

محدود کردن جریان هجومی ترانسفورماتور به وسیله کنترل سوئیچینگ

مهران کاویانی

kavyani@srttu.edu

عضو هیئت علمی دانشگاه شهید رجائی

حامد خلیلی نیا

hamedkhalilinia@yahoo.com

دانشگاه شهید رجایی

خلاصه:

جریان هجومی ترانسفورماتور هارمونیکهای دامنه بلند جریان هستند که موقعی که هسته ترانسفورماتور در اشباع است تولید می شوند. این جریانه‌ها اثرات نامطلوبی دارند که شامل افت پتانسیل یا تلفات حرارتی برای ترانسفورماتور، عملکرد بد رله‌های حفاظتی، و کم شدن کیفیت توان بر روی سیستم می‌باشد. کنترل سوئیچینگ در ترانسفورماتور می‌تواند به طور بالقوه این حالت‌های گذرا را حذف کند. این مقاله تئوری بحث شده درباره شار هسته گذرا را شرح می‌دهد.

لغات کلیدی: جریان هجومی، کنترل سوئیچینگ، شار باقیمانده، سوئیچهای ترانسفورماتور

۱-مقدمه:

ترانسفورماتورهای قدرت می‌توانند شار بزرگ غیرمتقارنی ایجاد کنند و بر روی یک و یا چند سیم پیچ بر روی ترانسفورماتور باعث اشباع شوند. این اشباع منجر به بوجود آمدن جریانی با دامنه بزرگ می‌شود که در طیف وسیع هارمونیک‌ها بدست می‌آید و دارای یک جزء جریان مستقیم بزرگ می‌باشد، این جریان می‌تواند باعث خطا در عملکرد رله‌های حفاظتی و فیوزها و مضرات مکانیکی برای سیم پیچهای ترانسفورماتور برای نیروی مغناطیسی شود و عموماً کیفیت قدرت را در سیستمها کاهش می‌دهد. تاثیر این حالات گذرا معمولاً بوسیله کم کردن حساسیت دستگاههای حفاظتی متعادل می‌شود. همچنین مقاومت بسته شده ای بصورت سری با سیم پیچ اولیه برای کم کردن دامنه جریان هجومی استفاده می‌شود. همچنین برای کم کردن دامنه این جریانیان هجومی وصل ترانسفورماتور به شبکه قدرت در یک محدوده معینی می‌تواند موثر باشد. این مقاله نشان خواهد داد که تاثیر شار باقیمانده می‌تواند اختصاصاً در تعیین یک محدوده بهینه برای لحظه وصل شدن به منبع بکار رود که وصل شدن در این محدود می‌تواند باعث کم شدن جریان هجومی شود.

جریان هجومی در ترانسفورماتور

نیروی محرک برای جریان هجومی ولتاژ بکار رفته برای سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور می باشد. میزان افزایش جریان هجومی به شار اولیه و لحظه کلید زنی بستگی دارد. همچنین ترانسفورماتور دارای هسته با اشباع شدیدتر، جریان هجومی بیشتری تولید می کند.

رفتار ایده آل (بدون مقاومت) از جریان هجومی بوسیله روابط زیر شرح داده می شود:

$V(t)$ ولتاژ لحظه ای بکار رفته برای اولیه و $\lambda(t)$ شار لحظه ای القاء شده در داخل سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور می باشد.

$$V(t) = \frac{d}{dt} I(t)$$

حال اگر فرض کنیم $V(t) = V_m \sin \omega t$ و لحظه وصل شدن ترانسفورماتور به منبع را t در نظر بگیریم و همچنین $\lambda(t) = N\phi(t)$ آنگاه:

$$V(t) = N \frac{dj(t)}{dt}$$

$$N dj(t) = V(t) dt$$

آنگاه با انتگرال گیری از دو طرف از زمان t تا t داریم:

$$\int_{t_0}^t dj(t) = \frac{1}{N} \int_{t_0}^t v(t) dt$$

$$j(t) - j(t_0) = \frac{1}{N} \int_{t_0}^t V_m \sin \omega t dt$$

$$j(t) = -\frac{V_m}{NW} \cos \omega t + \frac{V_m}{NW} \cos \omega t_0 + j(t_0) \quad (1)$$

بنابراین:

$$j_{\max} = 2 \frac{V_m}{NW} + j(t_0)$$

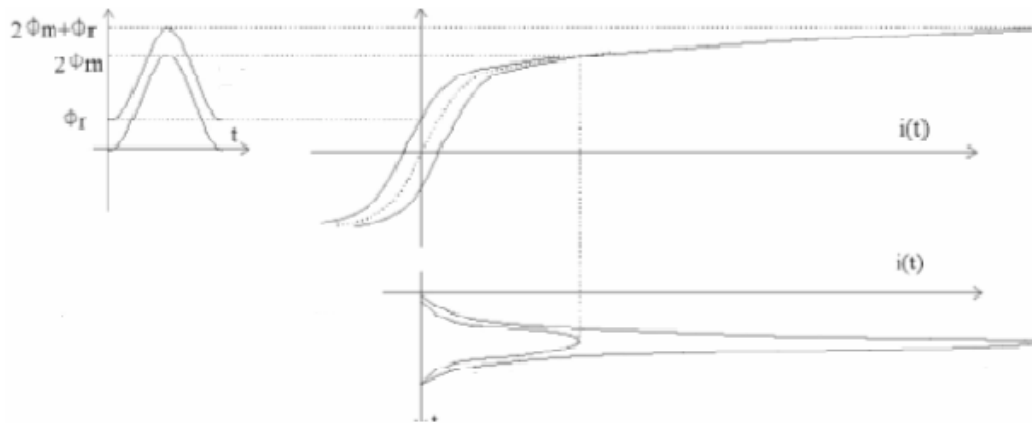
$$j_{\max} = 2j_m + j(t_0)$$

و کمترین شار ماکزیمم زمانی بدست می آید که:

$$j_m \cos \omega t_0 + j(t_0) = 0 \Rightarrow \cos \omega t_0 = \frac{-j(t_0)}{j_m}$$

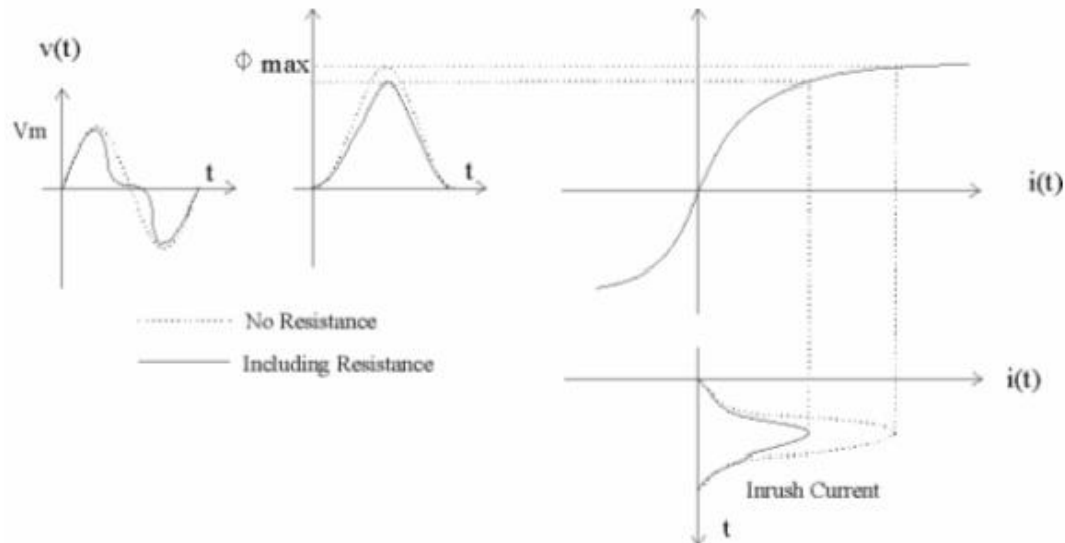
$$\Rightarrow t_0 = \frac{1}{\omega} \arccos\left(-\frac{j(t_0)}{j_m}\right)$$

شکل ۱ را برای توضیح گرافیکی از جریان هجومی در نظر بگیرید.



شکل (۱)

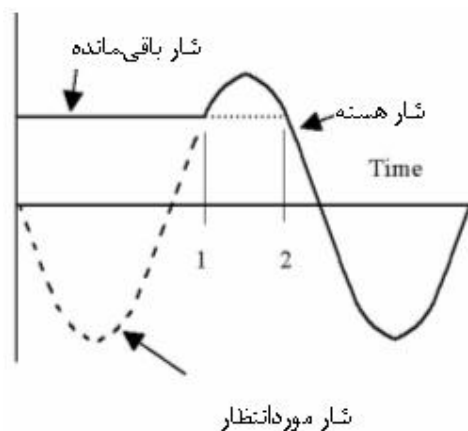
اگر مقاومت اولیه برای سیم پیچ در نظر بگیریم از آنجا که مقداری از ولتاژ در دو سر مقاومت افت می کند لذا ولتاژ ایجاد کننده شار کاهش مییابد بنابراین باعث کمتر شدن جریان هجومی می شود (شکل (۲)). توجه داشته باشید که طراحان توانسفرماتور به دلیل مسایل گرمایی این مقاومت ابتدایی را نمی توانند خیلی زیاد کنند.



شکل (۲)

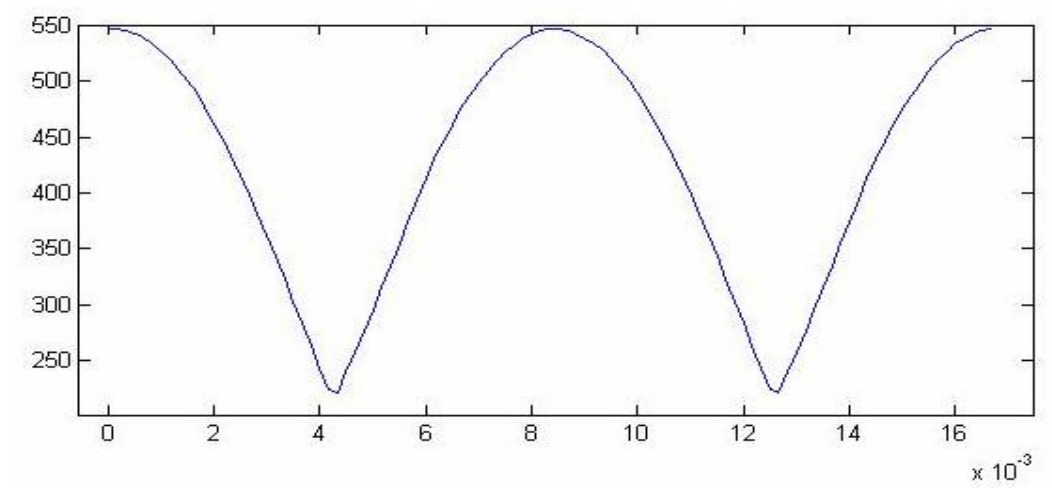
کنترل سوئیچینگ برای ترانسفورماتور تک فاز

برای حذف شار نامتقارن هسته، شار "القایی" (انتگرال ولتاژ بکار رفته) در لحظه وصل منبع باید مساوی با شار باقیمانده باشد. اگر چه هیچ شار القایی قبل از وصل شدن منبع وجود ندارد، اما منبع ولتاژ یک احتمال برای بوجود آوردن این شار القایی دارد. اگر منبع ولتاژ بعنوان یک منبع مجازی در نظر گرفته شود سپس بهینه لحظه وصل شدن منبع به ترانسفورماتور موقعی است که شار مورد انتظار مساوی با شار باقیمانده است (شکل (۳)). این یک روش را برای کنترل سوئیچینگ روی ترانسفورماتور تک فاز می دهد.



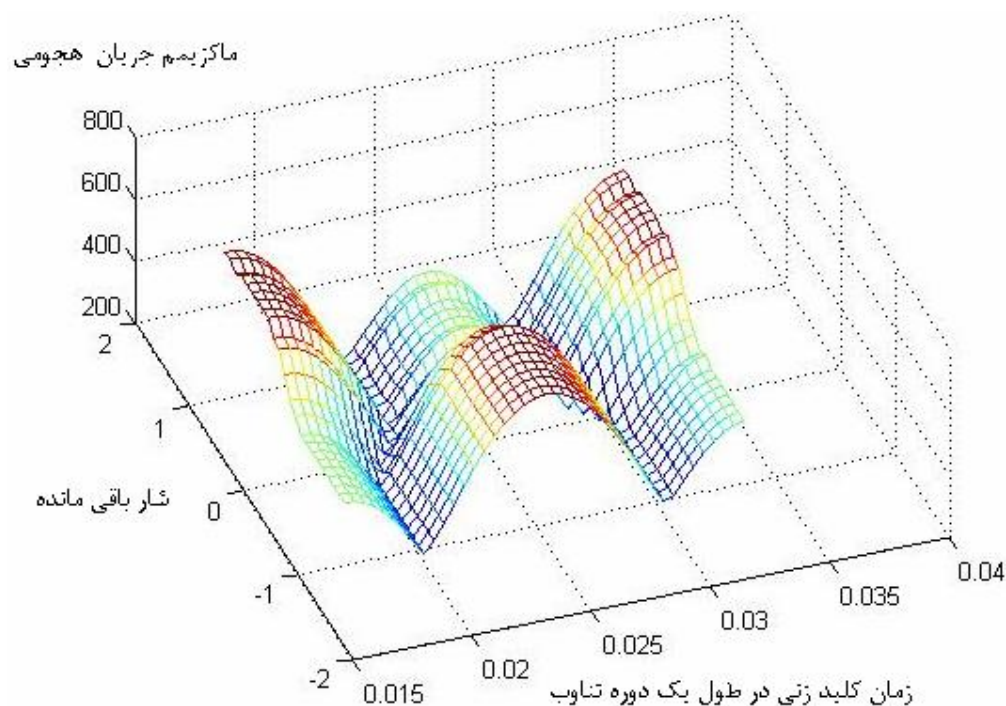
شکل (۳)

شکل (۴) منحنی تغییرات ماکزیمم جریان هجومی برای شار باقیمانده صفر نسبت به زمان کلید زنی را برای یک دوره تناوب نشان می دهد



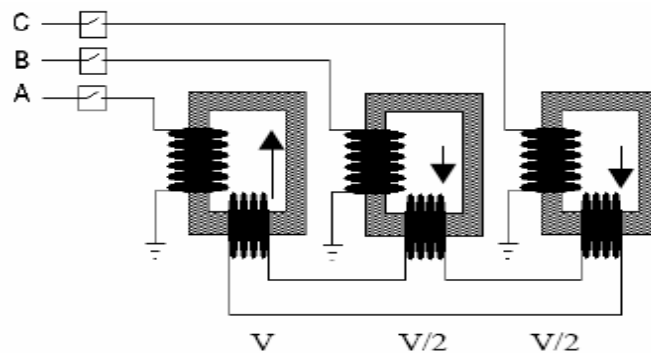
شکل (۴)

شکل زیر منحنی سه بعدی تغییرات ماکزیمم جریان هجومی نسبت به شار باقیمانده و زمان کلیدزنی را برای ترانسفورماتور تکفاز نشان می دهد.



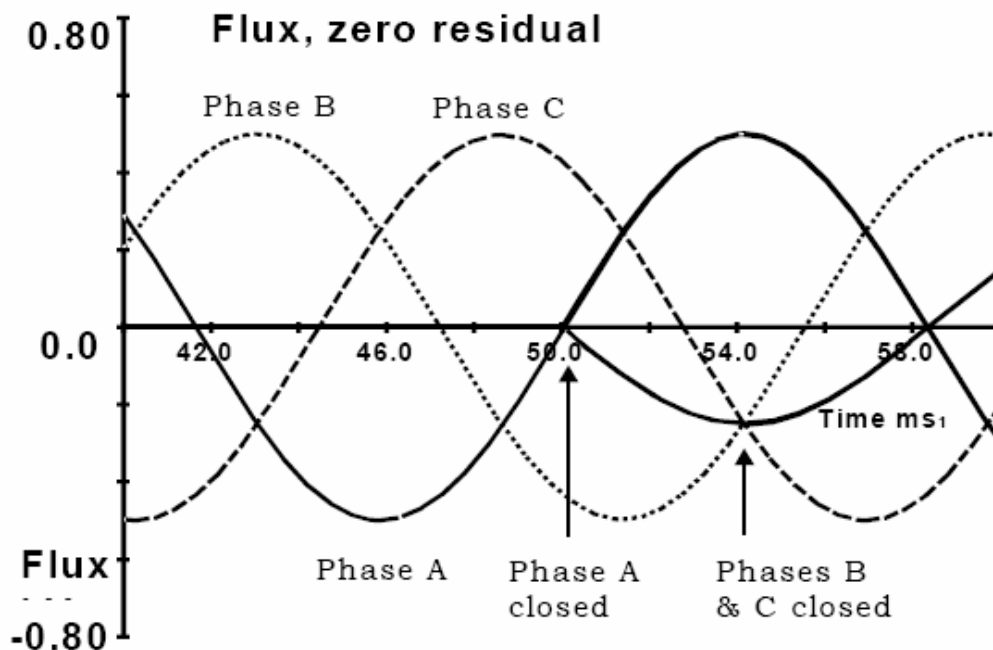
کنترل سوئیچینگ در ترانسفورماتور چند فاز بدون شار باقیمانده

فقط ترانسفورماتورهای با سیم پیچ هسته تک فاز و سیم پیچ زمین ممکن است بعنوان ترانسفورماتور سه فاز فرض شود. اما بیشتر ترانسفورماتورها در سیستمهای قدرت عکس العمل بین فازهایشان وجود دارد. در این ترانسفورماتورها، اغلب یک فاز دارای انرژی است و شار در سیم پیچهای دیگر یا پایه های هسته یک شار باقیمانده ثابت نیست، بلکه یک شار گذرا که شار "دینامیک" خوانده می شود وجود دارد. شکل (۵) یک مثال از ترانسفورماتورهای با ۳ هسته جدا که بوسیله یک سیم پیچ مثلث به هم وصل شده اند را نشان می دهد.



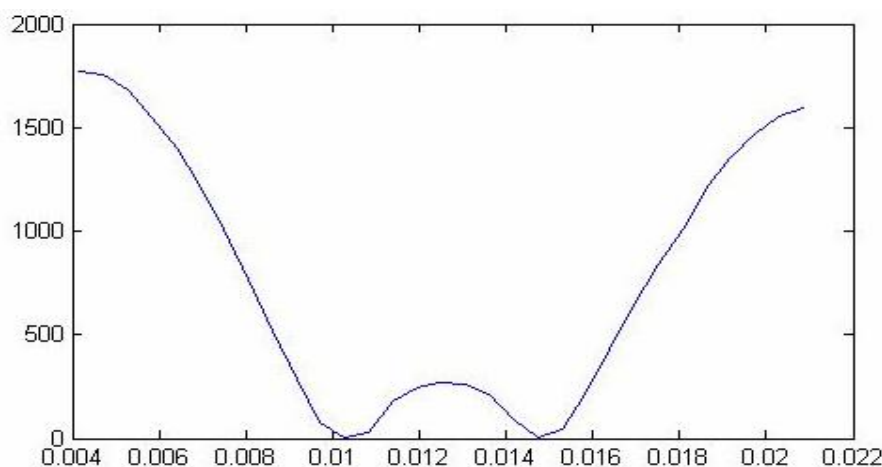
شکل (۵)

ابتدا فرض بر آن است که شار باقیمانده در همه فازها صفر است. سپس لحظه بهینه برای بسته شدن فاز اول موقعی است که شار مورد انتظار مساوی صفر است. این لحظه در قله ولتاژ است. اغلب فاز اول بسته می شود و یک ولتاژ در هر یک از دو فاز دیگر سیم پیچ مثلث ایجاد می کند. این ولتاژها دامنه شان نصف فازشان ۱۸۰ درجه با فاز ولتاژ دارای انرژی اختلاف دارد. شار ایجاد شده در هسته دو فاز دیگر شار هسته دینامیک می باشد. شارهای هسته ها در هر سه فاز بنابراین رابطه های دامنه و فاز یکسان با سیم پیچهای ولتاژ دارند. شار هسته دینامیک همچنین ۱۸۰ درجه اختلاف فاز و نصف دامنه شار فاز انرژی دار هستند. در این نمونه بهینه زمان وصل شدن به منبع دو فاز دیگر در زمان یک چهارم سیکل بعد از فاز اول می باشد. در این لحظه شار مورد انتظار و شار دینامیک با هم برابرند. شکل (۶) این موقعیت را نشان می دهد. بهینه وصل شدن به منبع برای یک ترانسفورماتور با یک هسته مشابه خواهد بود. در آن حالت شار تولید شده بوسیله فاز وصل شده به منبع مستقیماً یک شار دینامیک تولید خواهد کرد. در دو فاز دیگر این شار دینامیک مشخصات مشابهی با شار القایی بوسیله سیم پیچ مثلث شرح داده شده در بالا دارد. (شکل ۵).



شکل (۶)

شکل (۷) منحنی تغییرات زمان کلیدزنی و ماکزیمم دامنه جریان هجومی در ترانس را در یک سیکل برای فاز دوم و سوم نشان می دهد



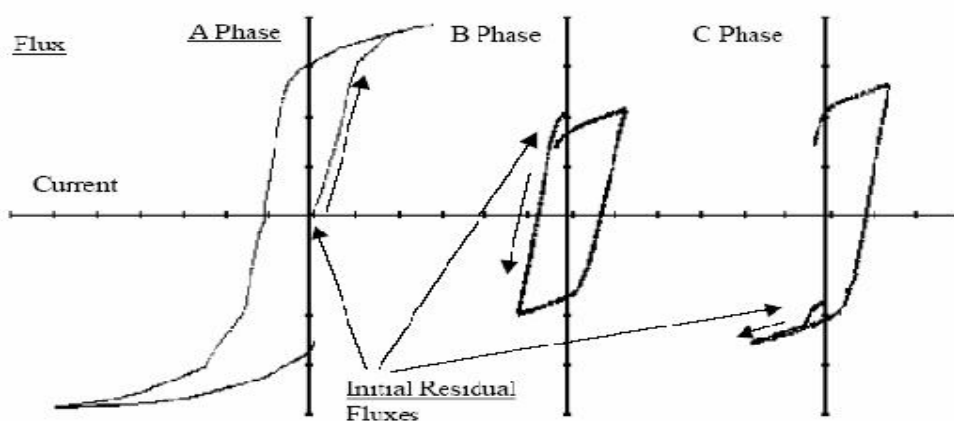
شکل (۷)

شار باقیمانده

شار هسته باقیمانده می تواند ارزش بالاتر از ۸۵٪ از پیک نرمال شار داشته باشد، البته بیشتر انواع دامنه ها در رنج ۲۰ تا ۷۰٪ می باشند. می توان نشان داد که شار باقیمانده در هسته سه فاز ترانسفورماتور ذاتاً جمعشان صفر است و فرم معمولی یک نمونه شار باقیمانده نزدیک صفر در یک فاز مثبت و منفی بعضی مقادیر محدود در دو فاز دیگر است این در تست میدان مشاهده می شود.

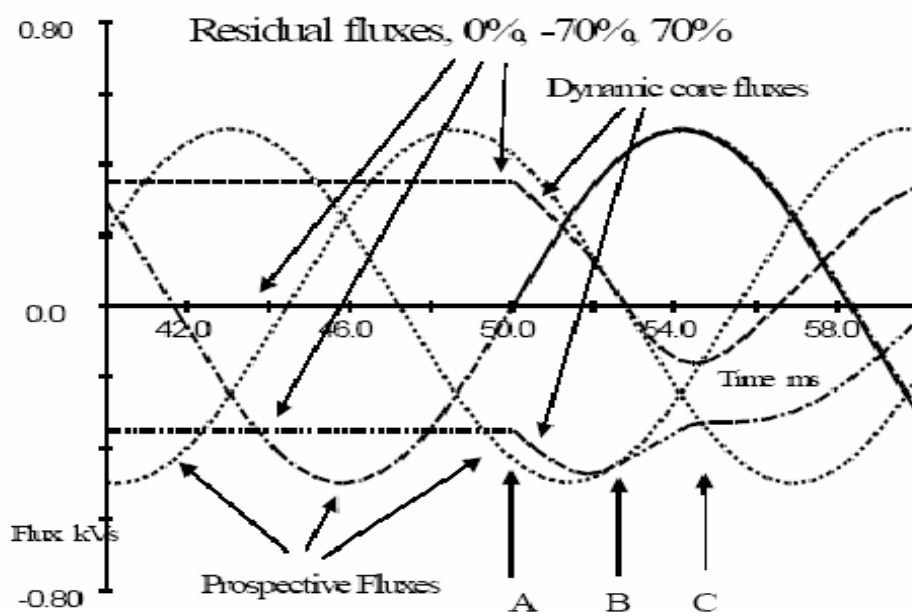
کنترل سوئیچینگ در ترانسفورماتورهای سه فاز با شار باقیمانده

ابتدا برای روشن شدن، فرض بر آن است که مدلی از شار باقیمانده در ترانسفورماتور شکل (۵) وجود دارد و فاز با شار باقیمانده صفر (فاز A) در نقطه بهینه به منبع وصل می شود (قله ولتاژ و بنابراین صفر شار مورد انتظار) در نتیجه شار دینامیک هسته در فازهای دیگر به اندازه مساوی تقسیم نمی شوند. شار دینامیک در شکل (۸) از سطح شار باقیمانده شان شروع می شوند در اطراف حلقه هیستریزیس در جهت مشایع حرکت می کنند. یک فاز (C) به زانوی مشخصه اشباع می رسد در حالی که فاز (B) هنوز در قسمت خطی است. بنابراین اندوکتانس هر دو سیم پیچ دارای مقادیر متفاوتی است. بنابراین ولتاژ روی سیم پیچها به شکل مساوی تقسیم نمی شوند. سیم پیچ با اندوکتانس بزرگتر، ولتاژ بزرگتری خواهد داشت، این ولتاژ بزرگتر یک سطح شار بزرگتری بوجود خواهد آورد شار فاز B به سوی دامنه شار فاز C افزایش پیدا خواهد کرد. در نتیجه شار در دو فاز B و C با سرعت مساوی می شود و اثر این شار باقیمانده را محدود می کند. این پدیده بعنوان "مساوی شدن شار هسته" نامیده می شود. همانطور که نشان داده شد، شار در پایه های هسته بیشتر ترانسفورماتورهای سه فاز مجموعش صفر است، این برای ترانسفورماتورهای سه پایه با سیم پیچهای مثلث صحیح است ولی برای ترانسفورماتورهای بدون اتصال مثلث که تک فاز یا پنج پایه هستند یا دارای هسته با فرم پوسته ای هستند درست نیست.



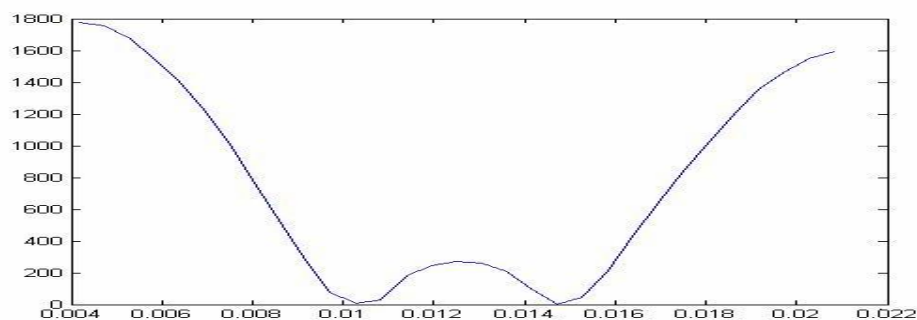
شکل (۸)

اگر یک فاز از یک ترانسفورماتور که بعنوان ترانسفورماتورهای با مجموع شار صفر در نظر گرفته می شود به منبع وصل شود، به طوری که پایه های هسته به اشباع نرود شار در آن فاز در هر لحظه با شار مورد انتظار برابر است. از آنجا که شارهای مورد انتظار و شارهای هسته ها باید مجموع صفر داشته باشند، شار دینامیک القایی هسته باید مساوی با شار مورد انتظار باشد دو بار در هر سیکل. این در شکل (۹) نشان داده شده است. این نقطه های فرصتی برای وصل کردن دو فاز دیگر به منبع بدون اشباع رفتن هسته پیشنهاد می کند.



شکل (۹)

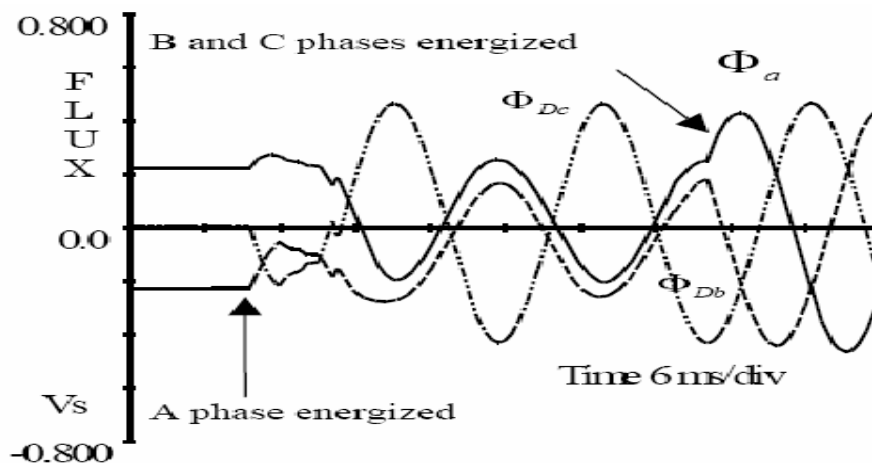
این استراتژی بستن "بستن سریع" خوانده می شود که در شکل (۱۰) منحنی تغییرات زمان کلیدزنی فاز b و c و ماکزیمم دامنه جریان هجومی برای یک فاز نشان داده شده است.



شکل (۱۰)

همانطور که مشاهده می شود در طول یک سیکل در دو نقطه کمترین جریان وجود دارد . نقطه B در شکل (۹) خطای تغییرات زمان بسته شدن زیادی نسبت به نقطه C دارد. زیرا شیب منحنی شار مورد انتظار و شار دینامیک تقریباً در نقطه B برای یک دوره تقریباً میلی ثانیه مساوی هستند که این حالت برای نقطه C وجود ندارد. یک فرصت بسته شدن هوشمندانه دیگر می توان در شکل (۹) مشاهده کرد. از نقطه A جایی که فاز اول بسته شده، شار مورد انتظار و شار دینامیک از دو فاز دیگر تقریباً برابر هستند و بنابراین شار باقیمانده برای این نمونه بهینه است اگر شار باقیمانده مقدار کمی در این دو فاز بلندتر بود، نقطه (A) نقطه بهینه ای بود برای بستن همزمان هر سه فاز. این یک فرصت یکتا برای سیستمهای ولتاژ پایین پیشنهاد می کند ، جایی که مدار شکنهای قطب - کنترل - مستقل غیرمعمول هستند. این استراتژی "همزمانی" خوانده می شود.

همانطور که قبلاً نشان داده شد، اغلب زمانی که یک فاز به یک منبع وصل می شود شار باقیمانده در فازهای دیگر به سرعت محدود می شود. بوسیله "تساوی شارهای هسته". این بدان معناست که اگر یک فاز به منبع وصل شود زمانی که شار باقیمانده و شار هسته مورد انتظار مساوی هستند، و بعد از تاخیر در چند سیکل دو فاز دیگر به منبع وصل شوند می توان از شار باقیمانده دو فاز دیگر صرف نظر کرد. این ارجاء می شود به "استراتژی تاخیر در بسته شدن" این استراتژی در تست انرژی در آزمایشگاه ترانسفورماتور در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱)

نتیجه:

در بیشتر ترانسفورماتورهای سه فاز از اندازه گیری شار باقیمانده و کنترل بسته برای محدود کردن جریان هجومی استفاده می شود. سه استراتژی برای کنترل وصل شدن به منبع در ترانسفورماتورهای چند فاز بکار می رود. برای هر سه استراتژی، بسته شدن هر سیم پیچ زمانی که شار مورد انتظار هسته و شار دینامیک هسته مساوی هستند محدود بهینه است،

استراتژی بسته شدن سریع:

در این استراتژی ابتدا یک فاز بسته می شود و دو فاز دیگر در طول یک چهارم سیکل بعد، بسته می شوند. آن نیاز دارد اطلاعاتی از شار باقیمانده برای حالات گذرای ترانسفورماتور و کنترل شکننده های قطب مستقل، یک مدل برای حالت گذرای ترانسفورماتور (هیچ مدل استاندارد برای مقایسه حالات گذرای همه ترانسفورماتورها وجود ندارد) بدانیم استراتژی بسته شدن با تاخیر:

در این استراتژی یک فاز ابتدا بسته می شود و دو فاز دیگر پس از ۲ و یا ۳ سیکل بسته می شوند. آن نیاز دارد به اطلاعاتی از شار باقیمانده در هر فاز، کنترل مستقل قطب، اما به هیچ اطلاعات پارامتر از ترانسفورماتورها نیاز ندارد. استراتژی بسته شدن همزمان:

در این استراتژی هر سه فاز با هم بسته می شوند در یک نقطه بهینه برای شار باقیمانده آن به کنترل شکننده های قطب مستقل نیاز ندارند، اما به اطلاعاتی در رابطه با شار باقیمانده در هر سه فاز نیاز دارد و آن دامنه شار باقیمانده در دو فاز است که از شار باقیمانده در فاز قبلی پیروی می کنند.

مراجع

(۱) "elimination of transformer inrush current by controlled switching" John H. Brunke .

(۲) "Transformer Based Solutions to Power Quality Problems" Francisco de Leon