

اضافه ولتاژ در ترانسفورماتور سه فاز ناشی از وضعیت قرار گرفتن سرهای سیم پیچها

فرامرزرهبر
وزارت نیرو
شرکت توانیر

حسین محسنی
دانشکده فنی
دانشگاه تهران

چکیده

در ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً "سرهای هر سیم پیچ در یک سمت هسته جای داده می‌شوند، ولی می‌توان آنها را در دو سمت مختلف هسته نیز قرار داد. در این صورت تعداد رشته سیمهای مربوط به این سیم پیچ که از پنجره های مجاور ستون آن عبور می‌کنند برابر نخواهند بود. اگر از این سیم پیچ جریان بگذرد آمپر دور گذرنده از پنجره های هسته ترانسفورماتور برابر نمی‌شوند. این اختلاف آمپر دور می‌تواند باعث عبور شار شدیدی از دیگر ستونهای هسته شود و در سیم پیچهای این ستونها اگر سرهایشان آزاد و یا به امیدانس بزرگی متصل باشند ولتاژی شدید القا کند.

شرح مقاله

سیمهای ثانویه یا یکدیگر مساوی اند در نتیجه مجموع آمپردورهای این رشته سیمها در دو پنجره نمی‌تواند صفر باشد.

شکل (۲) مدار مغناطیسی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که تنها از سیم پیچهای ولتاژ بالا و پائین ستون وسط جریان عبور می‌کند و سیم پیچهای دو ستون دیگر آزادند. رلکتانسینوهای سه ستون R_1 و R_2 و R_3 غیرخطی اند و مقدارشان بستگی به مقدار شار دارد.

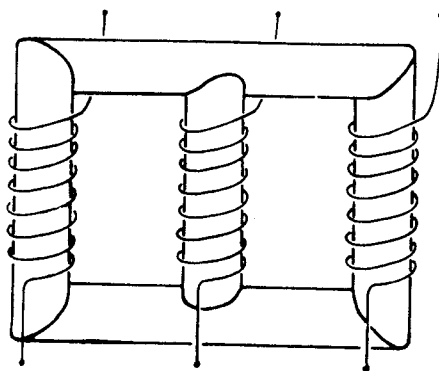
نیروهای محرک مغناطیسی MMF_1 و MMF_2 همان آمپر دورهای دو پنجره هسته ترانسفورماتورند و اختلاف بین آنها باعث می‌شود که یک شار مغناطیسی از مسیر ستونهای کناری و یوغهای بالا و پائین حلقه ۱ در شکل (۲) بگذرد. این شار می‌تواند خیلی شدید باشد به طوری که ستونهای کناری را اشباع کند.

بر اثر عبور این شار از ستونهای کناری و ولتاژ شدیدی در سیم پیچهای این ستونها القای می‌شود. اگرچه شار در ستونهای کناری محدود به مقداری است که هسته را به اشباع می‌رساند، ولتاژ القایی می‌تواند چند برابر ولتاژنا می‌شود، زیرا شار ممکن است به سرعت به مقدار اشباع برسد. از طرف دیگر ولتاژ سرسیم پیچ (بوشینگ) می‌تواند تا دو برابر ولتاژ القا شده در آن برسد زیرا ولتاژ سرسیم پیچ به دلیل وجود اثر خازن قدری دیرتر به مقدار ولتاژ القا شده می‌رسد و در نتیجه اثر خود القای سیم پیچ، نوسان می‌کند. این مسئله با توجه به مدار معادل سیم پیچهای ستونهای کناری روشن تر می‌شود (شکل ۵) در صورتی که مقدار جریان در سیم پیچهای ستون وسط بیش از جریان نامی باشد ستونهای کناری در زمانی بسیار کوتاه به اشباع می‌رسند و تغییرات شار در این ستونها خیلی بیشتر از حالت کار

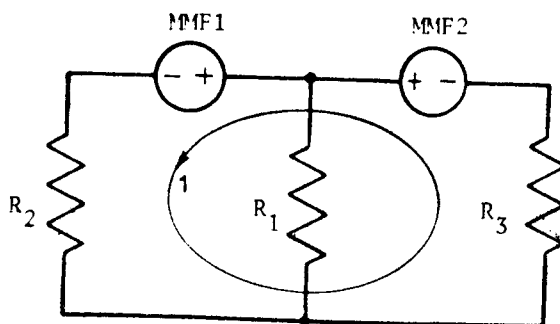
در این مقاله امکان پیدایش اضافه ولتاژ در ترانسفورماتور بر اثر قرار گرفتن سرهای یک سیم پیچ (مثلاً "سیم پیچ ولتاژ بالا) در دو سمت مختلف هسته بررسی می‌شود و روشی برای محاسبه اضافه ولتاژ با توجه به اثر اشباع و پسماند در هسته به کمک انتگرال گیری قدم به قدم عرضه می‌شود. همچنین روابط لازم برای انتگرال گیری قدم به قدم در مورد جریان بار، جریان اتصال کوتاه و جریان هجومی تعیین و اضافه ولتاژ محاسبه شده در یک مورد با اندازه گیری مقایسه می‌شود.

کلیات

هسته یک ترانسفورماتور سه ستونه که سرهای سیم پیچ مثلاً "اولیه آن در دو سمت مختلف هسته قرار دارند در شکل (۱) نشان داده شده است. تعداد سیمهای گذرنده فاز وسط این سیم پیچ از دو پنجره ترانسفورماتور برابر نیستند. فرض می‌شود سرهای سیم پیچ ثانویه در یک سمت از هسته قرار دارند، در نتیجه تعداد سیمهای گذرنده آن از دو پنجره هسته برابرند. اگر در چنین ترانسفورماتوری از سیم پیچهای ولتاژ بالا و پائین فاز وسط جریان بگذرد، آمپر دورهای این دو سیم پیچ نمی‌توانند یکدیگر را در دو پنجره ترانسفورماتور خنثی کنند. در یک پنجره N_1 رشته مربوط به سیم پیچ اولیه فاز چوسط N_2 رشته مربوط به سیم پیچ ثانویه همان فاز وجود دارد. در حالی که در پنجره دیگر N_1+1 رشته مربوط به سیم پیچ اولیه و N_2 رشته مربوط به سیم پیچ ثانویه قرار دارد. چون جریان تمام رشته سیمهای اولیه با یکدیگر برابرند، همچنین جریان همه رشته



شکل (۱) - هسته یک ترانسفورماتور سه ستونه با سرهای سیم پیچی در دو سمت مختلف هسته (تنها یک سیم پیچ بر روی هر ستون رسم شده است) .



شکل (۲) - مدار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور

آید . چون ولتاژ القا شده در سیم پیچها باعث نوسان آنها خواهد شد ، باید مدار الکتریکی سیم پیچها نیز همزمان با مدار مغناطیسی بررسی شود .

جریان سیم پیچها در حالت نوسان بر روی مقدار شار اثر خواهد گذاشت و امکان پیدایش رزونانس نیز وجود دارد که می تواند از این راه بررسی شود .

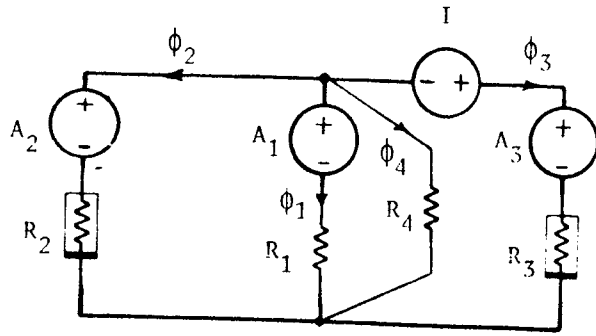
۲ - محاسبه اضافه ولتاژ ناشی از جریان اتصال کوتاه

در صورتی که یک سیم پیچ از ستون وسط اتصال کوتاه و سیم پیچ دیگر تغذیه شود محاسبه چندان دشوار نخواهد بود . فرض می شود سیم پیچ اتصال کوتاه شده ، سیم پیچ نزدیکتر به هسته باشد . در نتیجه با صرف نظر کردن از مقاومت اهمی ،

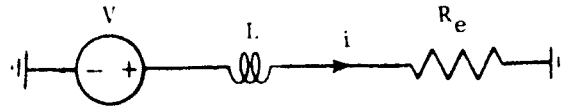
معمولی ترانسفورماتور می شود . همچنین پسماند در مقدار ولتاژ اثر بگذارد .

البته جریان سیم پیچهای ستونهای کناری در مقدار شار و ولتاژ اثر کلی دارد و اگر این سیم پیچها به امیدانسهای نسبتاً کوچکی وصل باشند جریان گذرنده از آنها می تواند شار ناشی از اختلاف نیروهای محرک مغناطیسی MMF_1 و MMF_2 را از بین ببرد یا کمتر کند .

جریان گذرنده از سیم پیچهای ستون وسط ممکن است جریان بار یا جریان اتصال کوتاه یا جریان هجومی وصل شدن ترانسفورماتور باشد . در هر حالت باید مسئله به کمک مدار معادل مغناطیسی بررسی و مقدار شار در هر ستون و تغییرات آن با توجه به اثر اشباع و پسماند محاسبه شود و میزان ولتاژ القا شده به دست



شکل (۳) - مدار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور. درحالی که ستون وسط اتصال کوتاه شده است .



شکل (۴) - مدار الکتریکی برای محاسبه جریان در سیم پیچ اتصال کوتاه شده .

ویا به صورت ماتریسی A $R\phi$ بیان کرده در آن داریم :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ R_1 & -R_2 & 0 & 0 \\ R_1 & 0 & -R_3 & 0 \\ R_1 & 0 & 0 & -R_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} \phi_1 & & & 0 \\ \phi_2 & & & A_1 - A_2 \\ \phi_3 & & & A_1 + A_3 + I \\ \phi_4 & & & A_1 \end{bmatrix}$$

از داخل این سیم پیچ شاری نمی گذرد (یا شار آن تغییر نمی کند)
سیم پیچهای دو ستون دیگر آزاد یا متصل به یک امپدانس
(خازن ، خط ، برقیگیر) فرض می شوند . مدار مغناطیسی هسته
مطابق شکل (۳) است .

" R_1 رلوکتانس مسیر شار ϕ_1 بین دو سیم پیچ روی
ستون وسط است و از امپدانس اتصال کوتاه به دست می آید این
رلوکتانس ثابت و نسبتاً "بزرگ" است . R_2 و R_3 رلوکتانسهای
غیرخطی ستونهای کناری در مسیر شارهای ϕ_2 ، ϕ_3 اند
و R_4 رلوکتانس مسیر شار ϕ_4 است که از یوغ بالا به یوغ پائین
از طریق هوا عبور می کند . A_1 و A_2 و A_3 مجموع آمپر
دوره های سیم پیچهای سه ستون و جریان در سیم پیچ ولتاژ بالای
ستون وسط است . روابط مدار را می توان با معادلات زیر :

$$\begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 &= 0 \\ R_1\phi_1 - R_2\phi_2 &= A_1 - A_2 \\ R_1\phi_1 - R_3\phi_3 &= A_1 - A_3 + I \\ R_1\phi_1 - R_4\phi_4 &= A_1 \end{aligned}$$

رابطه ماتریسی فوق را می توان به صورت $\phi = R^{-1} A$ ، نوشت ، با توجه به صفر بودن جزء اول ماتریس این رابطه در نهایت به صورت زیر درمی آید :

$\phi 1$	$-R3R4$	$-R2R4$	$-R2R3$	$A1+A2$
$\phi 2$	$R1R3+R1R4+R3R4$	$-R1R4$	$-R1R3$	$A1-A3+I$
$\phi 3$	$-R1R4$	$R1R2+R1R4+R2R4$	$-R1R2$	$A1$
$\phi 4$	$-R1R3$	$-R1R2$	$R1R2+R1R3+R2R3$	

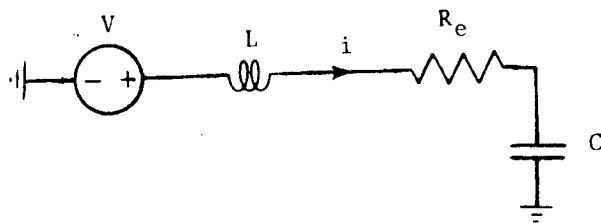
در لحظه $t = 0$ جریان I در تمام شاخه های مدار صفر فرض می شود . در این لحظه کلید شکل (۴) بسته می شود . جریان I را در لحظه $t = \Delta t$ به فرض Δt بسیار کوچک مثلا 10^{-4} ثانیه حساب می کنیم . با داشتن I مقدار $A1$ و به کمک رابطه (۳) $\phi 1$ تا $\phi 1$ را به دست می آوریم . همچنین تغییرات $V = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ ولتاژ U را برای مدار شکل (۵) برای دو ستون کناری محاسبه می کنیم .

با داشتن ولتاژ خازن C و جریان I در این مدار (در قدم اول هر دو صفرند) افت ولتاژ در سلف L به دست می آید . در نتیجه تغییرات جریان $\Delta I = \frac{U1}{L} \Delta t$ و سپس جریان I در این شاخه برای قدم بعد محاسبه می شود . با داشتن I تغییر بار خازن C به صورت $\Delta \phi = I \Delta t$ به دست می آید . و با بار قبلی خازن جمع می شود . در نتیجه ولتاژ خازن به دست می آید . با داشتن جریان در این شاخه ها که برای سیم پیچ هر ستون جداگانه محاسبه شده است مقدار $A2$ و $A3$ ، به دست می آید و برای قدم انتگرال گیری بعد منظور می شود به این ترتیب قدم به قدم زمان افزایش می یابد و جریانها و ولتاژها محاسبه می شوند . با تغییر شار ، ولوکتانسهای $R2$ ، و $R3$ باید محاسبه و مقدار جدید آنها در رابطه (۳) منظور شود .

با داشتن مقادیر $A1$ و $A2$ و $A3$ و T می توان مقادیر $\phi 1$ تا $\phi 4$ را محاسبه کرد . باید دانست که $R3$ ، $R2$ ، غیر خطی اند و مقدار آنها به ترتیب به $\phi 2$ و $\phi 3$ بستگی دارد . جریان I با توجه به امپدانس اتصال کوتاه آن سیم پیچ که به منبع ولتاژ وصل شده است محاسبه می شود . شکل (۴) مقدار الکتریکی مربوط به محاسبه جریان I را نشان می دهد . $A1$ حاصل ضرب همین جریان در تعداد حلقه های سیم پیچ تغذیه شده است .

در صورتی که شار و تغییرات آن در دو ستون کناری محاسبه شود ولتاژ القا شده در سیم پیچهای این دو ستون به دست می آید . این سیم پیچها خو نسبت به بدنه اثر ظرفیتی دارند که به صورت متمرکز در انتهای سیم پیچ ولتاژ بالا در نظر گرفته می شود . این ظرفیت از محاسبه انرژی میدان الکتریکی بین حلقه ها و بین سیم پیچها و بدنه به دست می آید . مدار معادل سیم پیچ ستون کناری مطابق شکل (۵) است .

"U ولتاژی است که بر اثر تغییر شار در سیم پیچ کناری القا می شود ، با اندوکتانس سیم پیچ و R مقاومت آن است که باید با توجه به فرکانس مجموعه منظور شود . ظرفیت C در مدار شکل (۵) می تواند ظرفیت با سبار و وسایل متصل به آن را نیز در برگیرد .



شکل (۵) - مدار الکتریکی سیم پیچ ستون کناری

۳- محاسبه اضافه ولتاژ ناشی از جریان هجومی

در این حالت مدار مغناطیسی هسته مطابق شکل (۶) است. کلید فاز وسط (در اتصال ستاره) ابتدا و دو کلید دیگر با کمی تاخیر پس از آن بسته می شود. مقدار جریان هجومی فاز وسط بستگی به شرایط هسته دارد و خود مجهول است. ولی مقدار شار ستون وسط از رابطه کلی (۴) به دست می آید.

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t U(t) dt + \phi_0 \quad (4)$$

برای مدار شکل (۶) همان روابط (۱) صادق اند ولی در اینجا مجهولها ϕ_2 تا ϕ_4 و AL اند لذا می توان نوشت:

$$\begin{aligned} A1 + R2\phi_2 &= A2 + R1\phi_1 \\ (A1 + I) + R3\phi_3 &= A3 + R1\phi_1 \\ A1 + R4\phi_4 &= R1\phi_1 \\ \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 &= -\phi_1 \end{aligned} \quad (5)$$

که به صورت ماتریسی $BX = b$ نشان داده می شود و در آن داریم:

$$\begin{aligned} A1 & & A2 + R1\phi_1 \\ \phi_2 & & A3 + R1\phi_1 \\ b = & & R1\phi_1 \\ \phi_3 & & \\ \phi_4 & & -\phi_1 \end{aligned} \quad (6)$$

برای در نظر گرفتن تقریبی پسماند می توان منحنی $A(\phi)$ را در جهت افقی به میزان A_0 حرکت داد. مقدار A_0 را باید در هر شاخه از مدار مغناطیسی که اثر پسماند وجود دارد به صورت یک نیروی محرک مغناطیسی در نظر گرفت. جهت A_0 متغییر است و مقدار آن بستگی به حداکثر شار و احتمالاً "مقدار لحظه ای شار و آمپر دور دارد".

روش دیگر در منظور کردن اثر اشباع و پسماند این است که این منحنی در هر محدوده معینی خطی فرض شود. در این حالت هر قطعه از مبدا مختصات عبور نمی کند و روابط (۲) و (۵) به آن صورت قابل اجرا نیستند. اما می توان تغییرات ϕ را بر حسب تغییرات A یا برعکس محاسبه کرد. یعنی در روابط (۲) و (۵) به جای ϕ تغییرات آن $\Delta\phi$ را به جای A تغییرات آن ΔA را قرار داد. مقدار رلوکتانس R شیب منحنی $A(\phi)$ یعنی $R = \frac{\Delta\phi}{\Delta A}$ است. سپس می توان $\Delta\phi$ (یا ΔA) را در هر قدم حساب کرد و با ϕ (یا A) از قدم قبل جمع کرد تا مقدار آن در قدم جدید به دست آید. البته شیب منحنی $A(\phi)$ بستگی به حداکثر شار که قبلاً "به آن رسیده است و مقادیر لحظه ای A و ϕ دارد".

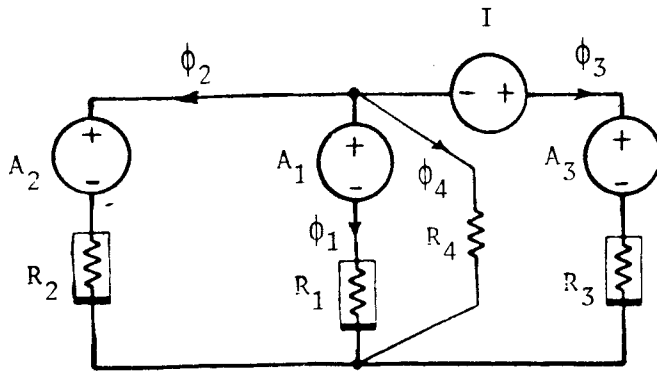
$$R = \begin{bmatrix} 1 & R2 & 0 & 0 \\ 1 + \frac{1}{N} & 0 & R3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & R4 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X =$$

۵- شرایط تولید اضافه ولتاژ و مثال برای یک ترانسفورماتور قدرت در ترانسفورماتورهای سه ستونه، اگر از سیم پیچ ستون وسط که دوسر آن در دو سمت مختلف هسته قرار دارند جریان عبور کند اضافه ولتاژی بسیار شدید در سیم پیچهای ستونهای کناری پدید می آید. البته باید سرهای سیم پیچهای کناری آزاد یا به امپدانسهای نسبتاً "بزرگی متصل باشند، در غیر این صورت اضافه ولتاژ تولید نمی شود. جریان گذرنده از سیم پیچ ستون وسط که دوسر آن در دو سمت هسته است می تواند جریان باز یا جریان اتصال کوتاه یا جریان هجومی وصل شدن باشد. این اضافه ولتاژ اگر جریان از سیم پیچ ستون کناری بگذرد پدید

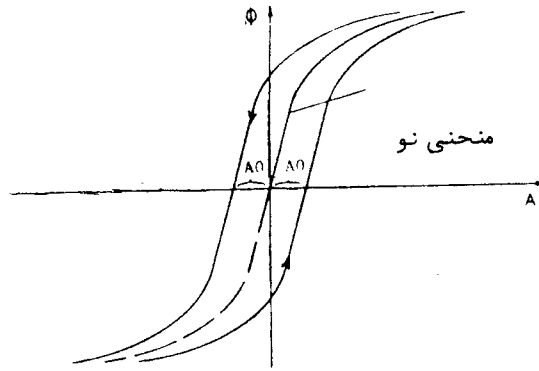
از آنجا که مقدار I ناگهانی تغییر نمی کند اگر در هر قدم آن را برابر مقدار قدم قبل بگیریم، خطا بزرگ نخواهد بود.

۴- منظور کردن اثر اشباع و پسماند

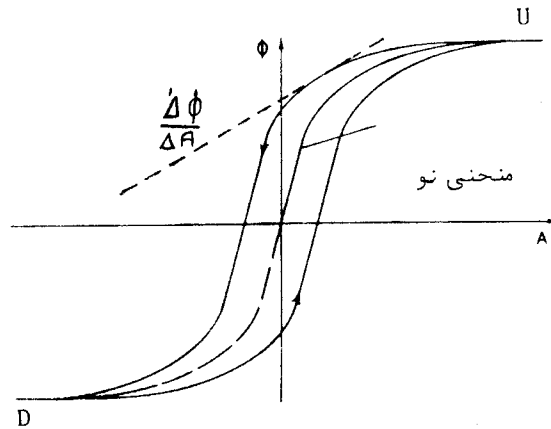
برای در نظر گرفتن اثر اشباع می توان مقدار رلوکتانس R را بر حسب ϕ تغییر داد و در روابط (۳) و (۵) منظور کرد. یادآور می شود که با توجه به این روابط منظور از رلوکتانس نسبت $\frac{\phi}{A}$ شار ϕ به آمپر دور A لازم برای به وجود آوردن شار در یک مسیر معین است یعنی منحنی غیر خطی $A(\phi)$ به صورت یک خط منظور می شود که از مبدا مختصات می گذرد (شکل ۷).



شکل (۶) - مدار مغناطیسی هسته در حالت جریان هجومی



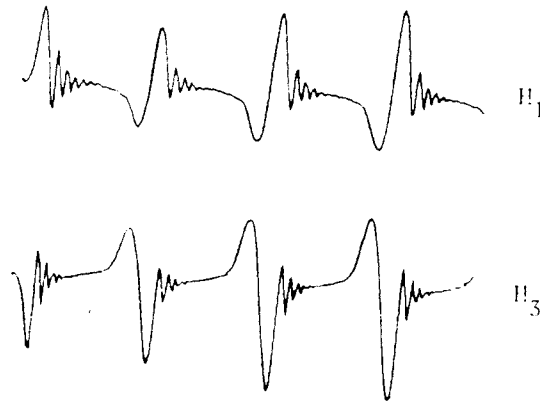
شکل (۷) - در نظر گرفتن اثر پسماند بصورت یک آمپر دور



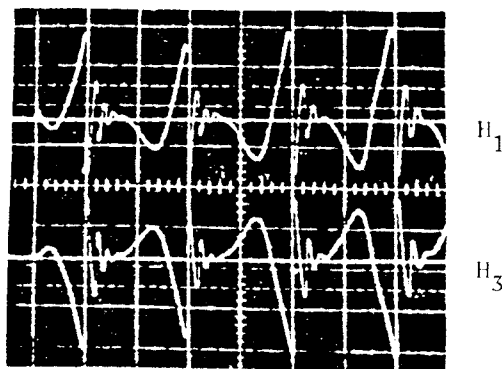
شکل (۸) - در نظر گرفتن اثر اشباع و پسماند هسته

اتصال کوتاه پیش بیاید خطر بزرگتر است احتمال این اتصال کوتاه به لحاظ آلودگی محیطی چندان بعید نیست . محاسبات انجام شده نشان داده است که مقدار خازن C ، متصل به فازهای کناری (خازن C در شکل (۵) اثر زیادی بر مقدار ولتاژ دارد و احتمال پدید آمدن ولتاژهای خیلی شدید برای بعضی مقادیر خازن وجود دارد . محاسبات بالا در مورد یک ترانسفورماتور ۱۲۵ مگاوات آمپری و ۶۳/۲۳۰ کیلوولتی تصویر شده در شکل‌های پیش انجام شده است . شکل‌های ۹ و ۱۰ نتیجه محاسبه و اندازه‌گیری را در حالت جریان اتصال کوتاه فاز وسط نشان می‌دهد . با اضافه شدن ظرفیت خازن C در شکل (۵) مقدار اضافه ولتاژ می‌تواند

نمی‌آید . زیرا در این حالت یک مسیر بسته آهنی آزاد وجود ندارد که شار به مقدار و سرعت تغییر دلخواه بتواند از آن بگذرد . مقصود از مسیر بسته آزاد مسیری است که شار در هیچ قسمت از آن مسیر متأثر از منبع قوی‌تر نباشد . در حالی که یک سیم پیچ ستون کناری به منبع ولتاژ وصل (یا اتصال کوتاه) باشد مقدار شار را آن منبع (یا آن اتصال کوتاه) تعیین می‌کند و در نتیجه مقدار شار و تغییرات آن محدود است . لذا خطر موقعی وجود دارد که کلید فاز وسط در طرف ستاره بسته شود و کلیدهای دیگر باز باشند . در این حالت جریان هجومی می‌تواند اضافه ولتاژی در سیم پیچ ستون‌های دیگر پدید آورد . البته اگر پس از وصل شدن کلید فاز وسط ، در طرف دیگر



شکل (۹) - ولتاژ محاسبه شده سیم پیچ‌های ستون کناری



شکل (۱۰) - ولتاژ اندازه‌گیری شده سیم پیچ‌های کناری

فهرست منابع

- 1- Ewart, D.N.: Digital Computer Simulation Model of A Steel-Core Transformer IEEE Trans. on Power Delivery PWRD-1 No.3 July 1986"

به (۶) برابر مقدار نامی و بیشتر برسد که باعث سوختن ترانسفورماتور خواهد شد .

۶- نتیجه

بدین سان ترانسفورماتورهایی که ابتدا و انتهای سیم پیچ آن در دو سمت مختلف هسته قرار دارند به ضعفی دچار است که تئوری و محاسبات آن از نظر گذشت . برطرف کردن هر ضعف اگر هم ممکن باشد احتمالاً "ضعف دیگری پدید می آید . لذا راه حلی صد درصد مطمئن وجود ندارد . بایستن امید انسهای مناسب به صورت مستمر به ترانسفورماتور می توان جلوی پدید آمدن اضافه ولتاژ را گرفت . استفاده از برقیگر به تنهایی به عنوان امپدانس صحیح نیست . زیرا برقیگر در مرحله اول برای گرفتن اضافه ولتاژهای خارج از ترانسفورماتور است و باید به عنوان آخرین نقطه اتکا و ضریب اطمینان در نظر گرفته شود . از طرف دیگر مابقی ولتاژ برقیگر خود نسبتاً " بزرگ است .

به عنوان امپدانس مستمر می توان خازن یا سلف یا هر دو را که بر روی دو فاز کناری طرف ستاره یا هر سه فاز طرف مثلث وصل می شود به عنوان جزء لاینفک ترانسفورماتور در نظر گرفت و بهتر است تا حد امکان داخل ترانسفورماتور نصب شود تا احتمال پدید آمدن خطا به حداقل برسد .

مقدار این سلف یا خازن و طرز قرار گرفتن آن باید با مطالعه و بررسی تعیین شود .