

حذف جریان هجومی ترانسفورمرهای قدرت سه فاز از طریق کلیدزنی غیر هم زمان فازها با استفاده از مدل جیلز-اترتون و الگوریتم بهینه سازی PSO

رضا حسنی کبوترخانی احسان حاجی پور مهدی وکیلان
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
بیبا عرب سلمان آبادی
شرکت توزیع برق تهران بزرگ، تهران، ایران

واژه‌های کلیدی: حذف جریان هجومی، شار پسماند، مدل جیلز-اترتون، الگوریتم PSO

چکیده

جریان هجومی، به عنوان پدیده ای ناخواسته در هنگام برق دار نمودن ترانسفورمر، باعث افزایش قابل توجه جریان عبوری از سیم پیچ های آن در چند سیکل ابتدایی می گردد. این جریان زیاد، می تواند سبب آسیب دیدگی عایقی سیم پیچها، خرابی مکانیکی آنها و همچنین عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی و در نتیجه بی برق شدن بار گردد. دامنه این جریان، ارتباطی تنگاتنگ با شار پسماند مغناطیسی هسته ترانسفورمر دارد. در این مقاله، هدف دستیابی به روشی هوشمند جهت برقرار نمودن غیرهمزمان فازهای یک ترانسفورمر سه فاز متناسب با شار پسماند، جهت کنترل و کاهش این جریان هجومی و تبعات آن می باشد. در این مقاله، از معادلات دیفرانسیل جیلز-اترتون^۱ (JA) جهت مدلسازی رفتار غیرخطی هسته مغناطیسی استفاده شده است. همچنین بهینه سازی تجمعی پرندگان^۲ (PSO) برای به دست آوردن زمان بهینه کلیدزنی مورد استفاده

قرار گرفته است.

عملکرد مناسب روش پیشنهادی، با شبیه سازی های مختلف در انتهای مقاله نشان داده شده است.

۱- مقدمه

برق دار نمودن ترانسفورمر، همواره با مشکل جریان هجومی روبرو بوده است. این جریان، جریانی گذرا با دامنه ای چندین برابر جریان نامی (گاه ۱۰ تا ۲۰ برابر) می باشد که می تواند چندین ثانیه در مدار به طور بیانجامد [۱]. از جمله تاثیرات نامطلوب جریان هجومی ترانسفورمر استرس های مکانیکی تحمیلی به سیم پیچ [۲]، پیرسازی عایقی و کاهش طول عمر حرارتی ترانسفورمر [۳]، افت ولتاژ و اثرات نامطلوب روی کیفیت توان بار نامی [۴] و عملکرد اشتباه مازول حفاظتی ترانسفورمر [۵] می باشد.

جهت مطالعه و کاهش جریان هجومی، بایستی دو مرحله زیر

را پیاده سازی نمود:

¹ Jiles-Atherton (JA)

² Particle Swarm Optimization (PSO)

• شبیه سازی مشخصه هیستریزس هسته مغناطیسی و محاسبه جریان هجومی

• مدل سازی مدار معادل الکتریکی و مغناطیسی ترانسفورمر سه فاز و انتخاب زمان مناسب کلیدزنی

برای شبیه سازی مشخصه هیستریزس هسته ترانسفورمر، روش های گوناگونی مطرح شده است. در بین این روشها، دو روش پریساج [۶] و جیلز-آرتون [۷] مقبولتر واقع شده اند. در بین این دو روش، روش پریساج پیش از این جهت مدل سازی جریان هجومی به کار رفته است [۸-۹]. اما از آنجا که این روش، جهت مدل سازی رفتار هیستریزس هسته مغناطیسی نیازمند مدل سازی گرافیکی مثلث پریساج می باشد، نمی توان این روش را به صورت معادلات توصیف کننده به کار برد. لذا هنگامی که به دنبال مدل سازی رفتار هسته به صورت مجموعه معادلات حالت در نرم افزارهایی مانند Matlab/Simulink می باشیم، شبیه سازی زمان بر شده و عدم همگرایی در مساله به شدت افزایش می یابد. اما روش جیلز-آرتون با به کارگیری معادلات دیفرانسیل مشخص، با تقریب خوبی همگرایی مساله را تضمین می نماید، از طرفی دیگر زمان شبیه سازی به شدت کاهش می یابد. تنها مشکل این روش، عدم دقت مدل برای حلقه های هیستریزس گوناگون با ضرایب ثابت می باشد [۱۰]. در این مقاله از مدل جیلز-آرتون با پارامترهای متغیر، جهت شبیه سازی هسته مغناطیسی و جریان هجومی بهره برده شده است.

گام بعدی، شبیه سازی مدارهای مغناطیسی و الکتریکی معادل می باشد. در این گام معمولا مقالاتی که ارائه می شوند، مدل سازی در حالت تکفاز و محدود به یک نوع ترانسفورمر (ستاره یا مثلث) می باشند [۱۰-۱۳]. در این مقاله با بهره گیری از نرم افزار Matlab/Simulink و بهره گیری از کوپل مدارهای مغناطیسی و الکتریکی، مدلی استخراج شده است که توانایی مدل سازی هر نوع ترانسفورمری (چه در اولیه و چه در ثانویه) را خواهد داشت. در این مدل، جریان هجومی برای هر شار پسماند مغناطیسی هسته و زمان کلیدزنی دلخواه قابل محاسبه می باشد.

در این مقاله، از روش بهینه سازی PSO، جهت محاسبه زمان

کلیدزنی بهینه برای هر شار پسماند استفاده شده است. این زمان های بهینه، در یک جدول مناسب در کنار شار پسماند متناسب قرار گرفته و به صورت یک جدول (Lookup Table) در المان حفاظتی حذف کننده جریان هجومی جای می گیرند. چگونگی حفاظت ترانسفورمر در برابر جریان هجومی در بخش ششم به طور کامل بیان می شود.

در ادامه مقاله، در بخش دوم چگونگی مدل سازی حلقه هیستریزس بیان می شود. در بخش سوم، روش بهینه سازی PSO شرح داده شده است. در بخش چهارم در زمینه چگونگی پیاده سازی مدارهای الکتریکی و مغناطیسی ترانسفورمر بحث می شود. در بخش پنجم بهینه سازی زمان کلیدزنی غیرهمزمان توسط روش PSO معرفی می شود. در نهایت در بخش های ششم و هفتم به بحث و جمع بندی الگوریتم پیشنهادی جهت حذف جریان هجومی پرداخته می شود.

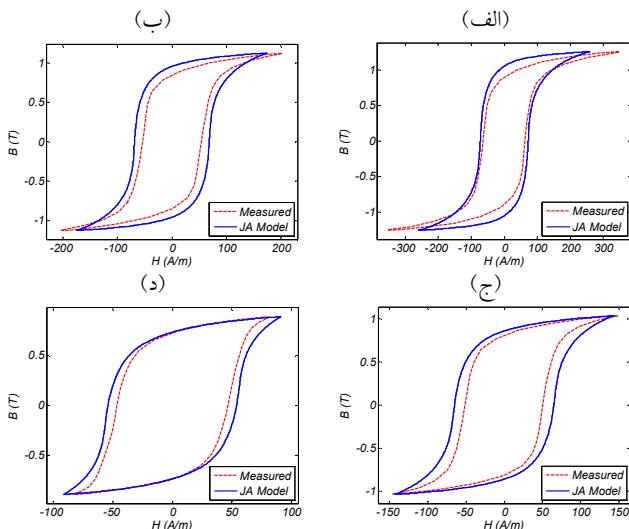
۲- مدل سازی حلقه هیستریزس هسته مغناطیسی

در این مقاله، جهت مدل سازی حلقه هیستریزس از روش جیلز-آرتون استفاده شده است [۱۴]. در این روش، معادلات دیفرانسیل حلقه هیستریزس ماده مغناطیسی، بر حسب نوشتن معادلات تعادل انرژی به دست می آید. این مدل مبتنی بر تغییرات بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر دیواره حوزه های مغناطیسی بنا شده است و به این ترتیب مغناطیس شونددگی ماده مغناطیسی را از مجموع دو مولفه مغناطیس شونددگی برگشت پذیر و مولفه مغناطیس شونددگی برگشت ناپذیر به حساب می آورد. چگونگی استخراج این معادلات دیفرانسیل، در مقالات متعددی بیان شده است [۱۴-۱۷]. در این مقاله تنها معادلات نهایی در بیان می گردد [۱۷].

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left(\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right) \quad (2)$$

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$



شکل ۲- حلقه هسترزیس اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با روش جیلز-اترتون با فرض پارامترهای ثابت

حلقه برازش شده بر آن با استفاده از روش جیلز-اترتون را نشان می دهد. در این حلقه هسترزیس H_{max} برابر با ۶۰ آمپر بر متر می باشد.

با شبیه سازی حلقه هسترزیس با روش جیلز-اترتون، مشاهده می شود که چنانچه ضرایب a, M_s, c, k و α برای شدت میدان های مغناطیسی متفاوت ثابت در نظر گرفته شوند، نتایج برازش حلقه هسترزیس با روش جیلز-اترتون دقیق نخواهد بود. به عنوان مثال در شکل ۲، پارامترهای بهینه شده برای حلقه هسترزیس شکل ۱ (H_{max} برابر با ۶۰ آمپر بر متر)، برای سایر حلقه های هسترزیس همان ترانسفورمر خاص به کار رفته است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج نامیدکننده می باشد. برای حل این مشکل در مقاله [۷]، استفاده از پارامترهای متغیر با ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی در حلقه پیشنهاد شده است. در این مقاله، از این روش جهت مدل سازی و افزایش دقت محاسبات استفاده شده است. شکل ۳، برازش بهینه همان حلقه های هسترزیس نشان داده شده در شکل ۲، با استفاده از روش پارامترهای متغیر را نشان می دهد. شکل ۴، پارامترهای متغیر با ماکزیمم میدان مغناطیسی برای این ترانسفورمر خاص را نشان می دهد. رابطه به کار رفته برای مدل سازی این پارامترها در معادلات دیفرانسیل به صورت زیر می باشد [۷].

$$a = \frac{A.H_{max} + B}{H_{max} + C} \quad (۸)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH_e} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} \quad (۴)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (۵)$$

$$\begin{cases} \delta = +1 & \frac{dH}{dt} > 0 \\ \delta = -1 & \frac{dH}{dt} < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

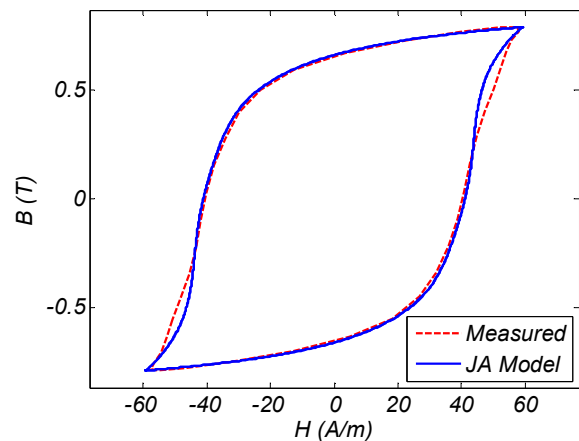
با توجه به معادلات (۱) تا (۶)، می توان نتیجه گرفت که:

$$\frac{dH}{dB} = \frac{1}{\mu_0} \left(1 - \frac{(1-c)\frac{dM_{irr}}{dH_e} + c\frac{dM_{an}}{dH_e}}{1 + (1-\alpha)(1-c)\frac{dM_{irr}}{dH_e} + (1-\alpha)c\frac{dM_{an}}{dH_e}} \right) \quad (۷)$$

متغیرهای معادلات فوق، در ضمیمه الف معرفی شده اند.

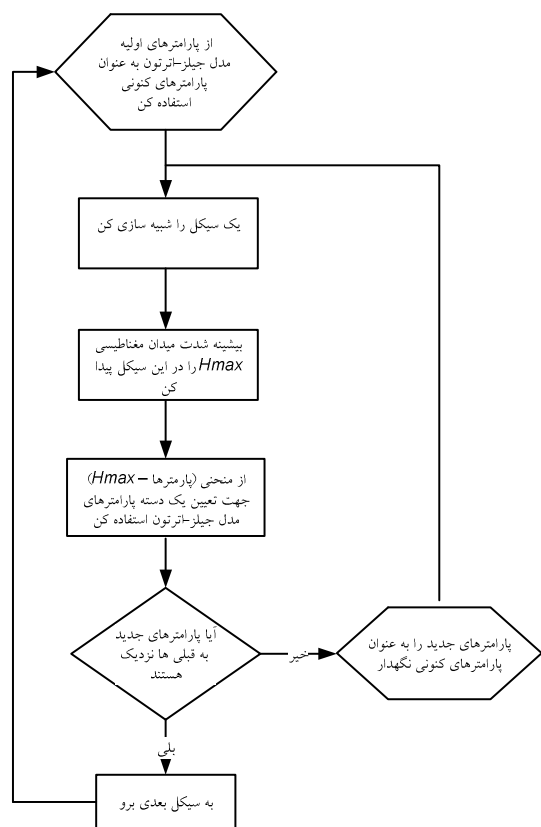
با در اختیار داشتن معادله (۱)-(۶) با توجه به مقادیر چگالی شار مغناطیسی (B) در لحظه t و $t+\Delta t$ و همچنین شدت میدان مغناطیسی (H) در لحظه t، می توان شدت میدان مغناطیسی در لحظه $t+\Delta t$ را به دست آورد. لذا می توان حلقه هسترزیس و رفتار غیرخطی ماده مغناطیسی را مدل نمود.

تنها مساله ای که در این روش باقی می ماند، چگونگی تعیین ضرایب ثابت معادلات (a, M_s , c, k و α) می باشد. در مقالات روش های متعددی اعم از آزمایشگاهی و یا روش های بهینه سازی هوش مصنوعی مانند ژنتیک الگوریتم برای تعیین این ضرایب استفاده شده است [۱۸-۲۰]. در این مقاله، ضرایب مذکور با استفاده از بهینه سازی PSO به دست آمده است. شکل ۱، یک نمونه حلقه هسترزیس اندازه گیری شده و



شکل ۱- حلقه هسترزیس اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با روش

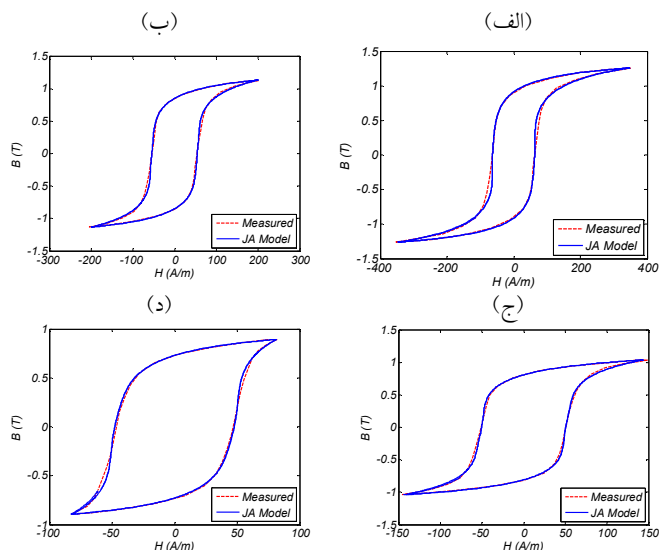
جیلز-اترتون



شکل ۵- فلوجارت روش تکراری جهت پیاده سازی پارامترهای متغیر در روش جیلز-اترتون

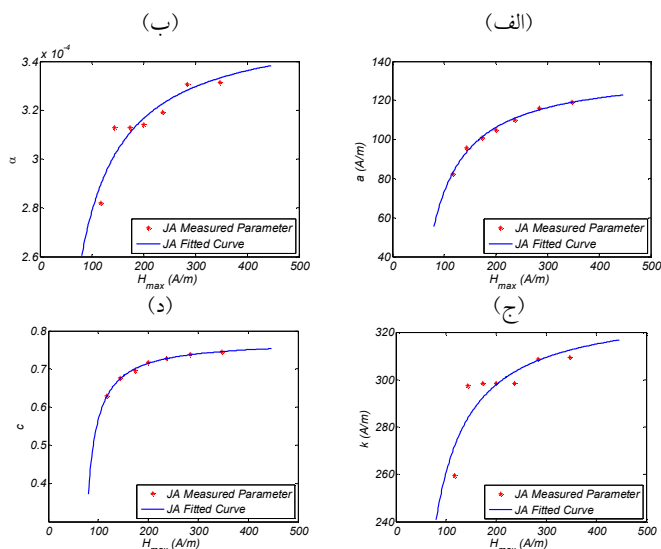
بهره برده شده است. فلوجارت این روش در شکل ۵ نشان داده شده است.

جهت اطمینان از صحت شبیه سازی صورت پذیرفته توسط روش جیلز-اترتون، در شکل ۶ یک نمونه جریان هجومی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط روش جیلز-اترتون برای یک ترانسفورمر تکفاز نشان داده شده است. ترانسفورمر تکفاز به کار رفته 5KVA، ۳۸۰/۲۲۰ ولت می باشد. همان طور که مشاهده می شود، چنانچه از پارامترهای متغیر در روش جیلز-اترتون استفاده گردد، این روش از دقت مناسبی جهت مدلسازی رفتار هیستریزس هسته مغناطیسی و استخراج جریان هجومی برخوردار می باشد. البته شکل ۶ به گونه ای انتخاب شده است که هم دقت مدلسازی Minor Loop ها و هم دقت تخمین پیک جریان هجومی در کنار یکدیگر مشاهده گردد.



شکل ۳- حلقه هستریزس اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با روش جیلز-اترتون با پارامترهای متغیر وابسته به ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی همین معادله، برای سایر ضرایب به کار رفته است. ضرایب ثابت معادله (۸)، با استفاده از برازش منحنی استخراج شده است.

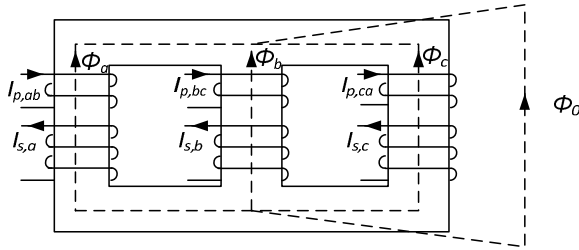
از آنجا که پارامترهای a ، M_s ، c ، k و α در معادلات دیفرانسیل (۱)-(۶) ثابت نمی باشد و به خروجی مساله در یک سیکل کامل (H_{max}) وابسته است، نیاز می باشد که یک روش تکراری^۳ پیاده سازی شود تا از همگرایی معادلات اطمینان حاصل گردد. در این مقاله از روش ارائه شده در [۷]



شکل ۴- پارامترهای متغیر جیلز-اترتون، برازش شده با رابطه (۸)، الف) a

ب) α ، ج) k ، د) c

³ Iterative



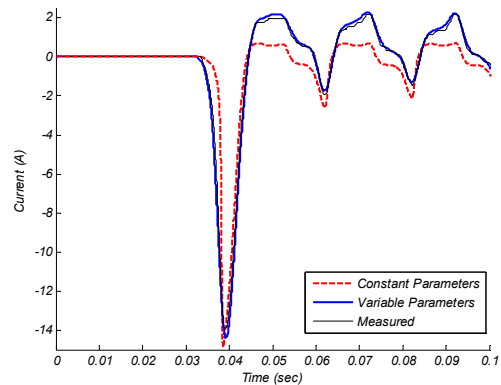
شکل ۷- شماتیک یک ترانسفورمر سه فاز سه ساق

تابع $rand$ نیز عددی تصادفی در بازه $[۱,۰]$ به وجود می آورد.

۴- مدل سازی مدارای ترانسفورمر سه فاز

پس از مدل سازی رفتار غیر خطی هسته مغناطیسی، حال بایستی مدل مدارای کل ترانسفورمر را در نظر گرفت. شکل ۷، شماتیک یک ترانسفورمر سه فاز سه ساق را نشان می دهد. در این شکل Φ_0 شار توالی صفر گذشته از مسیر هوایی^۴ ترانسفورمر را نشان می دهد.

می توان جهت تحلیل رفتار ترانسفورمر، آن را به دو مدل مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی معادل تفکیک کرد. این دو مدل به وسیله جریان ها و ولتاژهای سیم پیچهای ترانسفورمر به یکدیگر کوپل می باشند [۹]. شکل ۸، این دو مدار الکتریکی و مغناطیسی ترانسفورمر را نمایش می دهد. برای مطالعات جریان هجومی، به طور معمول از جریان در ثانویه ترانسفورمر صرف نظر می شود، اما جهت حفظ کلیت مساله، ثانویه نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل، یک ترانسفورمر سه فاز مثلث-ستاره مدل شده است، اما همان طور که از شکل پیداست، می توان با تغییر سر بندی ترانسفورمر، هر ساختار دلخواه ترانسفورمر را مدل نمود. در مدار مغناطیسی، ماژولهایی که با شکل حلقه هیستریزس نشان داده شده اند، رفتار غیرخطی هسته مغناطیسی را مدل می سازند. برای مدل سازی این رفتار، از مدار نشان داده شده در شکل ۹ بهره گرفته شده است. در شکل ۹، Jiles-Atherton Simulator همان معادلات جیلز-ترتون حلقه هیستریزس هسته مغناطیسی می



شکل ۶- یک نمونه جریان هجومی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با روش جیلز-ترتون با پارامترهای ثابت و متغیر

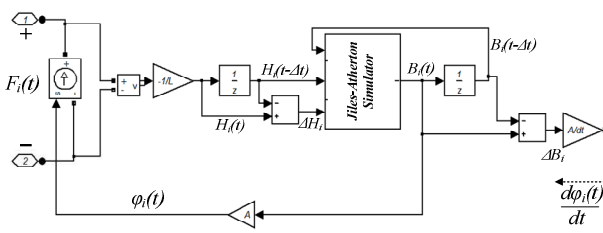
۳- الگوریتم بهینه سازی PSO [۲۱]

الگوریتم PSO با یک گروه از ذره ها (پرنده ها یا ماهی) عمل می کند و برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با به روز کردن مکان ذره ها و سرعت آنها به جستجو می پردازد. هر ذره در یک فضای چند بعدی با دو مقدار V_{id} و X_{id} که به ترتیب معرف موقعیت مکانی و سرعت بعد d ذره i ام می باشد، معرفی می گردد. در هر مرحله از حرکت جمعیت، مکان ذره با توجه به دو مقدار بهینه به روز می شود. اولین مقدار بهینه، بهترین جواب شخصی هر ذره در طول بهینه سازی می باشد. این مقدار g^{best} نامیده می شود. دیگر مقدار بهینه P^{best} نامیده می شود که جواب بهینه کلیه ذرات می باشد. در هر تکرار الگوریتم، بعد از یافتن دو مقدار P^{best} و g^{best} برای تک تک ذرات، سرعت و مکان جدید هر ذره با توجه به روابط (۹) به روز می شود.

$$\begin{aligned} X_{id}^{t+1} &= X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \\ V_{id}^{t+1} &= w.X_{id}^t + c_1.rand(P_{id}^{best} - X_{id}^t) \\ &\quad + c_2.rand(g_{id}^{best} - X_{id}^{t+1}) \end{aligned} \quad (9)$$

که در این رابطه w ، نشان دهنده اینرسی برای سرعت گیری ذرات می باشد. c_1 و c_2 ضرایب یادگیری ذرات با توجه به جواب بهینه کلی و جواب بهینه شخصی هستند و معمولاً در بازه $[۲,۱]$ می باشد و مقدار آنها برابر در نظر گرفته می شود.

⁴ Zero-Sequence air flux path



شکل ۹- ساختار درون زیرسیستم های هیستریز نشان داده شده در شکل ۸ (ب)

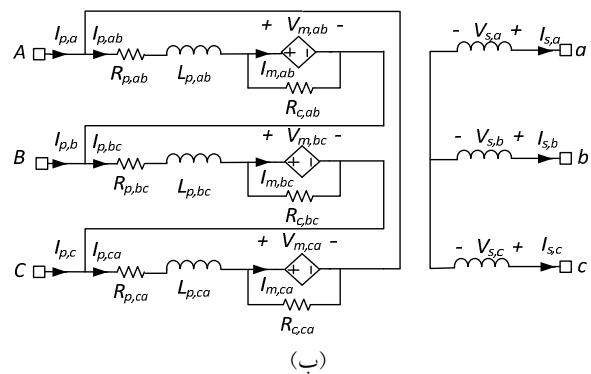
است که این روش در ترانسفورمرهای سه فاز با سربندیهای خاص مانند ستاره زمین نشده و یا زیگزگ قابل استفاده نمی باشد.

مدلسازی های مطرح در این بخش توسط نرم افزار Matlab/Simulink صورت پذیرفته است. جهت تغییر ساختار ترانسفورمر، به راحتی می توان سربندی آن را در شبیه سازی تغییر داد. خروجی مدلسازی نیز جریان همجومی فازهای مختلف و تغییرات ولتاژ و شار مغناطیسی در ساق های ترانسفورمر می باشد. لازم به ذکر است چنانچه بخواهیم مطالعات را بر روی ترانسفورمر سه فاز پنج ساق انجام دهیم، تنها کافی در شکل ۸ (ب) دو شاخه موازی بدون منبع ولتاژ وابسته اضافه نماییم و مدل توانایی انجام محاسبات را دارد. تنها مشکل موجود، چگونگی اندازه گیری حلقه های هیستریز ترانسفورمر پنج ساق در واقعیت می باشد.

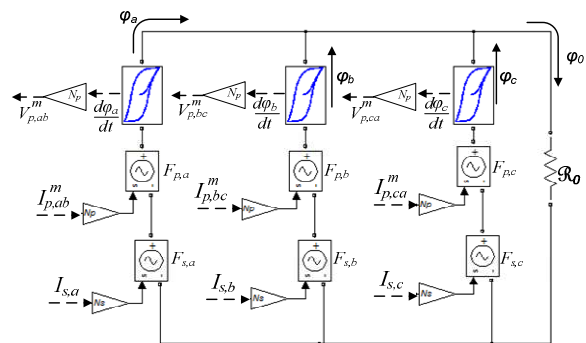
۵- بهینه سازی زمان کلیدزنی فازها با روش PSO

پس از مدلسازی ترانسفورمر سه فاز و رفتار غیرخطی هسته مغناطیسی، می توان از روش بهینه سازی PSO، برای تعیین بهینه زمان کلیدزنی فازهای مختلف با توجه به شار پسماند استفاده نمود. با این عمل می توان جریان همجومی را به طور کامل کنترل نمود و اندازه پیک آن را در محدوده مجاز جریان ترانسفورمر نگه داشت. بهینه سازی زمان کلیدزنی، هرچند برای ترانسفورمرهای Yn-Yn آسان می باشد، اما هنگامی که ترانسفورمر سیم پیچی مثلث داشته باشد یا اینکه ستاره زمین نشده در یکی از طرفین وجود داشته باشد، این تصمیم گیری با استفاده از معادلات دیفرانسیل و به صورت تحلیلی امکان پذیر

(الف)



(ب)



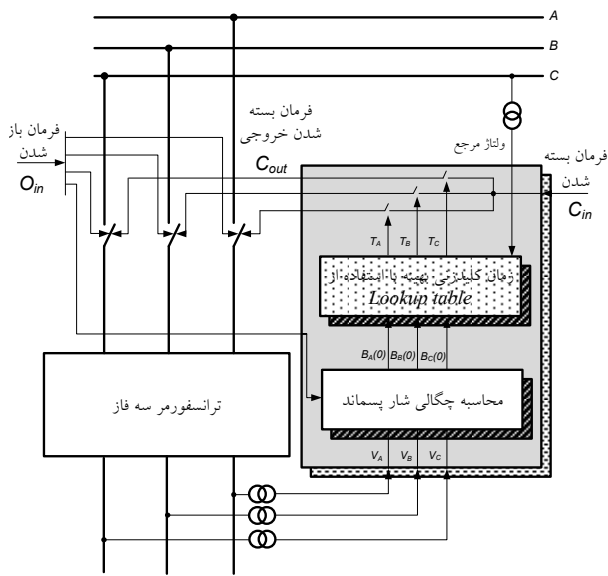
شکل ۸- (الف) مدار الکتریکی معادل یک ترانسفورمر سه فاز سه ساق مثلث-ستاره، (ب) مدار مغناطیسی معادل ترانسفورمر

باشد که در بخش ۲ توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که برای اندازه گیری حلقه هیستریز و R_0 در ساقهای مختلف یک ترانسفورمر سه فاز، بایستی از روش شرح داده شده در [۲۲] استفاده نمود.

در مدار شکل ۸ شرایط اولیه مساله، شار پسماند در ساق های مختلف ترانسفورمر می باشد. جهت محاسبه شار پسماند، معمولترین روش انتگرال گیری از ولتاژ (چه اولیه و چه ثانویه) می باشد (رابطه (۱۰)).

$$\varphi_0 = -\frac{1}{N_p} \int_{t=-\infty}^{t_0} V dt \quad (10)$$

هرچند این روش به نظر ساده می باشد و در عمل نیز نویسندگان مشاهده نمودند که به طور معمول پس از قطع ترانسفورمر، شار پسماند در حدود ۲۰٪-۳۰٪ کاهش پیدا می کند، اما هنوز در عمل به کار رفته و پاسخگو می باشد [۱۱]. مرجع [۱۱] نشان داده است که با استفاده از این روش مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شار پسماند در حالت سه فاز جهت مدلسازی جریان همجومی تطبیق مناسبی دارند. البته لازم به ذکر

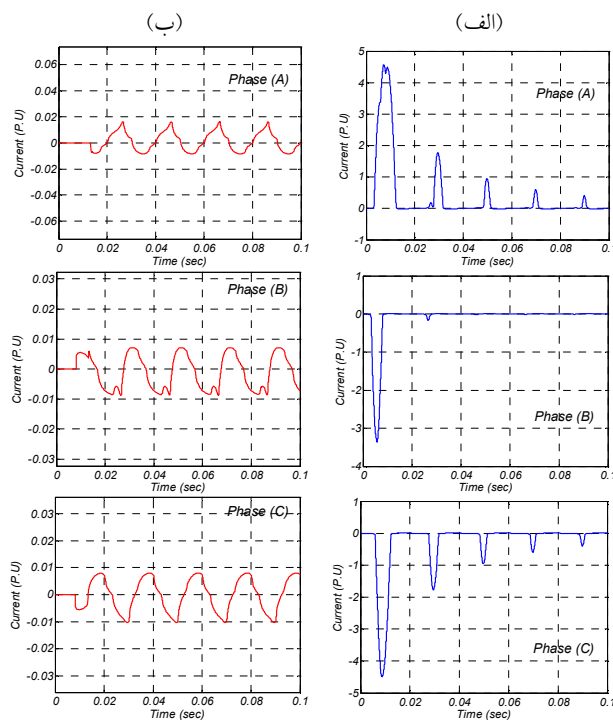


شکل ۱۱- ساختار پیشنهادی جهت کنترل جریان هجومی

۶- بحث

در بخش های پیشین، روشی جهت محاسبه زمان بهینه کلیدزنی برای مهار جریان هجومی با توجه به شار پسماند ارائه شد. پس از خرید ترانسفورمر و پیش از نصب آن، حلقه های هیستریزس ساقهای مختلف اندازه گیری شده و با توجه به مشخصات ترانسفورمر، زمانهای کلیدزنی بهینه با توجه به مقادیر مختلف شار پسماند تعیین می شود. این مقادیر بهینه در یک جدول (Lookup Table) جمع آوری می شود. بخشی از این جدول برای ترانسفورمر ضمیمه ب در جدول ۱ نشان داده شده است. حال مطابق شکل ۱۱، یک کنترل کننده جریان هجومی در مجاورت ترانسفورمر قرار می گیرد. این کنترل کننده جریان هجومی، ولتاژ هر یک از سه فاز (V_B, V_A) و V_C را در ثانویه با استفاده از ترانسفورمرهای ولتاژ (PT) در اختیار دارد. هنگامی که فرمان باز شدن بریکرها (O_{in}) توسط RTU^o و یا به صورت دستی صادر گردد، این سیگنال فرمان در اختیار مازول محاسبه پسماند قرار گرفته و لذا این مازول به محاسبه شار در هر ساق (با انتگرال گیری از شکل ولتاژ مناسب که با توجه به نوع سربندی ترانسفورمر در ثانویه برای

نمی باشد. در این حالت، ناگزیر مجبور به استفاده از روش های بهینه سازی هوش مصنوعی می باشیم. روشی که در اینجا برگزیده شده است، روش PSO می باشد. در این روش، برای سه شار پسماند برای سه ساق مختلف که به عنوان شرایط اولیه مساله در نظر گرفته می شوند، مدار شکل ۸ تحلیل شده و جریان هجومی استخراج می شود. الگوریتم PSO، با عوض کردن زمان کلیدزنی بریکرهای سه فاز، بهترین ترتیب و زمان کلیدزنی برای فازهای مختلف را استخراج می کند. شکل ۱۰، جریان هجومی حاصل از کلیدزنی هوشمند و کلیدزنی همزمان سه فاز را برای ترانسفورمر سه فاز خاص نشان می دهد. اطلاعات مدار شبیه سازی شده و ترانسفورمر مورد بحث، در ضمیمه ب آورده شده است. همان طور که از شکل ۱۰ مشخص است، چنانچه از کلیدزنی هوشمند در برق دار نمودن ترانسفورمر استفاده نمی شد، جریان هجومی تا $4/5$ برابر جریان نامی افزایش می یافت، اما با تنظیم صحیح زمان کلیدزنی و ترتیب فازها، جریان هجومی در حد جریان بی باری ترانسفورمر باقی مانده است.



شکل ۱۰- جریان هجومی ترانسفورمر سه فاز در فازهای مختلف، (الف)

کلیدزنی همزمان فازها، (ب) کلیدزنی ناهمزمان و هوشمند

Remote Terminal Unit: ° رابط مخابراتی که در پست هایی که از راه دور و توسط SCADA کنترل می شوند، به کار می رود.

IEEE Trans. Magn., vol. 24, pp. 3217-3222, Nov. 1988.

- [2] M. Steurer, K. Frohlich, "The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils", IEEE Trans. Power Del., vol 17, pp. 155-160, Jan 2002.
- [3] A. Ebner, "Reduction of voltage stress and inrush current of power transformers using controlled switching", 20th Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED), Prague, Jun 2009.
- [4] Nagpal, T.G. Matinich, A. Moshref, K. Morison, P. Kundur, "Assessing and limiting impact of transformer inrush current on power quality", IEEE Trans. Power Del., vol. 21, pp. 890-896, Apr. 2006.
- [5] L. Wu, C. Liu, S. Chien, C. Chen, "The effect of inrush current on transformer protection", IEEE 38th North American Power Symposium (NAPS), pp. 449-456, Sept. 2006.
- [6] S. R. Naidu, "Simulation of the hysteresis phenomenon using preisach's theory," IEE Proc., vol. 137, March 1990.
- [7] X. Wang, D.W.P. Thomas, M. Sumner, J. Paul, S.H.L. Cabral, "Characteristics of jiles-atherton model parameters and their application to transformer inrush current simulation," IEEE Trans. Magn, vol. 44, pp. 340-345, 2008.
- [8] E. Cardelli, E. Della Torre, V. Esposito, A. Faba, "Theoretical considerations of magnetic hysteresis and transformer inrush current", IEEE Trans. Magn., vol. 45, pp. 5247-5250, Nov. 2009.
- [9] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, H. A. Toliyat, "Dynamic modeling of three-phase asymmetric power transformers with magnetic hysteresis: no-load and inrush conditions," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.25, pp.1040-1047, 2010.
- [10] A. Darabi, M. Khosravi, "Inrush current analyzing in the transformers based on preisach model", Int. Jour. Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), vol. 1, pp. 48-53, Dec. 2009.
- [11] N. Chiesa, H.H. Hoidalén, "Novel approach for reducing transformer inrush currents: laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies", IEEE Trans. Power Del., vol. 25, pp. 2609-2616, Oct. 2010.
- [12] Y. Wang, S.G. Abdulsalam, W. Xu, "Analytical formula to estimate the maximum inrush current", IEEE Trans. Power Del., vol. 3, pp. 1266-1268, Apr. 2008.
- [13] J. Faiz, S. Saffari, "Inrush current modeling in a single-phase transformer", IEEE Trans. Magn., vol. 46, pp. 578-581, Feb. 2010.

ماژول تعریف شده است) می پردازد. شار پسماند محاسبه شده $(B_A(0), B_B(0), B_C(0))$ به بلوک محاسبه زمان بهینه اعمال می شود. این بلوک با توجه به جدول تهیه شده مطابق جدول ۱، زمان بهینه کلیدزنی (T_C و T_B, T_A) را تعیین کرده و ذخیره می کند. هنگامی که فرمان بسته شدن بریکرها (C_{in}) صادر شد، کنترل کننده جریان هجومی در زمان مناسب فرمان وصل را برای بریکرهای سنکرون صادر می کند.

۷- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جهت حذف جریان هجومی در ترانسفورمرهای سه فاز با استفاده از کلیدزنی غیرهمزمان ارائه شد. ابتدا مدل جیلز-اترتون معرفی شده و پیاده سازی گشت. دقت مدل سازی با محاسبه و اندازه گیری جریان هجومی در یک ترانسفورمر تکفاز نشان داده شد. پس از آن مدل مدار الکتریکی و مغناطیسی ترانسفورمر شبیه سازی گشت. توانایی این مدل، در پیاده سازی تمام انواع ترانسفورمرها شامل ستاره، مثلث و قابل تعمیم به هر تعداد ساق دلخواه می باشد.

در نهایت با استفاده از روش PSO، زمان بهینه کلیدزنی غیرهمزمان جهت حذف جریان هجومی ارائه شد و یک مدار پیشنهادی جهت پیاده سازی آن معرفی شد.

جدول ۱- برخی از زمان های بهینه کلیدزنی برحسب شار پسماند

T_C (ms)	T_B (ms)	T_A (ms)	$B_C(0)$ (T)	$B_B(0)$ (T)	$B_A(0)$ (T)
۲/۶	۲۰	۲/۶	۱	۰	-۱
۱۶/۵	۰	۰	۰/۸	۰/۲	-۱
۱۶/۵	۰	۰	۰/۶	۰/۴	-۱
۱۶/۲	۱۰/۲	۱۰/۲	-۰/۱	-۰/۵	۰/۶
۱/۶	۱/۶	۴	۰/۳	-۱	۰/۷
۵/۸	۰	۰	۰	۱	-۱

۸- مراجع

- [1] P. Ling, A. Basak, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer",

شدت میدان مغناطیسی موثر [A/m]	: H_e
مغناطیس شوندهگی اشباع [A/m]	: M_s
پارامتر رفتار بدون هیستریزیس [A/m]	: a
پارامتر میدان اصلی	: α
پارامتر پینینگ [A/m]	: k
پارامتر انعطاف پذیری حوزه	: c
مقاومت اتصال کوتاه شبکه در اولیه ترانسفورمر	: $R_{p,(a,b,c)}$
سلف اتصال کوتاه شبکه در اولیه ترانسفورمر	: $L_{p,(a,b,c)}$
مقاومت معادل تلفات هسته ترانسفورمر	: $R_{c,(ab,bc,ca)}$

ضمیمه ب:

توان نامی:	۵۰۰ کیلو ولت آمپر
ولتاژ:	۲۰۰۰۰/۴۰۰ ولت
فرکانس:	۵۰ هرتز
گروه برداری:	Dyn5
نوع ورق:	M5T30
سطح مقطع هسته:	۲۸۲ سانتی متر مربع
تعداد دور فشار ضعیف:	۲۲ دور
تعداد دور فشار قوی:	۲۰۰۱ دور
: $R_{p,(a,b,c)}$	۸۰ اهم
: $R_{p,(bc,ab,ca)}$	۶/۸۴ اهم
: $R_{c,(ab,bc,ca)}$	۷۰۰ کیلو اهم
: R_0	۱۰۰ کیلو اهم
: $L_{p,(a,b,c)}$	۰/۲۵۴۶ هانری
: $L_{p,(ab,bc,ca)}$	۰/۱۴۶۶ هانری
: $B_a(0)$	۰/۵ تسلا
: $B_b(0)$	-۰/۲۵ تسلا
: $B_c(0)$	-۰/۲۵ تسلا

ضمیمه الف:

- [14] D. C. Jiles, D. L. Atherton, "Ferromagnetic hysteresis," IEEE Trans. on Magn., vol. 19, pp.2183, 1983.
- [15] H. Li, Q. Li, X. B. Xu, T. Lu, J. Zhang, L. Li, "A modified method for jiles-atherton hysteresis model and its application in numerical simulation of devices involving magnetic materials," IEEE Trans. on Magn., vol. 47, pp.1094-1097, 2011.
- [16] J. P. A. Bastos, N. Sadowski, Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods, Marcel-Dekker, 2003.
- [17] J. V. Leite, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, N. J. Batistela, J. P. A. Bastos, A. A. de Espindola, "Inverse Jiles-Atherton vector hysteresis model," IEEE Trans. Magn., vol. 40, pp.1769-1775, 2004.
- [18] J. Zeng, B. Bai, "Evaluation of Jiles-Atherton hysteresis model's parameters using mix of simplex method and simulated annealing", IEEE Int. Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 4033-4036, Oct. 2008.
- [19] J. V. Leite, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, N. J. Batistela, J. P. A. Bastos, "The inverse Jiles-Atherton model parameters identification", IEEE Trans. Magn., vol. 39, pp. 1397-1400, May 2003.
- [20] S. Cao, B. Wang, R. Yan, W. Huang, Q. Yang, "Optimization of hysteresis parameters for the Jiles-Atherton model using a genetic algorithm", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 14, pp. 1157-1160, Jun. 2004.
- [21] J. Liang, A. Qin, P. Suganthan, S. Baskar, "Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions", IEEE Trans. Evolutionary Computation, vol. 10, pp. 281-295, 2006.
- [22] E. Fuchs, Y. You, "Measurement of λ -i Characteristics of Asymmetric Three-Phase Transformers and Their Applications", IEEE Trans. Power Del., vol. 17, pp. 983-990, Oct. 2002.
- | | |
|-------------|--------------------------------------|
| : B | چگالی شار مغناطیسی [T] |
| : H | شدت میدان مغناطیسی [A/m] |
| : μ_0 | نفوذپذیری مغناطیسی خلاء [Wb/(A.m)] |
| : M_{rev} | مغناطیس شوندهگی برگشت پذیر [A/m] |
| : M | مغناطیس شوندهگی [A/m] |
| : M_{irr} | مغناطیس شوندهگی برگشت ناپذیر [A/m] |
| : M_{an} | مغناطیس شوندهگی بدون هیستریزیس [A/m] |

