

# مدلسازی پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورها با استفاده از مدل جدید

## هیستریزیس هسته

افشین رضائی زارع، مجید صنایع پسند، حسین محسنی، شاهرخ فرهنگ  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران  
تهران - ایران

**چکیده:** در این مقاله، پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورها مورد مطالعه و مدلسازی قرار می گیرد. با استفاده از تئوری Preisach یک مدل جدید هیستریزیس معرفی می شود که برخلاف بیشتر مدل‌های موجود که مدل‌های صرفاً ریاضی بوده، این مدل بر اساس تئوری فیزیکی هیستریزیس بیان می شود. در نتیجه با استفاده از این مدل دقیقتر می توان حلقه های هیستریزیس 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 هیستریزیس برنامه گذرای EMTP که به عنوان یکی از بهترین مدل‌های هیستریزیس موجود شناخته می شود، جهت مقایسه ارائه می گردد. نتایج این بررسی نشان می دهند که در مطالعات فرورزونانس، در نظر گرفتن اثر هیستریزیس هسته ترانسفورماتور الزامی بوده و مدل هیستریزیس پیشنهادی دقیقتر از سایر مدل‌های موجود مانند مدل برنامه EMTP قادر به مدلسازی پدیده فرورزونانس است.

**واژه های کلیدی:** ترانسفورماتور، فرورزونانس، هسته، هیستریزیس، 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

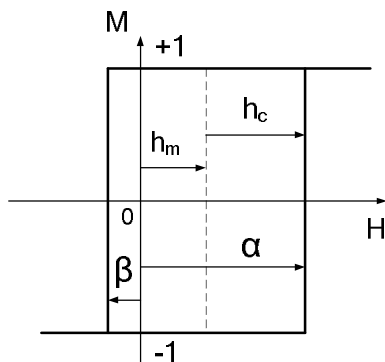
### Abstract :

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.



## ۱- مقدمه



شکل ۱- مشخصه مغناطیسی دوقطبی پایه مدل Preisach

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

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، می‌توان برای این دو قطبی، دو میدان  $h_m$  که میدان جابجایی و  $h_c$  که میدان Coercive نامیده می‌شوند، تعریف کرد. تعداد دوقطبی‌هایی که در محدوده  $(h_c, h_m)$  تا  $(h_c+dh_c, h_m+dh_m)$  هستند از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$dn = g(h_c, h_m) dh_c dh_m \quad (1)$$

تابع  $\gamma$  تابع چگالی توزیع دو قطبی‌ها در ماده است و دارای مشخصات زیر است:

$$g(h_c, h_m) = 0 \quad \text{برای } h_c < 0 \quad (2)$$

$$g(h_c, h_m) = g(h_c, -h_m) \quad \text{برای سایر مقادیر } h_c$$

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

$$g(h_c, h_m) = \frac{1}{2ps_c s_m} \exp\left[-\frac{(h_c - \bar{h}_c)^2}{2s_c^2}\right] \exp\left[-\frac{h_m^2}{2s_m^2}\right] \quad (3)$$

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

یکی از پدیده‌های جالب و پیچیده مرتبط با ترانسفورماتورها، پدیده فرورزونانس است. سالهای متمادی است که این پدیده در سطوح مختلف ولتاژی شبکه‌های کشورهای مختلف رخ می‌دهد [3]-[1] که عمدتاً به از بین رفتن تجهیزات شبکه منجر شده است ولی هنوز نمی‌توان 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 همه ترکیبات مختلف شرایط اولیه و حالت‌های گذرا باعث می‌شود که تجزیه و تحلیل و پیش بینی فرورزونانس چندان با اطمینان انجام نشود.

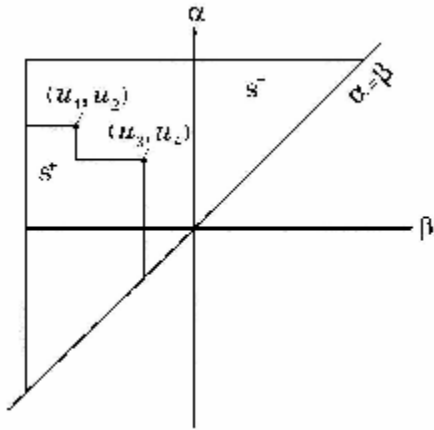
تحقیقات انجام شده در زمینه فرورزونانس نشان می‌دهند که نتایج شبیه سازی حساسیت زیادی به روش تعریف مشخصه اشباع مغناطیسی و تلفات هسته داشته و مدل‌های ترانسفورماتور موجود دارای خطای زیادی در مدلسازی و شبیه سازی فرورزونانس هستند [1]. تلفات هسته از تلفات جریان گردشی و هیستریزس تشکیل می‌شود. تلفات جریان گردشی با توان دو شار مغناطیسی و فرکانس متناسب است. در نتیجه یک مقاومت ثابت با دقت خوبی می‌تواند این تلفات را مدل کند [4]. ولی تلفات هیستریزس به فرکانس و سطح محور در منحنی هیستریزس و در نتیجه به مدل هیستریزس وابسته است. بنابراین برای مدلسازی دقیق مشخصه مغناطیسی و تلفات هسته که دو پارامتر اصلی در مطالعه پدیده فرورزونانس هستند و همچنین برای تکمیل مدل‌های موجود ترانسفورماتور، باید مدل دقیقی از هیستریزس به این مدل‌ها اضافه شود. در این مقاله بر اساس یکی از دقیق ترین تئوری‌های فیزیکی هیستریزس که به تئوری Preisach موسوم است [5] یک مدل جدید هیستریزس با فرمول بندی جدید ارائه شده و در برنامه حالت گذرای PSCAD/EMTDC پیاده سازی شده است که در ذیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل جدید هیستریزس بر اساس تئوری Preisach

در تئوری Preisach یک المان دوقطبی پایه معرفی می‌شود که مشخصه آن در شکل (۱) نشان داده شده است. ماده مجموعه‌ای از این المان‌ها است که دارای رفتار مستقلی هستند و در سراسر ماده بصورت تصادفی توزیع شده‌اند. این دو قطبی دو وضعیت مغناطیسی نسبی +۱ و -۱ می‌تواند داشته باشد. برای یک میدان مغناطیسی افزایشی، وقتی میدان

با معلوم بودن تابع توزیع چگالی دوقطبی های  $\gamma$ ، مغناطیس شدن ماده در مدل Preisach بوسیله دیگرام Preisach تعیین می شود. با توجه به

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



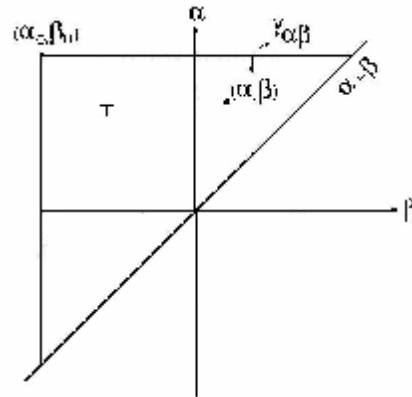
شکل ۳- دیگرام Preisach به ازاء یک میدان مغناطیسی با ماکزیمم ها و مینیمم های نزولی

### ۳- پیاده سازی مدل Preisach در برنامه 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 برنامه حالت گذرا دارای دو مشکل اساسی است. اولین مشکل، محاسبه یک انتگرال دوگانه به روش عددی است که بسیار وقت گیر است. مشکل بعدی مربوط به محاسبه تابع چگالی توزیع دوقطبی های  $\gamma$  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 ناحیه  $S^+$  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]:

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



شکل ۲- دیگرام Preisach و مثلث حدی T

این نکته که  $\beta$  نمی تواند از  $\alpha$  بزرگتر باشد، در صفحه  $\alpha-\beta$  که در شکل (۲) نشان داده شده است و به دیگرام Preisach موسوم است ناحیه معتبر قرار گرفتن دو قطبی های مغناطیسی، قسمت سمت چپ و بالای خط  $\alpha=\beta$  است. همچنین به علت متناهی بودن تعداد دوقطبی ها، ناحیه بالای این خط بوسیله مثلث T که به مثلث حدی موسوم است، محدود می شود. بنابراین کل دو قطبی های ماده در ناحیه داخل مثلث T قرار دارند. مختصات راس مثلث T که با  $(\alpha_0, \beta_0)$  مشخص می شود معرف دامنه بزرگ میدان مغناطیسی است که به ازاء آن ماده بطور کامل اشباع می شود.

بطور کلی با یک میدان مغناطیسی متغیر که دامنه نقاط ماکزیمم محلی آن، به صورت یکنوا در حال کاهش و نقاط مینیمم محلی آن، به صورت یکنوا در حال افزایش است دیگرام 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 ناحیه تقسیم شده 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 سابقه مغناطیسی ماده وابسته است. در عمل نیز هیستریزس مواد، ویژگی اثر پذیر بودن از شرایط مغناطیسی قبلی را از خود نشان می دهند. بنابراین مدل Preisach به خوبی قادر به مدلسازی سابقه مغناطیسی مواد است در حالی که مدل های ریاضی فاقد این ویژگی می باشند. مقدار مغناطیس شدگی ماده در هر لحظه از رابطه زیر بدست می آید:



$$H_e = H + k_B \cdot I(H_e) \quad (8)$$

که در آن  $k_B$  ضریب شار پیوندی  $\lambda$  و ثابت اثر متقابل مغناطیسی است. با توجه به روابط بالا، می توان اندوکتانس متغیر هسته را با محاسبه 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:

$$\frac{dI}{dH} = \left( \frac{\frac{\partial F(a, b)}{\partial a}}{1 - k_B \cdot \frac{\partial F(a, b)}{\partial a}} \right)_{a=H_e(t), b=m_{n-1}} \quad (9)$$

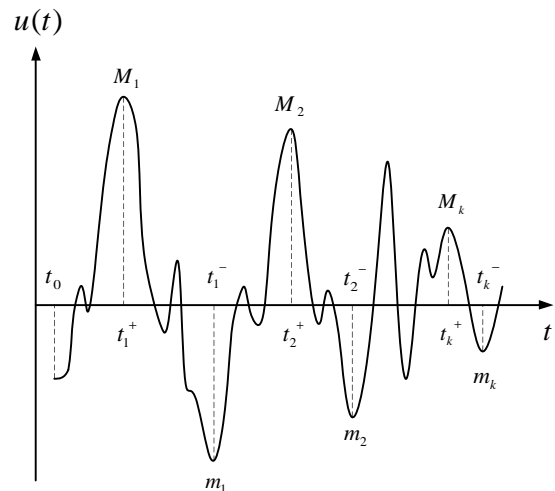
$$\frac{dI}{dH} = \left( \frac{\frac{\partial F(a, b)}{\partial b}}{1 - k_B \cdot \frac{\partial F(a, b)}{\partial b}} \right)_{b=H_e(t), a=M_n} \quad (10)$$

#### ۴- تست فرورزونانس ترانسفورماتور ولتاژ

جهت مطالعه پدیده فرورزونانس با مدل پیشنهادی، یک ترانسفورماتور ولتاژ سه سیم پیچه با ولتاژهای 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 ثانویه 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

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 حافظه مدل Preisach

$$f(t) = -F(a_0, b_0) + 2 \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + 2F(u(t), m_{n-1}) \quad (6)$$

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 شده حلقه هیستریزاس بدست می آید:

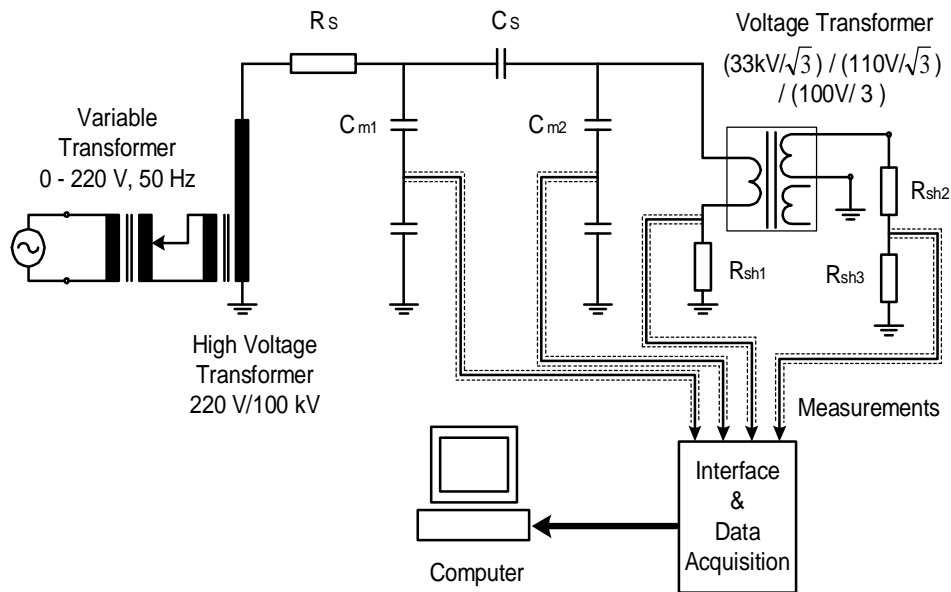
$$F(x(a, b)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^q I_i [\tanh(P_i x) + c \operatorname{sech}^2(P_i x)]$$

که در رابطه اخیر:

$$\begin{aligned} x = b, \quad 0 \leq c \leq 0.5 & \quad \text{برای قسمت بالایی حلقه اصلی} \\ x = a, \quad -0.5 \leq c \leq 0 & \quad \text{برای قسمت پایینی حلقه اصلی} \\ \sum I_i = I_s \quad I_i > 0 \quad P_i > 0 & \end{aligned}$$

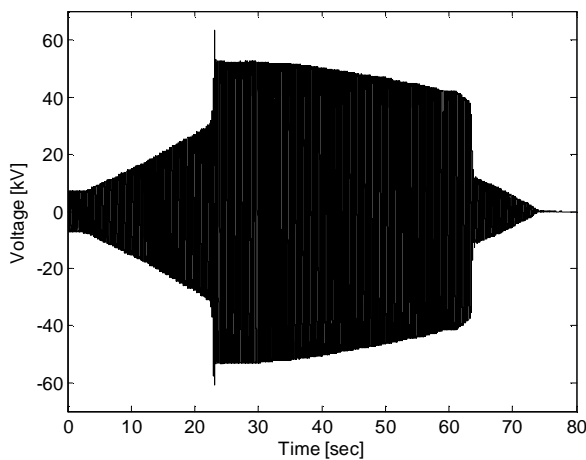
برای اینکه اثر متقابل حوزه های مغناطیسی ماده در نظر گرفته شود، یک میدان مغناطیسی موثر به صورت زیر تعریف و در مدل در نظر گرفته می شود:





شکل ۵- مدار تست فرورزونانس ترانسفورماتور ولتاژ

۲۱/۷۱ pu) و پیک ولتاژ VT به ۳۰/۶ kV (۱/۱۳۶ pu) 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 ۲۱/۷۱ kV، 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 ۹/۶۵ kV (۰/۵۱ pu) برسد، ادامه می یابد. در لحظه قطع فرورزونانس ولتاژ VT از مقدار پیک ۳۸/۴ kV (۱/۴۳ pu) به ۱۱/۸ kV جهش پیدا می کند.



شکل ۶- تغییرات ولتاژ VT در طول تست فرورزونانس

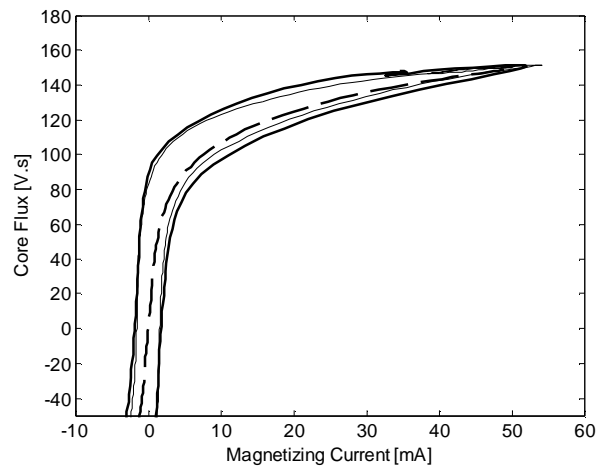
پیچ اولیه قابل اندازه گیری است. مقدار این مقاومت بسته به ترانسفورماتور ولتاژ در محدوده چند اهم تا چند ده اهم مناسب می باشد. در این آزمایش جهت اندازه گیری و ثبت سیگنال های جریان و ولتاژ از یک مجموعه سیستم دیجیتال متشکل از یک مدار واسط و یک کامپیوتر استفاده شده است. مدار واسط که در آزمایشگاه فشارقوی دانشگاه 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 ورستورهای محدود کننده 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 و جریان 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]. اندازه 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 ۳۸/۴ kV

## ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی با اندازه گیری

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

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

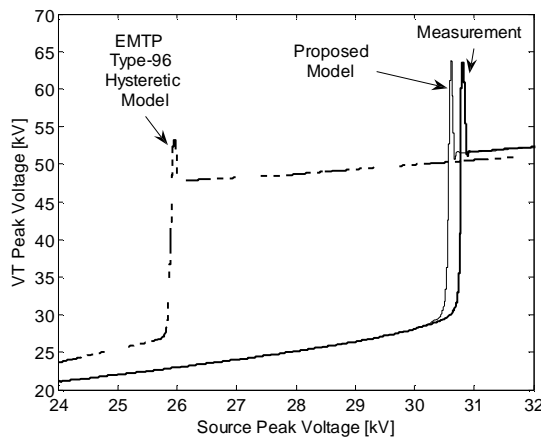


شکل ۷- مشخصه مغناطیسی مدل پیشنهادی در مقایسه با هیستریزیس اندازه گیری شده  
 اندازه گیری —————  
 مدل هیستریزیس پیشنهادی - - - - -

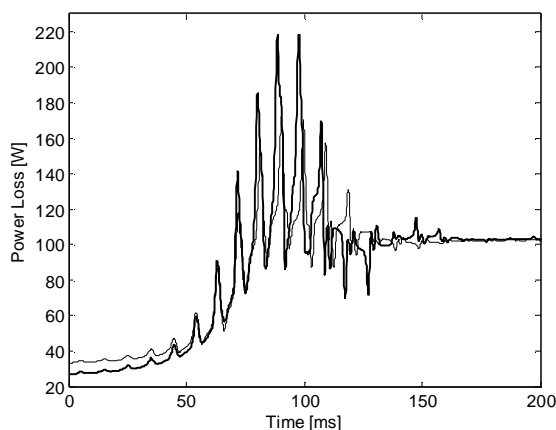
شکل ۷- مشخصه مغناطیسی مدل پیشنهادی در مقایسه با هیستریزیس اندازه گیری شده  
 حلقه اصلی هیستریزیس را مدل کند. هیستریزیس هسته در قسمت زانو دارای عرض بیشتری نسبت به قسمت های دیگر است. مدل پیشنهادی نیز به خوبی این وضعیت را نشان می دهد. همچنین شیب نهایی مشخصه هیستریزیس نیز به خوبی توسط مدل پیشنهادی مدل می 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 دامنه 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. دامنه ولتاژ منبع در هنگام شروع فرورزونانس برای این مدل ها به ترتیب برابر  $25/85$  kV و  $30/5$  kV می باشد. نتایج تست نشان می دهد که VT در ولتاژ بالاتر  $30/7$  kV 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.

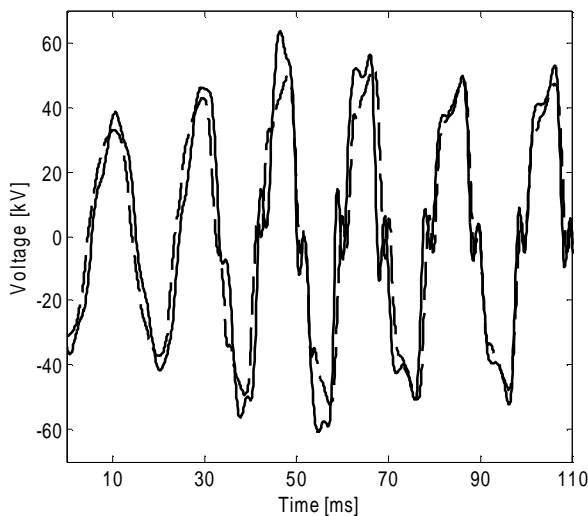


شکل ۸- تغییرات پیک ولتاژ VT بر حسب پیک ولتاژ منبع بدست آمده از اندازه گیری و مقایسه آن با مدلها



شکل ۹- تغییرات تلفات VT مدل EMTP در هنگام شروع فرورزونانس  
 اندازه گیری —————  
 مدل EMTP - - - - -

شکل (۱۳) نتایج بسیار نزدیک ولتاژ حالت ماندگار فرورزونانس مدل و اندازه گیری را نشان می دهد. همچنین شکل (۱۴) نشان می دهد که در حالت گذرای تغییر مد VT از حالت عادی به فرورزونانس، ولتاژ گذرای مربوطه و مقدار پیک آن با دقت بسیار خوبی توسط مدل پیشنهادی تعیین می شود. نتایج بررسی های دیگر فرورزونانس در ترانسفورماتورهای قدرت [۷]، [۹] و همچنین مطالعه حالت های گذرای ترانسفورماتورهای اندازه گیری جریان [۷]، [۱۰] نیز موبد دقت بالای الگوریتم و مدل پیشنهادی در مدلسازی رفتار حالت گذرای هسته ترانسفورماتورها است.



شکل ۱۱- تغییرات ولتاژ VT در حالت گذرای تغییر مد از حالت عادی به مد فرورزونانس (شروع فرورزونانس)  
 اندازه گیری —————  
 مدل EMTP - - - - -

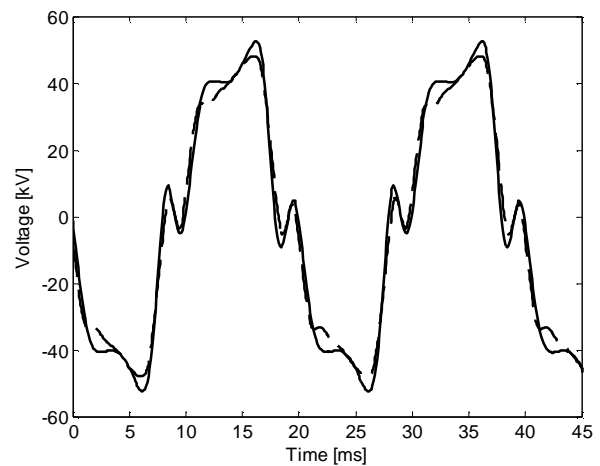
## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله مدل جدیدی از هیستریزس هسته آهنی بر اساس تئوری Preisach و با فرمول بندی جدید معرفی گردید. همچنین مدار و روال انجام آزمایش فرورزونانس یک ترانسفورماتور ولتاژ 33 kV و تشریح و نتایج آن ارائه گردید. سپس آزمایش فرورزونانس با استفاده از مدل هسته پیشنهادی و مدل برنامه EMTP که از دقیقترین برنامه های حالت گذرا 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

تلف توان VT قبل از شروع فرورزونانس ۲۹ W است که پس از طی یک حالت گذرا به مقدار ماندگار ۱۰۳ W می رسد. با وجود اینکه مدل EMTP با ولتاژ کمتر به حالت فرورزونانس می رود ولی تلف توان VT این مدل از مقدار تست بیشتر است. قبل از فرورزونانس تلفات این مدل برابر ۳۵ W است که در حالت فرورزونانس به مقدار اندازه گیری شده ۱۰۳ W می رسد. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، مدل EMTP قادر به مدلسازی دقیق تلفات گذرای VT در هنگام تغییر مد 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

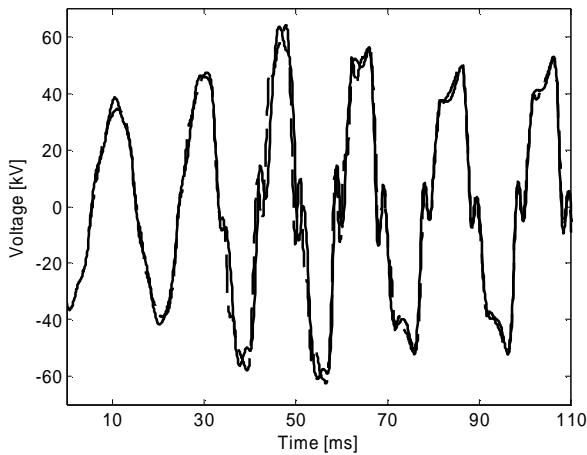


شکل ۱۰- ولتاژ VT مدل EMTP در حالت ماندگار فرورزونانس  
 اندازه گیری —————  
 مدل EMTP - - - - -

به هم شبیه بوده ولی پیک ولتاژ مدل EMTP به ۴۸ kV می رسد که کمتر از مقدار اندازه گیری شده ۵۲/۴ kV است. شکل (۱۱) تغییرات ولتاژ VT را در حالت گذرای تغییر مد نشان می دهد. پیک ولتاژ VT این حالت که بیشترین دامنه ولتاژ بوده و از نظر عایقی بسیار حائز اهمیت است به ۶۳/۵ kV می رسد، در حالی که پیک ولتاژ بدست آمده از مدل EMTP برابر ۵۲/۱ kV است که بطور قابل ملاحظه ای کمتر از مقدار اندازه گیری است. در مجموع مدل EMTP چندان قادر به مدلسازی دقیق حالت گذرای تغییر مد از حالت عادی به فرورزونانس نیست.

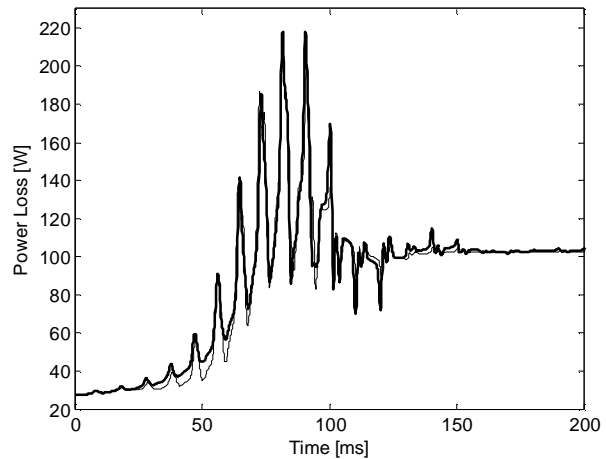
شکل (۱۲) تلفات مدل هیستریزس پیشنهادی را در مقایسه با اندازه گیری نشان می دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، این مدل قادر است تلفات VT را در هر سه حالت قبل از فرورزونانس، حالت گذرای تغییر مد و حالت ماندگار فرورزونانس بصورت دقیق مدل کند.





شکل ۱۴- تغییرات اندازه گیری شده ولتاژ VT در مقایسه با مدل هیستریزیس پیشنهادی در حالت گذرای تغییر مد از حالت عادی به مد فرورزونانس (شروع فرورزونانس) اندازه گیری ————— مدل هیستریزیس پیشنهادی - - - - -

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



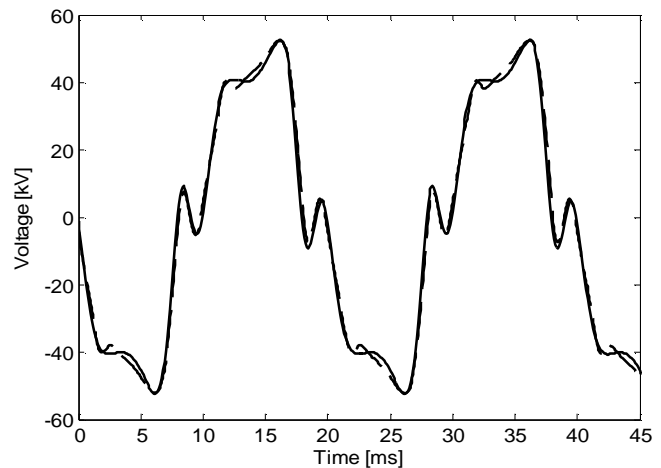
شکل ۱۲- تغییرات تلفات VT مدل هیستریزیس پیشنهادی در هنگام شروع فرورزونانس اندازه گیری ————— مدل هیستریزیس پیشنهادی - - - - -

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.

نکته جالب توجه دیگر آن است که با وجود اینکه در نظر گرفتن هیستریزیس 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 هیستریزیس به صورت دقیق مدل نشود می تواند باعث خطای زیاد شود. در نمونه 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 دهنده دقت بالای مدل مذکور در مدلسازی رفتار حالت گذرای هسته ترانسفورماتور و پدیده فرورزونانس است.

#### ۷- ضمیمه

#### الف) پارامترهای مدار تست فرورزونانس



شکل ۱۳- ولتاژ VT مدل هیستریزیس پیشنهادی در حالت ماندگار فرورزونانس اندازه گیری ————— مدل هیستریزیس پیشنهادی - - - - -

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

سایر پارامترها:

$R_S=50 \text{ k}\Omega$ ,  $C_S=1200 \text{ pF}$ ,  $C_{m1}=100 \text{ pF}$ ,  $C_{m2}=300 \text{ pF}$ ,  $R_{Sh1}=20 \text{ }\Omega$ ,  $R_{Sh2}=630 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{Sh3}=33 \text{ k}\Omega$

(ب) پارامترهای مدل هیستریزیس Preisach:

$n=3$ ,  $\lambda_1=78.997$ ,  $\lambda_2=24.3$ ,  $\lambda_3=62.453$ ,  $P_1=186.2$ ,  $P_2=56.18$ ,  $P_3=18.98$ ,  $c_1=0.21355$ ,  $c_2=0.0956$ ,  $c_3=0.26015$ ,  $k_B=0.0001$

## ۸ - مراجع

- [1] Irvani 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., "Über die magnetische nachwirkung", Zeitschrift für 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 دکترای 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., Irvani R., Analysis of Ferroresonance Modes in Power Transformers Using Preisach-Type Hysteric Magnetizing Inductance , IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 919-929, April 2007.
- [10] Rezaei-Zare A., Irvani 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.

