

تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی

بهرام نوشاد^۱، دانشجوی دکتری، مرتضی رزاز^۲، استادیار، سید قدرت اله سیف السادات^۳، استادیار
 ۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران- bahramnoshad@yahoo.com
 ۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران- razaz_m@scu.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز- ایران- seifossadat@yahoo.com

چکیده: پیش‌بینی عملکرد یک ترانسفورماتور جریان تحت شرایط گذرا برای حفاظت مناسب مورد نیاز است. هنگامی که یک خطای اتصال کوتاه در شبکه برق رخ می‌دهد ترانسفورماتور جریان به اشباع رفته و منجر به منحرف شدن جریان ثانویه می‌شود. در نتیجه این کار عملکرد رله‌های حفاظتی را تحت تاثیر قرار داده و رله‌های حفاظتی به طور ناخواسته عمل می‌کنند. بنابراین برای بررسی عملکرد رله‌های حفاظتی در شرایط اتصال کوتاه نیاز به یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان می‌باشد. در این مقاله یک مدل دقیق ریاضی برای یک ترانسفورماتور جریان جهت پیش‌بینی عملکرد گذرا با یک بار مختلط شامل اندوکتانس و مقاومت با در نظر گرفتن اشباع هسته بیان می‌شود. یک ترانسفورماتور جریان نمونه با نسبت تبدیل ۱۲۰/۵ با جریان‌های خطا افسر حداکثر شبیه‌سازی شده و پاسخ جریان ثانویه و شار برای مقادیر مختلف امپدانس بار محاسبه می‌شود. در این مقاله الگوریتم پیشنهادی جهت مدل کردن دقیق ترانسفورماتور جریان ارائه می‌شود و نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از نرم افزار ATP-EMTP مقایسه می‌شوند. همچنین نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با نتایج حاصل از مدل ترانسفورماتور جریان کمیته حفاظت سیستم قدرت IEEE مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل ترانسفورماتور جریان، عملکرد گذرا، اشباع هسته، خطای الکتریکی

Determination of an Accurate Current Transformer Model for the Analysis of Electromagnetic Transient During Electrical Faults

B. Noshad¹, M. Razzaz², S. G. A. Seifossadat³

1, 2, 3- Faculty of Electrical Engineering- Shahid Chamran University of Ahvaz

Abstract: It is necessary to predict the performance of a current transformer under transient conditions for appropriate protection. When a short circuit fault in the power system occurs, the current transformer approaches to saturation region and will be led to the secondary current distortion. Hence, it affects the protective relays operation and as a result, maloperation will occur for the protective relays. Thus, it needs an accurate model of current transformer under short circuit in order to analyze the protective relays operation. In this paper, An Accurate mathematical model is developed for a current transformer to predict the transient performance with a complex burden consisting of inductance and resistance, taking core saturation into account. A typical 1200/5 A current transformer will be simulated with various maximum offset fault currents. The secondary current and flux response will be computed for different values of burden impedance. To validate the method a comparison is made with ATP-EMTP time domain simulation program and with IEEE power system relaying committee current transformer model. The results give excellent agreement with the time domain simulation and IEEE model.

Keywords: Current Transformer model, Transient Operation, Core saturation, Electrical Faults.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۰۲/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۳/۲۳

نام نویسنده مسئول: بهرام نوشاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران- اهواز- بلوار گلستان- دانشگاه شهید چمران اهواز- دانشکده مهندسی- گروه برق.

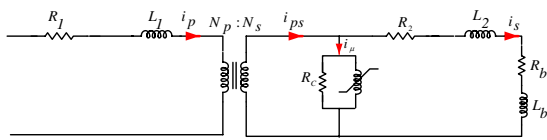
۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری مانند ترانسفورماتور جریان، ترانسفورماتور ولتاژ و ترانسفورماتور ولتاژ خازنی، سیگنال‌های ورودی برای رله‌های حفاظتی شبکه‌های برق را تهیه می‌کنند. جهت ارزیابی عملکرد یک رله حفاظتی براساس روش‌های شبیه‌سازی حوزه زمان گسسته، مدل‌های دقیق ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری مورد نیاز است. هنگامی که یک خطای اتصال کوتاه در شبکه برق رخ می‌دهد ترانسفورماتور جریان به اشباع رفته و منجر به منحرف شدن جریان ثانویه شده و عملکرد رله‌های حفاظتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در نتیجه رله‌های حفاظتی به طور ناخواسته عمل می‌کنند. برای بررسی عملکرد رله‌های حفاظتی در شرایط اتصال کوتاه نیاز به یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان می‌باشد. مقالات متعددی رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان تحت شرایط خطا را مطالعه کرده‌اند. در مقاله [۱] مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی رفتار واقعی مواد فرومغناطیس نمی‌باشد. در مقالات [۲]-[۵] از نرم‌افزار ATP-EMTP برای مطالعات گذرای ترانسفورماتور جریان استفاده شده است. در [۵] روش پیشنهادی نیازمند بدست آوردن یک تابع براساس پارامترهای ترانسفورماتور جریان داده شده می‌باشد تا بتواند به طور تقریب مشخصه‌های غیرخطی هسته ترانسفورماتور جریان را نمایش دهد. در این مدل، جریان مغناطیسی به جریان ثانویه اندازه‌گیری شده برای تخمین صحیح جریان ثانویه اضافه می‌شود. اگر ترانسفورماتور جریان یک خطای بزرگ جریان را ببیند، هسته می‌تواند اشباع شود و خروجی به شدت از شکل سینوسی منحرف می‌شود. این الگوریتم برای سیستم قدرت و حالت‌های مختلف خطا به خوبی قابل استفاده است، اما در این الگوریتم فرض شده که شار باقیمانده قبل از وقوع خطا صفر است. یک مدل عملی به کمک نرم‌افزار EMTDC در [۶] استفاده شده است که مشخصات شاخه مغناطیسی بوسیله یک سلف غیرخطی با مشخصات شار-جریان توصیف شده بوسیله یک سری توانی غیر عدد صحیح نشان داده شده است. تلفات جریان گردابی و هیستریزس بوسیله یک مقاومت غیرخطی موازی با شاخه مغناطیسی نشان داده شده است. نتایج این مدل نزدیک به تست‌های عملی می‌باشد. مدل‌های ریاضی هسته مغناطیسی بوسیله کمیته حفاظت سیستم قدرت IEEE در [۷] ارائه شده است. در این مقاله چهار مدل شامل آنهایی که از نرم‌افزار ATP-EMTP و EMTDC استفاده شده، ارائه گردیده است. در مدل Jiles-Atherton یک منحنی هیستریزس بوسیله تابع Langevin و تابع‌های دیگر نشان داده شده است. مدل‌های مختلف ترانسفورماتور جریان که در مرجع [۷] استفاده شده‌اند از مشخصات تک‌مقداره هسته استفاده کرده‌اند که قادر به تعیین شار باقیمانده هسته بعد از یک قطعی جریان نیستند. یک روش جدید برای بهبود مدل Jiles-Atherton در [۸] آورده شده است که تابع‌های منطقی برای نشان دادن منحنی هیستریزس بکار برده شده است. به عبارت دیگر جهت

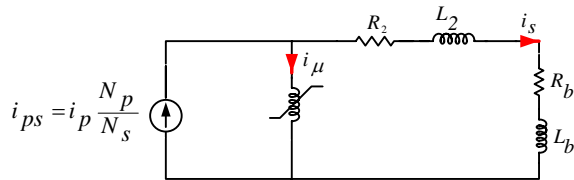
استفاده از مدل Jiles-Atherton تخمین پنج پارامتر ورودی مورد نیاز است. روش‌های متعددی برای حل این مسئله بر پایه مفاهیم فیزیکی [۹] و آزمون سعی و خطا [۱۰] وجود دارد. با این حال، این مدل‌ها خیلی وقت‌گیر هستند. راه دیگر برای تعیین اطلاعات ورودی استفاده از روش حداقل مربعات [۱۱] یا تکنیک سرد کردن تدریجی فلزات [۱۲] است. بنابراین اگر یک روش موثر در دسترس نباشد، مشکل شناسایی پارامترها عیب عمده این مدل می‌باشد. در [۱۳] یک تکنیک اصلاحی از انحراف جریان ثانویه بر اساس یک مدل که تاثیر جریان گردابی و هیستریزس در نظر گرفته شده، ارائه گردیده است. اما این مدل هیستریزس قادر به بازتولید خواص رفع و بستن نشان داده شده بوسیله حلقه‌های کوچک و جزئی [۱۴] نمی‌باشد. استفاده این مدل برای عملکرد حالت ماندگار محدود می‌شود. همچنین یک روش اصلاحی در [۱۵] آورده شده است که جریان اولیه با اندازه‌گیری جریان ثانویه و بکارگیری تکنیک حداقل مربعات تخمین زده می‌شود. برخلاف روش‌های ریاضی اصلاح شده که در این مقاله استفاده شده، خواص مغناطیسی ماده آهنی هسته در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۱۶] یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان براساس تئوری Preisach برای آنالیز گذرای مغناطیسی بیان شده است که به کمک این الگوریتم رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان با دقت بالا مدل شده است. در این مرجع برای یافتن مدل گذرای ترانسفورماتور جریان از معادلات بسیار پیچیده‌ای استفاده شده است. در مرجع [۱۷] آنالیز گذرای ترانسفورماتور جریان به کمک نرم‌افزار ATP-EMTP بیان شده که در مدل پیشنهادی سیم‌پیچ ثانویه با شاخه مغناطیسی غیرخطی موازی شده است. در این مرجع فاکتورهای که روی حالت گذرای ترانسفورماتور جریان تاثیر می‌گذرانند بررسی شده‌اند که می‌توان به نسبت راکتانس به مقاومت، کلاس دقت ترانسفورماتورهای جریان و بار اشاره کرد.

در این مقاله یک مدل برای پیش‌بینی رفتار گذرای یک ترانسفورماتور جریان با بار شامل اندوکتانس و مقاومت با در نظر گرفتن اشباع هسته بیان می‌شود. در این مقاله ابتدا به کمک الگوریتم پیشنهادی مدل ترانسفورماتور جریان آنالیز می‌شود. در این الگوریتم جهت حل معادلات دیفرانسیل از الگوریتم رانگ کوتا استفاده می‌شود که نتایج بدست آمده صحت و دقت بالای این روش حل عددی را نشان می‌دهد. سپس در ادامه مدل پیشنهادی ترانسفورماتور جریان به کمک نرم‌افزار ATP-EMTP آنالیز می‌شود و نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نرم‌افزار ATP-EMTP مقایسه می‌شوند. یک مدل ترانسفورماتور جریان بر اساس Type-96 از ATP-EMTP [۳ و ۱۸] با تعریف مناسب از منحنی مغناطیس شونده‌گی در این مقاله در نظر گرفته شده و از مشخصات این ترانسفورماتور جریان برای الگوریتم پیشنهادی نیز استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. همچنین نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با مدل ترانسفورماتور جریان کمیته حفاظت سیستم قدرت IEEE [۱۹] مقایسه می‌شوند. علی‌رغم این‌که در مدل

باعث افزایش شار در هسته می‌شود. افزایش شار باعث اشباع هسته می‌شود که منجر به انحراف جریان ثانویه می‌شود.



شکل ۲: مدار معادل ترانسفورماتور جریان



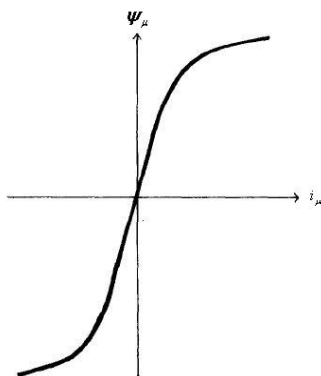
شکل ۳: مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به سمت ثانویه

۴- مشخصات مغناطیسی ترانسفورماتور جریان

مشخصات مغناطیسی ترانسفورماتور جریان در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور طبیعی جریان تحریک زیر اشباع کوچک می‌باشد، بنابراین منحنی مغناطیسی می‌تواند به صورت شکل تقریبی ۵ نشان داده شود. این منحنی در شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار گذرا ترانسفورماتور جریان بکار می‌رود. در اکثر مقالات در ناحیه خطی منحنی تقریبی جریان مغناطیس‌کننده صفر در نظر گرفته می‌شود اما در این مقاله منحنی به صورت دقیق در نظر گرفته شده است که معادلات حاصل از منحنی به صورت زیر می‌باشد:

$$i_{\mu} = \begin{cases} \frac{\psi_{\mu} - \psi_s}{L_s} + i_{\mu_0} & \psi_{\mu} > \psi_s \\ \frac{\psi_{\mu} + \psi_s}{L_s} - i_{\mu_0} & \psi_{\mu} < -\psi_s \\ i_{\mu_0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} & |\psi_{\mu}| \leq \psi_s \end{cases} \quad (2)$$

که ψ_{μ} شار پیوندی، ψ_s شار پیوندی در نقطه زانو از منحنی مغناطیس‌کنندگی، i_{μ} جریان مغناطیس‌کنندگی در نقطه زانوی از منحنی مغناطیس‌کنندگی و L_s شیب اشباع منحنی مغناطیس‌کنندگی می‌باشد.



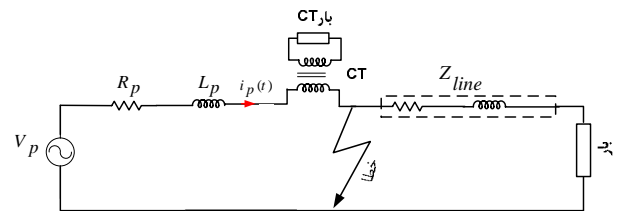
شکل ۴: مشخصات مغناطیسی یک ترانسفورماتور جریان

پیشنهادی اثر هیستریزس در نظر گرفته نشده و در حالی که مدل پیشنهادی IEEE اثر هیستریزس را لحاظ نموده‌اند اما نتایج هر دو تطابق خوبی با هم دارند. از مهمترین مزایای مدل پیشنهادی می‌توان به نیاز نداشتن به اطلاعات منحنی B-H برای منحنی مغناطیس-شوندگی، مدل نکردن اثر هیستریزس و انطباق نتایج با مدل پیشنهادی IEEE با در نظر گرفتن اثر هیستریزس و سرعت و دقت بالای محاسبات اشاره کرد. نتایج بدست آمده صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای مطالعات یک ترانسفورماتور جریان نمونه با نسبت تبدیل ۱۲۰۰/۵ [۱۹] با جریان‌های خطا افست حداکثر شبیه‌سازی شده است و پاسخ جریان ثانویه و شار برای مقادیرهای مختلف امپدانس بار محاسبه می‌شود.

۲- توصیف مساله

۱-۲- پدیده گذرا در سمت اولیه ترانسفورماتور جریان

هنگامی که یک خطا در یک شبکه برق مطابق شکل ۱ شامل مقاومت R_p و اندوکتانس L_p رخ می‌دهد جریان خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۱: خطا در شبکه برق

$$i_p = \frac{v_p}{(R_p^2 + \omega^2 L_p^2)^{1/2}} [\sin(\omega t + \theta - B) + \sin(B - \theta)e^{-\frac{t}{\tau_p}}] \quad (1)$$

که v_p ولتاژ پیک، θ زاویه فاز اولیه در لحظه خطا و $B = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L_p}{R_p}$ می‌باشد.

۳- مدل ریاضی ترانسفورماتور جریان

مدار معادل یک ترانسفورماتور جریان در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدار R_1 و L_1 شامل مقاومت و اندوکتانس اولیه و شبکه می‌باشند. R_2 و L_2 مقاومت و اندوکتانس ثانویه ترانسفورماتور جریان، R_b و L_b مقاومت و اندوکتانس بار می‌باشد. در اکثر مقالات از مقاومت، اندوکتانس نشستی اولیه و اندوکتانس ثانویه به علت کوچک بودن صرفه نظر شده است اما در این مقاله همگی آنها لحاظ شده‌اند. از آنجایی که مولفه تلفات هسته روی اشباع ترانسفورماتور جریان تاثیری ندارد از آن صرف نظر شده است [۲۰]. مدار معادل ترانسفورماتور جریان ارجاع داده شده به سمت ثانویه در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر جریان خطا از سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور جریان عبور کند، مولفه نامتقارن

$$i_s = \frac{N_p}{N_s} \sqrt{2} I_p (\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \sin(B - \theta) \cos wt) + \sin(wt) \cos(B - \theta) - \frac{(\psi_\mu - \psi_s)}{L_s} - i_{\mu 0} \quad (11)$$

از طرفین رابطه (۱۱) دیفرانسیل می‌گیریم:

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{p_1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + wp_1 \sin(wt)$$

$$\sin(B - \theta) + wp_1 \cos(wt) \cos(B - \theta) - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_\mu}{dt} \quad (12)$$

که $p_1 = \frac{N_p}{N_s} \sqrt{2} I_p$ از آنجایی که $e_s = \frac{d\psi_\mu}{dt}$ و طبق رابطه (۵) و (۱۱) و (۱۲) داریم:

$$\frac{d\psi_\mu}{dt} = \frac{R}{1 + \frac{L}{L_s}} \{ p_1 [\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \cos(wt) \sin(B - \theta) + \sin(wt) \cos(B - \theta)] - \frac{1}{L_s} (\psi_\mu - \psi_s) - i_{\mu 0} \} + \frac{L p_1}{1 + \frac{L}{L_s}} [w \sin(wt) \sin(B - \theta) - \frac{1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + w \cos(wt) \cos(B - \theta)] \quad (13)$$

که در این روابط τ_p ثابت زمانی سیستم قدرت می‌باشد.

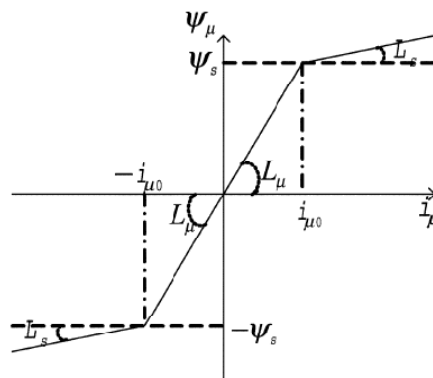
حالت دوم: برای $\psi_\mu < -\psi_s$:

$$i_\mu = \frac{1}{L_s} (\psi_\mu + \psi_s) - i_{\mu 0} \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۷) و (۱۴) داریم:

$$i_s = \frac{N_p}{N_s} \sqrt{2} I_p (\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \sin(B - \theta) \cos wt) + \sin(wt) \cos(B - \theta) - \frac{(\psi_\mu + \psi_s)}{L_s} + i_{\mu 0} \quad (15)$$

از طرفین رابطه (۱۵) دیفرانسیل می‌گیریم:



شکل ۵: مشخصه تقریبی مغناطیس کننده هسته ترانسفورماتور جریان

۵- آنالیز ریاضی یک ترانسفورماتور جریان با امپدانس بار $R-L$

مدار معادل که در شکل ۳ نشان داده شده در نظر گرفته می‌شود. در این مدار معادل ابتدا پارامترهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$R = R_2 + R_b \quad (3)$$

$$L = L_2 + L_b$$

طبق مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳ نشان داده شده داریم:

$$i_{ps} = i_\mu + i_s \quad (4)$$

$$e_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (5)$$

$$i_{ps} = \frac{N_p}{N_s} i_p \quad (6)$$

که i_{ps} جریان اولیه ارجاع شده به سمت ثانویه، i_μ جریان مغناطیس‌کنندگی، N_p تعداد دورهای اولیه، N_s تعداد دورهای ثانویه و e_s ولتاژ القا شده در سیم پیچ ثانویه است.

از رابطه (۱) و (۴) داریم:

$$i_s = \frac{N_p}{N_s} \sqrt{2} I_p (\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \sin(B - \theta) \cos wt + \sin(wt) \cos(B - \theta)) - i_\mu \quad (7)$$

$$I_p = \frac{V_p / \sqrt{2}}{(R_p^2 + w^2 L_p^2)^{1/2}} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن اشباع، منحنی مغناطیسی‌شوندگی نشان داده شده در شکل (۵) به سه ناحیه تقسیم می‌شوند:

حالت اول: برای $\psi_\mu > \psi_s$:

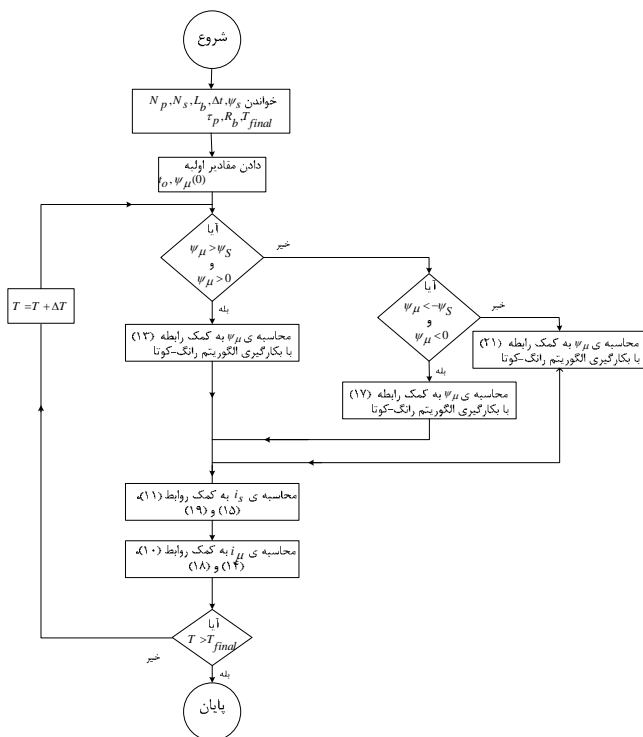
$$\psi_\mu = L_s i_\mu - L_s i_{\mu 0} + \psi_s \quad (9)$$

$$i_\mu = \frac{(\psi_\mu - \psi_s)}{L_s} + i_{\mu 0} \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۷) و (۱۰) داریم:

$$\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = \frac{R}{1 + \frac{i_{\mu 0}}{\psi_s}} \{ p_1 [\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \cos(\omega t)] + \sin(B - \theta) + \sin(\omega t) \cos(B - \theta) \} - \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} i_{\mu 0} \} + \frac{L p_1}{1 + \frac{i_{\mu 0}}{\psi_s}} [w \sin(\omega t) \sin(B - \theta) - \frac{1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + w \cos(\omega t) \cos(B - \theta)] \quad (21)$$

طبق الگوریتم رانگ کوتا و با توجه به روابط (۱۳) و (۱۷) و (۲۱) ψ_{μ} بدست می‌آید. در حل معادلات به کمک الگوریتم رانگ کوتا فاصله زمانی ۱۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. بعد از یافتن ψ_{μ} طبق روابط ذکر شده می‌توان جریان ثانویه را بدست آورد. به طور کلی فلوجارت یافتن جواب‌های بهینه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: فلوجارت پیشنهادی الگوریتم

۶- آنالیز یک ترانسفورماتور جریان به کمک نرم‌افزار

ATP-EMTP

شبکه برقی که در شکل ۱ نشان داده شده را در نظر می‌گیریم. هنگامی که خطا در شبکه فوق رخ می‌دهد مدار معادل ترانسفورماتور جریان به صورت شکل ۲ و ۳ می‌باشد. جهت آنالیز ترانسفورماتور جریان در این بخش از نرم‌افزار ATP-EMTP استفاده شده است که

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{p_1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + w p_1 \sin(\omega t) \sin(B - \theta) + w p_1 \cos(\omega t) \cos(B - \theta) - \frac{1}{L_s} \frac{d\psi_{\mu}}{dt} \quad (16)$$

از آنجایی که $\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = e_s$ و طبق رابطه (۵) و (۱۵) و (۱۶) داریم:

$$\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = \frac{R}{1 + \frac{L}{L_s}} \{ p_1 [\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \cos(\omega t)] + \sin(B - \theta) + \sin(\omega t) \cos(B - \theta) \} - \frac{1}{L_s} (\psi_{\mu} + \psi_s) + \frac{L p_1}{1 + \frac{L}{L_s}} [w \sin(\omega t) \sin(B - \theta) - \frac{1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + w \cos(\omega t) \cos(B - \theta)] \quad (17)$$

حالت سوم: $|\psi_{\mu}| \leq \psi_s$

$$i_{\mu} = i_{\mu 0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} \quad (18)$$

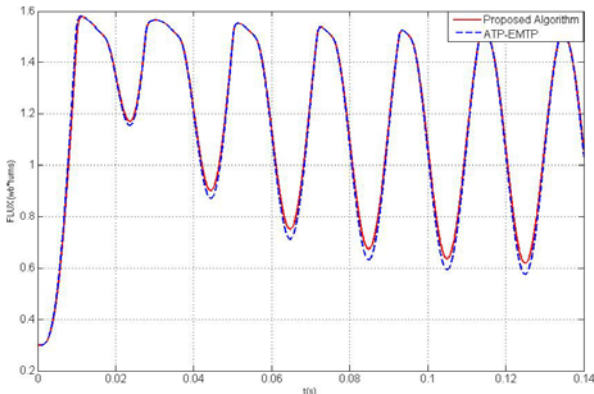
با توجه به رابطه (۷) و (۱۸) داریم:

$$i_s = \frac{N_p}{N_s} \sqrt{2} I_p (\sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} - \sin(B - \theta) \cos \omega t + \sin(\omega t) \cos(B - \theta)) - i_{\mu 0} \frac{\psi_{\mu}}{\psi_s} \quad (19)$$

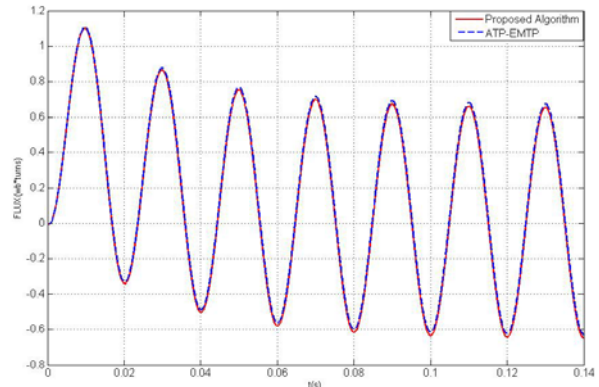
از طرفین رابطه (۱۹) دیفرانسیل می‌گیریم:

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{p_1}{\tau_p} \sin(B - \theta) e^{-t/\tau_p} + w p_1 \sin(\omega t) \sin(B - \theta) + w p_1 \cos(\omega t) \cos(B - \theta) - \frac{i_{\mu 0}}{\psi_s} \frac{d\psi_{\mu}}{dt} \quad (20)$$

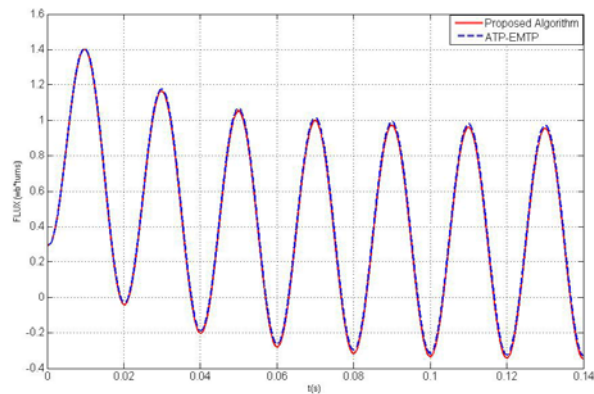
از آنجایی که $\frac{d\psi_{\mu}}{dt} = e_s$ و طبق رابطه (۵) و (۱۹) و (۲۰) داریم:



شکل ۱۰: شکل موج شار به کمک الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار ATP-EMTP با مقاومت بار صفر و سلف ۹/۲ میلی هانری

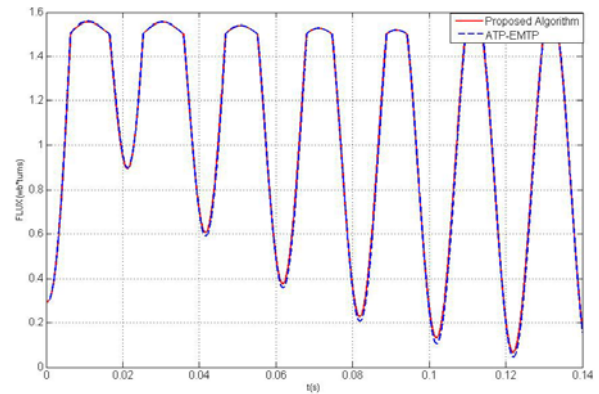


شکل ۱۱: شکل موج شار به کمک الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار ATP-EMTP با مقاومت بار ۲ اهم و سلف ۹/۲ میلی هانری



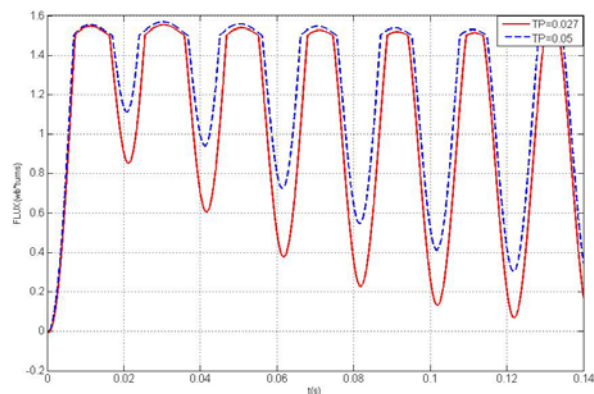
شکل ۱۲: شکل موج شار به کمک الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار ATP-EMTP با مقاومت بار ۲ اهم و سلف ۹/۲ میلی هانری

سناریو دوم: شار اولیه صفر در نظر گرفته نشود. در این حالت شار اولیه ۲۰ درصد شار نقطه زانوی اشباع منحنی مغناطیس شوندهی ترانسفورماتور جریان در نظر گرفته شده است. در ترانسفورماتور جریان برخلاف ترانسفورماتور قدرت، هرچه شار از نقطه زانوی اشباع دورتر باشد برای عملکرد رله های حفاظتی مناسب تر می باشد. زیرا در اثر وقوع یک خطا مدت زمان بیشتری طول می کشد تا به ناحیه اشباع برود و اشباع هسته ترانسفورماتور جریان منجر به اعوجاج در جریان ثانویه شود. نتایج حاصل به ازای بارهای مختلف به کمک الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار ATP-EMTP در شکل های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

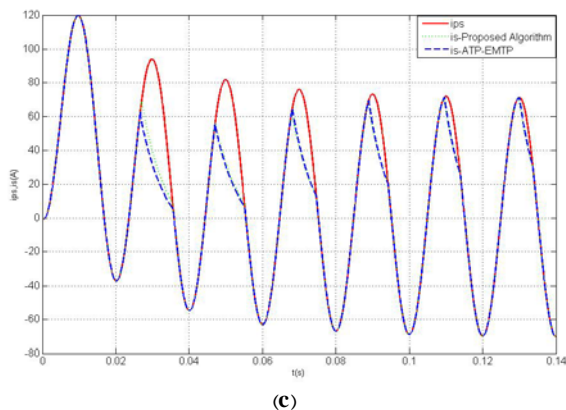


شکل ۱۳: شکل موج شار به کمک الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار ATP-EMTP با مقاومت بار ۲ اهم و سلف ۹/۲ میلی هانری

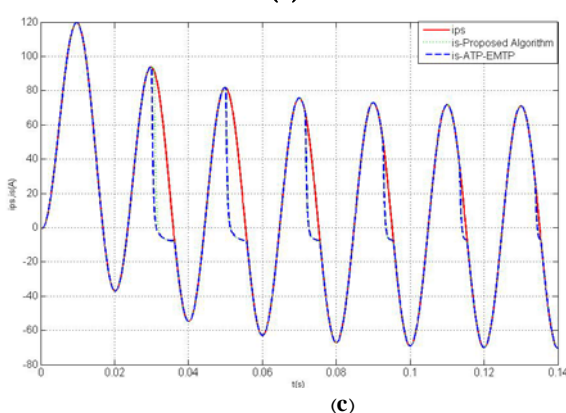
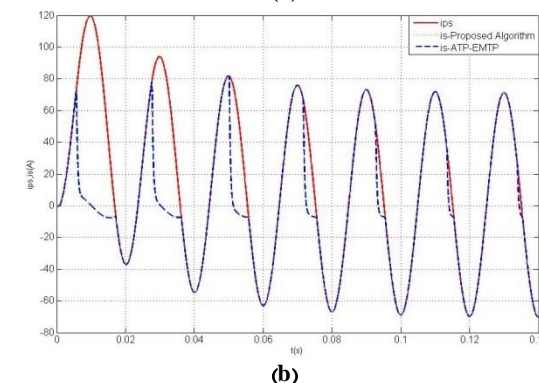
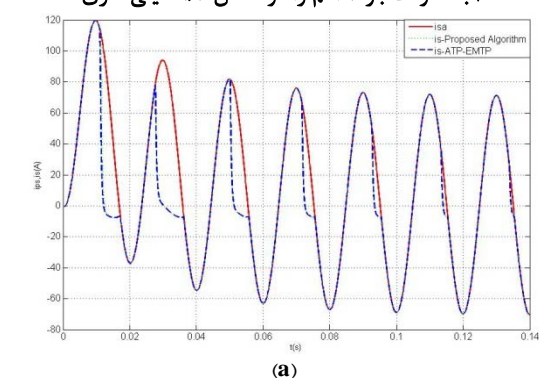
همچنین ثابت زمانی شبکه بر میزان میرایی مولفه DC جریان خطا تاثیر می گذارد. این مولفه DC می تواند اشباع هسته ترانسفورماتور جریان را حاصل شود. هرچه ثابت زمانی شبکه بزرگتر باشد ترانسفورماتور جریان در سطح بالاتری از اشباع باقی می ماند که به کمک الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱۴ این موضوع نشان داده شده است. در این مطالعات ثابت زمانی شبکه برق ۰/۰۲۷ ثانیه در نظر گرفته شده است که در شکل ۱۴ ابتدا ثابت زمانی ۰/۰۲۷ ثانیه و سپس ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده و نتایج با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۴: شکل موج شار با مقاومت بار ۲ اهم و اندوکتانس ۹/۲ میلی هانری با ثابت زمانیهای متفاوت



شکل ۱۵: اشباع ترانسفورماتور جریان و جریانهای ثانویه بدست آمده از سناریوهای مختلف در دامنه‌های شار باقیمانده (a) ۰، (b) +۸۰٪ و (c) -۸۰٪ با مقاومت بار ۲ اهم و اندوکتانس ۹/۲ میلی‌هائری

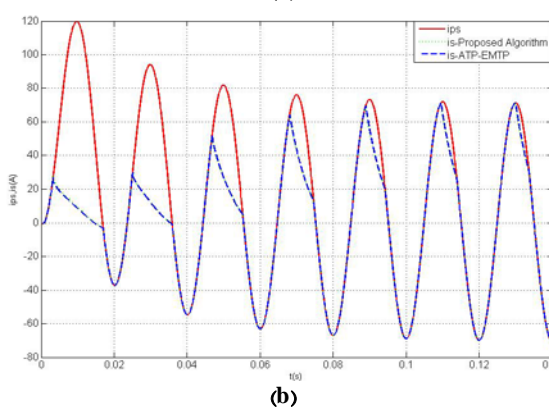
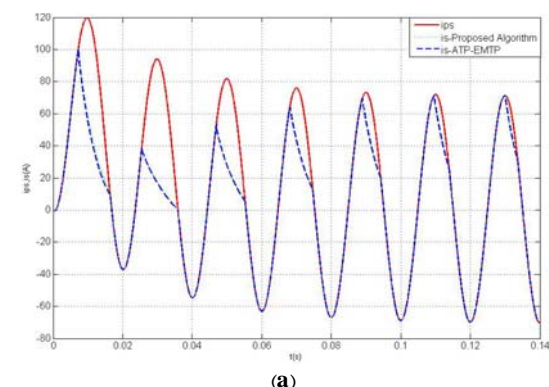


شکل ۱۶: اشباع ترانسفورماتور جریان و جریانهای ثانویه بدست آمده از سناریوهای مختلف در دامنه‌های شار باقیمانده (a) ۰، (b) +۸۰٪ و (c) -۸۰٪ با مقاومت بار ۲ اهم و اندوکتانس صفر هائری

با توجه به شکل موج‌های شار نشان داده شده، اگر جریان خطا از اولیه ترانسفورماتور جریان عبور کند مولفه‌های نامتقارن سبب افزایش شار هسته می‌شود. افزایش شار سبب اشباع هسته و در نتیجه منجر به منحرف شدن جریان ثانویه می‌گردد که در قسمت بعد این موضوع نشان داده شده است. در این مقاله به ازای مقادیر مختلف بار شکل موج شار نشان داده شده است. هرچه مقاومت بار بیشتر و اندوکتانس بار کمتر باشد ترانسفورماتور جریان بیشتر به حالت اشباع می‌رود و شکل موج شار دارای اعوجاج می‌باشد. همچنین در صورتیکه مقاومت بار کم و اندوکتانس بار بیشتر باشد ترانسفورماتور جریان کمتر به حالت اشباع می‌رود و شکل موج شار بدون اعوجاج می‌باشد. نتایج بدست آمده در این مقاله صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

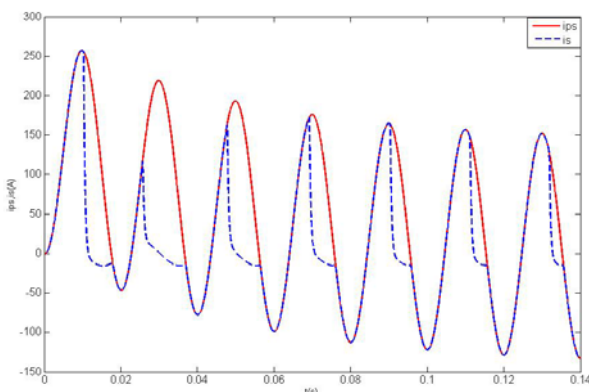
۷-۱-۲- تحلیل جریان ثانویه

انحراف جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان به مقدار بار اهمی ترانسفورماتور بستگی دارد. هرچه مقاومت بار ترانسفورماتور جریان بیشتر باشد شکل موج جریان ثانویه از حالت سینوسی منحرف‌تر می‌شود. در این مقاله برای مطالعه جریان ثانویه در ترانسفورماتور جریان سه سناریو در نظر گرفته شده است. این سه سناریو دامنه شار باقیمانده ۰، +۸۰٪ و -۸۰٪ شار نقطه اشباع می‌باشد. هنگامی که ترانسفورماتور جریان یک خطا اتصال کوتاه را با دامنه 12KA و افسست DC، ۱۰۰ درصد در دامنه‌های شار باقیمانده ۰، +۸۰٪ و -۸۰٪ می‌بیند. شکل موج‌های ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ شکل موج جریان ثانویه به ازای بارهای مختلف را نشان می‌دهد.

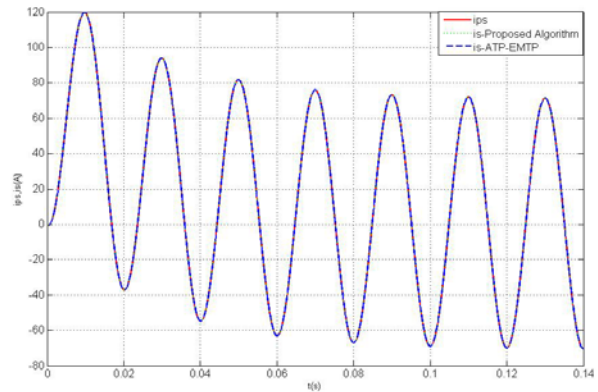


بالای این روش را نشان می‌دهد. بنابراین، منحنی هیستریزس تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان ندارد و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی را می‌توان با مرجع [۱۶] مقایسه کرد که در مرجع [۱۶] یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان براساس تئوری Preisach برای آنالیز گذرهای مغناطیسی بیان شده و به کمک این الگوریتم رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان با دقت بالا مدل شده است. در این مرجع برای یافتن مدل گذرای ترانسفورماتور جریان از معادلات بسیار پیچیده‌ای استفاده شده است. در شکل موج‌های ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ به ازای بارهای مختلف و در سناریوهای مختلف شکل موج جریان ثانویه آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که هرچه مقاومت بار ترانسفورماتور جریان بیشتر و اندوکتانس آن کمتر باشد شکل موج جریان ثانویه بیشتر از شکل موج سینوسی منحرف می‌شود و هرچه مقاومت بار ترانسفورماتور جریان کمتر و اندوکتانس بار بیشتر باشد شکل موج جریان ثانویه به شکل سینوسی نزدیکتر می‌باشد و ترانسفورماتور جریان کمتر به حالت اشباع می‌رود. بنابراین همانطوری که گفته شد رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان توسط نقاط اشباع هسته و اندوکتانس هسته در ناحیه اشباع تعیین می‌شود.

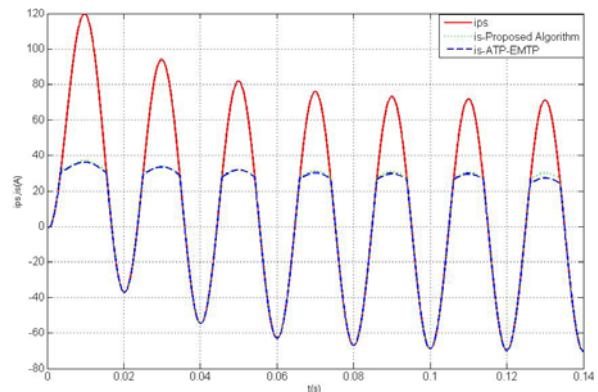
برای مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با مدل کمیته حفاظت IEEE، یک حالت از آنالیز گذرای ترانسفورماتور جریان در [۱۹ و ۲۱] آورده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، فرکانس ۶۰ هرتز، ثابت زمانی ۰/۰۵ ثانیه، دامنه جریان اتصال کوتاه ۲۴ کیلوآمپر، شار باقیمانده صفر و مقاومت بار ۲/۶ اهم و اندوکتانس صفر در نظر گرفته شده و شکل موج جریان اولیه و ثانویه کمیته حفاظت IEEE نشان داده شده است [۲۱]. شکل ۱۸، شکل موج جریان اولیه و ثانویه تحت شرایط فوق به-کمک الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۱۸ و شکل موج جریان اولیه و ثانویه کمیته IEEE در مرجع [۲۱] مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از کمیته حفاظت IEEE تطابق خوبی دارد.



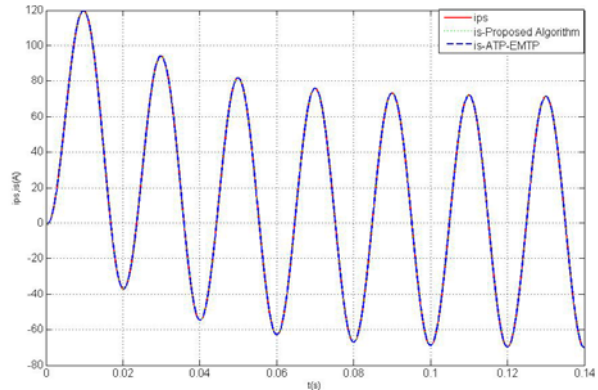
شکل ۱۸: نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی



(a)



(b)



(c)

شکل ۱۷: اشباع ترانسفورماتور جریان و جریانهای ثانویه بدست آمده از سناریوهای مختلف در دامنه‌های شار باقیمانده (a) ۰، (b) ۸۰٪ و (c) ۸۰-٪ با مقاومت بار صفر اهم و اندوکتانس ۹/۲ میلی‌هنری

نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار ATP-EMTP نشان می‌دهند که در دامنه‌های شار باقیمانده، دامنه‌های جریان متناوب و مقادیر مختلف افست DC جوابهای قابل قبول و با دقت بالایی را ارائه می‌دهند. همچنین نتایج بیان می‌کنند که تحت شرایط گذرهای خطا، نقاط اشباع هسته و اندوکتانس هسته در ناحیه اشباع، رفتار گذرای ترانسفورماتور جریان را تعیین می‌کنند. با مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار ATP-EMTP در این مقاله با مدل ترانسفورماتور جریان کمیته حفاظت سیستم قدرت IEEE [۱۹] که در آن منحنی هیستریزس نیز در نظر گرفته شده صحت و دقت

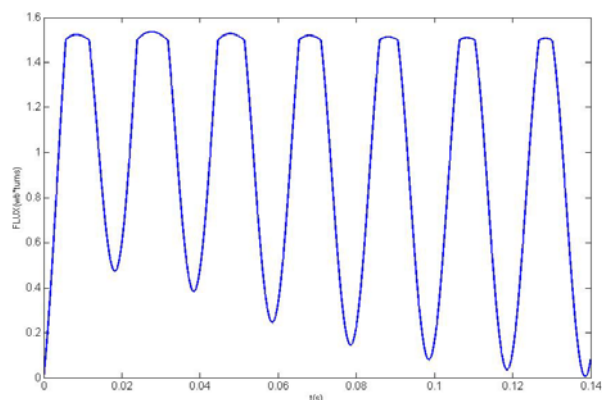
می‌دهد. بنابراین، رله‌های حفاظتی به طور ناخواسته عمل می‌کنند. برای بررسی عملکرد رله‌های حفاظتی در شرایط اتصال کوتاه نیاز به یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان می‌باشد. در این مقاله یک مدل دقیق ریاضی برای یک ترانسفورماتور جریان جهت پیش‌بینی عملکرد گذرا با یک بار مختلط شامل اندوکتانس و مقاومت با در نظر گرفتن اشباع هسته بیان شد. یک ترانسفورماتور جریان استاندارد با نسبت تبدیل ۱۲۰/۵ با جریان‌های خطا افست حداکثر شبیه‌سازی شده و پاسخ جریان ثانویه و شار برای مقدارهای مختلف امپدانس بار محاسبه شد. هرچه مقاومت بار بزرگتر باشد جریان ثانویه از شکل موج سینوسی بیشتر منحرف می‌شود. اندوکتانس در امپدانس بار انحراف جریان ثانویه را کاهش می‌دهد. همچنین اگر جریان خطا از سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور جریان عبور کند، مولفه نامتقارن باعث افزایش شار در هسته می‌شود. افزایش شار باعث اشباع هسته می‌شود که منجر به انحراف جریان ثانویه می‌گردد. در این مقاله الگوریتم پیشنهادی جهت مدل کردن دقیق ترانسفورماتور جریان ارائه شد و نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با نرم‌افزار ATP-EMTP مقایسه گردید. همچنین نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها با مدل ترانسفورماتور جریان کمیته حفاظت سیستم قدرت IEEE مقایسه شد. علی‌رغم اینکه در مدل پیشنهادی اثر هیستریزس در نظر گرفته نشده و در حالیکه مدل پیشنهادی IEEE اثر هیستریزس را لحاظ نموده است اما نتایج هر دو تطابق خوبی با هم دارند. از مهمترین مزایای مدل پیشنهادی می‌توان به نیاز نداشتن به اطلاعات منحنی B-H برای منحنی مغناطیس-شوندگی، مدل نکردن اثر هیستریزس و انطباق نتایج با مدل پیشنهادی IEEE با در نظر گرفتن اثر هیستریزس و سرعت و دقت بالای محاسبات اشاره کرد. نتایج بدست آمده صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی با تعریف مناسبی از منحنی مغناطیس شوندگی را نشان می‌دهد.

مراجع

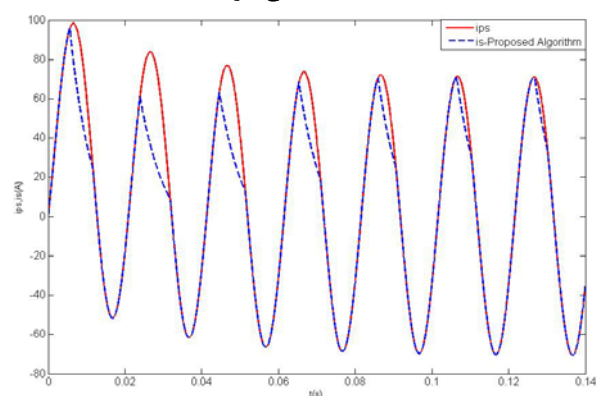
- [1] M. Poljak and M. Kolibas, Computation of Current Transformer Transient Performance, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 3, no. 4, pp. 1816–1822, Oct. 1988.
- [2] T. Conrad and D. Oeding, A Method to Correct the Distorted Secondary Currents of Current Transformers, in *Proc. PSCC*, 1987, pp. 311–315.
- [3] M. Kezunovic, C. W. Fromen, and F. Philips, Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 405–412, Jan. 1994.
- [4] A. K. S. Chaudhary, K. Tam, and A. G. Phadke, Protection System Representation in the Electromagnetic Transients Program, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, pp. 700–708, Apr. 1994.
- [5] Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, and R. K. Aggarwal, An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers, *IEEE*

۲-۷- حالت دوم: شرایط غیرحداکثر مولفه DC

در حالت اول حداکثر افست DC در جریان رخ داده است. اما در شرایطی که مولفه DC حداکثر نباشد نیز این مدل نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. برای این منظور حالت‌های متنوعی را می‌توان در نظر گرفت. به‌عنوان نمونه، در صورتی که $\sin(\beta - \theta) = 0.5$ در نظر گرفته شود، شکل موج شار، جریان اولیه و ثانویه با مقاومت استاندارد ۲ اهم و اندوکتانس استاندارد ۹/۲ میلی‌هائری و شار باقیمانده صفر به- ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده است. با مقایسه شکل موج-های ۱۹ و ۲۰ با شکل موج‌های ۸ و ۱۵(a)، نتیجه می‌شود که در شرایط حداکثر افست DC هسته بیشتر اشباع شده و جریان ثانویه از حالت سینوسی بیشتر منحرف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در همه شرایط پاسخ قابل قبولی را ارائه می‌دهد.



شکل ۱۹: شکل موج شار به کمک الگوریتم پیشنهادی با مقاومت بار ۲ اهم و سلف ۹/۲ میلی‌هائری



شکل ۲۰: اشباع ترانسفورماتور جریان و جریان ثانویه با مقاومت بار ۲ اهم و اندوکتانس ۹/۲ میلی‌هائری

۸- نتیجه‌گیری

جهت ارزیابی عملکرد یک رله حفاظتی جریانی براساس روش‌های شبیه‌سازی حوزه زمان گسسته، مدل دقیق ترانسفورماتور جریان مورد نیاز است. هنگامی که یک خطای اتصال کوتاه در شبکه برق رخ می‌دهد ترانسفورماتور جریان به اشباع رفته و منجر به منحرف شدن جریان ثانویه می‌شود و عملکرد رله‌های حفاظتی را تحت تاثیر قرار

- [19] IEEE Power System Relaying Committee, CT Saturation Theory and Calculator 2001, Working Group Rep.
- [20] M.Naidu and G.W.Swift, Dynamic Analysis of a current Transformer during Faults, *Electric Power System Research*, 11(1986) 225-231.
- [21] IEEE Power System Relaying Committee, Relaying Current Transformer Application Guide, Relay Work Group, June 1989.
- Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 1, pp. 116–124, Jan. 1997.
- [6] J. R. Lucas, P. G. McLaren, W. W. Keethipala, and R. P. Jayasinghe, Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 1, pp. 152–159, Jan. 1992.
- [7] D. A. Tziouvaras, et.al, Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 1, pp. 62–72, Jan. 2000.
- [8] U. D. Annakkage, P. G. McLaren, E. Dirks, R. P. Jayasinghe, and A. D. Parker, A Current Transformer Model based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 1, pp. 57–61, Jan. 2000.
- [9] D. C. Jiles, J. B. Thoelke, and M. K. Devine, Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 1, pp. 27–35, Jan. 1992.
- [10] S. Prigozy, PSPICE Computer Modeling of Hysteresis Effects, *IEEE Trans. Educ.*, vol. 36, no. 1, pp. 2–5, Sep. 1993.
- [11] H. G. Brachtendorf, C. Eck, and R. Laur, Macromodelling of Magnetic Phenomena with SPICE, *IEEE Trans. Circuits Syst. II—Analog Digit. Signal Proces.*, vol. 44, no. 5, pp. 378–388, May 1997.
- [12] E. D. M. Hernandez, C. S. Muranaka, and J. R. Cardoso, Identification of the Jiles-Atherton Parameters using Random and Deterministic Searches, *Phys. B: Condensed Matter*, vol. 275, no. 1–3, pp. 212–215, Jan. 2000.
- [13] N. L. Locci and C. Muscas, Hysteresis and Eddy Currents Compensation in Current Transformers, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 16, no. 2, pp. 154–159, Apr. 2001.
- [14] J. Tellinen, The Simple Scalar Model for Magnetic Hysteresis, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4, pp. 2200–2206, Jul. 1998.
- [15] S. Bittanti, F. A. Cuzzola, F. Lorito, and G. Poncia, Compensation of Nonlinearities in the Current Transformer for the Reconstruction of the Primary Current, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 565–573, Jul. 2001.
- [16] Afshin Rezaei-Zare, Reza Iravani, Majid Sanaye-Pasand, Hossein Mohseni, and Shahrokh Farhangi, An Accurate Current Transformer Model Based on Preisach Theory for the Analysis of Electromagnetic Transients, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vpl. 23, no. 1, January 2008.
- [17] A. Nawikavatan, et.al, the Current Transformer Model with ATP-EMTP for Transient Response Characteristic and Its Effect on Differential Relays Performance, 8th International conference on Advances in power system control operation and management, 2009.
- [18] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program Reference Manual*. Portland, or: (EMTP Theory Book), BPA, 1986.