فرورزونانس نشان می دهد.



شکل ۸- تغییرات پیک ولتاژ VT بر حسب پیک ولتاژ منبع بدست آمده از اندازه گیری و مقایسه آن با مدلها



شکل۹- تغییرات تلفات VT مدل EMTP در هنگام شروع فرورزونانس

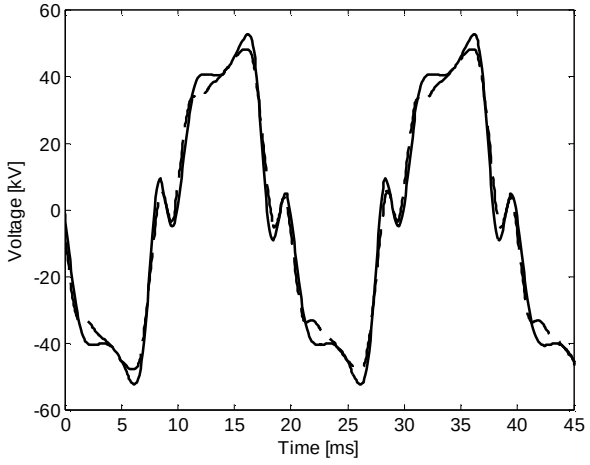
اندازه گیری

مدل EMTP

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تلف توان VT قبل از شروع فرورزونانس W ۲۹ است کـه پـس از طـی یک حالت گذرا به مقدار ماندگار W ۱۰۳ می رسد. با وجـود اینکـه مـدل EMTP با ولتاژ کمتر به حالت فرورزونانس می رود ولـی تلـف تـوان VT این مدل از مقدار تست بیشتر است. قبل از فرورزونانس تلفـات ایـن مـدل برابر W ۳۵ است که در حالت فرورزونانس به مقـدار انـدازه گیـری شـدهٔ ۱۰۳W می رسد. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده اسـت، مـدل EMTP قادر به مدلسازی دقیق تلفات گذرای VT در هنگـام تغییـر مـد نیست.

شکل (۱۰) شکل موج ولتاژ مدل EMTP را در مقایسه با اندازه گیری در حالت ماندگار فرورزونانس نشان می دهد. در این شکل، شکل موجها



شکل۱۰- ولتاژ VT مدل EMTP در حالت ماندگار فرورزونانس

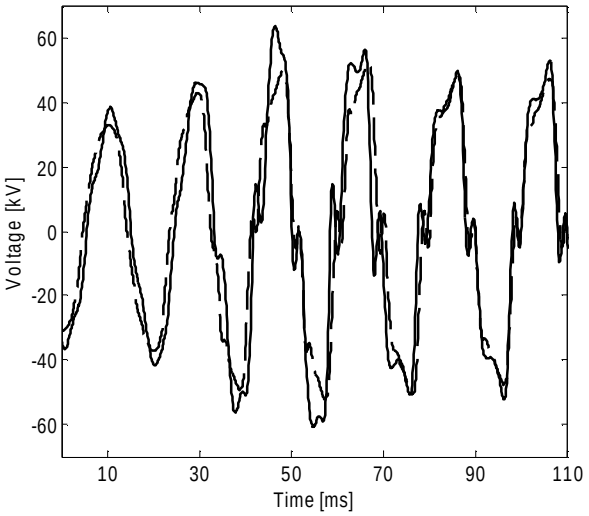
اندازه گیری ——

مدل EMTP - - - - - -

به هم شبیه بوده ولی پیک ولتاژ مدل EMTP به kV ۴۸ مـی رسـد کـه کمتر از مقدار اندازه گیری شـدهٔ kV ۵۲/۴ اسـت. شـکل (۱۱) تغییـرات ولتاژ VT را در حالت گذرای تغییر مد نشان می دهد. پیک ولتـاژ VT در این حالت که بیشترین دامنهٔ ولتاژ بوده و از نظر عایقی بسیار حائز اهمیت است به kV ۶۳/۵ می‌رسد، در حالی که پیک ولتاژ بدست آمـده از مـدل EMTP برابر kV ۵۲/۱ است که بطور قابل ملاحظـه ای کمتـر از مقـدار اندازه گیری است. در مجموع مـدل EMTP چنـدان قـادر بـه مدلـسازی دقیق حالت گذرای تغییر مد از حالت عادی به فرورزونانس نیست.

شکل (۱۲) تلفات مدل هیسترزیس پیشنهادی را در مقایسه با انـدازه گیری نشان می دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، این مدل قادر است تلفات VT را در هر سه حالت قبل از فرورزونـانس، حالـت گذرای تغییر مد و حالت ماندگار فرورزونـانس بـصورت دقیـق مـدل کنـد.

شکل (۱۳) نتایج بسیار نزدیک ولتاژ حالـت مانـدگار فرورزونـانس مـدل و اندازه گیری را نشان می دهد. همچنین شکل (۱۴) نشان می دهد که در حالت گذرای تغییر مد VT از حالت عادی به فرورزونـانس، ولتـاژ گـذرای مربوطه و مقدار پیک آن با دقـت بـسیار خـوبی توسـط مـدل پیـشنهادی تعیین می شود. نتایج بررسی های دیگر فرورزونانس در ترانـسفورماتورهای قدرت [۷]، [9] و همچنین مطالعـهٔ حالتهـای گـذرای ترانـسفورماتورهای اندازه گیری جریان [۷]، [10] نیـز مویـد دقـت بـالای الگـوریتم و مـدل پیشنهادی در مدلسازی رفتار حالت گذرای هستهٔ ترانسفورماتورها است.



شکل۱۱- تغییرات ولتاژ VT در حالت گذرای تغییر مد از حالت عادی به مد فرورزونانس (شروع فرورزونانس)

اندازه گیری ——

مدل EMTP - - - - - -

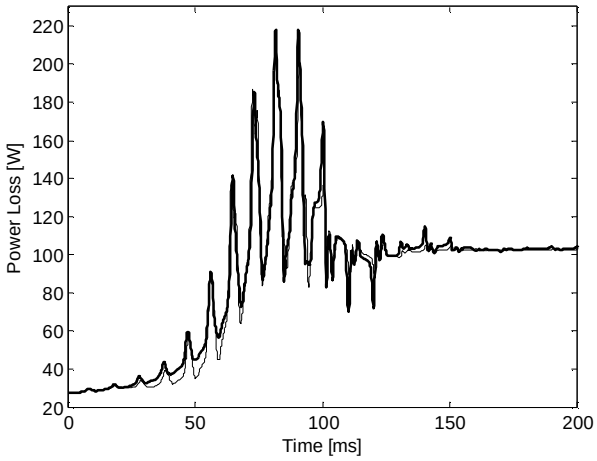
۶- نتیجه گیری

در این مقاله مدل جدیدی از هیسترزیس هسته آهنی بر اسـاس تئـوری Preisach و با فرمول بندی جدید معرفـی گردیـد. همچنـین مـدار و روال انجام آزمـایش فرورزونـانس یـک ترانـسفورماتور ولتـاژ kV 33 تـشریح و نتایج آن ارائه گردید. سپس آزمایش فرورزونانس با استفاده از مدل هـستهٔ پیشنهادی و مدل برنامهٔ EMTP که از دقیقترین برنامه های حالت گـذرا محسوب می شود، مورد شبیه سازی قرار گرفت.

نتایج تست آزمایشگاهی فرورزونانس ترانسفورماتور ولتاژ نشان می دهند که در هنگام افزایش تدریجی ولتاژ منبع، فرورزونانس در ولتاژی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

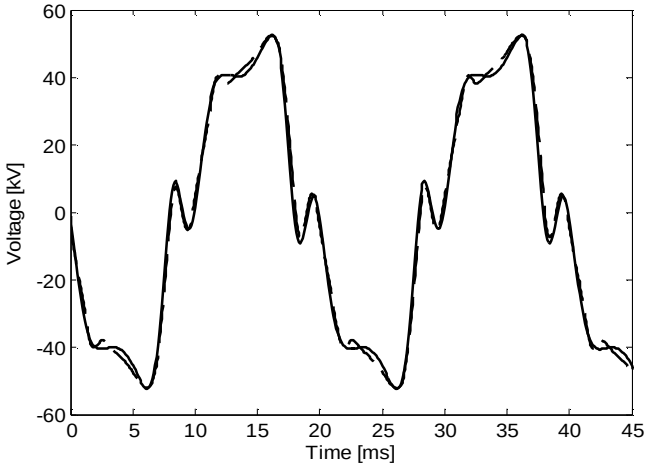
بالاتر از آنچه مدلها تعیین می کنند رخ می دهد و نزدیک ترین ولتاژ شروع فرورزونانس نسبت به نتایج تست، مربوط به مدل پیشنهادی است.



شکل۱۲- تغییرات تلفات VT مدل هیسترزیس پیشنهادی در هنگام شروع فرورزونانس

اندازه گیری

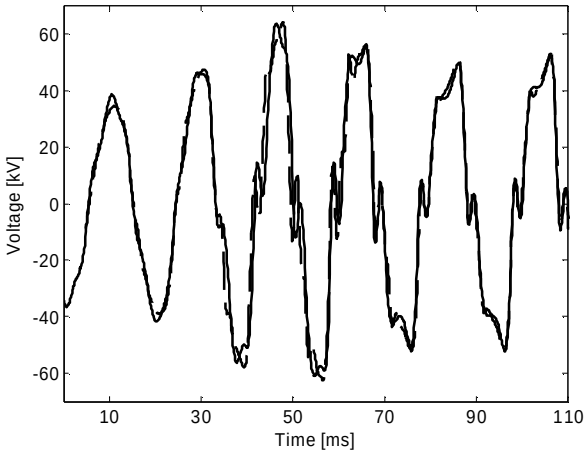
مدل هیسترزیس پیشنهادی



شکل۱۳- ولتاژ VT مدل هیسترزیس پیشنهادی در حالت ماندگار فرورزونانس

اندازه گیری

مدل هیسترزیس پیشنهادی



شکل۱۴- تغییرات اندازه گیری شدهٔ ولتاژ VT در مقایسه با مدل هیسترزیس پیشنهادی در حالت گذرای تغیر مد از حالت عادی به مد فرورزونانس (شروع فرورزونانس)

اندازه گیری

مدل هیسترزیس پیشنهادی

همچنین این مدل بهتر و دقیق تر از مدل EMTP قادر به تعیین اضافه ولتاژها، شکل موج فرورزونانس و تلفات هسته در شرایط گذرا و ماندگار است. اضافه ولتاژ گذرای فرورزونانس که دارای بزرگترین دامنه است از نظر ملاحظات عایقی و همچنین هماهنگی عایقی سیستم قدرت دارای اهمیت فوق العاده است و مدل پیشنهادی می تواند این اضافه ولتاژ را بطور دقیق تعیین نماید.

نکتهٔ جالب توجه دیگر آن است که با وجود اینکه در نظر گرفتن هیسترزیس در یک مدل ترانسفورماتور باعث می شود که آن مدل از نظر فیزیکی صحیح تر باشد، ولی نتایج بررسی این مقاله نشان می دهد که چنانچه هیسترزیس به صورت دقیق مدل نشود می تواند باعث خطای زیاد شود. در نمونهٔ بررسی شده در این مقاله، خطای مدل EMTP در تعیین ولتاژ شروع فرورزونانس برابر ۱۳/۸% است در حالی که مدل پیشنهادی دارای خطای ۰/۶۵% است. همچنین خطای مدل EMTP در تعیین پیک اضافه ولتاژ گذرا و حالت ماندگار به ترتیب برابر ۱۷/۹۵% و ۸/۶% بوده و این خطاها در مورد مدل پیشنهادی برابر ۰/۶۳-% و ۰/۲۹% است که نشان دهندهٔ دقت بالای مدل مذکور در مدلسازی رفتار حالت گذرای هستهٔ ترانسفورماتور و پدیدهٔ فرورزونانس است.

۷- ضمیمه

الف) پارامترهای مدار تست فرورزونانس

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ترانسفورماتور آزمایشگاهی فشار قوی:
220 V/ 100 kV, 50 Hz, 5 kVA, Z_{SC} = 2.6%

سایر پارامترها:

R_S=50 kΩ, C_S=1200 pF, C_{m1}=100 pF, C_{m2}=300 pF, R_{Sh1}=20 Ω, R_{Sh2}=630 kΩ, R_{Sh3}=33 kΩ

ب) پارامترهای مدل هیسترزیس Preisach:

n =3, λ_1=78.997, λ_2=24.3, λ_3=62.453, P_1=186.2, P_2=56.18, P_3=18.98, c_1=0.21355, c_2=0.0956, c_3=0.26015, k_B =0.0001

۸ - مراجع

[1] Iravani M. R., Chaudhary A. K. S., Giesbrecht W. J., et. Al. "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients—Part III: The Study of Ferroresonance", Slow Transients Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of Systems Transients Using Digital Programs, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Jan. 2000.

[2] Jacobson D., "Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System", IEEE PES annual meeting, Toronto, Canada, July 2003

[3] Dugan, R.C.; "Examples of Ferroresonance in Distribution Systems", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, 13-17 July 2003.

[4] Dommel H.W., EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Portland, August 1986.

[5] Preisach F., "Uber die magnetische nachwerikung", Zeitschrift fur Physik, Vol. B 94, pp. 227-302, 1935.

[6] Liorzou F., Phelps B. and Atherton D. L., "Macroscopic Models of Magnetization", IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No. 2, March 2000.

[۷] رضائی زارع، افشین، "**مدلسازی ترانسفورماتور جهت تحلیل فرورزونانس**"، رسالهٔ دکترا، دانشگاه تهران، ۱۹۰ صفحه، دی ماه ۱۳۸۵

[8] Mork B.A. and Stuehm D.L., "Application of Nonlinear Dynamics and Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.2, pp. 1009-1017, Apr. 1994.

[9] Rezaei-Zare A., Sanaye-Pasand M., Mohseni H., Farhangi Sh., Iravani R., Analysis of Ferroresonance Modes in Power Transformers Using Preisach-Type Hystertic Magnetizing Inductance , IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 919-929, April 2007.

[10] Rezaei-Zare A., Iravani R., Sanaye-Pasand M., Mohseni H., Farhangi Sh., An Accurate Current Transformer Model Based on Preisach Theory for the Analysis of Electromagnetic Transients , IEEE Trans.
On Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pp. 233-242, January 2008.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-14]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com