

# حذف جریان هجومی ترانسفورماتور های قدرت با استفاده از تئوری سوئیچینگ کنترل شده بخش اول: ملاحظات تئوری

سیدعباس طاهر<sup>۱</sup>، حمید رضا بقایی<sup>۲</sup>، حسین کرمی طاهری<sup>۲</sup>

دانشگاه کاشان \_ دانشکده مهندسی \_ گروه مهندسی برق

Email: SATaher@kashanu.ac.ir

**چکیده:** جریان هجومی به دلیل به اشباع رفتن هسته در زمان برق دار کردن ترانسفورماتور به وجود می آید. ویژگی اصلی این جریان داشتن مولفه DC بزرگ، هارمونیک های زیاد، و اندازه بزرگ می باشد که می تواند تاثیرات مختلفی از جمله کاهش کیفیت برق، کاهش عمر مفید ترانسفورماتور، عملکرد غلط رله های حفاظتی، تنش و فشار مکانیکی روی سیم پیچی ها و هسته را به همراه داشته باشند. لذا کنترل اندازه و حذف جریانهای هجومی در ترانسفورماتور از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله روش سوئیچینگ کنترل شده برای این منظور معرفی و ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** جریان هجومی ، سوئیچینگ کنترل شده و شار پسماند

## (۱) مقدمه

جریان هجومی در ترانسفورماتور ها در اصل از اشباع زیاد هسته آهنی در مدت زمان سوئیچینگ ترانسفورماتور، سرچشمه می گیرد. این جریان دارای اندازه زیاد و مولفه DC بزرگ می باشد. همچنین حاوی هارمونیک های زیاد در زمانی که هسته به اشباع می رود، می باشد. جریان مذکور در مدت زمان برق دار کردن ترانس ایجاد می شود و تاثیرات نامطلوبی دارد. عامل ایجاد جریان هجومی ولتاژی است که به اولیه اعمال می شود. این ولتاژ، شار را ملزم می کند تا به ماکزیمم مقدار تئوری ، یعنی دو برابر شار حالت دائمی به علاوه شار پسماند افزایش یابد. لذا ترانسفورماتور به شدت اشباع شده و جریان زیادی را از شبکه دریافت می کند. از آنجا که ایجاد این جریان در یک مدت کوتاه می باشد، تاثیر های زیادی روی ترانس ندارد، اما به هر حال، وسایل حفاظتی برای اضافه بار ممکن است عملکرد غلطی داشته باشند و ترانسفورماتور را قطع نمایند. سه پارامتر مهم و عمده که در کنترل اندازه جریان هجومی موثر اند، عبارتند از: شار پسماند، زاویه سوئیچینگ و مقاومت سیم پیچی اولیه در این مقاله براساس کنترل زاویه سوئیچینگ به بررسی روش سوئیچینگ کنترل شده برای حذف این جریان در ترانسفورماتورها پرداخته می شود.

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی

## ۲) مدل سازی ترانسفورماتور جهت مطالعه جریان هجومی

به منظور بررسی حالت گذرای شار هسته در ترانسفورماتور ها با هسته و سیم پیچی های مختلف، یک مدل تئوری لازم است. به علاوه تفاوت آشکار در میان ترانسفورمر ها ایجاب می کند که اطلاع کافی از پارامترها و مشخصه های ترانس داشته باشیم. مدل سازی ترانس مخصوصا در پدیده حالت گذرا یک قضیه پیچیده است و یک مدل کلی و جامع برای تمام فرکانس ها و مدل سازی تمام مشخصه های ترانسفورماتور موجود نیست. شرایط لازم جهت مدل سازی برای مطالعه شار حالت گذرای آن اصولا شامل یک رابطه فلو\_جریان  $(\varphi - i)$  و مدل سازی شار پسماند در هسته می باشد. مدل هسته ترانسفورمر هایی که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، شامل یک مقاومت برای نشان دادن تلفات است، که موازی با یک اندوکتانس بوده که نشان دهنده جریان مغناطیس کنندگی هسته است، قرار گرفته است. چنین مدلی برای شار پسماند مناسب نیست. دیگر روش ها با استفاده از یک منبع جریان برای نشان دادن تابع شار در هسته در مدل ترانسفورماتور های سه فاز است. اما در هنگام قرار گیری ترانس سه فاز در یک اتصال کوتاه موثر قابل بکار گیری نیستند. البته مدل های بکار رفته در اینجا هم دارای محدودیت هایی هستند. در حالت ایده آل و بدون در نظر گرفتن اثر مقاومت سیم پیچ ها، جریان هجومی به وسیله قانون فاراده چنین توصیف می شود:

$$v(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (۱)$$

به ترتیب ولتاژ لحظه ای اعمال شده به ترانسفورماتور و شار دور لحظه ای سیم پیچی است. چون  $\lambda(t)$  و  $v(t)$  که در آن ولتاژ نیروی محرکه است، شار طبق رابطه زیر ایجاد می گردد:

$$\lambda(t) = \int_0^t v(\tau).d\tau \quad (۲)$$

چنانچه از شار پراکندگی صرف نظر شود :

$$\lambda(t) = N\varphi(t) \quad (۳)$$

$N$  تعداد دور سیم پیچی است. از ترکیب روابط (۲) و (۳) داریم:  $N$  شار لحظه ای موجود در هسته و  $\varphi(t)$  که در آن

$$\varphi(t) = \frac{1}{N} \int_0^t v(\tau).d\tau \quad (۴)$$

اگر ولتاژ را سینوسی در نظر بگیریم:

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (۵)$$

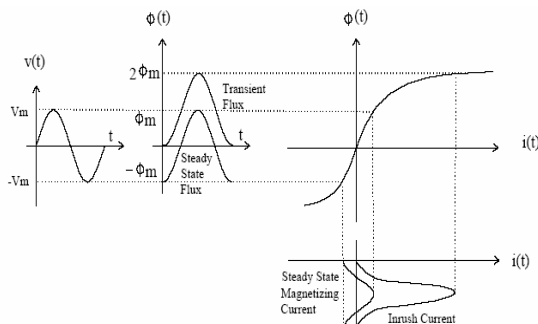
لذا رابطه (۴) تبدیل می شود به:

$$\varphi(t) = \frac{V_m}{N\omega} [\cos \theta - \cos(\omega t + \theta)] + \varphi(0) \quad (۶)$$

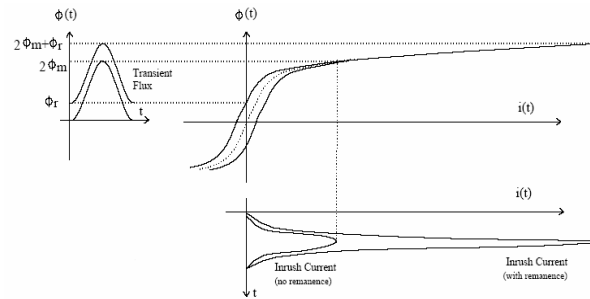
با فرض آنکه که شار در لحظه  $t = 0$ ،  $\varphi(0) = \Phi$  است، ماکزیمم شاری که در هسته ایجاد می شود زمانی است که زاویه  $\theta = 0$  باشد. در این شرایط ماکزیمم شار چنین است:

$$\Phi_{\max} = \frac{2V_m}{N\omega} + \Phi_r = 2\Phi_m + \Phi_r \quad (V)$$

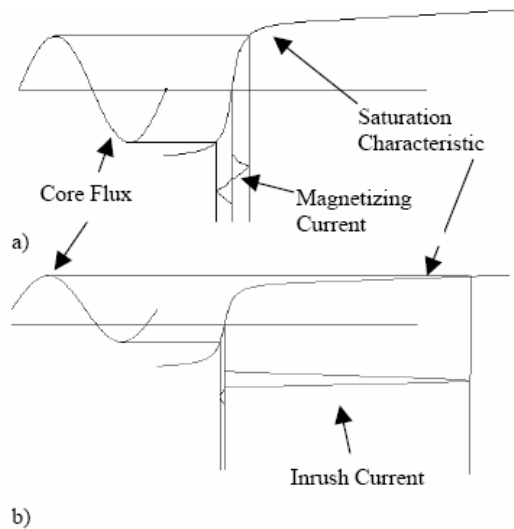
که در آن  $\Phi_r$  شار پسماند مغناطیسی است که متأثر از منحنی مشخصه مواد بکار رفته در هسته ترانس، فاکتور شکاف هوایی هسته، ظرفیت خازنی سیم پیچی، منحنی های مشخصه برش جریان مدار شکن و دیگر خازن های متصل به ترانسفورماتور است. شکل های زیر شرح گرافیکی این پدیده را نشان می دهد:



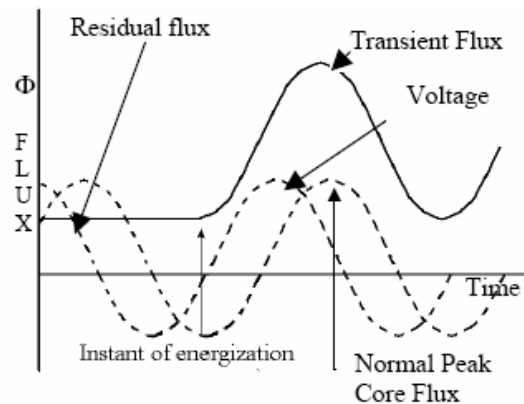
شکل ۱-۲ توصیف گرافیکی جریان هجومی با در نظر گرفتن شار پسماند



شکل ۱-۱ توصیف گرافیکی جریان هجومی

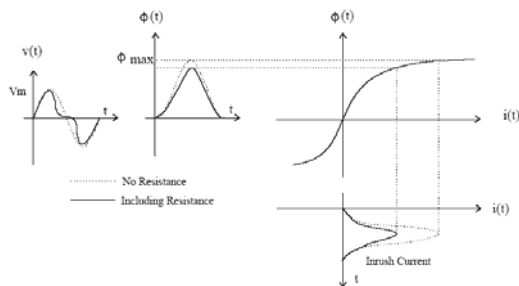


شکل ۱-۴ منحنی اشباع هسته ترانس (الف) برای شار متقارن (ب) برای شار نامتقارن



شکل ۱-۳ نمایش بدترین حالت برای برق دار کردن ترانسفورماتور با یک شار پسماند مشخص

در صورتی که از مقاومت اهمی سیم پیچ ها صرف نظر نشود، همه ولتاژ سبب افزایش شار در هسته نمی شود. بخشی از ولتاژ در مقاومت اهمی سیم پیچی اولیه افت می یابد و لذا یک افت در شار ماکزیمم خواهیم داشت. همان طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، میزان جریان تا حد زیادی کاهش یافته است. توجه کنید که طراح ترانسفورماتور نمی تواند مقاومت اولیه را به دلیل مسائل حرارتی خیلی زیاد بگیرد.



شکل ۵-۱ تاثیر مقاومت اولیه بر جریان هجومی

وقتی یک ترانس در لحظه صفر ولتاژ برق دار می شود، هسته آهنی اغلب به اشباع می رود زیرا چگالی شار از حد اشباع تجاوز می کند. اشباع شاخه مغناطیس کنندگی می تواند به عنوان یک اندوکتانس هسته هوایی در نظر گرفته شود و پیک جریان هجومی می تواند بوسیله معادله زیر محاسبه گردد:

$$i_{peak} = \frac{B_{air}.l}{\mu_0.N} = \frac{l}{\mu_0.N} \cdot \frac{A_c}{A_{air}} (2B_n + B_r - B_s) \quad (\lambda)$$

که در آن:

$B_{air}$ : چگالی شار مغناطیسی بیرون ناحیه اشباع شده [vs]

$B_n$ : پیک نامی مشخصه مغناطیس شوندگی [vs]

$B_r, B_s$ : چگالی شار پسماند و اشباع [vs]

$l$ : طول مسیر متوسط شار مغناطیسی در هوا [m]

$N$ : تعداد دور هسته برق دار شده

$A_c$ : مساحت بخش تقاطعی هسته آهنی [m<sup>2</sup>]

$A_{air}$ : مساحت بخش اندوکتانس هسته هوایی [m<sup>2</sup>]

$\mu_0$ : پرماییته هوا  $= 4\pi \times 10^{-7} [vs(A/m)^{-1}]$

این معادله پیش بینی می کند که ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بکار رفته بینهایت است. در شرایط واقعی شکل موج ولتاژ به وسیله جریان هجومی بد فرم و شکسته می گردد (از فرم سینوسی خارج می گردد). به علاوه اثر اشباع در ترانسفورماتورهای چند فاز چند سیم پیچه بیشتر است.

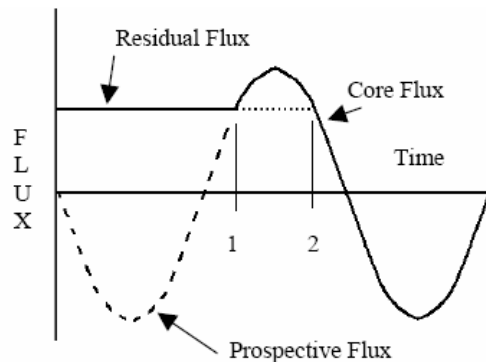
### ۳) روش های مختلف حذف جریان هجومی در ترانسفورماتورها

برای کاهش جریان هجومی می توان از تکنیک هایی همچون مقاومت های کنترل شده، سوئیچ های کنترل شونده، کاهش شار پسماند، کاهش حالت گذرا بوسیله غیر حساس کردن رله های حفاظتی یا over sizing در فیوزها (حفاظت دیفرانسیل)، و راه کارهایی با عنوان Transformer\_Based Solutions to limiting Inrush Currents [3] استفاده نمود.

#### ۴) حذف جریان های هجومی ترانسفورماتور بوسیله سوئیچینگ کنترل شده

##### ۴-۱) سوئیچینگ کنترل شده در ترانسفورماتور های تکفاز

در حالت بستن کنترل شده خازن ها نقطه بهینه برای برق دار کردن در لحظه ای است که منبع ولتاژ برابر با شارژ اولیه خازن است. برای این حالت بستن کنترل شده ترانسفورماتور **trapped charge** یک اتصال موازی با شار هسته دارد. اصل اساسی برای حذف شار نامتقارن هسته، اینست که شار القایی (انتگرال ولتاژ اعمال شده) در زمان برق دار کردن باید برابر با شار پسماند باشد. در اینجا البته شار القایی قبل از لحظه برق دار کردن وجود ندارد. اما منبع ولتاژ، دور نمایی برای ایجاد یک شار القایی دارد. اگر منبع ولتاژ به عنوان یک چشمه شار مجازی در نظر گرفته شود، پس لحظه بهینه (optimal) برای برق دار کردن ترانس زمانی است که شار منتظره برابر با شار پسماند باشد. این اصل استراتژی اساسی برای بستن کنترل شده (controlled closing) در ترانسفورماتور های تک فاز فراهم می آورد.

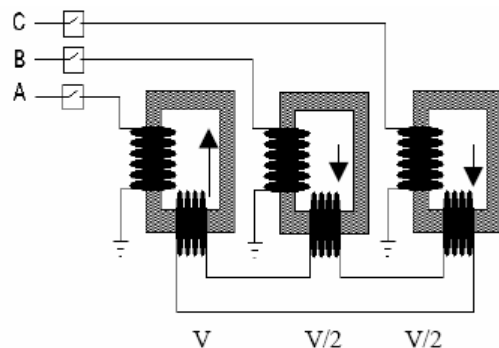


شکل ۴-۱ لحظه بهینه برای برق دار کردن یک ترانسفورماتور تک فاز، یک لحظه بهینه برای برق دار کردن ترانس در (۱) و لحظه جایگزین دیگر نیز در (۲) وجود دارد.

##### ۴-۲) سوئیچینگ کنترل شده در ترانسفورماتور های چند فاز بدون پسماند

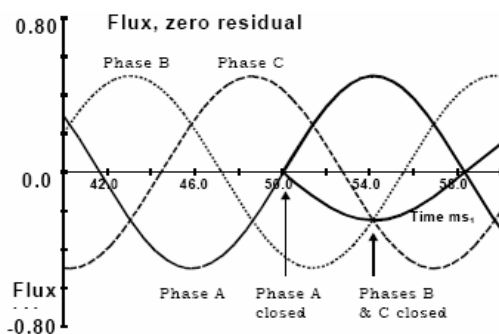
تنها ترانسفورماتور هایی با هسته تک فاز و سیم پیچی های زمین شده ممکن است به عنوان سه ترانسفورماتور تک فاز در نظر گرفته شود، اما اغلب ترانسفورماتور ها در سیستم های قدرت برهم کنش هایی بین فاز ها دارند. در دیگر ترانسفورماتور ها بعد از اینکه یک فاز برق دار شد، شار در هسته های دیگر یا پایه های هسته یک شار پسماند استاتیکی نیست. اما یک شار گذرا که در ادامه می آید، شار دینامیک هسته است. شکل ۴-۲ مثالی از یک ترانس که با سیم بندی دلتا بسته شده است، نشان می دهد.

با پذیرش اینکه در آغاز شار پسماند در هر سه فاز صفر است، پس لحظه بهینه برای فاز اول برای بستن وقتی است که شار منتظره برابر صفر است. این لحظه، زمان یک پیک ولتاژ است. بعد از اینکه فاز اول بسته شد، یک ولتاژ در هر یک از دو فاز دیگر سیم پیچی دلتا، القا می شود. این ولتاژ ها هر یک نصف اندازه ولتاژ فاز اول و ۱۸۰ درجه اختلاف با فاز ولتاژ فازی که برق دار کامل (fully energize) است، دارند. این شار در هسته دو فاز دیگر، شار دینامیک هسته است.



شکل ۴-۲ یک ترانسفورماتور سه فاز با هسته های تک فاز و سیم پیچی اتصال دلتا که برهم کنش شار و ولتاژ را نشان می دهد. جهت پیکان ها رابطه فاز بین شار ها را نشان می دهد.

پس شار هسته در همه سه فاز به یک اندازه و رابطه برای ولتاژ هر یک از دو فاز دیگر دارد. شار دینامیک هسته همچنین ۱۸۰ درجه اختلاف با فاز و نصف دامنه شار در فاز fully energize را دارد. در این حالت، لحظه بهینه برای برق دار کردن می تواند بوسیله برق دار کردن دو فاز آخر، در یک ربع سیکل پس از اولین فاز صورت گیرد. وقتی که شار منتظره و شار دینامیک هسته در هر سه فاز برابر است. برق دار کردن بهینه برای یک ترانس با یک هسته سه فاز به همان صورت است. در این شرایط شار تولید شده به وسیله فاز برق دار شده، به طور مستقیم شار دینامیک در هر دو فاز دیگر را ایجاد می کند. این شار دینامیک همان مشخصه مثل دو فاز دیگر که بوسیله سیم پیچی دلتای فوق الذکر، را دارا می باشد.



شکل ۴-۳ برق دار کردن یک ترانسفورماتور سه فاز بدون شار پسماند.

#### ۴-۳) شار پسماند

شار پسماند می تواند بالای ۸۵ درصد پیک نرمال شار را به خود بگیرد، گرچه اندازه های معمول تر در حدود ۲۰ تا ۷۰ درصد است. این می تواند نشان دهد که جمع شار پسماند در هسته های ترانسفورماتور های سه فاز در حالت ماندگار برابر

صفر است، و یک فرم معمول یک الگو با شار نزدیک به صفر در یک فاز به علاوه یا منهای یک مقدار محدود در دو شار دیگر است.

#### ۴-۴) سوئیچینگ کنترل شده در ترانسفورماتورهای چند فاز با شار پسماند

ابتدا لازم است برای تشریح از یک الگوی نمونه از شار پسماند مطابق شکل ۴-۴ شکل یابد و فاز A که شار پسماند صفر دارد، در لحظه بهینه در شکل موج (پیک ولتاژ و در نتیجه صفر شار منتظره) برق دار شود. در نتیجه شار دینامیک هسته در دو فاز دیگر، عادلانه تقسیم نمی شود.

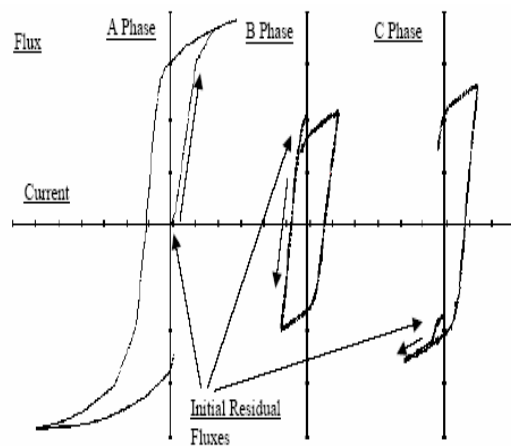
در شکل ۴-۴ شار دینامیک در شار پسماند مخصوص به خود شروع کرده و حول هسته های هیستریزس خود در همان جهت جابجا می شود. یک فاز (C)، در حالی که فاز B هنوز در بخش خطی است، به زانوی اشباع می رود. از آنجا که شیب منحنی مشخصه در این دو نقطه به وضوح متفاوت است، اندوکتانس دو سیم پیچی دیگر به وضوح متفاوتند. پس ولتاژ در سیم پیچی عادلانه توزیع نشده است، که البته سیم پیچی با اندوکتانس بزرگ تر ولتاژ بیشتری خواهد داشت. این ولتاژ بیشتر شار بالاتری را تولید خواهد کرد.

در نتیجه با افزایش شار فاز B نسبت به اندازه شار فاز C، شار در فاز B و C به سرعت متعادل شده و تاثیر شار پسماند را حذف می کند. این پدیده را می توان در مراجع با نام "Core Flux Equalization" یافت [4].

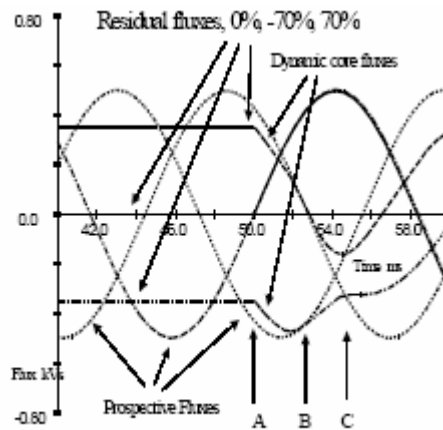
چنانچه ذکر شد، در بیشتر ترانسفورماتورهای سه فاز جمع جبری شار در ساق اصلی هسته صفر است. این برای ترانسفورماتورهای با هسته سه پایه یا یک سیم پیچی دلتا درست است و برای ترانسفورماتورهایی که با سیم پیچ هایی با اتصال  $\Delta$ ، تک فاز یا ۵ پایه اند، یا هسته های زرهی<sup>۱</sup> دارند، برقرار نیست. اگر یک فاز در یک ترانس مفروض که طوری پیکر بندی شده که جمع شارها برابر صفر باشد، برق دار شود، به طوری که پایه ها به اشباع نروند، شار در آن فاز برابر شار منتظره در هر لحظه است.

از آنجا که شار منتظره و شار هسته باید مجموعی برابر صفر داشته باشد، شار القایی دینامیک هسته باید با شارهای منتظره آن در هر سیکل دو برابر باشد. این وضعیت در شکل زیر نشان داده شده است که در آن فاز A با شار پسماند صفر در نقطه A بسته شده و بلافاصله شار دینامیک در فاز B و C القا شده است.

بسته به پلاریته شار پسماند در دو پایه، شار دینامیک در هسته و شار منتظره باید برابر یا یکدیگر باشند. در نقطه B یا C نشان داده شده در شکل، این نقاط شانس مناسبی را برای برق دار کردن دو فاز دیگر بدون اشباع هسته پدید می آورد. این استراتژی به نام "Rapid Closing Strategy" نامیده می شود. نقطه B به وضوح مقاوم تر از نقطه C در برابر خطای زمانی بستن (closing timing error) است. چون شیب شار لحظه ای و منتظره تقریباً برای یک پریود برابرند، این حالت در نقطه C نیست.



شکل ۴-۵ شار منتظره و دینامیک هسته برای یک ترانسفورماتور سه فاز با شار پسماند



شکل ۴-۶ منحنی شار-جریان هسته های ترانسفورماتور، وابستگی اندوکتانس موثر B و C به شار پسماند و منحنی دور حلقه هیستریزیس. پس از برق دار کردن فاز A شار دینامیک در دو فاز دیگر منجر به تفاوت اندوکتانس و برقراری تعادل در شار هسته می شود.

همچنین یک شانس مناسب دیگر در نقطه A که فاز اول بسته شده ، لحظه بهینه برای بستن لحظه ای هر سه فاز است. چنانچه ذکر شد، بعد از اینکه یک فاز برق دار شد، شار پسماند در دو فاز دیگر به سرعت به وسیله تعادل شار در هسته از بین می رود. ین بدان معنی است که اگر یک فاز برق دار شد، وقتی که شار پسماند و شار منتظره برابرند، و بین دو فاز دگر چند سیکل تاخیر داده شده است، شار پسماند می تواند در دو فاز دیگر قابل صرف نظر کردن باشد. این به عنوان **delayed closing strategy** مطرح است. این استراتژی در مورد **energization** یک ترانس به صورت آزمایشی، در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

پس به طور خلاصه در اغلب ترانسفورمر های سه فاز ممکن است که از روش **controlled closing** برای حذف جریان هجومی گذرای ترانسفورماتور استفاده شود. سه استراتژی برای برق دار کردن کنترل شده ترانسفورماتور های چند فاز مطرح است. برای تمام استراتژی ها بستن هر سیم پیچی در زمانی که شار دینامیک هسته و شار منتظره برابرند، بدون اشباع ترانسفورماتور یا جریانهای گذرای هجومی منجر به یک لحظه بهینه برای برق دار کردن می شود. این روش ها عبارتند از :

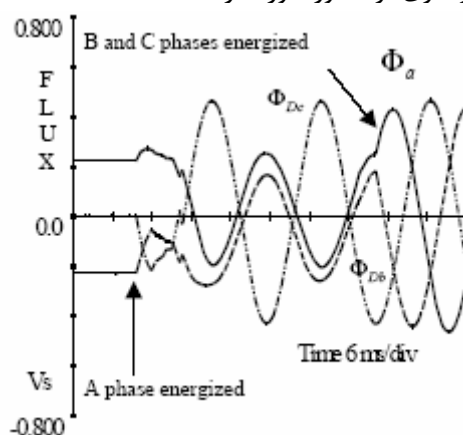
#### ۱) Rapid Closing Strategy

این استراتژی یک فاز را در آغاز و سپس دو فاز باقی مانده را در یک چهارم سیکل بعد، برق دار می کند. این اطلاعاتی را برای شار پسماند در هر سه فاز و مدلی برای عملکرد حالت گذرای ترانسفورماتور نیاز دارد.

#### ۲) Delayed Closing Strategy



این استراتژی یک فاز را در آغاز و دو فاز دیگر را برای ۲-۳ سیکل بعد می بندد. این دانشی را در مورد شار پسماند در یک فاز لازم دارد، اما نیازی به داده های پارامتری ترانسفورماتور ندارد.



شکل ۴-۶ استراتژی بستن تاخیری برای یک ترانس سه فاز با هسته سه پایه و سیم پیچی با اتصال دلتا

### ۳) Simultaneous Closing Strategy

این استراتژی تمام سه فاز را با هم می بندد و دانشی در مورد شار پسماند در تمام سه فاز و اینکه اندازه شار پسماند در هر سه فاز را طلب می کند. البته از لحاظ تئوری حالت گذرای جریان هجومی می تواند بوسیله برق دار کردن کنترل شده حذف شود. در عمل چندین فاکتور می توانند از رسیدن به ما به هدف حذف کامل این حالت گذرا جلوگیری کنند که عبارتند از: انحراف در زمان بستن مکانیکی (mechanical closing time) مدار شکن ها، تاثیر prestrike در مدار شکن، خطا در اندازه گیری شار پسماند، شکل هسته و سیم پیچی ترانسفورماتور که ممکن است از یک راه حل بهینه جلوگیری کند.

### ۵) نتیجه گیری

در انتخاب استراتژی های بستن، چند عامل مهم را باید مد نظر قرار دهیم. اگر الکوی شار پسماند معلوم باشد، بهترین استراتژی بستن فاز اول با کمترین شار پسماند است. بسته به پلاریته شار در دو پایه دیگر (در ترانس های سه پایه یا حداقل دارای یک سیم پیچی دلتا) شار دینامیک و شار منتظره در یک لحظه معین برابر خواهند شد. این لحظات یک شانس مناسب برای برق دار کردن فاز های دیگر ترانس بدون اشباع پیشنهاد می دهد. استفاده از Rapid Closing Strategy چنانچه قبلا ذکر شد، نیاز به اطلاعاتی با جزئیات بیشتر در مورد مشخصه های هسته برای یک راه حل دقیق یا توسعه یک تقریب کلی دارد. برای اینکه این تقریب را تحت یک قانون کلی در آوریم، بررسی مشخصه های حالت گذرای ترانسفورماتور برای کاربرد های عمومی لازم است. delayed Closing Strategy، تقریب کلی تری را فراهم می آورد. Simultaneous Closing Strategy، محدود به شرایطی با شار پسماند زیاد و الکوی شار  $0, -r, r$  است. ممکن است یک مدار پسیو برای

تولید این شرایط شار پسماند ساخته شود ، اما مورد بررسی بیشتر قرار نگرفته است. در بخش دوم این مقاله به بررسی راه کار های بیشتری خواهیم پرداخت.

#### ۶) مراجع:

[1] Brunk, J.H, Fröhlich, K.J “Elimination of Transformer Inrush Current by Controlled Switching,” *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 16, no. 2, April 2001.

[2] Sen, P. C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, Second ed., John Wiley & Sons Inc., 1997.

[3] De León, F, Gladstone, B, Van Der Veen, M “Transformer Based Solutions to Power Quality Problems, *Powersystems World 2001 Conference*, September/12/2001

[4] Holmgren, R., Jenkins, R.S., Riubrugent, J., “Transformer Inrush Current,” *CIGRE paper 12-03, CIGRE Paris*, pp. 1-13, 1968.

[5] Laszlo Prikler, Georgy Banfai, Gabor Ban, Peter Becker, “Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers”, *International Conference on Power System Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA*

