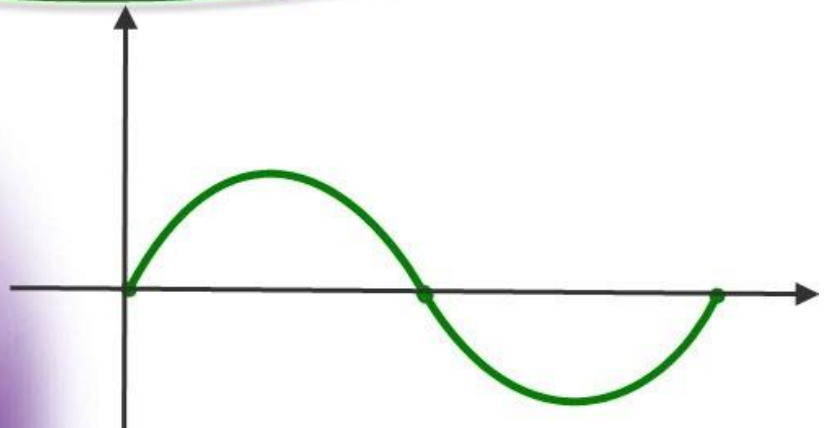


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

موضوع پروژه:

جریانهای هجومی در ترانسفورماتور



برای خرید فایل word این پروژه [اینجا کلیک کنید](#).

(شماره پروژه = ۴۴۳)

پشتیبانی: ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

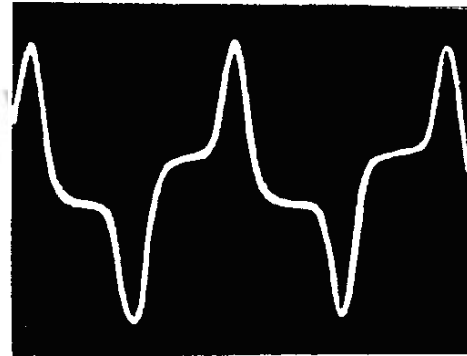
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فصل ۱ : مباحث پایه

۱-۱- جریان هجومی مغناطیس کننده ترانسفورماتور :

Transformer magnetizing inrush current

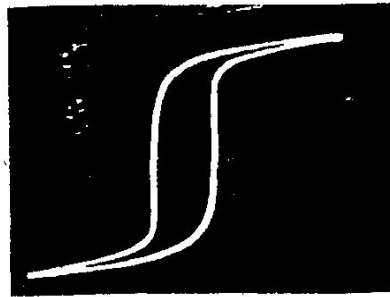
در شرایط معمولی یک ترانسفورماتور در حالت بی باری جریان مغناطیس کننده ای حدود ۰/۵ تا ۲ درصد جریان نامی اش از منبع میکشد . این جریان بعلت اثرات اشباع آهن سینوسی نیست (شکل ۱)



شکل ۱- جریان بی باری

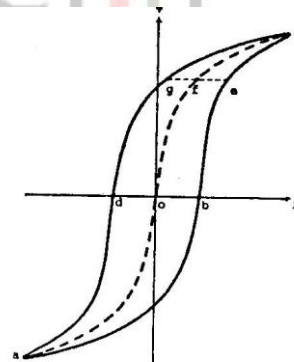
مقدار اعوجاج بستگی به مقدار چگالی فوران مغناطیسی دارد که هسته در آن چگالی کار میکند . تغییرات فوران هسته و جریان مغناطیس کننده بنحوی است که در هر پریود (دوره تناوب) یکبار دور حلقه هیستریزیس (Hysteresis loop) طی میشود (شکل ۲)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



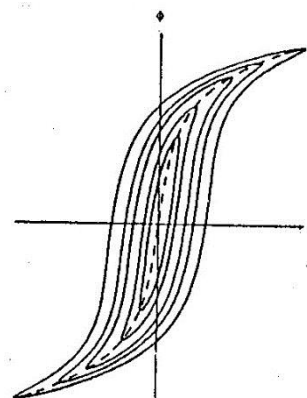
شکل ۲- حلقه هیستریزیس

همچنین تغییرات فوران هسته بنحوی است که در هر لحظه نیروی محرکه الکتریکی (emf) لازم را برای برابری با ولتاژ لحظه ای منبع تولید کند . در شکل ۳ حلقه هیستریزیس همراه با منحنی مغناطیسی magnetizing curve مکان قرار گرفتن رئوس حلقه های هیستریزیس است که در ولتاژ های اعمال شده به ترانسفورماتور در حالت ماندگار (steady state) بدست آمده اند (شکل ۴).



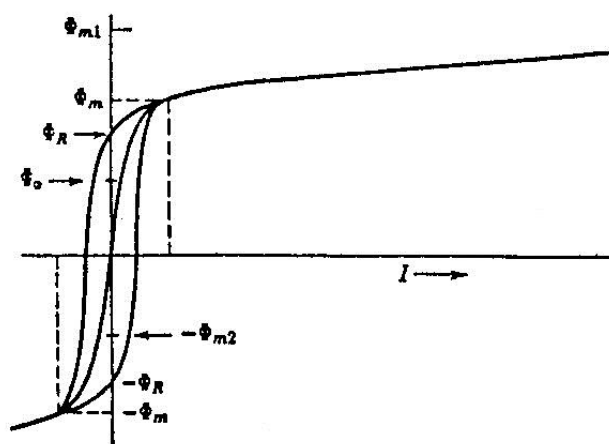
شکل ۳- حلقه هیستریزیس همراه با منحنی مغناطیسی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴- حلقه های هیستریزیس مربوط به اعمال ولتاژ های مختلف

بدیهی است همانگونه که ولتاژ افزایش میابد و در نتیجه این امر فوران بیشتر و بیشتری از هسته عبور میکند. ماگزیمم جریان نیز سرعت افزایش پیدامیکند زیرا هسته اشباع میشود.



شکل ۵- وضعیت مغناطیسی هسته ترانسفورماتور در زمان وصل به منبع

در حلقه هیستریزیس شکل ۵ تغییرات فوران بین $-\phi_m, +\phi_m$ می باشد که این امر در حالت ماندگار حاصل شده است. حال می خواهیم ببینیم در شرایط گذار که پس از وصل کلید و اعمال ولتاژ منبع به سیم پیچ ترانسفورماتور پیش می آید، چه اتفاقی می افتد. بدین منظور به

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

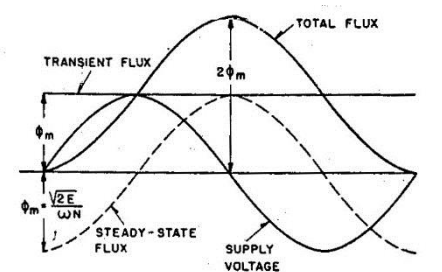
آخرین دفعه‌ای بازمی‌گردیم که ترانسفورماتور برقرار بوده و سپس از منبع تغذیه قطع شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که در لحظه‌ای که جریان از صفر عبور می‌کند فوران پسماند ϕ_R در هسته وجود دارد (Residual Flux) ، که فقط با تغییر جهت جریان و تغییرات آن تا صفر می‌توان آن را از بین برد .

لذا باید انتظار داشت که پس از قطع ترانسفورماتور از منبع نیز ، فوران قابل ملاحظه‌ای در هسته باقی بماند . معمولاً این فوران پسماند از مقدار ϕ_R مشخص شده در شکل ۵ کمتر است ، زیرا بعد از قطع جریان توسط کلید ، یک جریان گذرا در سیم پیچ عبور می‌کند که نتیجه تخلیه ظرفیت خازنی ترانسفورماتور یا جریان بار است . البته توضیح بیشتر راجع به کاهش یافتن فوران پسماند در قسمت ۶ خواهد آمد . فرض می‌کنیم که مقدار فوران پسماند $\phi_0 + \phi_m$ باشد . همچنین فرض می‌کنیم که در هنگام برقرار شدن مجدد ترانسفورماتور پلاریته ولتاژ به نحوی باشد که فوران در جهت مثبت افزایش یابد . اگر موج ولتاژ اعمال شده در لحظه وصل در حال عبور از صفر به طرف نیمه مثبت موج باشد ، فوران مجبور است به اندازه $\phi_m + \phi_0$ افزایش یابد تا زمانی که موج ولتاژ در $\omega t = \frac{\pi}{2}$ به ماکزیمم خود برسد . چون فوران از مقدار اولیه $\phi_0 + \phi_m$ آغاز شده ، در $\omega t = \frac{\pi}{2}$ به مقدار ϕ_m که مساوی $\phi_0 + \phi_m$ است ، و در $\omega t = \pi$ به ماکزیمم $2\phi_m + \phi_0$ خواهد رسید ، این امر در شکل به وضوح دیده می‌شود ، که در آن فوران اولیه ϕ_0 مساوی $6\phi_m$ است .

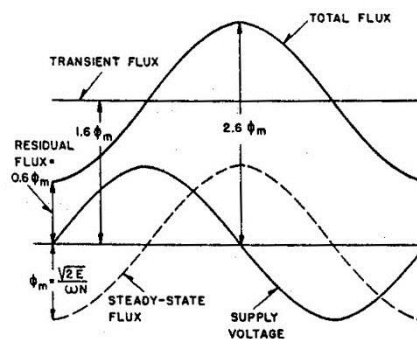
این فوران زیاد باعث می‌شود که هسته به حالت اشباع مغناطیسی برود ، و در نتیجه جریان بسیار زیادی از منبع تغذیه کشیده خواهد شد ، که آنرا جریان هجومی (Inrush current) می‌نامند . (شکل ۸)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

البته شرایطی که در بالا در نظر گرفته شد، یعنی حداکثر پسماند مثبت و زاویه ولتاژ صفر موج ولتاژ در لحظه وصل، بدترین شرایط برقرار شدن ترانسفورماتور است. دامنه جریان هجومی در بدترین شرایط می تواند تا چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور برسد. جریان هجومی، به علت وجود تلفات ترانسفورماتور که عمدتاً مربوط به سیم پیچ است پس از مدتی از بین رفته و جریان مغناطیس کننده به حالت ماندگار خود می رسد. در طول پریودهایی که جریان هجومی جاری است، همیشه روی منحنی هیستریزس جابجا شده حرکت می کند تا بتدریج بر روی منحنی هیستریزس معمولی بازگشت نماید (شکل ۷).



(a) PRIMARY CLOSED AT ZERO VOLTAGE—ZERO RESIDUAL FLUX.



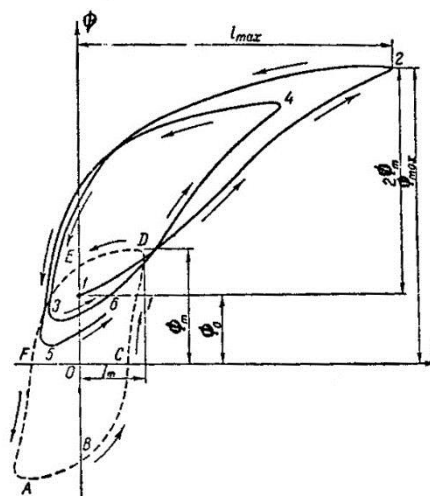
(b) PRIMARY CLOSED AT ZERO VOLTAGE—60% POSITIVE RESIDUAL FLUX.

شکل ۶- فوران هسته در حالت گذرا

در این شکل ϕ_0 فوران پسماند است. همانگونه که مشاهده می شود ماکزیمم فوران در اولین

سیکل می تواند به $2\phi_m + \phi_0$ برسد این امر در بررسی ریاضی جریان هجومی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۸- منحنی هیستریزیس در حالت گذرا

در بخش بعدی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت .

۲-۱- بررسی ریاضی جریان هجومی :

اکنون مسئله اضافه فوران (Overfluxing) هسته ترانسفورماتور در لحظه وصل به شبکه را به نحو ساده به طریق ریاضی بررسی می‌کنیم . اگر موج ولتاژ سینوسی $(V = V_m \sin(\omega t + \theta_0))$ در لحظه $t = 0$ با وصل کلید منبع ، به ترانسفورماتور اعمال شود ، می‌توان نوشت :

$$V = V_m \sin(\omega t + \theta_0) = Ri + N \frac{d\theta}{dt} \quad (۲-۱)$$

در این لحظه i جریان عبوری از مدار ، ϕ فوران تولید شده ، N تعداد دور سیم پیچ برقرار شده و R مقاومت اهمی مدار سیم‌پیچ برقرار شده است . برای ساده شدن مطلب ابتدا فرض می‌کنیم که اندوکتانس سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور ثابت و مساوی L باشد .

$$L = \frac{N\phi}{i} \Rightarrow i = \frac{N\phi}{dt} \quad (۲-۲)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بنابراین خواهیم داشت .

$$V_m \sin(\omega t + \theta_0) = R \frac{N\phi}{L} + N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-3)$$

با فرض ثابت بودن L ، پاسخ این معادله دیفرانسیل عبارت است از :

$$\phi(t) = \phi_m \sin(\omega t + \theta_0 - \varphi) - \phi_m \sin(\theta_0 - \varphi) e^{-\frac{t}{Z}} \quad (2-3)$$

در این رابطه $Z = \frac{L}{R}$ و $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$ و $\phi_m = \frac{V_m L}{N[R^2 + (\omega L)^2]} \frac{1}{2}$

اگر $\omega L \gg R$ باشد ، نتیجه می‌گردد : $\varphi = \frac{\pi}{2}$ که این فرض در ترانسفورماتور با

تقریب خوبی صحیح است . لذا رابطه (۲-۳) به نحو ذیل ساده می‌گردد :

$$\phi(t) = -\phi_m \cos(\omega t + \theta_0) + \phi_m \cos \theta_0 e^{-\frac{t}{Z}} = \phi_s + \phi_t \quad (2-5)$$

که ϕ_s فوران ماندگار و ϕ_t فوران گذراست . اگر در لحظه $t=0$ فوران پس‌ماند ϕ_R را نیز

داشته باشیم ، با اعمال شرایط اولیه به معادله دیفرانسیل مدار ، جمله $\phi_R e^{-\frac{t}{Z}}$ نیز به رابطه (۲-۵) افزوده می‌شود .

$$\phi(t) = \phi_R e^{-\frac{t}{Z}} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) + \phi_m \cos \theta_0 e^{-\frac{t}{Z}} \quad (2-6)$$

اگر $\theta_0 = 0$ باشد ، فوران مغناطیسی در اولین ماکزیمم خود همانگونه که رابطه (۲-۶) نشان

می‌دهد و قبلاً نیز اشاره شد ، می‌تواند در $\omega t = \pi$ به لحاظ تئوریک به حدود $2\phi_m + \phi_R$ برسد

، و این بدترین شرایط است . اگر $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ باشد ، بنابر رابطه (۲-۶) دامنه جریان هجومی به

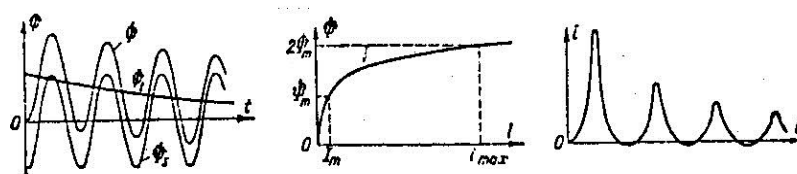
حداقل خود می‌رسد . در این حالت اگر فوران پسماند صفر باشد ، باید انتظار داشت که هیچگونه

جریان هجومی ایجاد نشود . در شکل ۸ منحنی‌های مربوط به فوران در حالت گذرای کلیدزنی

و جریان حاصل از آن و منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور دیده می‌شوند . همانطور که مشاهده

می‌گردد ، جریان گذرای حاصله دامنه بزرگی را پیدا می‌کند .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۸ - فوران و جریان هجومی

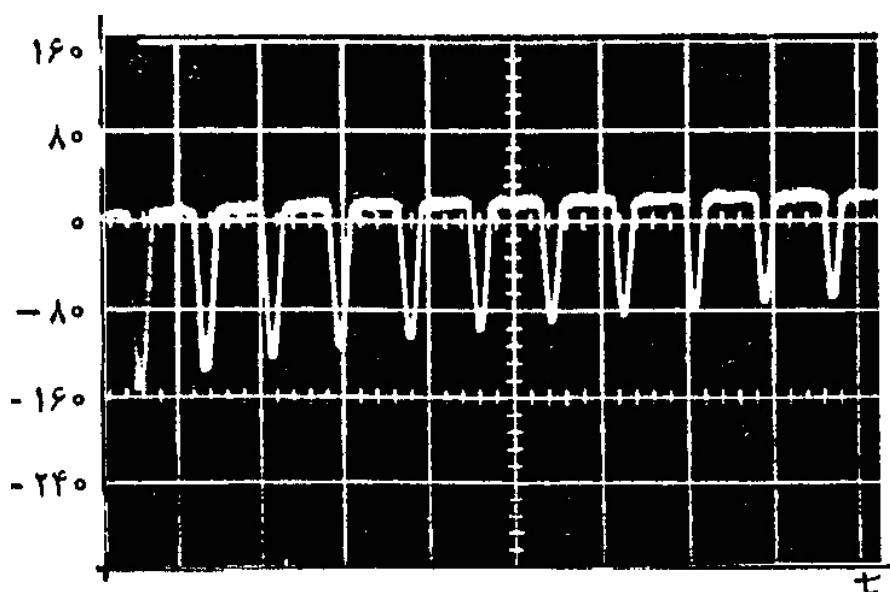
۳-۱- دامنه و مدت عبور جریان هجومی :

حداکثر دامنه جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت معمولی بنا به گزارش مقالات و مدارک فنی معمولاً تا حدود ۱۰ برابر جریان نامی و گاه ۱۵ تا ۲۰ برابر جریان نامی و حتی تا ۳۰ برابر جریان نامی ثبت گردیده است ، که این امر بستگی به پارامترهای ساختمانی ترانسفورماتور و موقعیت آن در شبکه قدرت و شرایط کلیدزنی دارد .

حداکثر مدت عبور جریان هجومی تا میرایی کامل نیز در ترانسفورماتورهای مختلف متفاوت بوده و بنابر گزارش مراجع و مقالات فنی از حدود ۱۰ سیکل تا ۱ دقیقه و حتی چند دقیقه می تواند طول بکشد .
این مدت میرایی بستگی به زاویه موج ولتاژ در لحظه وصل ترانسفورماتور، مقدار و پلاریته فوران پس ماند ، خواص مغناطیسی ترانسفورماتور ، مقاومت الکتریکی، تلفات مدار و فرکانس دارد .

در شکل ۹ نمونه اندازه گیری شده از جریان هجومی دیده می شود . ترانسفورماتورهای مربوطه ، از نوع سه فاز با ولتاژ نامی ۱۳/۸ کیلوولت و قدرت نامی ظاهری ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر بوده که جریان مغناطیس کننده آن کمتر از ۲ آمپر و جریان نامی آن ۴۲ آمپر بوده است . از روی منحنی که توسط اسیلوسکوپ رسم شده است می توان دید که ماکزیمم جریان هجومی آن بیشتر از ۱۵۰ آمپر بوده است . (هر یک از تقسیمات برابر ۸۰ آمپر است .)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۹ - نمونه ثبت شده جریان هجومی

جریان هجومی به طور کلی به ابعاد هسته و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و فواصل بین آنها، نوع آهن مورد استفاده در هسته و سایر قسمت‌های ترانسفورماتور، چگالی اشباع هسته، مشخصات شبکه قدرت با مقاومت و اندوکتانس منبع تغذیه، میزان و پلاریته فوران پسماند هسته و نیز زاویه موج ولتاژ در لحظه برقرار شدن ترانسفورماتور بستگی دارد، مثلاً محاسبه و آزمایش نشان می‌دهد که هر چه چگالی اشباع هسته کوچکتر باشد، مقدار ماکزیمم جریان هجومی بزرگتر خواهد بود.

نحوه بستگی جریان هجومی به عوامل فوق در قسمت‌های بعدی مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.

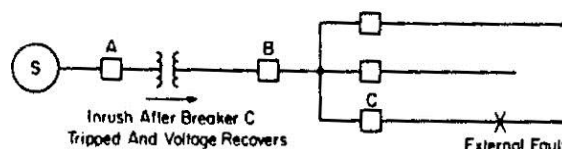
۴-۱- انواع جریان هجومی:

جریان هجومی علاوه بر آنکه در لحظه برقرار شدن اتفاق می‌افتد (Initial inrush) ممکن است در عین برقرار بودن ترانسفورماتور نیز به یکی از طرق ذیل جاری شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

الف - جریان هجومی بازیابی : (Recovery inrush)

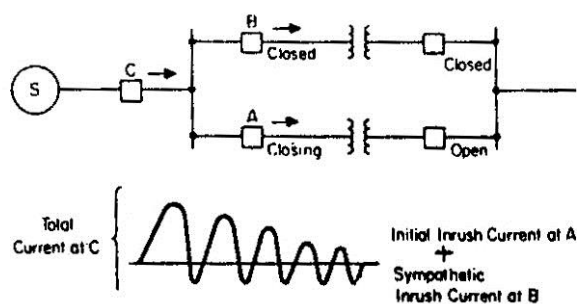
این جریان وقتی به راه می افتد که ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور به علت وقوع خطای خارجی سقوط نموده و سپس با عملکرد رله و قطع کلید ، قسمتی که دارای خطا بوده از مدار جدا می شود ، یا خطا بر طرف می گردد و لذا ولتاژ نامی مجدداً به ترمینال ترانسفورماتور بازگشت می نماید (شکل ۱۰) . در این حالت میزان افزایش ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور نامی است . لذا مقدار جریان هجومی بازیابی همیشه کمتر از جریان هجومی اولیه است .



شکل ۱۰ - جریان هجومی بازیابی

ب - جریان هجومی وابسته : (Sympathetic inrush)

این جریان هنگامی ایجاد می شود که یک ترانسفورماتور که بی برق بوده ، با یک ترانسفورماتور برقرار ، موازی (Parallel) می شود . در این حالت ممکن است ترانسفورماتوری که از قبل برقرار بوده ، مجدداً یک جریان هجومی را ببیند (شکل ۱۱) .



شکل ۱۱ - جریان هجومی تبعی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

علت ایجاد جریان هجومی تبعی آنست که ترانسفورماتوری که به تازگی برقرار می شود ، یک جریان هجومی پیدا می کند . این جریان یک مسیر موازی در ترانسفورماتوری که از قبل برقرار بوده می بیند و مولفه dc این جریان ، ترانسفورماتور برقرار قبلی را به اشباع می برد . دامنه این جریان هجومی وابسته به امپدانس ترانسفورماتور نسبت به امپدانس مابقی سیستم است که یک مدار موازی اضافی را تشکیل می دهد . این نوع از جریان هجومی نیز همیشه کمتر از جریان هجومی اولیه است . زیرا در واقع حاصل از افت ولتاژ ترمینال مشترک دو ترانسفورماتور ، به علت عبور جریان هجومی از ترانسفورماتور جدید است و لذا همانگونه که ذکر شد ، میزان این افت ولتاژ کمتر از ولتاژ نامی است .

با توجه به کوچکتر بودن جریان های هجومی باز یابی وابسته نسبت به جریان هجومی ابتدایی در حالت کلی بررسی جریان هجومی اولیه کافی است و مطالعه مشخصات این جریان طبعاً دو نوع دیگر را نیز خواهد پوشاند . مگر در موارد خاص که ممکن است بررسی آن دو نوع جریان هجومی نیز لازم باشد . مثلاً همانگونه که در شکل ۱۱ دیده می شود ، کل جریان هجومی در کلید C حاصل جمع جریان هجومی اولیه مدار A و جریان هجومی تبعی مدار B است . لذا باید در طراحی رله دیفرانسیل ، این امر در نظر گرفته شود تا باعث اشکال نگردد . مثال دیگر آنکه در نیروگاه های بخاری ، مجموعه ترانسفورماتور و ژنراتور واحد دارای مسئله جریان هجومی اولیه نیستند ، زیرا واحد به تدریج به ولتاژ نامی رسانده می شود . اما جریان های هجومی باز یابی و تبعی ممکن است مسئله باشند .

۱-۵- ثابت زمانی مدار ترانسفورماتور در حین عبور جریان هجومی :

مدار ترانسفورماتور ، یک مداری است متشکل از R و L سری است که طبیعتاً ثابت زمانی آن $\frac{L}{R}$ می باشد . مقدار $\frac{L}{R}$ در زمان عبور جریان هجومی مقدار ثابتی نیست ، زیرا اندوکتانس مدار در اثر اشباع شدن هسته در طول پیروید متغیر است . وقتی ترانسفورماتور در حال اشباع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

است مقدار L کوچک می‌باشد و بر عکس هنگامیکه هسته در حالت خطی کار می‌کند ، مقدار اندوکتانس زیاد است و مثلاً در حدود ۱۵۰ برابر حالت اشباع می‌باشد . این نسبت با مقایسه شیب منحنی مغناطیسی (Magnetizing Curve) در دو حالت خطی و اشباع مشخص می‌گردد . در پریودهای اولیه جریان هجومی ، هسته در بیشتر طول پریود در حال اشباع است و مقدار L کم می‌باشد و لذا ثابت زمانی مدار در این پریودها کوچک بوده ، سرعت میرا شدن جریان زیاد است . پس از گذشت چند سیکل با کاهش میزان اشباع هسته ، مقدار اندوکتانس افزایش یافته ، ثابت زمانی مدار بیشتر می‌شود و لذا جریان بتدریج و با سرعت کمتری میرا می‌گردد . همانگونه که در قسمت ۳ ذکر شد ، زمان میرایی کلی جریان هجومی ترانسفورماتورهای موجود ، بنابه اندازه‌گیری‌های انجام شده ، از چند سیکل تا چند دقیقه است . مقدار مقاومت اهمی مدار از منبع تا ترانسفورماتور نیز تاثیر زیادی در میزان میرایی جریان هجومی دارد .

هر چه مقاومت کل مدار اولیه بیشتر باشد ، ثابت زمانی $\frac{L}{R}$ کوچکتر بوده ، میرایی سریعتر می‌شود .

ترانسفورماتورهای نزدیک به ژنراتور دارای جریان هجومی طولانی‌تری هستند ، زیرا مقاومت خیلی کمی در مدار اولیه‌شان وجود دارد . اما در پست‌هایی که در انتهای یک خط طولانی قرار دارند ، جریان هجومی دامنه و مدت کمتری دارد ، زیرا مقاومت خطوط آن را به سرعت میرا خواهد کرد . ترانسفورماتورهای بزرگ نسبت به ترانسفورماتورهای کوچک دارای جریان هجومی طولانی‌تری هستند ، زیرا یک اندوکتانس بزرگ نسبت به مقاومت مدار اولیه از خود نشان می‌دهند و لذا $\frac{L}{R}$ بزرگتری دارند .

عملاً مقاومت مدار ترانسفورماتورهای قدرت در مقایسه با قدرت نامی ترانسفورماتور ، خیلی کوچک است . بنابراین ترانسفورماتورهای قدرت دارای یک ثابت زمانی بزرگ هستند که باعث

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

میرایی طولانی حالت گذار می شود . البته تلفات پراکندگی ناشی از عبور جریان هجومی نیز در میرا کردن آن موثر است . نقش دیگری که مقاومت اهمی و به طور کلی امپدانس مدار اولیه ، یعنی امپدانس تونن شبکه در ترمینال ترانسفورماتور دارد ، آنست که افت ولتاژ در حین عبور جریان هجومی تولید می کند . لذا ولتاژ را در ترمینال های ترانسفورماتور برقرار شونده کاهش داده ، بدینوسیله جریان هجومی را محدود می نماید .

۱-۶- فوران پسماند : (Residual or Remaining Flux)

میزان فورانی که در لحظه وصل کلید ، در هسته ترانسفورماتور وجود دارد ، فوران پسماند نامیده می شود .

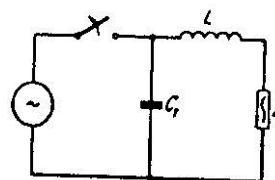
این فوران بستگی به سابقه قبلی برقدار بودن ترانسفورماتور دارد . همانگونه که در روابط ریاضی بخش ۲ مشخص گردید ، تاثیر مقدار و علامت این فوران در میزان جریان هجومی زیاد است . اگر فوران پسماند با فوران ایجاد شده پس از وصل کلید جمع شود جریان هجومی را افزایش ، و اگر از آن کاسته شود جریان هجومی را کاهش خواهد داد . در ترانسفورماتورهای سه فاز ، فوران های پسماند در ستون های هسته یکسان نیستند . این امر یکی از عواملی است که باعث می شود مقادیر مختلفی از جریان هجومی را در سه فاز داشته باشیم .

مقدار و پلاریته فوران پسماند بستگی به زاویه موج ولتاژ در آخرین دفعه قطع مدار و نیز مشخصات الکتریکی ترانسفورماتور و هم چنین بار ثانویه دارد . چون زاویه موج ولتاژ در لحظه قطع مدار ، کنترل شده نیست ، لذا مقدار و جهت فوران پسماند امری تصادفی می باشد . می دانیم که مدارهای الکتریکی هنگامی توسط کلید قطع می شوند که مقدار لحظه ای جریان آنها صفر باشد ، یا به سوی صفر برده شود و سپس قطع گردد ، یعنی بریدن جریان وجود ندارد . در زمان قطع مدار ، ولتاژ و فوران با جریان اختلاف فاز دارند . میزان این اختلاف فاز بستگی به نوع بار دارد . بنابراین فوران هسته در لحظه قطع کلید صفر نیست .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

پس از قطع مدار ، مقداری از فوران پسماند تخلیه می گردد ، ولی غالباً مقدار زیادی از آن تا کلیدزنی بعدی همچنان در هسته باقی می ماند .

تخلیه قسمتی از فوران پس ماند در اثر جریان های خازنی یا جریان بار صورت می گیرد . در موقع قطع کلید از طرف اولیه ، اگر ثانویه ترانسفورماتور دارای بار باشد ، مدار معادل شبیه شکل ۱۲ تشکیل می شود ، که در آن L اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتور C_1 ظرفیت خازنی موثر ترانسفورماتور و سیم های رابط بین کلید و ترمینال ترانسفورماتور است .



شکل ۱۲ - قطع مدار اولیه ترانسفورماتور در زیر بار

Z امپدانس بار می باشد . اگر بار کلاً اندوکتیو باشد ($Z=j\omega L$) در موقع قطع کلید ، ولتاژی در

دو سر خازن به وجود می آید که ماکزیمم آن می تواند برابر با $V = i \left(\frac{L + L_1}{C_1} \right)^{\frac{1}{2}}$ باشد . در این

رابطه i جریان در لحظه قطع کلید است . این ولتاژ با فرکانس $f = \frac{1}{2\pi((L + L_1)C_1)^{\frac{1}{2}}}$

نوسان می کند . اگر L_1 در این روابط صفر باشد ، ولتاژ و فرکانس به دست آمده مربوط به قطع مدار ترانسفورماتور در حالت اتصال کوتاه ثانویه خواهد بود . اگر بار ثانویه شامل مقاومت اهمی نیز باشد ، در این صورت نوسانات ولتاژ زودتر مستهلک شده و ولتاژ پدید آمده در اثر قطع کلید کوچکتر می شود .

در هر صورت جریان گذرا که از سیم پیچ عبور می کند ، فوران پسماند هسته را تغییر داده و مقداری از دامنه آن را خنثی می کند .

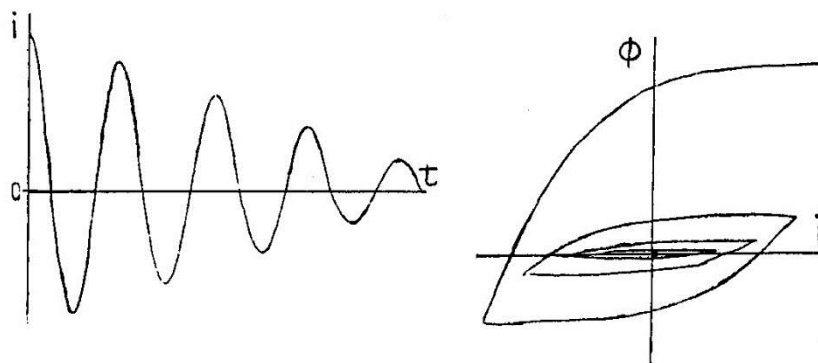
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

اگر بار متصل شده در ثانویه ترانسفورماتور ، یک موتور الکتریکی باشد و در این حالت کلید ، مدار اولیه را قطع نماید ، ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور به شکل نوسانی به سمت صفر میل می کند . در این حالت چون مدار اولیه قطع است ، جریان نیز همانند ولتاژ به صورت نوسانی به تدریج میرا گردیده و این امر فوران پسماند هسته را تا صفر کاهش می دهد .

در اندازه گیری های مختلفی که تا کنون به عمل آمده و در برخی از منابع ذکر گردیده ، مقادیر مختلفی برای فوران پسماند به دست آمده است : یکی از کارهای مشکل در مطالعه جریان هجومی ، اندازه گیری یا تخمین فوران پس ماند در لحظه وصل کلید است ، و با توجه به تاثیر زیادی که این فوران در دامنه جریان هجومی دارد ، باید حتی الامکان اندازه گیری یا تخمین صحیحی از آن در دست باشد ، وگرنه دامنه جریان ایجاد شده اختلاف زیادی با مقدار پیش بینی شده خواهد داشت . در صورتیکه ترانسفورماتور به صورت بی بار از منبع جدا شود می توان مقدار چگالی فوران پس ماند را تقریباً از حلقه هیستریزیس آهن مورد استفاده به دست آورد . با مراجعه به منحنی های هیستریزیس مربوط به آهن های سیلیکون دار سرد نورد شده با دانه های جهت دار که در حال حاضر عموماً برای ساخت هسته ترانسفورماتور از آن استفاده می شود ، ملاحظه می گردد که چگالی فوران پس ماند چیزی در حدود $0.75 B_{max}$ و بالاتر است ، اندازه گیری هایی هم که تا کنون انجام شده و نتایج آن در برخی از مراجع آمده ، به عنوان مثال مرجع [۵] این مطلب را ثابت می نماید . ولی با توجه به اینکه پس از قطع کلید ، مقداری از پس ماند تخلیه می گردد ، مقدار فوران پس ماند ندرتاً بالاتر از 0.6 مقدار فوران نامی است . در ترانسفورماتورهایی که در حالت باردار از منبع قطع می شوند ، فوران پسماند بستگی به ضریب قدرت بار دارد . در مطالعات آزمایشگاهی که بررسی اثر فوران پسماند به طور دقیق لازم است ، باید به کمک وسایل اضافی ، از جمله سیم پیچ تحریک dc ، سطح کنترل شده ای از فوران پسماند با پلاریته مورد نظر در هسته در زمان کلیدزنی ایجاد گردد ، که نمونه ای از این

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

کار در مرجع [۲] گزارش شده است. می توان برای آنکه جریان هجومی مورد آزمایش تحت تاثیر فوران پسماند قرار نگیرد، به روشی پسماند را به صفر رساند. یکی از روش های این امر آن است که به کمک یک منبع جریان dc متغیر، جریان کاهش یابنده ای را متناوباً با پلاریته های مثبت و منفی به ترانسفورماتور اعمال نمود تا پسماند به صفر برسد (شکل ۱۳)



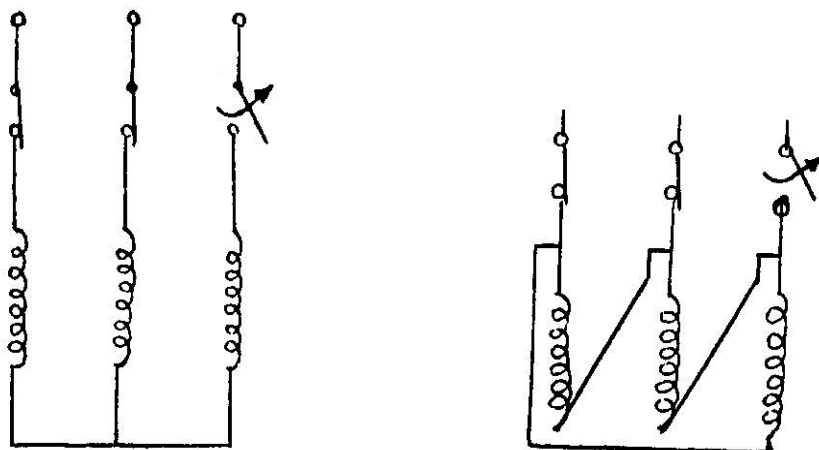
شکل ۱۳ - به صفر رساندن فوران پسماند هسته با اعمال جریان متغیر

در مرجع [۴] با قطع کردن مدار ترانسفورماتور در حالیکه ثانویه آن به یک موتور الکتریکی متصل شده، پسماند مغناطیسی هسته به صفر رسیده است.

حال به بررسی فوران پسماند در ترانسفورماتورهای سه فاز می پردازیم. در شبکه سه فاز یک از قطب های مدار شکن (Circuit Breaker)، مدار خود را در زاویه صفر یا 180° درجه موج جریان قطع می کند. دو قطب دیگر لحظه کوتاهی با هم موازی شده و اندکی بعد مدار خود را به طور همزمان قطع می کنند. لذا جریان ها در این دو خط در حال قطع با یکدیگر مساوی و مختلف العلامه اند.

اگر اتصال سیم پیچ های اولیه ترانسفورماتور از نوع ستاره باشد (شکل ۱۴) با توجه به اختلاف فاز بین فازها و قطع مدار سه فاز به نحوی که ذکر شد، فوران پسماند یکی از ستون های هسته که مدار آن ابتدا قطع شده دارای یک مدار تصادفی می باشد که اگر ترانسفورماتور بی بار باشد، در حدود صفر است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱۴ - باز شدن اتصال ستاره

شکل ۱۵ - باز شدن اتصال مثلث

دو فاز دیگر دارای فوران پسماندی مساوی و مختلف‌العلامه هستند. اندازه‌گیری‌های انجام شده

که نمونه آن در مرجع [۵] ذکر شده نیز همین مطلب را تایید می‌کند.

اگر اتصال سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور از نوع مثلث باشد، ابتدا کلید یکی از خطوط

که موج جریان آن از صفر می‌گذرد قطع می‌شود. سپس لحظه کوتاهی سیم‌پیچ فاز مربوطه با

یکی از فازهای دیگر سری شده، مجموعاً با فاز سوم موازی می‌گردند (شکل ۱۵) اندکی بعد

قطب‌های مدارشکن مربوط به دو فاز بعدی نیز مدار خود را قطع می‌کنند. بنابراین در این نوع

اتصال نیز قدر مطلق فوران پسماند دو ستون هسته با یکدیگر مساوی است و ستون سوم دارای

مقدار اتفاقی دیگری می‌باشد که تخمین زدن آن کاری مشکل است.

انجام یک آنالیز دقیق از مقدار نهایی فوران پسماند حاصله پس از قطع خطوط دوم و سوم

در مدار فوق غیر ممکن است.

۷-۱- نحوه کنترل و کاهش شدت جریان هجومی:

در قسمت ۲ دیدیم که اگر وصل کلید در زاویه ۹۰ درجه موج ولتاژ اتفاق بیفتد، دامنه

جریان هجومی به مقدار زیادی می‌تواند کاهش بیابد. البته این کاهش دقیقاً بستگی به مقدار

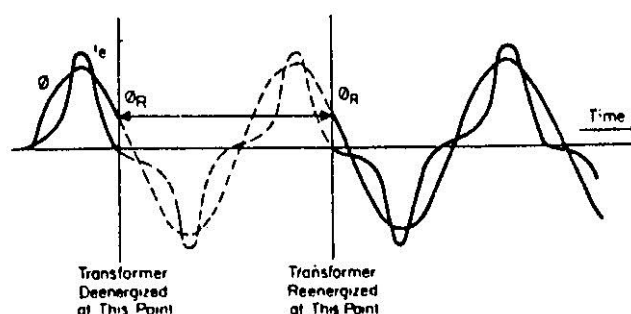
و جهت فوران پسماند دارد. ممکن است به علت وجود فوران پسماند، مقدار کاهش جریان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

هجومی زیاد نباشد ، یا پس از یکی دو سیکل دامنه آن افزایش یابد . به هر حال کنترل زاویه وصل یکی از راههای کنترل شدت جریان هجومی است . می توان کنترل زاویه وصل را در ترانسفورماتورهای کوچک توسط یک کلید الکترونیکی انجام داد . ولی در حال حاضر این امر جنبه آزمایشگاهی دارد و در ترانسفورماتورهای قدرت موجود در شبکه این کار عملی نیست . کنترل فوران پسماند نیز یکی از راههای کاهش شدت جریان هجومی است، ولی این کار هم قابل اعمال در ترانسفورماتورهای شبکه نیست و تنها در آزمایشگاه با در اختیار داشتن تجهیزات اضافی قابل اعمال است .

یک راه برای آن که در هنگام وصل ترانسفورماتور به منبع ، جریان هجومی نداشته باشیم ، آنست که درست در همان نقطه ای از موج ولتاژ متناظر با موج فوران که مقدار و پلاریته فوران مساوی پسماند است ، یعنی تقریباً در همان نقطه موج ولتاژ و همان شرایطی که قبلاً جداسازی از منبع اتفاق افتاده است ، اتصال به منبع صورت می گیرد . در این صورت نیز هیچگونه جریان هجومی ایجاد نمی شود و موج فوران هسته از همان نقطه به تغییرات ماندگار خود ادامه می دهد . (شکل ۱۶)

طبقه رابطه (۶-۲) اگر مدار قبلاً در حالت ماندگار بوده و در t_1 قطع شده باشد ، داریم :



شکل ۱۶ - شرایط برقرار شدن ترانسفورماتور بدون ایجاد جریان هجومی

$$\phi(t_1) = -\phi_m \cos(\omega t_1 + \theta_0) \quad (7-1)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فوران در لحظه قطع قبلی یعنی $\phi(t_1)$ همان فوران پسماند خواهد بود بنابراین :

$$\phi_R = -\phi_m \cos(\omega t_1 + \theta_0) \quad (7-2)$$

حال پس از وصل مجدد کلید در $t=0$:

$$\phi(0^+) = [\phi_R e^{-\frac{t}{Z}} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) + \phi_m \cos \theta_0 e^{-\frac{t}{Z}}]_{t=0} \quad (7-3)$$

$$\phi(0^+) = \phi_R - \phi_m \cos \theta_0 + \phi_m \cos \theta_0 = \phi_R \quad (7-3)$$

$$\phi(0^+) = -\phi_m \cos(\omega t_1 + \theta_0) \quad (7-5)$$

یعنی موج فوران بدون داشتن مولفه گذرا از همان نقطه قبلی شروع به تغییرات می نماید و

در نتیجه جریان هجومی نیز ایجاد نخواهد گردید .

واضح است که برقرار شدن در چنین شرایطی نیز کاملاً به صورت اتفاقی امکان پذیر است .

قراردادن مقاومت سری در مدار اولیه نیز در کاهش شدت جریان هجومی و ازدیاد میرایی موثر

است . ولی این مقاومت باید دارای مقدار بزرگی باشد تا باعث یک افت ولتاژ قابل ملاحظه در

مدار اولیه شود .

در حالت کلی با ایجاد ترکیب معینی از پارامترهای کلیدزنی یعنی فوران پسماند ، زاویه وصل

، مقاومت مدار اولیه و غیره ، می توان کاهش بزرگی در جریان هجومی را ایجاد کرد . اما به

لحاظ مسائل عملی از جمله ملاحظات اقتصادی ، چنین روش هایی در سیستم های قدرت

کاربرد پیدا نکرده است . به نظر نمی رسد که هیچگونه تغییرات ساده ای نیز وجود داشته باشد

که در طراحی ترانسفورماتورها داده شود تا جریان هجومی آنها را محدود نماید ، یا حتی به

مقدار بزرگی کاهش دهد . برعکس با استفاده از فولادهای سیلیکون دار از نوع سرد نورد شده

با دانه های جهت دار

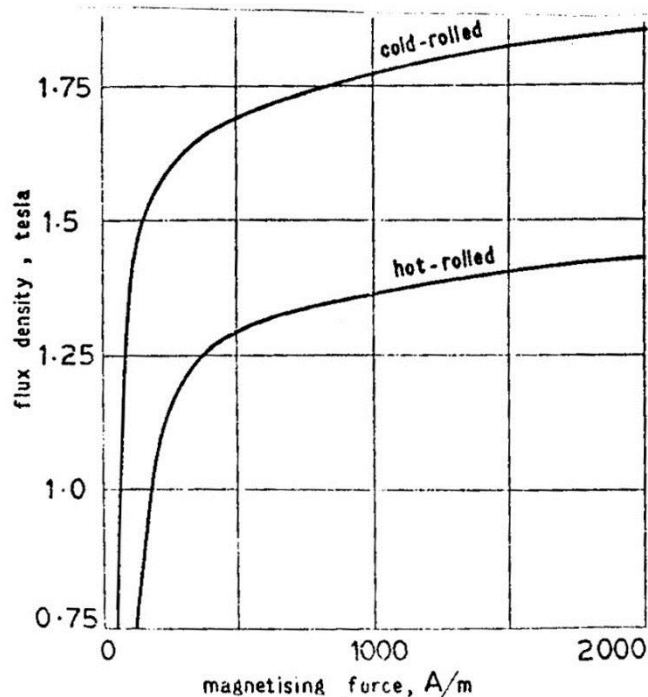
(Cold Rolled grain oriented steel sheets) در دهه های اخیر ، مشخصه

مغناطیسی ترانسفورماتورهای قدرت به نحوی بهبود یافته که در شرایط کار عادی ترانسفورماتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

، هسته دارای حداقل اشباع و تلفات است و کاملاً نزدیک به خطی می باشد . ولی در فوران های

بالتر شدیداً و به طور سریع اشباع شده ، خاصیت کاملاً غیر خطی دارد (شکل ۱۷)



شکل ۱۷ - مشخصه مغناطیسی فولاد الکتریکی

این امر باعث بالا رفتن دامنه جریان های هجومی گردیده است مسئله مهمی که جریان هجومی ایجاد می کند ، اختلال در امر حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور است . لذا سعی بر آن بوده است که با ساختن رله های دیفرانسیل مقاوم در مقابل جریان هجومی ، از آثار منفی این جریان جلوگیری شود که توضیح بیشتر در این زمینه در بخش های انتهایی این رساله خواهد بود .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر سایت و به همراه فونت های لازم

۱-۸- مدل کردن جریان هجومی :

به کل از مراحل مهمی که در بررسی و مطالعه هر پدیده فنی ، از جمله جریان هجومی ترانسفورماتور وجود دارد ، پیدا کردن مدل مناسب برای آن پدیده است . تا کنون مدل های مختلفی برای نمایش و بررسی جریان هجومی پیشنهاد گردیده است . باید دانست که مشکلی که در مسیر ساختن مدل مناسب برای ترانسفورماتورهای قدرت در حالت های گذار وجود دارد ، عدم ارائه مدل مناسب نیست ، بلکه کمبود اطلاعات لازم جهت پیدا کردن پارامترهای مورد نیاز برای ساختن این مدل هاست . به خصوص این مشکل در بررسی پدیده جریان هجومی ، که باید اشباع شدید هسته در نظر گرفته شود وجود دارد . زیرا اطلاعات خیلی کمی در مورد مشخصات اشباع شدید ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ در دسترس است .

اصولاً شرکت های برق اجازه انجام آزمایش عملی لازم به منظور به اشباع بردن شدید هسته ترانسفورماتورهای قدرت را به کسی نمی دهند .

از طرفی سازنده ها نیز معمولاً چنین آزمایش هایی را که جزء آزمایش های استاندارد ترانسفورماتور نیست ، انجام نداده و در صورت لزوم با محاسبه ، اطلاعات مورد نظرشان را به دست می آورند . بدین لحاظ به نوشته بسیاری از مراجع ، پیشرفت تحقیقات در این زمینه سریع نبوده است . جهت به دست آوردن چنین اطلاعاتی ، توسط بعضی از محققان داخل کشور ، در داخل کشور نیز جستجو هایی از کارخانجات سازنده ترانسفورماتور انجام گرفت که نتیجه مطابق مطالب فوق بود .

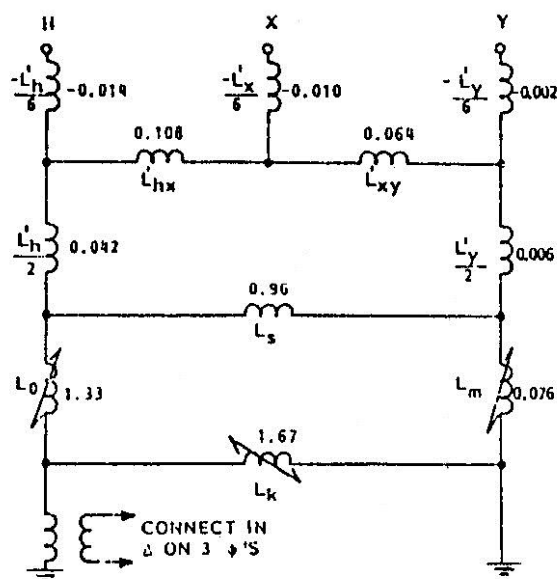
برای مطالعه جریان هجومی باید برای ترانسفورماتور در حالت اشباع شدید هسته ناشی از عبور جریان بسیار زیاد از یک سیم پیچ مدار معادل مناسبی پیدا کرد . باید ابتدا بررسی کرد که هدف از مدلسازی چیست ؟ اگر هدف به دست آوردن مدل برای ترانسفورماتور خاصی باشد . صرف نظر از مشکلاتی که طبق مطالب بالا وجود دارد ، می توان با انجام آزمایش های لازم بر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

روی ترانسفورماتور مورد نظر، مدل دقیقی برای آن به دست آورد. بدین منظور باید مسیرهای عبور فوران‌های اصلی و پراکندگی ترانسفورماتور در حالت اشباع هسته را مشخص نموده، بر اساس این مسیرها اندوکتانس‌های معادل را در قسمت‌های مختلف مدار معادل قرارداد. نمونه چنین مدار معادلهایی در مرجع [۱۰] مورد بحث قرار گرفته است، که در شکل ۱۸ دیده می‌شود. این شکل مربوط به مدل دقیق یک ترانسفورماتور سه فاز ۱۱ کیلو ولت، به قدرت نامی ۲۵ مگاوات آمپر از نوع هسته‌ای (Core Type) است. در این مدار معادل هر یک از

اندوکتانس‌ها نشان دهنده یکی از مسیرهای فوران است. اندوکتانس‌های $\frac{L'_y}{6}$, $\frac{L'_x}{6}$, $\frac{L'_h}{6}$ ناشی

از توزیع فوران پراکندگی از میان ضخامت شعاعی سیم پیچ‌ها هستند.



شکل ۱۸ - مدار معادل دقیق یک ترانسفورماتور ۲۵ مگا ولت آمپری

اندوکتانس‌های L'_{xy} , L'_{hx} مربوط به فوران در فاصله بین سیم‌پیچ‌ها می‌باشند. اندوکتانس‌های

$\frac{L'_y}{2}$, $\frac{L'_h}{2}$ مربوط به فوران پراکندگی قسمتی از سیم‌پیچ‌ها، اندوکتانس L_s مربوط به فوران

فاصله هوایی و شیلدهای انتهای سیم‌پیچ، L_0 اندوکتانس مولفه صفر مربوط به مسیر فوران از

میان چارچوب‌های انتهایی و هوا و تانک، L_m اندوکتانس مغناطیس‌کننده مربوط به رلوکتانس

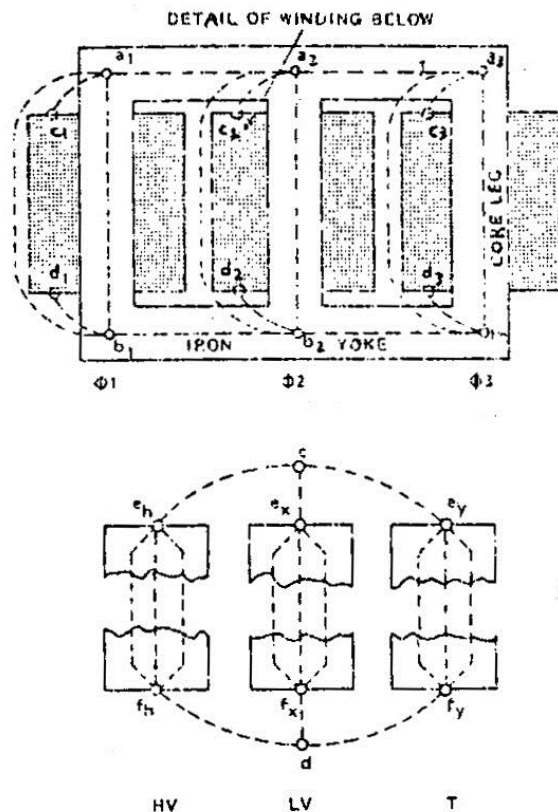
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ستون هسته و بالاخره L_k اندوکتانس یوغ معادل با طول مسیر فوران اضافی در قسمت یوغ در فازهای دو طرف هستند. مسیر بسته شدن خطوط این فورانها در شکل ۱۹ دیده می شود. مقادیر این اندوکتانسها از آزمایشهای اتصال کوتاه و تحریک DC به طور جداگانه به دست آورده می شوند. همانطور که مشاهده می شود و در مرجع [۱۰] نیز به آن اشاره گردیده، در نظر گرفتن چنین مدار معادل هایی بسیار زحمت آور و غیر لازم است و تغییر زیادی هم در نتیجه امر ایجاد نمی کند، جز آنکه حجم و وقت زیادی برای محاسبات مربوطه صرف می شود. لذا در همین مرجع مدار معادل های ساده تری مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شده که نتیجه حاصله تفاوت چندانی با مدل خیلی دقیق ندارد. شکل ۲۰ مدار معادل ساده شده را نشان می دهد.

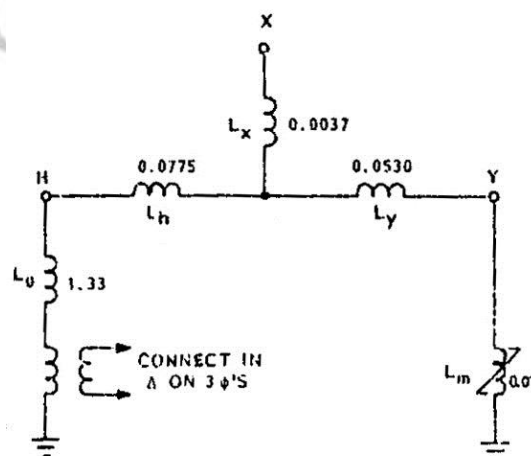
در سال (۱۹۸۹) در یکی از مقالات [۱۲] روشی پیشنهاد گردیده که بنابراین، معادلات جریان هجومی در حوزه فرکانس حل می شود.

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱۹ - مسیرهای فوران در ترانسفورماتور سه فاز از نوع هسته ای



شکل ۲۰ - مدار معادل ساده شده یک ترانسفورماتور ۲۵ مگاوات آمپری

در این روش اشاره می‌گردد که با توجه به آنکه میرا شدن جریان هجومی ممکن است حتی تا چند دقیقه طول بکشد، می‌توان آن را به عنوان یک پدیده شبه ماندگار در نظر گرفته،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

(Quasi-Stationary) مورد بررسی قرار داد. جریان هجومی را در گام‌های معینی دیسکریت (مجزا) نموده و به صورت فازورهای ثابت در نظر می‌گیرند. مزیت این روش بر شبیه‌سازی در حوزه زمان را، امکان بهتر نشان دادن دقیق شکل موج‌های جریان و ولتاژ در یک فاصله زمانی نسبتاً طولانی ذکر نموده اند. این روش شبیه مطالعه پایداری گذاری ماشین‌هاست که در آن با وجود آنکه مقادیر ثابت نیستند، باز هم از فازورها استفاده می‌شود. برای توضیح بیشتر مطلب می‌توان به مرجع [۱۲] مراجعه نمود.

در این پروژه برای به دست آوردن یک مدل کلی برای ترانسفورماتورها در زمان عبور جریان هجومی، از مدل عمومی ترانسفورماتور استفاده می‌گردد. با این تفاوت که اندوکتانس کلی ترانسفورماتور به صورت یک اندوکتانس متغیر مطرح می‌شود. این اندوکتانس ترکیبی از اندوکتانس‌های مربوط به هسته، مسیر عبور فوران پراکندگی معمولی و مسیر عبور فوران مربوط به جریان هجومی است. لذا مقدار این اندوکتانس در حالت معمولی و حالت اشباع با یکدیگر متفاوت است. در مدل پیشنهادی این پروژه، مقادیر اندوکتانس دیده شده در ترمینال ترانسفورماتور چه در حالت معمولی و چه در حالت اشباع، با استفاده از مشخصات هسته و سیم‌پیچ‌ها به خصوص ابعاد هندسی و فواصل بین آنها محاسبه می‌گردد. همانگونه که ذکر شد مشکل اصلی در مدل کردن ترانسفورماتور در زمان عبور جریان هجومی، عدم امکان ارائه مدل‌های دقیق نیست، بلکه عدم دسترسی به اطلاعات صحیح و عدم امکان عملی اندازه‌گیری‌های دقیق در حالت اشباع شدید جریان هجومی است.

در مدل ارائه شده در این پروژه سعی شده است که مشکل عدم امکان اندازه‌گیری مشخصات اشباع به کمک انجام محاسبات جبران شود.

پس از به دست آوردن مدار معادل ترانسفورماتور در حین جریان هجومی، معادلات مربوطه در حوزه زمان حل شده، مقدار جریان هجومی حساب می‌شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۹-۱- به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور :

یکی از مهمترین مسائلی که در مطالعه جریان هجومی حائز اهمیت است ، شکل مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور می باشد . زیرا دامنه جریان هجومی بستگی به این مشخصه و شیب آن در ناحیه اشباع دارد . بدین صورت که هر چه چگالی فوران اشباع هسته کوچکتر و شیب منحنی مغناطیسی در ناحیه اشباع کمتر باشد ، دامنه جریان هجومی بزرگتر خواهد بود . در حال حاضر تقریباً فقط از فولاد سیلیکون دار سرد نورد شده با ذارت جهت دار برای ساختن هسته ترانسفورماتور استفاده می شود . همانطور که ذکر شد خاصیت مغناطیسی این ماده در پایین تر از چگالی فوران اشباع بسیار عالی و در بالاتر از آن شدیداً غیر خطی است (شکل ۱۷) برای آن که مدل ترانسفورماتور در زمان عبور جریان هجومی از دقت لازم برخوردار باشد ، باید منحنی مغناطیسی تا حد امکان به طور دقیق در نظر گرفته شود. نکته مهمی که لازم است در اینجا مورد توجه قرار گیرد آن است که در مدل کردن جریان هجومی به منحنی مغناطیسی کلی ترانسفورماتور آن گونه که از سیم پیچ برقدار شده دیده می شود ، احتیاج داریم و در نظر گرفتن منحنی مغناطیسی آهن مورد استفاده در هسته به تنهایی کافی نیست ، در مشخصه اشباع ترانسفورماتور ، جنس ، ابعاد و فواصل قسمت های دیگر ترانسفورماتور مثل سیم پیچ و تانک و تیر آهن های نگهدارنده یوغ و غیره موثر می باشند . در برخی از مقالات ، فرض شده ، است که سطح مقطع هسته با سطح مقطع سیم پیچ یکسان است . این فرض در مورد محاسبه جریان هجومی اشتباهات بزرگی را ایجاد می نماید . بنا به نوشته مراجع [۴و۵] این خطا می تواند در ترانسفورماتورهای کوچک به ۵۰ درصد و در ترانسفورماتورهای بزرگ تا ۲۰۰ درصد برسد . زیرا هر چه ترانسفورماتور بزرگتر باشد ، فاصله سیم پیچ برقدار از هسته بزرگتر می گردد و اثر آن در مقدار اندوکتانس های پراکندگی ترانسفورماتور بیشتر ظاهر می شود . در محاسبه اندوکتانس معادل ترانسفورماتور در حالت اشباع شدید ناشی از جریان هجومی ،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نه تنها فوران هسته و فوران پراکندگی معمولی، بلکه فوران پراکندگی شدید ناشی از جریان هجومی نیز باید در نظر گرفته شود و لذا ابعاد و فواصل هسته و سیم پیچها در محاسبه دخالت می کنند. البته تعدادی از پارامترها وجود دارند که به طور دقیق قابل محاسبه نیستند. به عنوان نمونه می توان از تاثیرات تانک و سایر قسمت های ترانسفورماتور نام برد. ولی چون در زمان اشباع ناشی از جریان هجومی، مسیرهای معمولی عبور فوران تا حد زیادی اشباع می شود، خطوط فوران خود را به مسیرهای آهنی محدود نمی کنند و لذا در نزدیکترین مسیر نیز بسته می شوند.

روش محاسبه اندوکتانس پراکندگی در زمان عبور جریان هجومی در قسمت های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. لذا قبل از پرداختن به روش محاسبات، روش های مختلف به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتورها تشریح می شود. ایده آل ترین حالت آن است که مختصات نقاط منحنی هیستریزس ترانسفورماتور به طور دقیق از آزمایش به دست آمده و در دسترس باشد و مستقیماً در محاسبه از آن استفاده گردد.

بدیهی است که در این صورت جواب به دست آمده دارای کمترین خطا خواهد بود. همانگونه که ذکر شد فوران ایجاد شده در زمان عبور حداکثر جریان هجومی به صورت تئوریک ونظری می تواند تا بیشتر از $2/5$ برابر فوران نامی برسد. منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور در چنین مقادیر بالایی از اشباع، توسط سازنده در اختیار خریدار قرار داده نمی شود و اصولاً سازندگان چنین منحنی هایی را به وسیله آزمایش به دست نمی آورند.

بنابراین مشخصه فوق اشباع ترانسفورماتورها به آسانی در دسترس نبوده و در نتیجه برای ساختن مدل جهت ترانسفورماتورهای قدرت موجود، عملاً کمبود اطلاعات وجود دارد. به دست آوردن مشخصه فوق اشباع ترانسفورماتور نیاز به اطلاعات زیاد از آزمایش های متعدد دارد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

و به خاطر عوامل متعددی که در این امر دخالت می کنند ، انجام آزمایش های عملی به این منظور دارای مشکل است .

تا کنون روش هایی برای به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور پیشنهاد گردیده است که به قرار ذیل می باشد :

اندازه گیری با استفاده از یک ولتاژ متناوب با فرکانس کم یا ولتاژ DC .

اندازه گیری با استفاده از ولتاژ متناوب .

اندازه گیری در حین عبور جریان هجومی .

به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور از طریق محاسبه با استفاده از اطلاعات ساختمانی ترانسفورماتور .

روش های اول تا سوم فوق الذکر به طور اجمال در بخش های انتهایی این رساله تشریح گردیده است . انجام این سه روش نیاز به تجهیزات مربوط به خود دارد .

روش چهارم که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته ، در اینجا تشریح می گردد .

۱-۱۰- تشریح مشخصه مغناطیسی مورد استفاده در این پروژه :

این مشخصه از دو پاره خط تشکیل می شود (شکل ۲۱) . پاره خط اول مربوط به مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور در پایین از فوران اشباع و پاره خط دوم مربوط به این مشخصه در بالاتر از فوران اشباع ϕ_s است .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

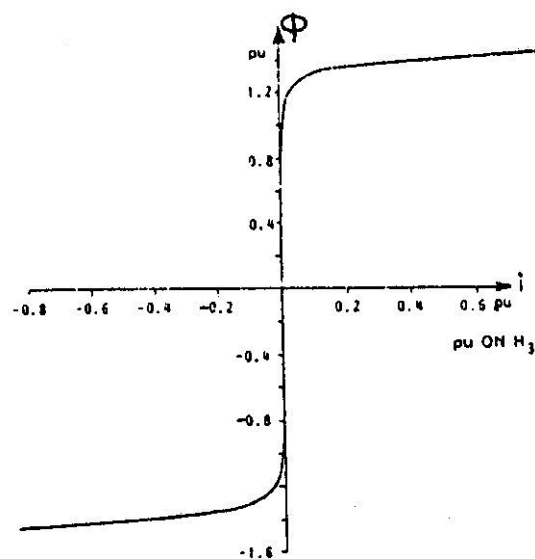


شکل ۲۱ - مشخصه مغناطیسی دو خطی

فرض مربوط به دو خطی بودن منحنی مغناطیسی هر چند تقریبی است، ولی همانگونه که قبلاً ذکر شد با توجه به مشخصات مغناطیسی آهن‌های مورد استفاده در هسته ترانسفورماتور، این روش نزدیک به واقع است. به عنوان نمونه در شکل ۲۲ مشخصه مغناطیسی اندازه‌گیری شده یک ترانسفورماتور ۲۵ مگاوات آمپری دیده می‌شود که با تقریب خوبی از دو خط مستقیم تشکیل شده است.

در این پروژه، شیب دو قسمت منحنی مغناطیسی از روی مشخصات ساختمانی هسته و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور محاسبه می‌گردد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲۲ - مشخصه مغناطیسی اندازه گیری شده یک ترانسفورماتور ۲۵ مگا ولت آمپری

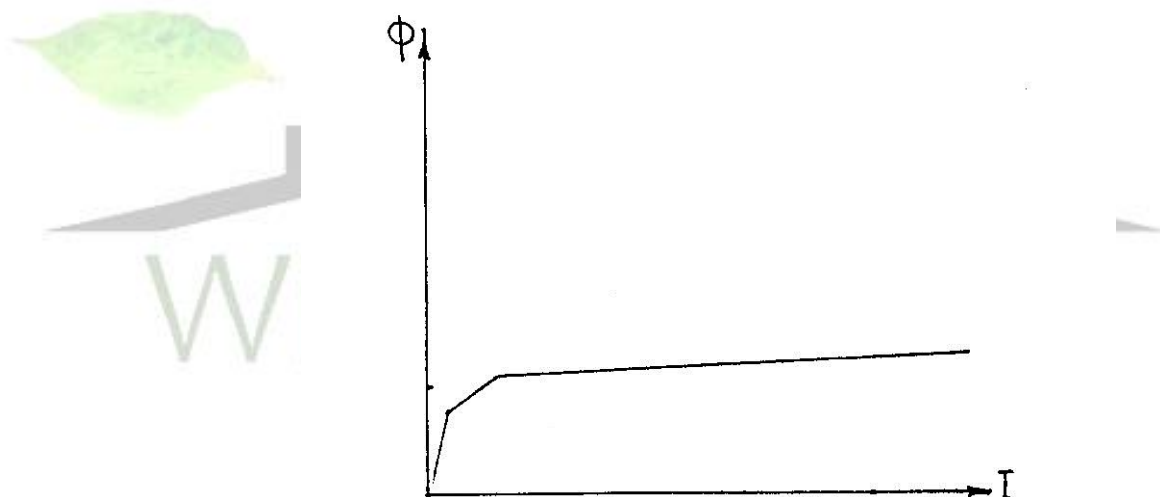
این شیب در قسمت خطی مساوی اندوکتانس مغناطیسی هسته ترانسفورماتور است و L_m مشخص می شود و در قسمت اشباع مساوی اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتور در حالت اشباع شدید ناشی از عبور جریان هجومی است و با L_{sat} مشخص می گردد. اطلاعات لازم جهت محاسبات از مشخصات ترانسفورماتور واقعی اخذ می شود. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته در حالت کار خطی جهت محاسبه L_m از روی منحنی مغناطیسی معمولی ترانسفورماتور، که از آزمایش بی باری به دست می آید، سایر مشخصات هندسی و ساختمانی هسته را از طریق اطلاعات ارائه شده توسط سازنده می توان به دست آورد. L_{sat} نیز با استفاده از ابعاد و فواصل سیم پیچ های ترانسفورماتور از طریق انتگرال گیری انرژی ذخیره شده در کل میدان پراکندگی ناشی از اضافه فوران جریان هجومی محاسبه می گردد. محاسبات مربوط در فصل بعدی آورده شده است.

۱-۱۰-۱- نمایش منحنی مغناطیسی با سه خط شکسته:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

می توان منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور را به صورت مجموع سه خط شکسته نشان داد (شکل ۲۳). در نظر اول چنین به نظر می رسد که حل مسئله با این نوع مشخصه ، دارای دقت بیشتری است . ولی چون جریان هجومی مربوط به حالت اشباع کامل هسته است ، در نظر گرفتن پاره خط سوم در محل زانوی منحنی تاثیر زیادی در مقدار محاسبه شده ماکزیمم جریان هجومی ندارد و تغییری هم که در شکل موج جریان هجومی می تواند ایجاد کند ، آن قدر کم و ناچیز است که با توجه به شکل خیلی تیز منحنی جریان هجومی ، قابل اعتنا نیست . بنابراین استفاده از مدل سه خطی تاثیر زیادی به جز افزایش حجم محاسبات ندارد .

۱-۱۰-۱- نشان دادن منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور به وسیله فرمول :



شکل ۲۳ - مشخصه مغناطیسی سه خطی

همانگونه که ذکر شد ، مهمترین مشکل در به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور در مقادیر بالای اشباع ، به دست آوردن اطلاعات صحیح راجع به این مشخصه از طریق اندازه گیری است . اگر مختصات نقاط اندازه گیری شده مربوط به این مشخصه در دسترس نباشد ، می توان آن را به وسیله یک فرمول نشان داده و در محاسبات از آن استفاده کرد . اما

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

تا وقتی که مختصات واقعی نقاط مناسب از مشخصه مغناطیسی در دسترس نباشد ، فرمول دقیقی برای آن نمی توان به دست آورد .

همانگونه که ذکر شد مشخصه فولادهای سیلیکون دار امروزی در بالاتر از فوران نامی شدیداً غیر خطی بوده و با سرعت به اشباع می رود . برخی از محققان برای فرمولیزه کردن این منحنی از دو جمله $i = A\phi + B\phi^n$ استفاده کرده اند و برخی دیگر فرمول های دیگر را پیشنهاد نموده اند ولی با توجه به مشخصه شدیداً غیر خطی مغناطیسی بهتر است از تعداد جملات بیشتری برای این کار استفاده شود . به عنوان نمونه می توان از رابطه $i = A_1\phi + A_3\phi^3 + A_5\phi^5 + A_7\phi^7$ برای ساختن مدل منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور استفاده کرد که در آن ϕ فوران و i جریان است . ضرایب این فرمول با استفاده از روش برازش منحنی (Curve fitting) از روی مختصات نقاط واقعی پیدا می شوند . در صورتیکه مختصات نقاط به تعداد کافی در هر سه ناحیه خطی ، زانو و اشباع منحنی در دسترس باشد ، ضرایب این فرمول می تواند به طور دقیق معلوم شود . ولی همانطور که گفته شد چون عملاً مختصات نقاط مربوط به اشباع ترانسفورماتورهای واقعی در دسترس نیست ، استفاده از این روش نمی تواند منحنی را در اشباع بالا به خوبی مدل کند . در نتیجه اگر جریان هجومی با استفاده از چنین فرمولی محاسبه شود ، دارای خطای زیاد خواهد بود . زیرا دلیلی وجود ندارد منحنی مغناطیسی بعد از رفتن به اشباع با همان آهنگی تغییر نماید که قبل از اشباع و در ناحیه خم منحنی تغییرات داشته است و شیب تغییرات آن در ناحیه اشباع بستگی تام به مشخصات فوران پراکندگی ترانسفورماتور دارد .

۱-۱۲- اثر تلفات هسته :

موضوع دیگری که مورد سوال است ، آنست که آیا در نظر گرفتن اثر هیستریزیس در محاسبه جریان هجومی لازم است یا خیر ؟ بدیهی است که اگر منحنی هیستریزیس لحظه ای

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

ترانسفورماتور اندازه گیری شده و در دسترس باشد استفاده از آن برای پیدا کردن مقدار جریان از روی مقدار نظیر فوران دقت بیشتری را می تواند در محاسبات به همراه بیاورد. همانطور که می دانیم سطح داخلی حلقه هیستریزس نمایش دهنده تلفات هسته است. در صورتیکه از سطح داخلی این حلقه صرف نظر شود در واقع از اثر تلفات هسته بر روی شکل جریان هجومی صرف نظر شده و نتیجه ای که به دست می آید اندکی بدبینانه است. در مقالات فنی که در مورد جریان هجومی نوشته شده، نوعاً از حلقه هیستریزس صرف نظر شده و به جای آن از مشخصه مغناطیسی استفاده گردیده است [۵]. این تقریب از آن جهت قابل قبول است که جریان هجومی به دفعات از جریان بی باری بیشتر است. وقتی منحنی هیستریزس را تا مقادیر بسیار بالای جریان مغناطیس کننده رسم می کنیم، رفت و برگشت این منحنی را بسیار نزدیک به هم می بینیم و لذا در مقادیر بالای اشباع با تقریب بسیار خوبی می توان منحنی هیستریزس را بر منحنی مغناطیسی، منطبق دانست و از منحنی مغناطیسی در محاسبه جریان هجومی استفاده کرد. حتی در جریان مغناطیس کننده معمولی که تا چندصد برابر کوچکتر از جریان هجومی است، صرف نظر کردن از هیستریزس تاثیری در مقدار ماکزیمم جریان بی باری ندارد و فقط شکل آن را کمی عوض می کند.

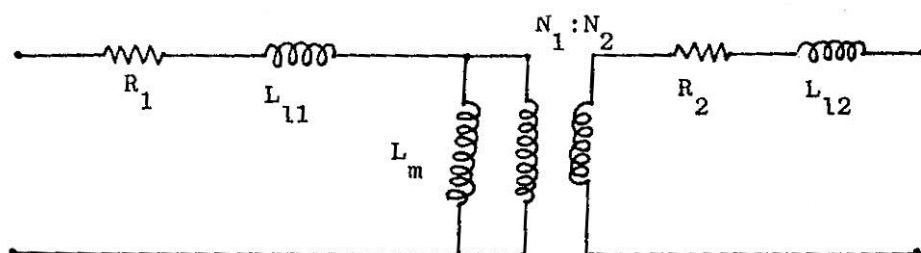
نقش تلفات هیستریزس در میرا کردن جریان هجومی نیز خیلی کمتر از نقش تلفات ناشی از مقاومت سری است. چون تلفات مقاومت سیم پیچ متناسب با مجذور جریان می باشد. لذا مقاومت اهمی سیم پیچ به لحاظ بالا بودن دامنه جریان هجومی تلفات زیادی را در سیم پیچ برقرار ایجاد می کند. البته تلفات هسته نیز تقریباً مناسب با مجذور چگالی فوران است و لذا حداکثر تا حدود ۹ برابر حالت عادی بالا می رود. اما تلفات سیم پیچ در جریان هجومی در مقایسه با این تلفات در حالت بی باری معمولی و حتی بار نامی اصلاً قابل مقایسه نیست. تلفات

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هیستریزیس بین ۰/۱ درصد تا ۱ درصد تلفات ناشی از مقاومت سری است [۴]. و لذا به راحتی می توان از آن در بررسی جریان هجومی صرف نظر کرد.

۱-۱۳- مدار معادل ترانسفورماتور :

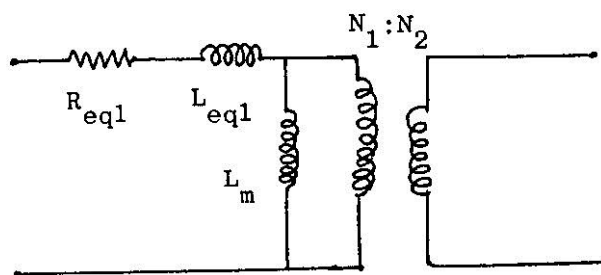
همانطور که می دانیم ترانسفورماتور در حالت کار معمولی خود مطابق شکل ۲۴ مدل می شود



شکل ۲۴ - مدار معادل معمولی ترانسفورماتور

که در آن R_1, R_2 مقاومت های اهمی سیم پیچ های اولیه و ثانویه و L_{11}, L_{12} اندوکتانس پراکندگی سیم پیچ های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور است. L_m اندوکتانس معادل هسته آهنی است که مقدار آن با توجه به خصوصیات خطی هسته تعیین می شود. اندوکتانس های پراکندگی L_{11}, L_{12} به علت جاری شدن فوران پراکندگی در فضای مس سیم پیچ ها ایجاد می گردد که مسیر آن از هسته آهنی یا مسیرهای آهن مغناطیسی تعبیه شده در بالای هسته و دیواره تانک ترانسفورماتور و نیز از طریق روغن بسته می شود. غالباً از مدار تقریبی ترانسفورماتور (شکل ۲۵) استفاده می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



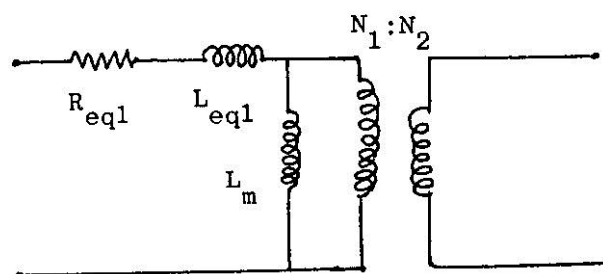
شکل ۲۵ - مدار معادل معمولی تقریبی ترانسفورماتور

زیرا مقدار امپدانس سری ترانسفورماتور که شامل مقاومت سیم‌پیچ و اندوکتانس پراکندگی سیم‌پیچ‌هاست، از آزمایش اتصال کوتاه به طور یکجا اندازه‌گیری می‌شود. اصولاً تفکیک فوران‌های پراکندگی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه از یکدیگر به طور دقیق ممکن نیست و به طور قرار دادی خطوط فوران جاری در یک نیمه از فاصله کانال بین سیم‌پیچ‌ها را جزء یکی و نیمه دیگر را جزء دیگری محسوب می‌نمایند. در مدار معادل شکل ۲۵ داریم:

در حالت کار عادی ترانسفورماتور، می‌توان از افت ولتاژ روی مقاومت سیم‌پیچ‌ها در مقابل افت ولتاژ مربوط به اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتور صرف‌نظر کرد و لذا امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای بزرگ با تقریب بسیار خوب تنها مشتمل بر اندوکتانس پراکندگی است. اما در حالت عبور جریان هجومی، چون مقاومت مدار اولیه نقش بزرگی در میراثی این جریان بازی می‌کند، آوردن مقاومت در مدار معادل ضروری است. از طرفی چون در عمل همیشه جریان هجومی در سیم‌پیچ برقرار شونده جاری می‌شود، لازم است مقاومت‌ها به طور جداگانه در مدار معادل مورد استفاده در جریان هجومی نشان داده شوند. اندوکتانس L_m که مربوط به فوران هسته در حالت خطی است، در حالت اشباع به همان نحو باقی نمی‌ماند. زیرا به علت اشباع هسته، فوران مربوط به جریان هجومی به شکل فوران پراکندگی در هسته و در

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فضای مس سیم پیچها علاوه بر فوران پراکندگی معمولی جاری می شود. این فوران را باید با اندوکتانس متغیر به موازات L_m نشان داد. موازی قرار گرفتن این اندوکتانس، که در حالت اشباع مقدار آن کوچک است، با اندوکتانس بسیار بزرگ L_m باعث می شود که در حالت اشباع قرار دادن L_m در مدار معادل لازم نباشد، زیرا حذف آن خطای قابل توجهی ایجاد نمی کند. با توجه به بحث های انجام شده مدار معادل ترانسفورماتور در حالت عبور جریان هجومی مطابق شکل ۲۶ در این رساله پیشنهاد و مدل می شود.

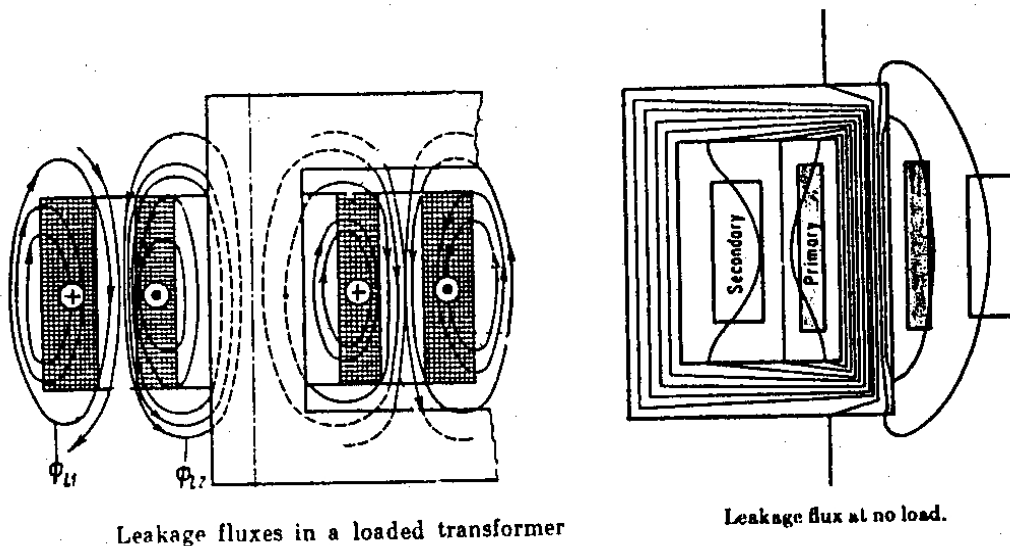


شکل ۲۶ - مدار معادل در حالت عبور جریان هجومی

مقدار اندوکتانس L در حالت عدم اشباع هسته مساوی بینهایت و در حالت اشباع هسته مساوی اندوکتانس اشباع L_{sat} می باشد. اندوکتانس L به موازات L_m مجموعاً معادل با مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور است. باید دقت کرد که در حالت عدم اشباع هسته مقدار اندوکتانس L_m خیلی بزرگ است و لذا اندوکتانس پراکندگی کوچک اولیه یعنی L_{11} در برابر آن در بی باری قابل صرف نظر است و تنها اثر L_{11} در بارداری است که افت ولتاژ ایجاد می نماید. پس از رفتن هسته ترانسفورماتور به حالت اشباع ناشی از جریان های زیاد مثل جریان هجومی، نه تنها هسته اشباع می شود و خطوط فوران مازاد بر ظرفیت هسته از هسته خارج شده و حجم سیم پیچ را اشغال می کنند، بلکه تمام مسیر عبور فوران پراکندگی نیز اشباع می گردد. فوران مازاد ایجاد شده مسیر خود را از طریق هسته و نیز از طریق مسیر معمولی فوران پراکندگی نمی بندد، بلکه در کوتاهترین مسیر از میان مس و عایق و غیره مسیر آن بسته

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

می شود. باید دقت کرد که اگر در حالت عبور جریان هجومی، اندوکتانسی را که از ترمینال های اولیه دیده می شود، اندازه گیری کنیم، در برگیرنده هر سه اندوکتانس L_{11}, L_{sat}, L_m خواهد بود. یعنی مشخصه مغناطیسی کل ترانسفورماتور از ترمینال های آن اندازه گیری می شود. مقاومت R_1 در مدار معادل فوق معادل تلفات فوران پراکندگی است. در شکل ۲۷ خطوط فوران پراکندگی معمولی دیده می شود. در شکل ۲۸ بسته شدن خطوط فوران اضافی ناشی از جریان زیاد سیم پیچ از طریق هوا و روغن و اشباع مسیرهای عبور فوران مشخص شده است.

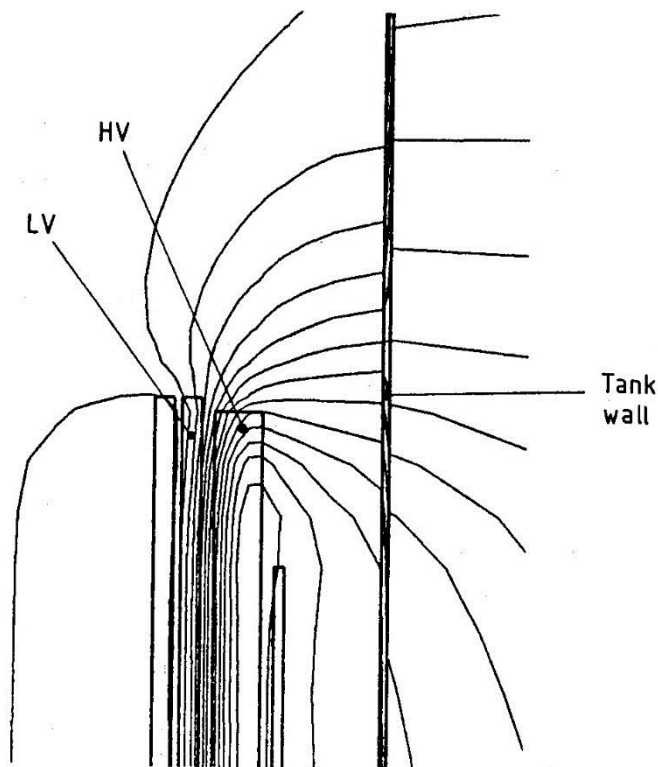


Leakage fluxes in a loaded transformer

Leakage flux at no load.

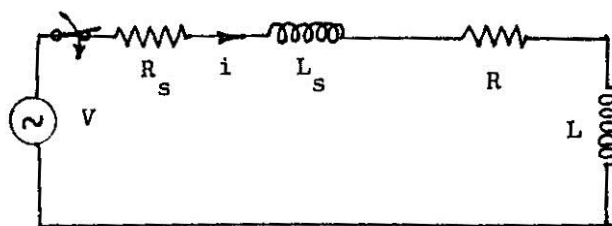
شکل ۲۷ - خطوط فوران پراکندگی معمولی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲۸ - خطوط فوران اضافی ناشی از جریان زیاد سیم پیچ

معادله دیفرانسیل مدار به صورت زیر به دست می آید. در شکل ۲۹، i جریان عبوری از سیم پیچ و ϕ کل فوران حاصله از جریان i است در این مدار پس از بسته شدن کلید رابطه زیر را خواهیم داشت:



شکل ۲۹ - برقرار شدن ترانسفورماتور

$$V = V_m \sin(\omega t + \theta_0) = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + Ri + L \frac{di}{dt} \quad (13-1)$$

R_s مقاومت منبع، L_s اندوکتانس منبع، R مقاومت سیم پیچ و L اندوکتانس است که در

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

ترمینال ترانسفورماتور دیده می شود. بنا به تعریف اندوکتانس :

$$L = N \frac{d\phi}{di} \quad (13-2)$$

ابتدا اندوکتانس L را ثابت فرض می کنیم بنابراین نتیجه می شود :

$$d\phi = \frac{L}{N} di \Rightarrow \phi = \frac{L}{N} i + k \quad (13-3)$$

در لحظه وصل کلید جریان صفر و فوران مساوی فوران پسماند هسته است. لذا با اعمال

این شرط اولیه خواهیم داشت :

$$i = 0 \Rightarrow \phi = \phi_{rem} \quad (13-3)$$

$$\phi = \frac{L}{N} i + \phi_{rem} \Rightarrow \phi_{rem} = \phi - \frac{L}{N} i$$

بنابراین :

$$V = (R_s + R) \frac{N}{L} (\phi - \phi_{rem}) + (L_s + L) \frac{d}{dt} \left[\frac{N}{L} (\phi - \phi_{rem}) \right]$$

$$\Rightarrow \frac{d\phi}{dt} = \frac{L}{(L_s + L)N} V_m \sin(\omega t + \theta_0) - \left(\frac{R_s + R}{L_s + L} \right) \phi \quad (13-5)$$

این رابطه یعنی (۱۳-۵) معادله دیفرانسیل مدار است که با استفاده از روش رانگ کوتای (Range-Kutta) مرتبه چهارم آن را حل می کنیم. محاسبات را به روش تکراری و می توان با طول گام مثلاً $t=0.0005$ S ثانیه، انجام داد که البته این کار توسط کامپیوتر صورت می گیرد. در هر تکرار با توجه به مقدار محاسبه شده فوران اندازه اندوکتانس L دوباره تعیین می گردد که در صورت قرار گرفتن در ناحیه خطی مساوی L_m و در صورت واقع شدن در ناحیه اشباع مساوی L_{sat} است.

روش رانگ کوتای مرتبه چهارم در مقایسه با سایر روشها، دقیق و آسان است و نسبت به روشهای اولرو دوزنقه ای دقت بیشتری دارد. لذا با انتخاب گام h مناسب جهت محاسبه، شکل موج جریان بی باری با دقت کافی به دست آمده، مسئله ناپایداری عددی نیز به وجود نمی آید. در این روش محاسبه هر نقطه از منحنی انتگرال از روی نقطه قبلی با استفاده از

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

فرمول‌های زیر به دست می‌آید. با توجه به کوچک بودن مقادیر L_s, R_s می‌توان در ترانسفورماتورهای سه فاز مانند سه ترانسفورماتور تکفاز عمل کرد. در این صورت پاسخ‌های به دست آمده تقریباً صحیح است. زیرا می‌توان فرض کرد که ولتاژ تعادل منبع سه فاز تقریباً در ترمینال‌های ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. البته مقادیر فوران پسماند و زاویه وصل که بیشترین تاثیر را در جریان هجومی دارند، در سه فاز با یکدیگر کاملاً متفاوت هستند. در صورتیکه حل دقیق‌تر مورد نظر باشد، باید معادلات را به صورت سه فاز حل کرد. که توضیح بیشتر در این زمینه در مبحث تکمیلی که در فصل سوم آمده، آورده شده است.

$$k_1 = hf(x_n, y_n)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

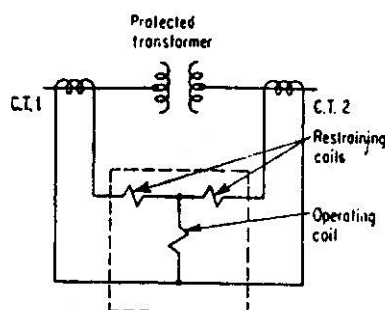
فصل ۲: مباحث تکمیلی

۲-۱- حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور و تاثیر جریان هجومی در آن :

رله‌های دیفرانسیل یکی از اصلی‌ترین وسایل حفاظتی در ترانسفورماتورهای با قدرت بالاتر از ۱۰ مگاوات آمپر و گاهی از ۵ مگاوات آمپر به بالا، هستند. این رله‌ها ترانسفورماتور را در مقابل خطرات ناشی از خطاهای داخلی حفاظت می‌کنند (شکل ۱-۱). ترانسفورماتورهای جریان که در این شکل دیده می‌شوند، طوری متصل شده‌اند که در شرایط عادی جریانی از سیم‌پیچ عمل‌کننده (Operating Coil) عبور نمی‌کند. اگر یک اتصال کوتاه یا خطای اتصال به زمین اتفاق بیفتد، جریان‌های عبوری از ثانویه ترانسفورماتورهای جریان نابرابر می‌شوند و اختلاف بین آنها از طریق سیم‌پیچ عمل‌کننده جاری می‌شود. رله‌ی دیفرانسیل زیر از نوع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرمان سایت و به همراه فونت های لازم

درصدی (Percentage differential relay) می باشد. در این نوع رله جریان عبوری از سیم پیچ های نگهدارنده (Restraining Coils) یک گشتاور متقابل تولید می کند، به نحوی که مقدار جریان عبوری از سیم پیچ عمل کننده لازم برای بستن کنتاکت های رله، درصد معینی از جریان عبوری از مدار اصلی است تا از عمل کردن غلط، به خاطر عدم تطبیق اندک ترانسفورماتورهای جریان با یکدیگر یا اشباع شدن ترانسفورماتورهای جریان در اثر عبور جریان های شدید از ترانسفورماتور به علت وقوع یک خطای خارجی جلوگیری نماید.



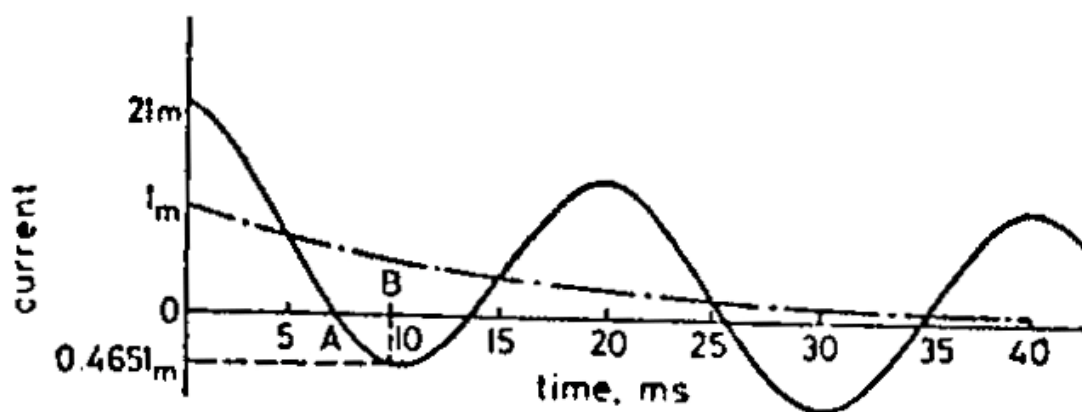
شکل ۱-۱ رله دیفرانسیلی درصدی

هنگامی که از اولیه ترانسفورماتور در اثر برقرار شدن، جریان هجومی عبور می کند، رله دیفرانسیل آن را به صورت یک جریان خطا می بیند زیرا جریان های دو طرف ترانسفورماتور نا برابر می شوند. این امر می تواند باعث عمل کردن رله شود در حالی که خطای حقیقی در ترانسفورماتور رخ نداده است. اگر این اتفاق بیفتد و مدار اولیه ترانسفورماتور در حالت سوئیچینگ قطع شود، ممکن است ولتاژ ضربه ای بسیار شدیدی ایجاد گردد. زیرا جریان هجومی می تواند مولفه DC بزرگی داشته باشد و قطع این جریان در اندوکتیویته ترانسفورماتور ولتاژ بزرگ $-L \frac{di}{dt}$ را القاء می کند که امکان وقوع اتصال حلقه یا اتصال زمین در اثر آن زیاد است. بنابراین باید برای جلوگیری از این عملکرد غلط رله، پیش بینی لازم به عمل آید. جهت این امر چند روش تا کنون پیشنهاد گردیده است، که در اینجا مهمترین آنها به طور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مختصر ذکر می شود .

یکی از راههای ممکن غیرحساس کردن رله دیفرانسیل در زمان برقدار شدن ترانسفورماتور است . واضح است که این روش مناسب نیست . زیرا اگر از عمل کردن رله در طی مدت زمان عبور جریان هجومی جلوگیری شود ، حفاظتی در مقابل جریانهای خطای حقیقی که ممکن است در حین برقدار شدن ترانسفورماتور اتفاق بیفتد وجود نخواهد داشت . لذا باید رله در عین عمل نکردن در اثر جریان هجومی ، بتواند جریان خطا را تشخیص داده و عمل کند . روش دیگر ، جلوگیری از کار رله به وسیله مولفه DC جریان هجومی است . در این روش از مولفه DC جریان جهت تغذیه یک سیم پیچ بازدارنده استفاده می شود . اما این روش نیز عملاً کاربردی ندارد . چون وجود مولفه DC به شرایط وصل کلید بستگی دارد و ممکن است مقدار آن صفر باشد . به علاوه در حین وقوع خطای داخلی نیز مولفه DC در جریان خطا (Fault) وجود دارد و ممکن است رله نتواند عمل خود را در مورد تشخیص جریان هجومی از جریان فالت به دقت انجام دهد (شکل ۱-۲)



Fault current wave shape in power transformer

شکل ۱-۲ : نمونه شکل منحنی جریان خطا در ترانسفورماتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

رایج ترین روش جهت تشخیص جریان هجومی از جریان خطا ، استفاده از مانع هارمونیک دوم است . هارمونیک دوم در جریان هجومی ، همیشه هارمونیک غالب است و درصد بالایی دارد . ولی جریان های ناشی از خطای داخلی درصد پایینی از هارمونیک دوم دارند . به عنوان نمونه در جدول زیر درصد هارمونیک های جریان هجومی با جریان خطا در یک مورد خاص مقایسه شده است .

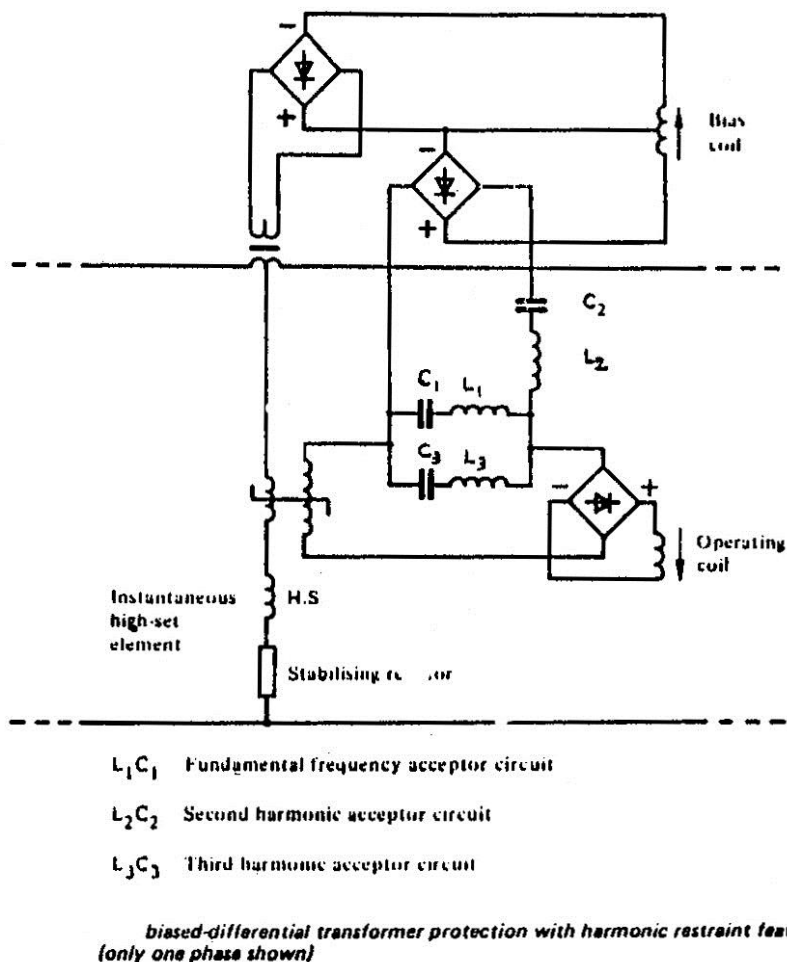
یکی از روش های لازم معمولی برای استفاده از هارمونیک دوم آن است که جریان هارمونیک دوم در زمان عبور جریان هجومی فیلتر شده و از آن برای ایجاد گشتاور مقاوم در رله استفاده می شود که باعث عمل نکردن رله می گردد . ساختمان یک نمونه از این رله ها در شکل (۲-۱) دیده می شود .

نوع جریان مولفه ها	جریان هجومی			جریان خطای داخلی
	پریود اول	پریود دوم	پریود سوم	
DC	۵۸	۵۸	۵۸	۳۸
مولفه اصلی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
هارمونیک دوم	۶۲	۶۳	۶۵	۹
هارمونیک سوم	۲۵	۲۸	۳۰	۴
هارمونیک چهارم	۴	۵	۷	۷
هارمونیک پنجم	۲	۳	۳	۴

اخیراً روش دیگری برای تشخیص جریان هجومی از جریان خطای داخلی توسط برخی از محققین ژاپنی پیشنهاد گردیده است . در این روش که در حال حاضر جنبه آزمایشی دارد ، از تعریف اندوکتانس معکوس (Inverse Inductance) استفاده می شود . اندوکتانس معکوس مطابق رابطه (۱-۱) تعریف می گردد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int V_1 dt \\ \int V_2 dt \\ \int V_3 dt \end{bmatrix} \quad Y_{jk} = Y_{kj} \quad \text{که (۱-۱)}$$



شکل ۱-۲: نمونه رله دیفرانسیل با مانع هارمونیک

سپس با اندازه گیری مقادیر ولتاژ و جریان در ترمینال های ترانسفورماتور از طریق نمونه گیری ، مقدار اندوکتانس های تعریف شده را پیدا نموده ، ثابت می کند که برخی از مقادیر این اندوکتانس ها در دو حالت عبور جریان فالت و جریان هجومی با یکدیگر تفاوت زیادی دارند که از این تفاوت با استفاده از یک الگوریتم مناسب برای تشخیص بین آن دو استفاده می کند .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۲-۲- روش های به دست آوردن مشخصه مغناطیسی فوق اشباع ترانسفورماتور از طریق آزمایش:

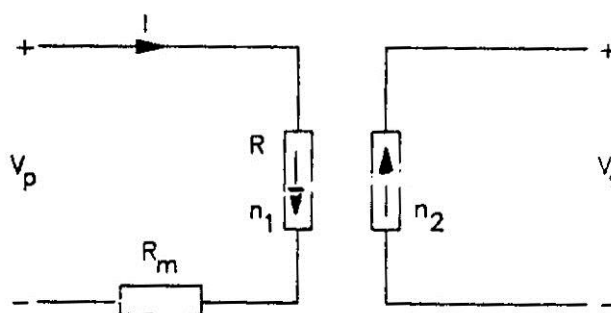
الف - اندازه گیری مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور با استفاده از یک ولتاژ متناوب با فرکانس کم یا ولتاژ DC متغیر:

روش به دست آوردن مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتورها به وسیله اعمال یک ولتاژ با فرکانس کم یا DC متغیر در برخی از منابع تشریح گردیده است در اینجا تئوری مورد استفاده در این روش به طور مختصر ذکر می شود. در مدار ترانسفورماتور شکل ۲-۱ رابطه زیر برقرار است:

$$V_p = R_m I \frac{d\phi}{dt} + R.I \quad (2-1)$$

در این رابطه V_p ولتاژ اعمال شده، I جریان اولیه، R_m مقاومت اضافی، R مقاومت داخلی سیم پیچ و ϕ فوران پیوسته با سیم پیچ اولیه است. از رابطه (۲-۱) می توان فوران را با استفاده از انتگرال گیری ولتاژ در ترمینال اولیه ترانسفورماتور طبق رابطه (۲-۲) به دست آورد.

$$\phi = \int [V_p - (R_m + R)I] dt \quad (2-2)$$

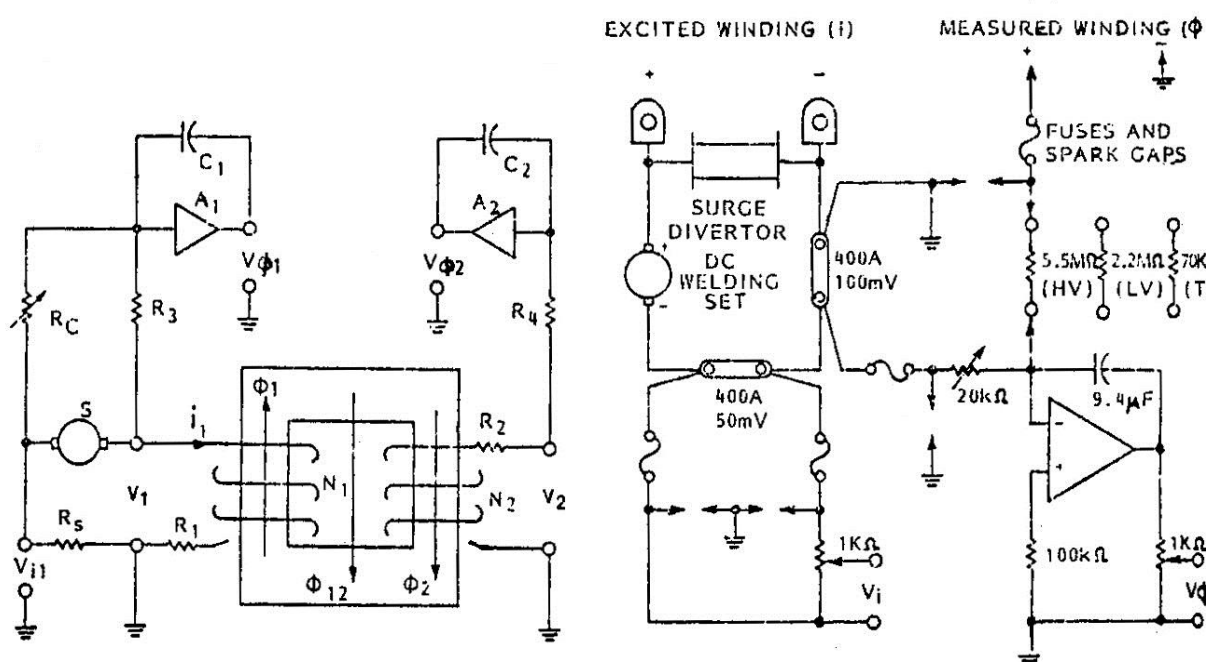


شکل ۲-۱: بدست آوردن مشخصه مغناطیسی توسط اعمال ولتاژ با فرکانس کوچک

به طور خلاصه در این روش با اعمال یک ولتاژ DC متغیر یا ولتاژ با فرکانس کم به ترانسفورماتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

و اندازه گیری و نمونه برداری از جریان و ولتاژ و سپس انتگرال گیری از ولتاژ، مشخصه فوران -جریان ترانسفورماتور که همان منحنی مغناطیسی آن است، به دست می آورند. در مرجع [۱۰] گزارش انجام این روش در بخش تحقیقات نیروگاه (Ontario Hydro) ذکر گردیده است، مدار لازم جهت انتگرال گیری از ولتاژ در شکل ۲-۲ و تجهیزات مورد استفاده در شکل ۲-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۲: تجهیزات مورد استفاده جهت آزمایش بدست آوردن مشخصه مغناطیسی

شکل ۲-۲: مدار انتگرالگیری ولتاژ برای بدست آوردن فوران بر حسب جریان تحریک در این کار تحقیقاتی، از یک ژنراتور DC متغیر جوشکاری ۴۰۰ آمپر از نوع بنزینی برای به اشباع بردن هسته یک ترانسفورماتور ۲۵ مگاوات آمپری ۱۱۰ کیلوولتی استفاده گردیده است. قدرت مصرف شده برابر ۲۳ کیلو وات در ولتاژ ۱۵۰ ولت بوده است. این قدرت که توسط ژنراتور تولید می شود، صرف تامین تلفات اهمی سیم پیچ می گردد. در این مقاله ذکر گردیده که اگر قرار بود با منبع ولتاژ متناوب ۶۰ هرتز، همین میزان از اشباع فراهم شود، نیاز به

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

قدرت ۱۵ مگاوات آمپر در ولتاژی باندازه ۱/۵ برابر ولتاژ نامی ترانسفورماتور می‌بود، که واضح است اعمال چنین ولتاژی به ترانسفورماتور باعث صدمه به آن می‌شود.

در یکی از مراجع دیگر [۱۶] نیز نمونه دیگری ذکر گردیده که در این مورد برای به اشباع بردن هسته یک ترانسفورماتور ۳۸۰ کیلو وات به قدرت ۴۵۰ مگاوات آمپر، به کارگیری یک ژنراتور DC به قدرت ۴۰۰ کیلو وات کافی بوده است. بنابراین مزیت این روش آنست که منبع تغذیه DC مورد نیاز در مقایسه با مشخصات ترانسفورماتور نسبتاً کوچک است، ولی در هر صورت باید بتواند جریان مستقیم قابل توجهی را تامین نماید، باید توجه کرد که این روش آزمایشگاهی است و انجام آن به علت نیاز به تجهیزات خاص مشکل بوده، لذا انجام آن در پست‌ها روی ترانسفورماتورهای در حال کار معمولاً عملی نیست.

ب - بدست آوردن منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور با استفاده از ولتاژ متناوب:

قبل از آنکه ترانسفورماتور به خدمت شبکه درآید، می‌توان در خلال آزمایش بی‌باری، که جزء آزمایش‌هایی است که طبق استاندارد در کارخانه روی ترانسفورماتورها صورت می‌گیرد، منحنی مغناطیسی را تا اندکی بالاتر از فوران نامی به دست آورد. این کار بوسیله اعمال یک ولتاژ کمی بالاتر از ولتاژ نامی به ترانسفورماتور صورت می‌گیرد. اما همانطور که در قسمت (الف) ذکر شد، برای رسیدن به سطوح بالای اشباع هسته، اعمال یک ولتاژ متناوب که تا حد قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از ولتاژ نامی باشد لازم است. انجام چنین آزمایشی در عمل مقدور نیست. زیرا علاوه بر آنکه باعث صدمه به ترانسفورماتور می‌شود، نیاز به یک منبع ولتاژ متغیر با قدرت و ولتاژ زیاد دارد که چنین منبعی چه در آزمایشگاه و چه در پست‌های فشار قوی معمولاً در دسترس نیست [۱۶]. اصولاً شرکت‌های برق نیز اجازه انجام چنین آزمایش‌هایی را روی ترانسفورماتورهای بزرگ به کسی نمی‌دهند.

ج - اندازه‌گیری منحنی مغناطیسی ترانسفورماتور در حین عبور جریان هجومی:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

همانگونه که می‌دانیم در حین برقرار شدن ترانسفورماتور و عبور جریان هجومی، هسته آهنی ممکن است در طی چندین پرپود تا میزان بالایی اشباع شود. این بدان معناست که اگر کسی بتواند کمیات مدار را در این حالت اندازه‌گیری کند، مشخصه مغناطیسی را تا درجه بالایی از اشباع به دست خواهد آورد. چنین آزمایشی در یک آزمایشگاه فشار قوی معمولی قابل انجام نیست، زیرا نیاز به یک منبع تغذیه با امپدانس اتصال کوتاه خیلی پایین دارد. اگر امپدانس منبع تغذیه بالا باشد، در زمان عبور جریان هجومی افت ولتاژ شدیدی در مدار تغذیه پیش می‌آید و ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور در مورد آزمایش دقت خود را از دست می‌دهد و عملاً پاسخ لازم به دست نمی‌دهد. اما انجام این آزمایش در یک پست فشار قوی در صورت مهیا شدن امکانات نمونه‌برداری و اندازه‌گیری، عملی است. زیرا منبع تغذیه با امپدانس کم در دسترس می‌باشد که همان شبکه فشار قوی می‌باشد. البته باید توجه داشت که در تمامی پست‌های فشار قوی چنین شرطی فراهم نیست. برای انجام این آزمایش، لازم است که در طول لحظات عبور جریان هجومی، از جریان و ولتاژ دو سر یکی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور، به طور دقیق نمونه‌برداری شود. سپس با توجه به ولتاژ اندازه‌گیری شده و استفاده از رابطه (۲-۲) فوران ایجاد شده محاسبه می‌شود. برای آن که دقت اندازه‌گیری تا حد ممکن بالا باشد، لازم است از ولتاژ دو سر سیم‌پیچی نمونه‌برداری شود که از لحاظ مکانی به هسته نزدیکتر از سایر سیم‌پیچ‌ها بوده و دارای بالاترین تزویج با فوران موجود در هسته آهنی باشد. با انجام این اندازه‌گیری، هر دو کمیت فوران و جریان و در نتیجه مشخصه مغناطیسی یک ترانسفورماتور، از دید سیم‌پیچ تحت اندازه‌گیری، به دست می‌آید. در مرجع [۱۶] مشخصه مغناطیسی یک ترانسفورماتور به قدرت ۱ مگا ولت آمپر از این روش محاسبه شده است. نمونه‌های دیگر اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از جریان هجومی در مراجع [۴ و ۲] آورده شده است. در مرجع [۲] یک سیستم اندازه‌گیری مشتمل بر یک میکرو کامپیوتر و سایر وسایل لازم،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

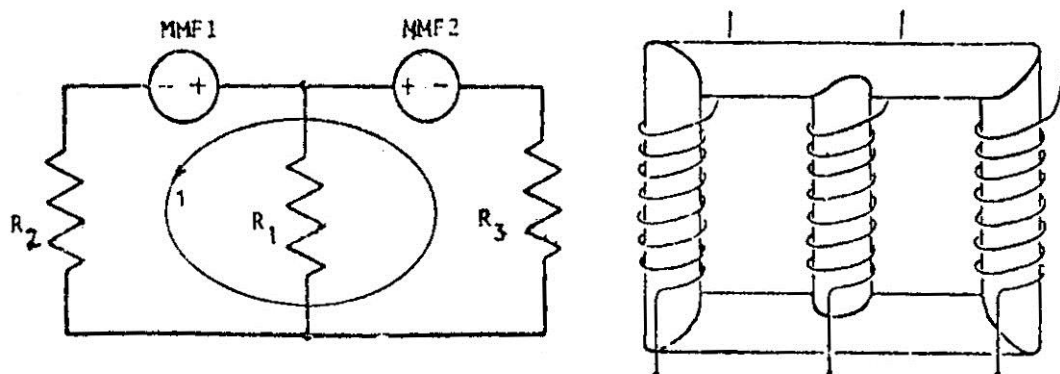
برای نمونه‌گیری از جریان هجومی معرفی شده است. در این سیستم، ترانسفورماتور مورد آزمایش با استفاده از یک کلید الکترونیکی در زاویه مورد نظر موج ولتاژ برقرار می‌شود. در طول ۵۰ سیکل اول جریان هجومی بیست و دو هزار نمونه‌برداری انجام می‌گیرد. به کمک این سیستم، نویسندگان مقاله جریان هجومی را در یک ترانسفورماتور ۲/۵ کیلو ولت آمپر مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مرجع [۴] نیز جریان هجومی یک ترانسفورماتور به قدرت ۶ مگا ولت آمپر مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. روش فوق علاوه بر نیازمند بودن به تجهیزات اضافی، مشکلاتی هم در برخی از حالات دارد. مثلاً در ترانسفورماتورهای سه فاز با اتصال مثلث، که به صورت مجموعه سه ترانسفورماتور تکفاز نیستند، جریان عبوری از داخل سیم‌پیچ‌ها مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست و لذا نمی‌تواند عیناً از این روش استفاده کرد. در مرجع [۱۶] پیشنهادهاتی برای رفع مشکلات این روش ارائه گردیده است که برای تفصیل بیشتر به مرجع مذکور ارجاع داده می‌شود.

۲-۳- اضافه ولتاژهای ناشی از جریان هجومی :

ممکن است به علل ثانوی اضافه ولتاژهایی در حین به وجود آمدن جریان هجومی ایجاد شود. در حالت عادی جریان هجومی به علت دامنه بالا باعث افت ولتاژ شدید در مدار اولیه ترانسفورماتور و نیز به اشباع رفتن هسته می‌شود، و اضافه ولتاژ ایجاد نمی‌گردد. اما در برخی شرایط خاص کلیدزنی از قبیل بسته نشدن همزمان کنتاکت‌های کلید و یا در شرایط تشدید حاصل از هارمونیک‌های جریان هجومی در شبکه متصل به ترانسفورماتور ممکن است اضافه ولتاژهایی در شبکه ایجاد گردد.

یک نوع از این اضافه ولتاژها در اثر وضعیت خاص ساختمانی ترانسفورماتور ایجاد می‌شود. توضیح آنکه در ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً دو سر سیم‌پیچ در یک طرف هسته قرار داده می‌شود. ولی در برخی موارد آنها را در طرف هسته قرار می‌دهند. (شکل ۱-۳)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱-۳: سیم پیچهای سه فاز با قرار گرفتن سرها در دو طرف و mmf اضافی حاصله

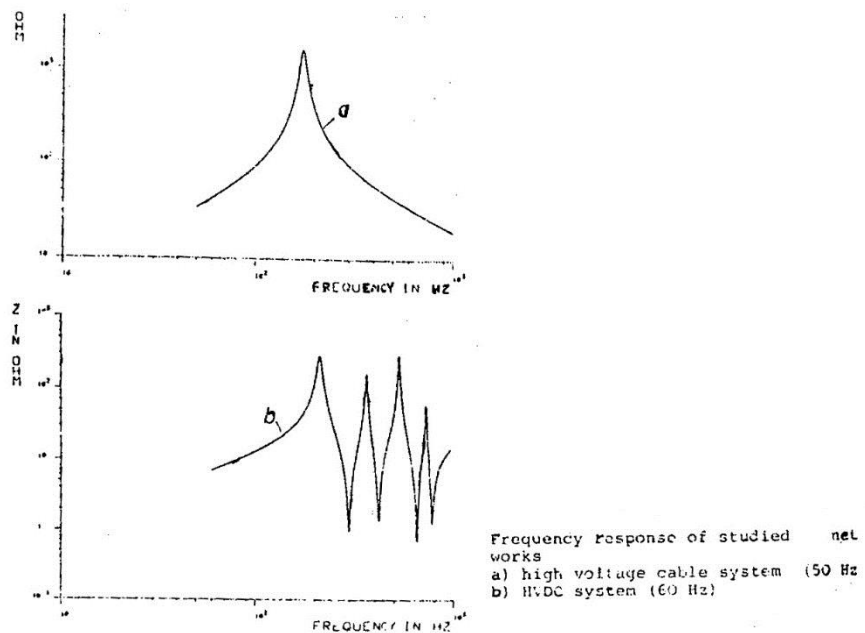
در این صورت تعداد دورهایی از سیم پیچ که از پنجره های مجاور ستون مربوط به آن سیم پیچ عبور می کنند ، برابر نبوده در یک پنجره تعداد دور سیم پیچ باندازه یک دور با پنجره مجاور متفاوت است . این اختلاف باعث می شود ، که یک فوران مغناطیسی از مسیر ستون های کناری و یوغ های بالا و پایین بگذرد حال در چنین ترانسفورماتوری اگر جریان هجومی شدید از فاز وسط عبور کند ، فوران حاصله زیاد بوده در نتیجه عبور آن از ستون های کناری ولتاژ شدیدی در سیم پیچ های دو طرف القاء می شود . البته این اضافه ولتاژ در صورتی در سیم پیچ های طرفین ایجاد می گردد که سرهای آنها باز یا متصل به یک امپدانس بزرگ باشند ، وگرنه اضافه ولتاژ ایجاد نخواهد گردید . لذا خطر موقعی وجود دارد که کنتاکت کلید فاز وسط در طرف ستاره بسته شود و کنتاکت های مربوط به دو فاز دیگر هنوز باشند ، ولتاژ القائی حاصله می توند به چند برابر ولتاژ نامی برسد و به علت وجود اثر خازنی در سیم پیچ نوسان نموده باز هم افزایش یابد . جهت توضیح بیشتر در مورد این نوع اضافه ولتاژ ، می توان به مرجع [۱۳] مراجعه کرد .

نوع دیگر اضافه ولتاژ ممکن است در اثر رزونانس موازی در شبکه به علت وجود هارمونیک های جریان هجومی ایجاد شود . این نوع اضافه ولتاژ در برخی از نشریات خارجی گزارش شده است . [۹] اضافه ولتاژهای ناشی از هارمونیک های جریان هجومی در شبکه های

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

قدرت دارای اتصال ولتاژ مستقیم dc (HVDC Link) ، خازنهای تصحیح ضریب قدرت ، فیلترها ، خطوط خازنی و شبکه‌های کابلی طولانی می‌تواند ایجاد شود . اینگونه شبکه‌ها ، دارای نقاط تشدید موازی (Parallel resonance) هستند . مثلاً در پست‌های HVDC مدار فیلترهای AC مورد استفاده تولید نقاط تشدید موازی متعددی در مشخصه امپدانس - فرکانس سیستم می‌نماید در چنین شبکه‌ای می‌توان انتظار اضافه ولتاژهایی با میزان اشباع بالا را داشت . این امر به خصوص در صورتی محتمل است که سیستم دارای درجه پایینی از میرا شوندگی باشد ، نمونه آن شبکه‌هایی هستند که در آن ژنراتورهای نیروگاه مستقیماً پست HVDC بدون آنکه بارهای AC محلی وجود داشته باشند ، تغذیه می‌کنند . نمونه این اضافه ولتاژها در اندازه‌گیری‌هایی که در یک پست HVDC به نام Radison متعلق به کمپانی Manitoba Hydro به عمل آمده مشاهده گردیده است [۹] . در سیستم‌های کابلی نیز ممکن است چنین مسئله‌ای پیش بیاید . شبکه‌های کابلی بر خلاف شبکه‌های هوایی ، عموماً یک نقطه تشدید معین دارند که در فرکانس نسبتاً پایین رخ می‌دهد ، زیرا شبکه‌های کابلی دارای ظرفیت خازنی بالایی هستند . اگر نقاط تشدید شبکه اتفاقاً با یکی از هارمونیک‌های تولید شده در اثر اشباع ترانسفورماتور تلاقی کند ، اضافه ولتاژ ایجاد می‌شود . زیرا ولتاژهای هارمونیکی با دامنه بالا ساخته می‌شود و این ولتاژها با سوار شدن بر روی ولتاژ شبکه اضافه ولتاژهای بالایی را به وجود می‌آورند . ممکن است ماکزیمم اضافه ولتاژ ایجاد شده بلافاصله پس از کلیدزنی رخ ندهد ، بلکه پس از گذشتن چند سیکل ، با ماکزیمم شدن هارمونیک مربوطه در جریان هجومی ایجاد گردد . در شکل ۲-۳ پاسخ فرکانسی یک شبکه کابلی فشارقوی و یک شبکه HVDC که در مرجع [۹] مورد مطالعه قرار گرفته به عنوان نمونه آورده شده است .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر سایت و به همراه فونت های لازم



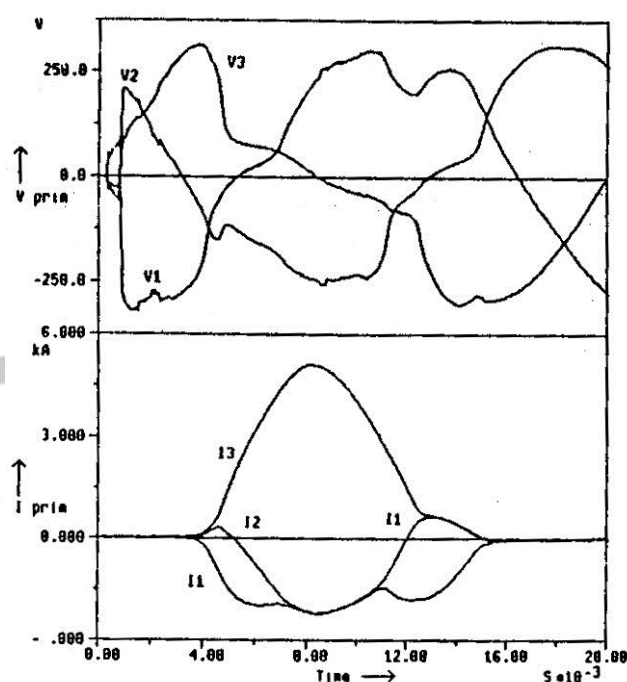
شکل ۲-۳: پاسخ فرکانسی نمونه شبکه های کابلی و HVDC

در شرایط تشدید، دامنه، اضافه ولتاژ و زمان میرایی آن، تابع میزان میرایی سیستم است. تلفات ترانسفورماتورها، ژنراتورها، مدارهای فیلتر و سایر اجزاء سیستم میزان میرایی شبکه را تعیین می کنند.

در طی سال های اخیر در شبکه های بزرگ الکتریکی مثل شبکه کانادا اضافه ولتاژهای موقت اهمیت بیشتری پیدا کرده اند. مهمترین مشخصه این اضافه ولتاژها آنست که به علت میرایی اندکی که در شبکه وجود دارد، به مدت ۱۰۰ سیکل یا بیشتر ادامه پیدا می کنند. اگر دامنه این اضافه ولتاژها به مقادیر بالا برسد، محتمل است که بر برقگیرها اثر بگذارند، زیرا دارای انرژی بالایی هستند. بنابراین در برخی حالات می توان عامل تعیین کننده ای در هماهنگی عایق های تجهیزات باشند اینگونه اضافه ولتاژها به نام شبه ماندگار (Quasi Steady State) شناخته می شوند. اندازه گیری های اندکی تا کنون در مورد اضافه ولتاژهای ناشی از اشباع ترانسفورماتور در شبکه های قدرت به عمل آمده و بیشتر طراحی ها و برنامه ریزی ها بر مبنای اندازه گیری های انجام شده روی TNA (Transient Network Analyze) یا بر اساس

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

محاسبات انجام شده توسط کامپیوترهای دیجیتال صورت می گیرد [۹]. نهایتاً این نکته یادآوری می شود که بروز اضافه ولتاژ در اثر جریان هجومی حتمی و همیشگی نیست و بستگی به وجود شرایط لازم دارد. به عنوان مثال در شکل ۲-۳ نتیجه اندازه گیری جریان هجومی و ولتاژ در حین برقرار شدن یک ترانسفورماتور به قدرت یک مگا ولت آمپر دیده می شود. همانگونه که مشاهده می گردد با وجود جاری شدن جریان هجومی اضافه ولتاژ ایجاد نشده است [۱۶]. نمونه دیگر این امر را نیز می توان در مرجع [۹] مشاهده کرد.



Measured voltages and currents while energizing a 1 MVA transformer.

شکل ۲-۳: ولتاژ اندازه گیری شده یک ترانسفورماتور ۱ مگا ولت آمپری 10KV/380KV

در حین عبور جریان هجومی

۲-۴- محاسبه اندوکتانس کلی ترانسفورماتور در حالت های خطی و اشباع:

الف - در حالت خطی:

همانگونه که از تئوری ترانسفورماتور می دانیم، اندوکتانس ترانسفورماتور در حالت خطی

تنها بستگی به خصوصیات هسته آهنی دارد و می توان آنرا با رابطه زیر نشان داد:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

$$L_m = \frac{N^2}{R_m} \quad \text{و} \quad R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S_{Fe}}$$

در این روابط ، N تعداد دور سیم پیچ و R_m رلوکتانس مغناطیسی هسته آهنی است . L طول مسیر آهنی ، μ_0 ضریب نفوذ مغناطیسی هوا ، μ_r ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهن و S_{Fe} سطح مقطع هسته آهنی می باشد ، با استفاده از روابطی مشابه روابط مربوط به سری و موازی کردن مقاومت ها ، می توان رلوکتانس معادل هسته را از دید سیم پیچ مورد نظر به دست آورد ، که با توجه به سادگی روش محاسبه از نوشته روابط مربوط به رلوکتانس هسته های مختلف به طور جداگانه خودداری می شود .

در ترانسفورماتورهای سه فاز ، در حالت کار خطی و عدم اشباع ، فازها با یکدیگر علاوه بر ارتباط الکتریکی ، پیوستگی مغناطیسی نیز دارند و رلوکتانس هسته مربوط به هر فاز با در نظر گرفتن رلوکتانس ستون های دیگر محاسبه می شود .

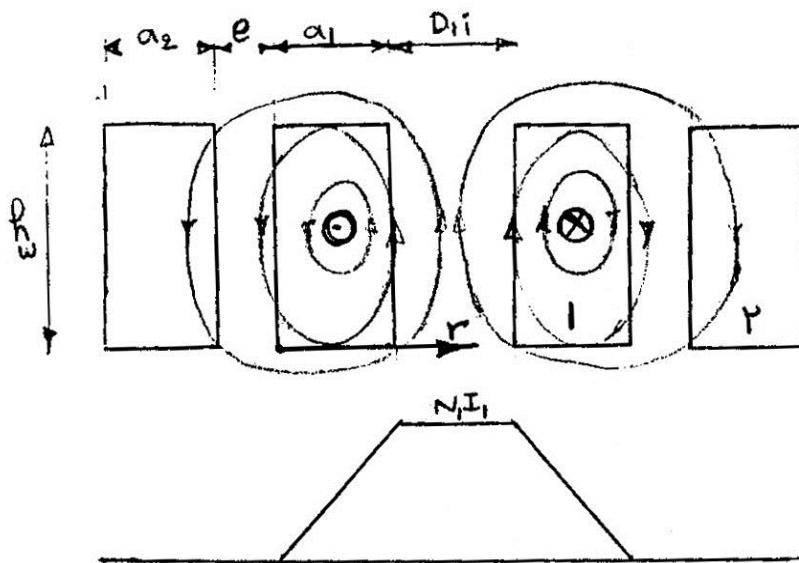
ب - در حالت اشباع :

همانطور که در بخش های ۹ و ۱۳ فصل دوم ذکر شد ، در حالت اشباع شدید ناشی از اضافه فوران حاصل از جریان هجومی پراکندگی که تمامی حجم سیم پیچ ها را پر کرده است ، خطوط خود را در کوتاهترین مسیرها می بندد . اندوکتانس دیده شده از ترمینال های سیم پیچ ترانسفورماتور در این حالت را می توان به تقریب با در دست داشتن اطلاعات مربوط به سیم پیچ ها محاسبه نمود . این کار با انتگرال گیری انرژی ذخیره شده در میدان پراکندگی انجام می شود . محاسبه برای دو حالت صورت می گیرد . اول برقرار شدن ترانسفورماتور از طریق سیم پیچ داخلی و دوم برقرار شدن آن از طریق سیم پیچ خارجی . در هر دو حالت ، ابتدا مسیر تقریبی خطوط فوران مغناطیسی را مشخص نموده . قانون آمپر را در آن مسیر می نویسم سپس شدت میدان مغناطیسی H را در نقاط مختلف میدان به دست آورده ، انرژی ذخیره شده را در واحد حجم میدان پیدا می کنیم ، آنگاه یک المان حجمی استوانه ای توخالی اختیار کرده ،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با انتگرال گیری روی مکان ، انرژی ذخیره شده در کل میدان پراکندگی را بدست می آوریم و نهایتاً با توجه به خطی فرض کردن رابطه فوران و جریان در حالت اشباع، مقدار اندوکتانس پراکندگی L_{sat} را پیدا می کنیم .

۱-ب- محاسبه راکتانس پراکندگی در حالت برقدار شدن از طریق سیم پیچ داخلی :



شکل ۴-۱: فوران پراکندگی در برقدار شدن از طریق سیم پیچ داخلی

محاسبه انرژی موجود در فضای داخل سیم پیچ ۱ :

مسیر یکی از خطوط فوران را که متوسط خطوط است در نظر می گیریم .

$$HL = N_1 I_1 \Rightarrow H_r (2h_w + 2r) = (NI)_r$$

با توجه به منحنی آمپر در دو شکل بالا :

$$(NI)_r = \frac{r(N_1 I_1)}{a_1}$$

$$\Rightarrow \frac{r N_1 I_1}{a_1} = 2(h_w + r) H_r \Rightarrow H_r = \frac{r N_1 I_1}{2 a_1 (h_w + r)}$$

انرژی موجود در واحد حجم میدان عبارت است از :

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$W_r = \frac{1}{2} \mu_0 H_r^2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r^2 (N_1 I_1)^2}{4a_1^2 (h_w + r)^2}$$

یک المان حجمی به شکل استوانه توخالی در داخل فضای مس سیم پیچ در نظر می گیریم

$$\text{حجم المان استوانه‌ای} = \pi[2(a_1 - r) + D_{li}]h_w dr$$

بنابراین انرژی موجود در فضای سیم پیچ داخلی عبارت است از :

$$W_{cu1} = \int_0^{a_1} \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r^2 (N_1 I_1)^2}{4a_1^2 (h_w + r)^2} \cdot \pi[2(a_1 - r) + D_{li}]h_w dr$$

با تعریف ضرایب K_1, K_2, K_3 به شکل زیر رابطه را ساده می کنیم :

$$k_1 = \frac{\pi \mu_0 (N_1 I_1)^2}{8a_1^2} h_w \quad \text{و} \quad k_2 = h_w \quad \text{و} \quad k_3 = a_1 + \frac{D_{li}}{2}$$

لذا انتگرال به صورت مقابل در می آید :

$$W_{cu1} = k_1 \int_0^{a_1} \frac{r^2 (k_3 - r)}{(k_2 + r)^2} dr$$

این انتگرال از روش تبدیل به کثیرالجمله محاسبه می شود .

$$\begin{aligned} W_{cu1} &= k_1 \int_0^{a_1} \left(\frac{k_3 r^2}{r^2 + k_2^2 + 2k_2 r} - \frac{r^3}{r^2 + k_2^2 + 2k_2 r} \right) dr \\ &= k_1 \int_0^{a_1} \left[-k_3 - k_3 k_2 \frac{2r + 2k_2}{r^2 + 2k_2 r + k_2^2} + k_3 k_2^2 \frac{1}{(r + k_2)^2} \right. \\ &\quad \left. - r + 2k_2 - 3k_2^2 \frac{r + k_2}{r^2 + 2k_2 r + k_2^2} + \frac{k_2^3}{r^2 + 2k_2 r + k_2^2} \right] dr \\ W_{cu1} &= k_1 \left[\frac{-1}{2} r^2 + (2k_2 - k_3)r - k_2(2k_3 + 3k_2) \ln(r + k_2) - \frac{k_2^2 (k_3 + k_2)}{r + k_2} \right] \\ W_{cu1} &= k_1 \left[-0.5 + a_1^2 + a_1(2k_2 - k_3) - k_2(2k_3 + 3k_2) \ln(a_1 + k_2) \right. \\ &\quad \left. - k_2^2 \frac{(k_3 + k_2)}{a_1 + k_2} + (2k_3 + 3k_2) \ln k_2 + k_2(k_3 + k_2) \right] \end{aligned}$$

که در این روابط ضرایب K_1, K_2, K_3 قبلاً مشخص شده اند .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

انرژی موجود در کل فضای اشغال شده توسط این خطوط عبارت است از:

$$W_{cu} = \frac{W_{cu1}}{h_w} (2h_w + 2a_1)$$

محاسبه انرژی موجود در فضای آهن اشباع شده :

$$HL = NI \Rightarrow H[2h_w + D_{1i} + 2(a_1 + e + a_2)] = NI$$

در فضای وسط سیم پیچ آمپر دور نسبت به مکان ثابت است .

انرژی موجود در واحد حجم وسط سیم پیچ عبارتست از :

$$W_{Fei} = \frac{1}{2} \mu_0 H^2$$

$$W_{Fei} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(NI)^2}{(2h_w + D_{1i} + 2(a_1 + e + a_2))^2}$$

حجم وسط سیم پیچ ۱ عبارت است از :

بنابراین کل انرژی در فضای وسط سیم پیچ عبارت است از :

$$W_{Fei} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(NI)^2}{(2h_w + D_{1i} + 2(a_1 + e + a_2))^2} \pi \left(\frac{D_{1i}}{2}\right)^2 h_w$$

انرژی موجود در کل فضای مربوط به خطوط فوران عبوری از فضای وسط سیم پیچ عبارت

است از :

$$W_{Fe} = W_{Fei} \frac{(2h_w + D_{1i} + 2(a_1 + e + a_2))}{h_w}$$

لذا انرژی موجود در کل میدان پراکندگی عبارت است از :

$$W = W_{Cu} + W_{Fe}$$

با توجه به فرض خطی بودن و منحنی فوران - جریان در میدان پراکندگی داریم :

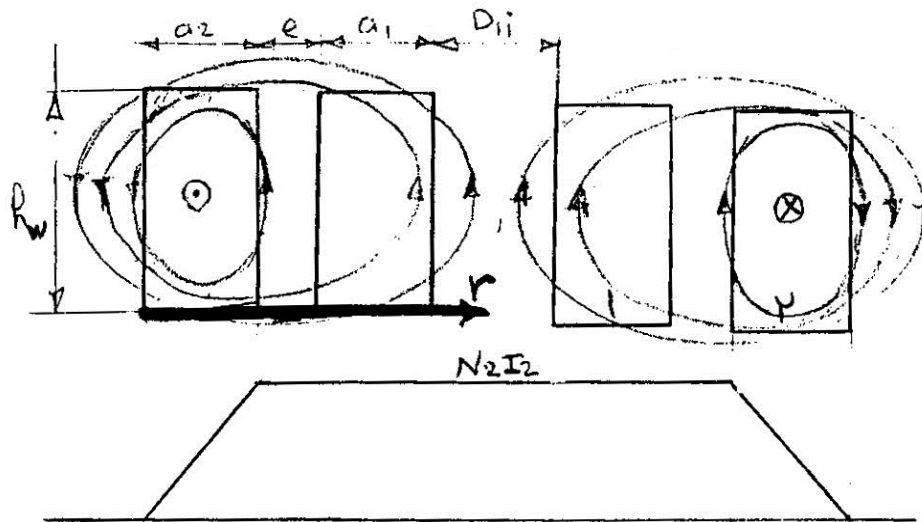
$$W = \frac{1}{2} L_{sat} I^2 \Rightarrow L_{sat} = \frac{2W}{I^2}$$

که با توجه به معلوم بودن مقدار W ، اندازه L_{sat} محاسبه می شود .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۲-ب- محاسبه را کتانس پراکندگی در حالت برقدار شدن ترانسفورماتور از طریق سیم پیچ

خارجی :



شکل ۲-۴: فوران پراکندگی در برقدار شدن از طریق سیم پیچ خارجی

در این حالت نیز مشابه حالت اول عمل می شود. ابتدا انرژی موجود در میدان پراکندگی فضای

مس سیم پیچ را محاسبه می کنیم .

$$HL = NI \Rightarrow H_r(2h_w + 2r) = (NI)_r$$

$$(NI)_r = \frac{N_2 I_2 r}{a_2} \Rightarrow 2H_r(h_w + r) = \frac{N_2 I_2 r}{a_2}$$

$$\Rightarrow H_r = \frac{N_2 I_2 r}{2a_2(h_w + r)}$$

بنابراین انرژی ذخیره شده در واحد حجم مس سیم پیچ عبارت است از :

$$W_r = \frac{1}{2} \mu_0 H_r^2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{(N_2 I_2)^2 r^2}{4a_2^2 (h_w + r)^2}$$

به همان صورت قبلی یک المان حجمی به شکل استوانه تو خالی در نظر می گیریم :

$$dv = \pi(2(a_2 - r + e + a_1) + D_{ii})h_w dr$$

در نتیجه انرژی موجود در المان حجمی ذکر شده عبارت است از :

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$dW_r = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{(N_2 I_2)^2 r^2}{4a_2^2 (h_w + r)^2} [\pi(2(a_2 - r + e + a_1) + D_{li})h_w] dr$$

و انرژی موجود در فضای مس سیم پیچی ۲ :

$$W_{Cu_2} = \int_0^{a_1} dW_r = \frac{\pi \mu_0 (N_2 I_2)^2 h_w}{8a_2^2} \int_0^{a_1} \frac{r^2 [2(a_2 - r + e + a_1) + D_{li}]}{(h_w + r)^2} dr$$

با تعریف ضرایب K_3, K_2, K_1 ، انتگرال فوق را به شکلی ساده تر نوشته ، جواب آن را به دست می آوریم .

$$k_1 = \frac{\pi \mu_0 (N_2 I_2)^2 h_w}{8a_2^2} \quad \text{و} \quad k_2 = h_w \quad \text{و} \quad k_3 = a_2 + e + a_1 + \frac{D_{li}}{2}$$

در نتیجه انتگرال به شکل زیر در می آید :

$$W_{Cu_2} = k_1 \int_0^{a_2} \frac{r^2 (k_3 - r)}{(k_2 + r)^2} dr$$

$$W_{Cu_2} = k_1 \left[-\frac{1}{2} r^2 + (2k_2 - k_3)r - k_2(2k_3 + 3k_2) \ln(r + k_2) - \frac{k_2^2 (k_3 + k_2)}{r + k_2} \right]$$

$$W_{Cu_2} = k_1 \left(-0.5a_2^2 + (2k_2 - k_3)a_2 - k_2(2k_3 + 3k_2) \ln(a_2 + k_2) - k_2^2 \frac{(k_3 + k_2)}{a_2 + k_2} + k_2(2k_3 + 3k_2) \ln k_2 + k_2(k_3 + k_2) \right)$$

محاسبه انرژی موجود در فضای آهن و فضای مس سیم پیچ داخلی و فواصل بین آنها :

در این قسمت آمپر دور ثابت و مساوی N_2, I_2 است .

$$HL = N_2 I_2 \Rightarrow H[2h_w + D_{li} + 2(a_1 + e + a_2)] = N_2 I_2 \Rightarrow H = \frac{N_2 I_2}{2h_w + D_{li} + 2(a_1 + e + a_2)}$$

لذا انرژی موجود در واحد حجم فضای وسط سیم پیچ بیرونی عبارت است از :

$$W_{CuFe} = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(N_2 I_2)^2}{(2h_w + D_{li} + 2(a_1 + e + a_2))^2}$$

در نتیجه انرژی موجود در کل مسیر خطوط فوران پراکندگی عبارت است از :

$$W = W_{Cu_2} \frac{2h_w + 2a_2}{h_w} + W_{CuFe} \frac{2h_w + D_{li} + 2(a_1 + e + a_2)}{h_w}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

با معلوم بودن کلیه مقادیر ، W بدست می آید . با فرض خطی بودن منحنی فوران جریان در زمان اشباع کامل ترانسفورماتور اندوکتانس پراکندگی کل ترانسفورماتور در این حالت از رابطه زیر به دست می آید .

$$W = \frac{1}{2} L_{sat} I^2 \Rightarrow L_{st} = \frac{2W}{I^2}$$

لازم به ذکر است که در حالت اشباع کامل هسته ، مقدار اندوکتانسی که در دو سر سیم پیچ دیده می شود ، مساوی مقدار محاسبه شده در بالاست . این امر هم در ترانسفورماتورهای تکفاز و هم در سه فاز صحیح است . زیرا پس از اشباع کامل هسته ، فوران پراکندگی هر فاز خطوط خود را در نزدیک ترین مسیر می بندند و مسیرهای آهنی هسته را طی نمی کند و فازها ارتباط مغناطیسی خود را با یکدیگر تقریباً از دست می دهند . لذا می توان پس از رسیدن به اشباع کامل ، فازها را از لحاظ مغناطیسی جدا فرض کرد و مقدار اندوکتانسی که در این حالت در دو سر سیم پیچ فاز مربوط دیده می شود برابر با L_{sat} فوق الذکر است . این فرض عموماً در مراجع و مقالات ، مثل [۵] ، نیز در نظر گرفته شده است .

۲-۵- نحوه محاسبه هارمونیک های جریان هجومی :

جهت محاسبه دامنه هارمونیک های جریان هجومی ، می توان از روش سری فوریه استفاده کرد . می دانیم که ضرایب هارمونیک های تابع پریودیک $f(t)$ از این فرمول ها به دست می آیند .

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin(nwt) dt$$

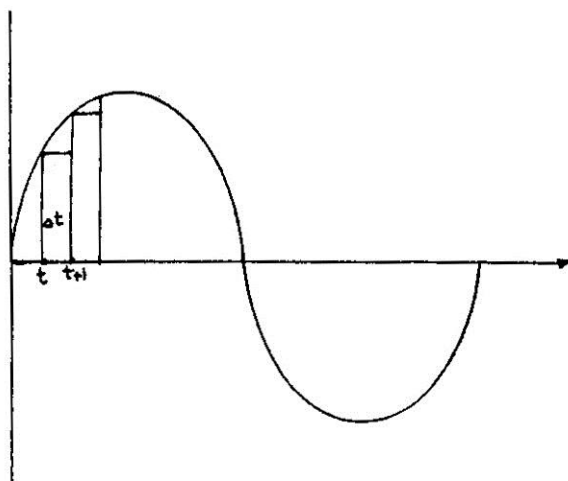
$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos(nwt) dt$$

طول هر پریود را می توان به ۸۰ تا ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم کرد . اگر برای نمونه طول

هر پریود را به ۸۰ قسمت تقسیم کنیم و با محاسبه سطح زیر منحنی مقادیر ضرایب a_n, b_n

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

را برای هارمونیک‌های اول تا هفتم، به دست می‌آوریم.



$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{1}{T} \sum_{t=t_1}^{t_1+80\Delta t} I(t) \sin(n\omega t) \Delta t$$

جریان را تقریباً ثابت فرض می‌کنیم و با انتگرال‌گیری مقدار a_n را به دست می‌آوریم. مقدار Δt ، مقدار t_1 در نقطه شروع سیکل مورد نظر است. در هر قسمت کوچک از زمان Δt ، مقدار

$$a_n = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\Delta t} I(0) \sin(n\omega t) dt + \int_{\Delta t}^{2\Delta t} I(\Delta t) \sin(n\omega t) dt + \int_{2\Delta t}^{3\Delta t} I(2\Delta t) \sin(n\omega t) dt \right. \\ \left. + \dots + \int_{(79)\Delta t}^{80\Delta t} I(79\Delta t) \sin(n\omega t) dt \right]$$

t_1 چون $I(t)$ در طول هر پریود Δt ثابت فرض می‌شود، داریم:

$$\int_{t_1}^{t_2} I(t) \sin(n\omega t) dt = I(t) \left[\frac{-1}{n\omega} \cos(n\omega t) \right] \\ a_n = \frac{1}{T} \sum_{n_0=1}^{80} \frac{1}{2} \frac{(I(n_0\Delta t) + I(n_0+1)\Delta t)}{n\omega} (-\cos(n\omega(n_0+1)\Delta t) + \cos(n\omega n_0\Delta t))$$

در این رابطه n شماره هارمونیک مربوطه و T پریود جریان هجومی و n_0 شماره پریود

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مورد محاسبه است. به همین ترتیب اگر ضریب b_n را محاسبه کنیم، نتیجه به شکل زیر خواهد بود.

$$b_n = \frac{1}{T} \sum_{n_0=1}^{80} \frac{1}{2} \frac{(I(n_0 t) + I(n_0 + 1))}{nw} (\sin(nw(n_0 + 1)t) - \sin(nwn_0 t))$$

دامنه‌ی هارمونیک ام عبارتست از:

$$H_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

می‌توان با استفاده از فرمول‌های فوق برنامه کامپیوتری نوشت و دامنه هارمونیک‌های اول تا هفتم را در هر پریود محاسبه کرد.

۲-۶- روش برازش منحنی به منظور پیدا کردن فرمول مناسب برای منحنی مغناطیسی:

روش منحنی‌یابی یا برازش خم در آنالیز عددی مورد بحث قرار گرفته است. می‌توان از روش کمترین میانگین مربعات (Least Square) برای این منظور استفاده کرد. فرض کنیم فرمول منحنی مورد نظر برای گذراندن از نقاط موجود مشخصه مغناطیسی به شکل $I = a\phi + b\phi^3 + c\phi^5 + d\phi^7$ باشد. می‌خواهیم ضرایب a, b, c, d را بنحوی پیدا کنیم که دارای بهترین برازش (best fit) باشد. تابع J را مطابق رابطه زیر اختیار می‌کنیم.

$$J = \sum_{i=1}^n (I_i - I)^2$$

نقاط I_i عبارت از نقاط موجود منحنی مغناطیسی هستند. اگر تابع را تا حداقل (minimize) کنیم، بهترین برازش به دست خواهد آمد.

$$\min J = \min \sum_{i=1}^n [I_i - (a\phi_i + b\phi_i^3 + c\phi_i^5 + d\phi_i^7)]^2$$

برای مینیمم شدن J باید داشته باشیم:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \frac{\partial I}{\partial b} = \frac{\partial J}{\partial c} = \frac{\partial J}{\partial d} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2\phi_i [I_i - (a\phi_i + b\phi_i^3 + c\phi_i^5 + d\phi_i^7)] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2\phi_i^3 [I_i - (a\phi_i + b\phi_i^3 + c\phi_i^5 + d\phi_i^7)] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial c} = \sum_{i=1}^n 2\phi_i^5 [I_i - (a\phi_i + b\phi_i^3 + c\phi_i^5 + d\phi_i^7)] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial d} = \sum_{i=1}^n 2\phi_i^7 [I_i - (a\phi_i + b\phi_i^3 + c\phi_i^5 + d\phi_i^7)] = 0$$

پس از ساده و مرتب کردن رابطه‌ها خواهیم داشت :

$$\begin{aligned} \sum \phi_i I_i &= a \sum \phi_i^2 + b \sum \phi_i^4 + c \sum \phi_i^6 + d \sum \phi_i^8 \\ \sum \phi_i^3 I_i &= a \sum \phi_i^4 + b \sum \phi_i^6 + c \sum \phi_i^8 + d \sum \phi_i^{10} \\ \sum \phi_i^5 I_i &= a \sum \phi_i^6 + b \sum \phi_i^8 + c \sum \phi_i^{10} + d \sum \phi_i^{12} \\ \sum \phi_i^7 I_i &= a \sum \phi_i^8 + b \sum \phi_i^{10} + c \sum \phi_i^{12} + d \sum \phi_i^{14} \end{aligned}$$

اگر دستگاه معادلات فوق حل شود ، مقادیر برای بهترین برازش به دست خواهد آمد .

$$\begin{bmatrix} \sum \phi_i^2 & \sum \phi_i^4 & \sum \phi_i^6 & \sum \phi_i^8 \\ \sum \phi_i^4 & \sum \phi_i^6 & \sum \phi_i^8 & \sum \phi_i^{10} \\ \sum \phi_i^6 & \sum \phi_i^8 & \sum \phi_i^{10} & \sum \phi_i^{12} \\ \sum \phi_i^8 & \sum \phi_i^{10} & \sum \phi_i^{12} & \sum \phi_i^{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \phi_i I_i \\ \sum \phi_i^3 I_i \\ \sum \phi_i^5 I_i \\ \sum \phi_i^7 I_i \end{bmatrix}$$

مقادیر ϕ_i, I_i عبارتند از مختصات n نقطه از مشخصه مغناطیسی که معلوم هستند .

بنابراین با عکس کردن ماتریس ضرایب دستگاه معادلات فوق ، مقادیر مجهول a, b, c, d

به دست می‌آید و منحنی $i = a\phi + b\phi^3 + c\phi^5 + d\phi^7$ با بهترین برازش مشخص می‌گردد .

از این روش می‌توان در مورد فرمول‌های دیگری غیر از فرمول اختیار شده فوق نیز استفاده

کرد . لازم به ذکر است که رابطه کثیرالجزمله فوق‌الذکر ، در صورتیکه نقاط کافی از مشخصه

مغناطیسی در دسترس باشد ، آن را می‌توان با دقت کافی نشان داد. ضمناً علت در نظر نگرفتن

توان‌های زوج آنست که مشخصه مغناطیسی یک منحنی فرد می‌باشد و نسبت به مبدا مختصات

قرینه است .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

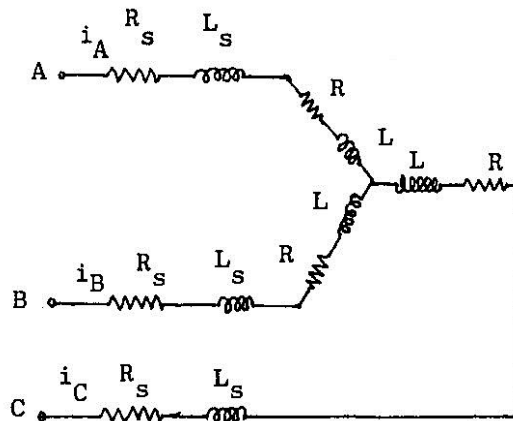
۷-۲- بررسی جریان هجومی در ترانسفورماتورهای سه فاز تغذیه شده به وسیله منبع با

امپدانس زیاد :

اگر اتصال ترانسفورماتور سه فاز در طرف برقدار شونده به صورت مثلث یا ستاره زمین شده باشد ، جریان هجومی را می توان عیناً به صورتی مشابه تکفاز ، برای سه فاز محاسبه کرد . البته فرض بر آن است که منبع تغذیه سه فاز متعادل است. اما اگر امپدانس خط آنقدر بزرگ باشد که یک افت ولتاژ قابل ملاحظه در هنگام جاری شدن جریان هجومی در خط ایجاد کند ، مسئله پیچیده می شود . وقتی از یک فاز جریان هجومی ماکزیمم کشیده شود ، از دو فاز دیگر که با آن ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند ، جریان خیلی کمتری عبور خواهد کرد . بنابراین افت ولتاژ در سه خط کاملاً متفاوت می شود . حل دقیق مسئله بسیار مشکل است زیرا باید از یک روش گام به گام سعی و خطا استفاده کرد . علاوه بر این یک عامل دیگر وجود دارد که باعث عدم قطعیت کامل حل مسئله می شود و آن این است که بسته شدن اتصالات کلید سه فاز هرگز دقیقاً به طور همزمان صورت نمی گیرد . اختلاف زاویه ۱۰ درجه در بسته شدن اتصالات فازها می تواند یک اختلاف قابل ملاحظه در جریان هجومی به وجود آورد . لذا در این حالت مشخص کردن دقیق جریان هجومی سه فاز عملی نیست و در واقع همه آنچه که می توان گفت آن است که جریان هجومی از مقدار معینی می تواند تجاوز کند .

با این وجود برای داشتن دقت بیشتر می تواند معادلات دیفرانسیل مدار را به صورت سه فاز حل کرد ، که یک نمونه از آن را به عنوان مثال به دست می آوریم . اگر اتصال سیم پیچ های ترانسفورماتور در طرف برقدار شونده به صورت ستاره زمین نشده باشد ، ولتاژ منبع سه فاز و معادلات KVL مدار مطابق زیر خواهد بود .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



$$V_{AB} = V_{LL\max} \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$V_{BC} = V_{LL\max} \sin(\omega t + \theta_0 - 120^\circ)$$

$$V_{CA} = V_{LL\max} \sin(\omega t + \theta_0 - 240^\circ)$$

$$V_{AB} = R_S L_A + L_S \frac{di_A}{dt} - R i_A + L \frac{di_A}{dt} - R i_B - L \frac{di_B}{dt} - R_S i_B - L_S \frac{di_B}{dt}$$

$$= (R_S + R)(i_A - i_B) + (L_S + L)\left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_B}{dt}\right)$$

$$V_{BC} = (R_S + R)(i_B - i_C) + (L_S + L)\left(\frac{di_B}{dt} - \frac{di_C}{dt}\right)$$

در این نوع اتصال، معادله KVL سوم وابسته است و نمی توان از آن استفاده کرد، لذا باید

به جای آن از رابطه $i_A + i_B + i_C = 0$ استفاده نمود.

بنا به تعریف اندوکتانس داریم:

$$\frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} = 0$$

در نتیجه پس از جای گذاری مقادیر جریان و مرتب کردن معادلات، نهایتاً سه معادله

دیفرانسیل مدار به شکل زیر درآورده می شود:

$$L = \frac{Nd\phi}{di} \Rightarrow di_A = \frac{Nd\phi_A}{L}, di_B = \frac{Nd\phi_B}{L}$$

$$i_A = \frac{N}{L} \phi_A + \phi_{remA}, i_B = \frac{N}{L} \phi_B + \phi_{remB}$$

$$\Rightarrow \frac{d\phi_A}{dt} + \frac{d\phi_B}{dt} + \frac{d\phi_C}{dt} = 0$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

از حل دستگاه معادلات دیفرانسیل فوق مقادیر ϕ_C, ϕ_B, ϕ_A به دست آمده و در هر مرحله از تکرار مقدار L مرحله بعد با توجه به مقدار ϕ از روی مشخصه مغناطیسی تعیین می‌شود و مقدار جریان مربوط به آن گام مشخص می‌شود.

$$\frac{d\phi_A}{dt} = \frac{(2V_{AB} + V_{BC})}{3N} \cdot \frac{L}{L_S + L} - \frac{R_S + R}{L_S + L} (\phi_A + \frac{L}{N} \phi_{remA})$$

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{(2V_{BC} - V_{AB})}{3N} \cdot \frac{L}{L_S + L} - \frac{R_S + R}{L_S + L} (\phi_B + \frac{L}{N} \phi_{remB})$$

$$\frac{d\phi_C}{dt} = \frac{(2V_{AB} + V_{BC})}{3N} \cdot \frac{L}{L_S + L} + \frac{R_S + R}{L_S + L} (\phi_A + \phi_B + \frac{L}{N} \phi_{remC})$$

فصل ۳: نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای ادامه کار :

۳-۱- نتیجه‌گیری :

در این پروژه یک مدل جهت ترانسفورماتور در حالت عبور جریان هجومی ارائه گردیده است . در این مدل مشخصه اشباع ترانسفورماتور به صورت دو خطی در نظر گرفته شده است و مقادیر شیب‌های آن از روی مشخصات هسته و سیم‌پیچ‌ها محاسبه می‌شود . مدل ارائه شده در این پروژه برای ترانسفورماتورهای با قدرت بالا مناسب است . البته مدل مزبور عمومی بوده و برای ترانسفورماتور خاصی نوشته نشده است . لذا با توجه به گستردگی ترانسفورماتورها و شرایط مختلف ساختمانی آنها و اثرات قسمت‌های غیر از هسته و سیم‌پیچ ترانسفورماتور ، مانند تانک و میله‌های نگهدارنده و تیرآهن‌های نگهدارنده یوغ و غیره ، واضح است که جواب کاملاً دقیقی برای تمامی ترانسفورماتورها نمی‌توان به دست آورد با کوچک‌تر شدن ترانسفورماتور دامنه جریان هجومی کوچک می‌شود و اشباع هسته به میزانی که در ترانسفورماتورهای بزرگ در بالاتر از فوران نامی مشاهده می‌گردد ، در ترانسفورماتورهای کوچک وجود ندارد . ترانسفورماتورهای قدرت تا ظرفیت بیشتر از ۱۰۰۰ مگاوات آمپر و ولتاژ ۸۰۰ کیلو ولت ساخته شده‌اند . به لحاظ اقتصادی نقطه کار هسته ترانسفورماتورهای قدرت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

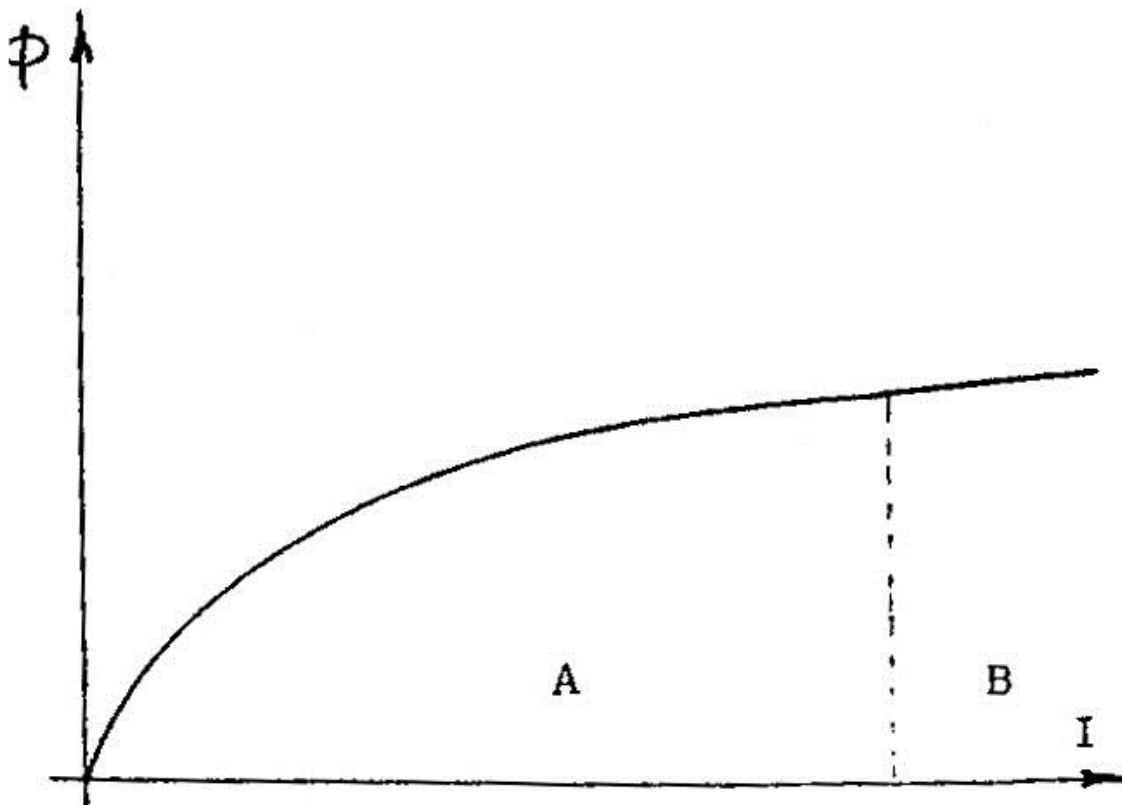
بزرگ بسیار نزدیک به فوران اشباع است. این امر به منظور کاهش هزینه مس، آهن و عایق مصرفی می‌باشد. در نتیجه مشخصه اشباع ترانسفورماتورهای بزرگ به مشخصه دو خطی مدل این پروژه نزدیکتر است و لذا پاسخ دقیق‌تری می‌دهد. در مجموع باید گفت که این مدل در ترانسفورماتورهای بالاتر از ۱ مگاوات آمپر دقت بیشتری دارد. با مطالعه و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی جریان هجومی نتیجه می‌گیریم که زاویه کلیدزنی و فوران پسماند بالاترین اثر را در میزان دامنه جریان هجومی دارند. مقاومت اهمی مدار اولیه نیز در کاهش دامنه جریان هجومی تاثیر دارد و با افزایش مقدار آن، می‌توان به میرایی جریان هجومی سرعت بخشید. در ترانسفورماتورهای سه فاز شکل منحنی جریان هجومی در سه فاز با یکدیگر متفاوت است معمولاً در یکی از فازها جریان هجومی نسبتاً کوچک و در دو فاز دیگر بزرگتر است. این اختلاف به خاطر تفاوت زاویه کلیدزنی و فوران پسماند در سه فاز می‌باشد. با بالا رفتن میزان اشباع هسته، دامنه هارمونیک‌های جریان هجومی بزرگتر می‌شود. هارمونیک دوم همیشه هارمونیک غالب است و هارمونیک‌های بعدی در سطوح پایین‌تر قرار دارند. دامنه هر هارمونیک در طول پریودهای متوالی جریان هجومی ثابت نبوده، دارای تغییرات می‌باشد. هارمونیک‌های بالاتر از هفتم به خاطر کوچکی قابل صرف‌نظر هستند.

۳-۲- پیشنهاداتی برای ادامه کار:

در ادامه این پروژه مناسب است که با فراهم کردن امکانات لازم برای انجام آزمایش اندازه‌گیری جریان هجومی، این کار برای ترانسفورماتورهای مختلف در ردیف‌های متفاوت قدرت و ولتاژ نامی صورت گیرد. سپس اندازه‌گیری‌ها با نتایج حاصل از محاسبه در مدل جهت تطبیق هر چه بیشتر نتایج محاسبه با اندازه‌گیری‌های واقعی در نظر گرفته شود. این کار نتیجه محاسبات برنامه کامپیوتری را به دقت مورد نظر خواهد رساند. زمینه دیگر برای تحقیق آنست که فرمول‌های ریاضی مختلف جهت مدل‌سازی مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتورها مورد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بررسی و مقایسه قرار گیرد و با مقایسه آنها با مقادیر اندازه گیری شده ، مناسب ترین فرمول جهت نمایش این مشخصه به دست آورده شود . البته ممکن است برای هر ردیف معینی از ظرفیت و ولتاژ نامی ترانسفورماتور ، فرمول متفاوتی با ردیف های دیگر ، مناسب باشد . با توجه به بررسی های انجام شده در این پروژه پیشنهاد می گردد که مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور مطابق شکل زیر به دو قسمت B, A تقسیم شود . قسمت A توسط فرمول مناسبی مدل گردد و قسمت B به وسیله یک خط مستقیم با شیب ثابت نشان داده شود .



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل چهارم

حالت گذرای ترانسفورماتورها :

۴-۱- طبقه بندی حالت گذرا :

با هر تغییری که در یک یا چند مشخصه عمل ترانسفورماتور مانند ولتاژ ، فرکانس ، بار و غیره به وجود آید یک حالت گذرا برای رسیدن از یک مقدار ثابت مشخصه ها به یک مقدار ثابت دیگر به وجود می آید و معمولاً این حالت گذرا در یک زمان بسیار کوتاه به وقوع می پیوندد . با اینکه این پدیده در زمان کوتاهی رخ می دهد ولی قابل تحمل نیست و برای ترانسفورماتور مضر و خطرناک می باشد . دلیل خطرناک بودن حالت گذرا برای ترانسفورماتور این است که یک فشار مکانیکی خیلی بزرگ ما بین اجزاء سیم پیچ ظاهر می گردد و در نهایت موجب خواهد شد که توزیع ولتاژ مناسب مابین بخش های مختلف سیم پیچ از دست برود و یا باعث ایجاد حرارت زیاد در سیم پیچ ها بشود و باعث از بین رفتن ترانسفورماتور گردد . به همین دلیل بررسی این پدیده در ترانس های ولتاژ و توان بالا که با هزینه های زیاد ساخته می شوند دارای اهمیت فراوانی می باشد . با توجه به مطالب بالا بایستی یک بررسی جامع در این مورد صورت گیرد تا بتوان ترانسفورماتورها را از انواع حالات گذرای ممکن محافظت کرد .

حالات گذرا در ترانسفورماتورها بسته به اینکه عامل به وجود آورنده حالت گذرا ولتاژ باشد یا جریان نامگذاری می شوند که یکی جریان بیش از حد مجاز می باشد این حالت خود به دو قسمت جریان راه اندازی یا جریان هجومی و دیگری جریان اتصال کوتاه ناگهانی تقسیم می شود و دیگری حالت ولتاژ بیش از حد مجاز می باشد و این حالت نیز خود به چند قسمت تقسیم می شود که عبارتند از:

اضافه ولتاژ بر اثر پدیده های جوی مانند رعد و برق و دیگری سوئیچینگ که روشن و خاموش نمودن بارها و یا قطع و وصل شدن قسمتی از شبکه می باشد و قسمت دیگر اضافه ولتاژ بر اثر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مواردی مانند اتصال کوتاه و اتصال به زمین و جرعه‌های الکتریکی بر اثر تخلیه‌های جزئی است بنابراین حالت‌های گذرا در ترانسفورماتورها بایستی از هم تمیز داده شده و جداگانه بررسی گردند.

۲-۴- جریان بیش از حد (Over Currents) :

جریان بیش از حد مجاز هنگامیکه ترانسفورماتور بدون بار به برق وصل شود و یا اینکه یک اتصال کوتاه پیش آید به وجود خواهد آمد و بررسی با جریان هنگام وصل ترانسفورماتور به شبکه در حالت بی‌باری شروع می‌شود.

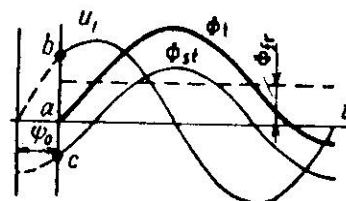
۱-۲-۴- جریان شروع (جریان هجومی) (Starting Current) :

فرض می‌کنیم که سیم‌پیچ ثانویه یک ترانس باز است می‌دانیم که در این حالت جریان بدون بار ترانس تا حدود ۱۰٪ خواهد بود ولی حالت ذکر شده در بالا یک حالت ماندگار است پس یک حالت گذرا در بین است و وقتی که ترانسفورماتور از طریق کلید به منبع تغذیه و به ولتاژ نامی وصل می‌گردد. جریان حاصله ممکن است از چندین برابر مقدار مجاز بدون بار تجاوز نماید این جریان زیاد که جریان هجومی نامیده می‌شود با توجه به شکل (۱-۲) دیده می‌شود $u_1 = ab$ و مقدار شار مربوط به این حالت پایدار $\varphi_{st} = ac$ است. اگر شار مغناطیسی باقیمانده یا پس‌ماند را صفر در نظر بگیریم در لحظه‌ی اتصال ترانس به منبع تغذیه جریان i_0 و شار φ_0 بایستی صفر باشند. پس زمانی که ترانس به منبع تغذیه وصل می‌شود شاری آزاد (φ_{fr}) به حدی از نظر دامنه افزایش می‌یابد تا $\varphi_{st} + \varphi_{fr} = 0$ گردد.

اگر مقاومت سیم‌پیچی اولیه صفر فرض گردد انرژی الکترومغناطیسی مربوط به فلوی φ_{fr}

از بین نمی‌رود

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل : شار مغناطیسی در زمان وصل ترانس به شبکه

و شار φ_{fr} به صورت یک مقدار ثابت در مدار مغناطیسی باقی خواهد ماند. در شکل (۱-۲) این شار با خط چین موازی محور زمان مشخص شده است و به شار φ_{st} اضافه می‌گردد تا φ_t (شاربرایند) به دست آید. شار برایند به وجود آمده در زمان‌هایی از مقدار نامی ترانس بیشتر می‌گردد نتیجتاً می‌تواند هسته ترانس را به اشباع برسد. حالتی را که در نظر گرفتیم در عمل به وجود نمی‌آید زیرا در سیم‌پیچ ترانسفورماتور مقاومت اهمی وجود دارد بنابراین شار φ_{fr} به تدریج کاهش می‌یابد. فرض می‌کنیم که ولتاژ اعمالی به ترانس به صورت سینوسی باشد اگر در ورودی قانون دوم کیرشهف را بنویسیم به رابطه زیر می‌رسیم:

$$u_1 = u_{1m} \sin(\omega t + \varphi_0) = r_1 i_0 + N \frac{d\varphi_t}{dt}$$

در رابطه قبل φ_0 زاویه وصل کلید یا برقراری جریان می‌باشد. منحنی مغناطیسی هسته ترانسفورماتور در عمل خطی نمی‌باشد در رابطه شار و جریان یک رابطه خطی نیست ولی در اینجا با توجه به اینکه بررسی تئوری می‌باشد و برای ساده کردن محاسبات فرض می‌کنیم که این رابطه خطی باشد با این فرض خواهیم داشت $\varphi_1 N_1 = L_1 i_0$ بنابراین معادله ولتاژ را دوباره می‌نویسیم.

$$u_1 = u_{1m} \sin(\omega t + \varphi_0) = r_1 + N_1 \frac{d\varphi_t}{dt} \quad (۲-۲)$$

$$\frac{d\varphi_t}{dt} + \frac{\varphi_t}{L_1} r_1 = \frac{u_{1m}}{N_1} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

معادله بالا یک معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول می‌باشد شار φ_t مجموع دو شار می‌باشد که یکی شار ثابت φ_{fr} مربوط به حالت گذرا می‌باشد و دیگری شار پریودیک مربوط به حالت ماندگار است.

$$\varphi_t = \varphi_{ft} + \varphi_{st} \quad (2-3)$$

شار حالت ماندگار φ_{st} تقریباً به اندازه ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ u_1 تاخیر فاز دارد بنابراین

$$\varphi_{st} = \varphi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}) = -\varphi_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2-4)$$

در رابطه بالا φ_m دامنه شار در حالت ماندگار می‌باشد. برای به دست آوردن شار φ_{fr} بایستی معادله (۲-۲) را با طرف ثانی صفر حل کنیم و از حل آن

$$\varphi_{fr} = ce^{-\frac{r_1 t}{L_1}} \quad (2-5)$$

به دست می‌آید و در فرمول قبلی c ثابت انتگرال گیری می‌باشد که با توجه به شرایط اولیه به دست می‌آید در لحظه وصل کلید یعنی $t = 0$ فقط شار مغناطیسی $\pm \varphi_{res}$ در هسته وجود دارد.

مقدار به دست آمده برای c را در معادله (۲-۵) قرار می‌دهیم:

$$\begin{aligned} \varphi_t &= \pm \varphi_{res} = -\varphi_m \cos \varphi_0 + c \\ c &= \varphi_m \cos \varphi_0 \pm \varphi_{res} \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\varphi_{fr} = \varphi_m \cos \varphi_0 e^{-\frac{r_1 t}{L_1}} \pm \varphi_{res} e^{-\frac{r_1 t}{L_1}}$$

با قرار دادن این مقدار در رابطه اصلی شار یک رابطه کلی به دست می‌آید:

$$\phi = \phi_m + \phi_{fr} = -\phi_m [\cos(\omega t + \phi_0) - \cos \phi_0 e^{-\frac{r_1 t}{L_1}}] \pm \phi_{res} e^{-\frac{r_1 t}{L_1}} \quad (2-7)$$

در فرمول به دست آمده بالا بهترین حالت وقتی اتفاق می‌افتد که $\phi_{res} = 0, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$ باشد:

$$\phi_{st} = -\phi_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \phi_m \sin \omega t, \phi_{fr} = 0$$

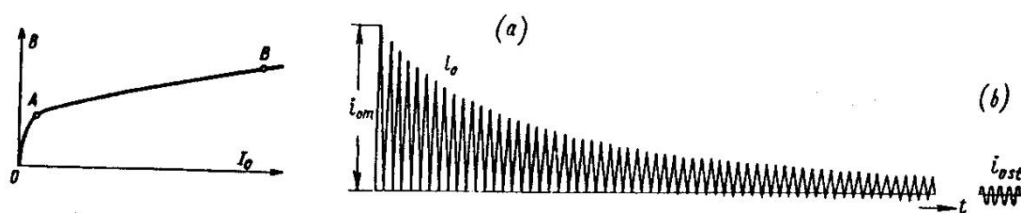
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

همانطور که از رابطه بالا پیداست وقتیکه در زاویه $\frac{\pi}{2}$ کلید زنی انجام شود و $\phi_{res} = 0$ باشد شار حالت ماندگار به فوریت به مقدار نهایی خودش می‌رسد. حالت مهم دیگر وصل کلید در زمان $t = 0$ و $\phi_0 = 0$ می‌باشد. مقدار شار برآیند به این صورت به دست می‌آید.

$$\phi_t = -\phi_m \cos \omega t + \phi_m e^{-\frac{r_1 t}{l_1}} \pm \phi_{res} e^{-\frac{r_1 t}{l_1}} \quad (2-8)$$

مقدار شار پس ماند معمولاً به صورت $\phi_{res} = (2-3)\phi_{st}$ می‌باشد در پریودهای اولیه چون زمان کوچک می‌باشد و مقدار $r_1 \ll \omega l_1$ می‌باشد قسمت نمایی برابر $e^{-\frac{r_1 t}{\omega l_1}} \cong 1$ است پس شار برآیند $\phi_{tm} = \phi_m + \phi_m + (2-3)\phi_m = (2.2-2.3)\phi_m$ خواهد شد.

جریان مغناطیسی i_0 که نیاز می‌باشد تا چنین شاری را تولید نماید از روی منحنی مغناطیسی تعیین می‌گردد. نقاط A, B از منحنی شکل (۲-۲) مربوط به مقادیر نامی چگالی و دو برابر حالت نامی می‌باشد. آزمایشات نشان می‌دهد که برای دو برابر کردن چگالی جریانی بین ۱۵۰ تا ۱۲۰ برابر جریان بی‌باری لازم است (بستگی به هسته و مشخصه اشباع دارد) و اگر جریان بی‌باری را تقریباً ۱۰ درصد جریان نامی در نظر بگیریم پس جریان هجومی بین ۱۵ تا ۱۲ برابر جریان نامی خواهد شد.



شکل (۲-۳) جریان هجومی و منحنی مغناطیسی

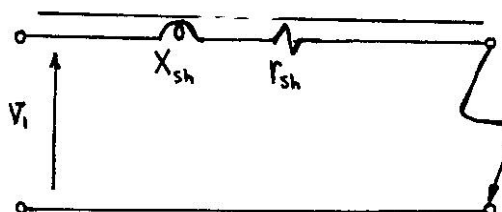
شکل (۲-۳) جریان ترانس را در دو حالت ماندگار و حالت گذرا نشان می‌دهد. در قسمت گذرا بسته به مشخصه ترانس جریان پس از چند ثانیه بعد از وصل کلید مستهلک می‌شود و به حالت ماندگار می‌رسد. هر چه مقاومت سیم‌پیچی ترانسفورماتور بزرگتر باشد سرعت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

استهلاک حالت گذرا بیشتر می شود و گاهی این زمان در ترانس های با توان بالا به ۲۰ ثانیه هم می رسد این جریان اگر زمان زیادی در مدار ترانس باقی نماند خطر مستقیم بر روی ترانس ندارد. بلکه ممکن است تجهیزات حفاظتی را به کار اندازد. بنابراین بایستی تجهیزات حفاظتی طوری طراحی و محاسبه گردند که این جریان در ترانس در نظر گرفته شود. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که بدترین حالت وقتی بود که در زمان صفر ولتاژ ترانسفورماتور به مدار متصل گردد ولی این مسئله پیش نخواهد آمد زیرا وجود ولتاژ زیاد بین کتاکت ها در فاصله آنها قبل از وصل کامل کلید باعث عبور جریان می شود و قاعدتاً جریانی بر قرار است. مطلب بیان شده در بالا برای ترانسفورماتوهای تکفاز صادق بوده ولی در ترانسفورماتورهای سه فازه وصل در زمان صفر بیشتر اتفاق می افتد زیرا در هر زمانی که بخواهیم عمل وصل را داشته باشیم ممکن است یکی از سه فازها در لحظه صفر ولتاژ باشند.

۴-۲-۲- جریان اتصال کوتاه ناگهانی :

هنگامی که در یک ترانسفورماتور اتصال کوتاه ناگهانی پیش آید یا اینکه تحت آزمایش اتصال کوتاه قرار گیرد می توانیم از جریان بی باری صرف نظر کنیم. در چنین حالتی مدار معادل یک ترانسفورماتور شبیه یک مدار الکتریکی ساده خواهد شد که شامل مجموع مقاومت های $r_{sh} = r_1 + r_2'$ و راکتانس های $x_{sh} = x_1 + x_2'$ می باشد.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم

مقادیر راکتانس های بالا ثابت هستند زیرا راکتانس نشتی می باشند و مسیر آنها در هوا بسته می شود پس دارای رلوکتانس ثابت و در نتیجه راکتانس آنها نیز ثابت است . معادله ولتاژ در مدار بالا چنین خواهد شد .

$$u_1 = u_{1m} \sin(\omega t + \varphi_{sh}) = i_{sh} r_{sh} + l_{sh} \cdot \frac{di_{sh}}{dt} \quad (2-9)$$

در فرمول بالا φ_{sh} زاویه اتصال ترانس به حالت اتصال کوتاه می باشد که شبیه φ_0 در مدار بدون بار عمل می کند . اگر معادله بالا را که یک معادله دیفرانسیل معمولی است حل کنیم به

$$\text{این نتیجه می رسیم که (با فرض اینکه } \varphi_{sh} = \arctg \frac{x_{sh}}{r_{sh}} \cong 90^\circ \text{)}$$

$$i_{sh} = i_{sh_n} + i_{sh_f} = -\frac{u_{1m}}{\sqrt{r_{sh}^2 + (\omega l_{sh})^2}} \cos(\omega t + \varphi_{sh}) + \frac{u_{1m}}{\sqrt{r_{sh}^2 + (\omega l_{sh})^2}} \cos \varphi_{sh} e^{-\frac{r_{sh} t}{l_{sh}}} = -I_{sh} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{sh}) + I_{sh} \sqrt{2} \cos \varphi_{sh} e^{-\frac{r_{sh} t}{l_{sh}}} \quad (2-10)$$

مقادیر i_{sh_f} و i_{sh_n} مقادیری لحظه ای می باشند و $I_{sh} \sqrt{2} = \frac{u_{1m}}{\sqrt{u_{sh}^2 + (\omega l_{sh})^2}}$ دامنه جریان حالت ماندگار در حالت اتصال کوتاه می باشد . برای طراحی ترانسفورماتور و در نظر گرفتن حالت اتصال کوتاه بدترین حالت ممکن در نظر گرفتن $\varphi_{sh} = 0$ است .

$$i_{sh(\varphi_{sh}=0)} = -I_{sh} \sqrt{2} \cos \omega t + I_{sh} \sqrt{2} e^{-\frac{r_{sh} t}{l_{sh}}} \quad (2-11)$$

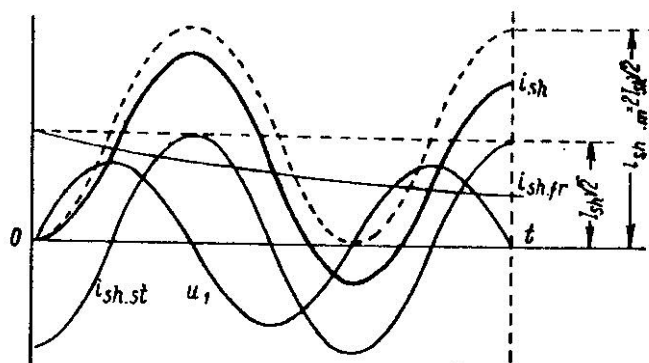
اگر اتصال کوتاه در هنگامی رخ دهد که ولتاژهای نامی به ترانس اعمال شده اند داریم

$$I_r \text{ و } I_{sh} \sqrt{2} = \frac{100\sqrt{2}}{u_{sh}} I_r I_{sh} \sqrt{2} = \frac{100\sqrt{2}}{u_{sh}} I_r$$

جریان نامی می باشد . اگر حالتی را که $\frac{r_{sh}}{l_{sh}} = 0$ است در نظر بگیریم جریان I_{fr} هرگز مستهلک

نمی شود این جریان در شکل (۲-۵) به صورت خطی مشخص شده است .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل : نمودار ولتاژی و جریانی برای ترانسفورماتور در حالت اتصال کوتاه ناگهانی

و در نتیجه نیم‌پریود بعد از لحظه اتصال کوتاه دامنه جریان اتصال کوتاه ناگهان دو برابر

مقدار دامنه جریان در حالت دائمی حالت اتصال کوتاه می‌گردد $k_{sh} = \frac{i_{shm}}{I_{sh}\sqrt{2}} = 2$ (اگر در

فرمول (۱۱-۲) مقدار $\omega t = \pi$ قرار دهیم $i_{sh} = 2I_{sh}\sqrt{2}$ می‌گردد که دو برابر $I_{sh}\sqrt{2}$ می‌باشد

(در عمل چون $\frac{r_{sh}}{l_{sh}}$ دارای مقداری غیر از صفر است i_{sh} سریعتر مستهلک می‌گردد . در

ترانسفورماتورهای با توان کم $\frac{r_{sh}}{\omega l_{sh}} = (0.5 - 0.33)$ و جریان بعد از یک یا دو پریود مستهلک

می‌گردد پس مقدار ۱۰۲ تا ۱۰۳ خواهد بود ولی در ترانسفورماتورهای با قدرت بالا $\frac{r_{sh}}{\omega l_{sh}} \leq \frac{1}{10}$

است و مقدار ۱۰۸۵ تا ۱۰۷ خواهد بود برای مطالعه‌ی بیشتر در مورد جریان هجومی می‌توان

به مراجع [۱۲] و [۸] و [۷] و [۶] و [۴] مراجعه نمود .

۴-۳- پدیده حرارتی مدار اتصال کوتاه :

با اینکه اتصال کوتاه در یک ترانسفورماتور معمولاً در زمان کوتاهی از بین می‌رود . ولی

حرارت سیم‌پیچ‌های آن ممکن است برای ایزولاسیون (عایق‌بندی) ترانسفورماتور خطرناک

باشد با توجه به چگالی جریان سیم‌پیچی می‌توان حد جریان آن را تعیین و با توجه به مقدار

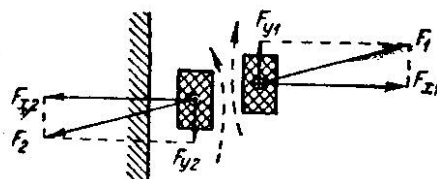
مقاومت سیم‌پیچی مقدار حرارت ایجاد شده را تعیین نمود و برای یک زمان کوتاه با توجه به

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

اینکه این جریان چند برابر می شود حرارت آن نیز با یک ضریب افزایش می یابد و در این حال بایستی با توجه به مشخصات ترانسفورماتور دید که آیا این ترانسفورماتور می تواند در زمان مورد نظر ما این حرارت را تحمل کند یا خیر؟ معمولاً کارخانجات برای این مسئله تمهیداتی در نظر می گیرند تا اگر جریان اتصال کوتاه در زمان کوتاهی برقرار گردید صدمه ای به ترانس وارد نشود تا تجهیزات حفاظتی، ترانس را از مدار خارج کنند.

۴-۴- نیروهای مکانیکی به وجود آمده در زمان اتصال کوتاه ناگهانی: [۶]

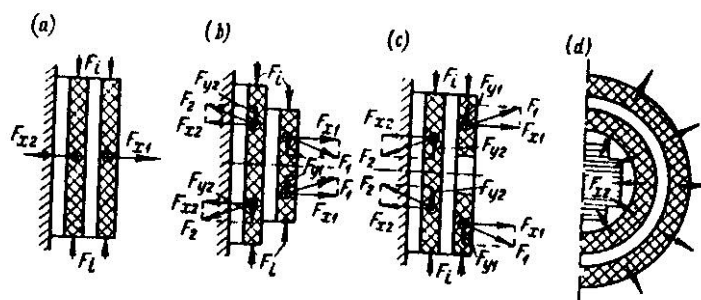
هنگامیکه جریان هایی خلاف جهت هم از داخل هادی ها عبور می نماید نیروهای مکانیکی ظاهر می گردند که خلاف جهت هم هستند $F_1 = -F_2$ هر دوی این نیروها را می توان به مولفه های عمودی و افقی تجزیه نمود.



شکل : نیروهای مکانیکی در سیم پیچهای ترانسفورماتور

هنگامیکه جریان های اتصال کوتاه $i_1 = i_2 = i_{sh}$ باشند نیروهای مکانیکی به i_{sh}^2 بستگی دارند در نتیجه نیروها تناوبی هستند. در کنار نیروهای F_y, F_x ، ما بین سیم پیچهای ترانسفورماتور نیروی فعال دیگری وجود دارد که تمایل دارد سیم پیچ را در راستای عمود بر امتداد هادی ها فشرده نماید و آنرا با F_i نشان می دهند. هر سه نوع این نیروها در شکل (a, b, c, ۷-۲) دیده می شوند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



(a) سیم پیچهای با ارتفاع یکسان (b) سیم پیچهای با ارتفاع برابر

(c) سیم پیچهای به دو قسمت شده (d) سیم پیچهای حلقه ای

نیروهای نام برده شده در صفحه قبل در حالت کار عادی ترانسفورماتور نیز وجود دارند ولی به دلیل اینکه جریان زیاد بالا نیست خطرناک نیستند. در حالیکه در حالت اتصال کوتاه تا چندصد برابر افزایش می یابند که ممکن است موجب آسیب دیدن ترانسفورماتور گردد. برای محاسبه نیروهای مکانیکی ظاهر شده در مدار اتصال کوتاه، می بایستی محاسبات را بر اساس انرژی الکترومغناطیسی به وجود آمده از شار نشتی انجام داد.

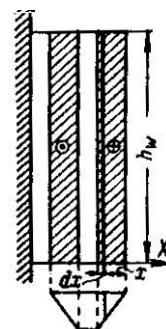
برای اینکه محاسبات را انجام دهیم i_{sh} را مقدار لحظه ای جریان مدار اتصال کوتاه و l_{sh} را اندوکتانس نشتی در ترانسفورماتور در نظر می گیریم. فرض می کنیم که در زمان کوچک dt جریان i_{sh} تغییر نمی کند و یکی از سیم پیچها تحت تاثیر نیروی F_X قرار می گیرد. به اندازه فاصله dx در محور Xها تغییر مکان دهد (شکل ۸-۲)

در این جابه جایی مقداری کار مکانیکی انجام شده است به عبارت دیگر جابجایی سیم پیچ موجب تغییر l_{sh} شده که به تبع آن انرژی الکترومغناطیسی نیز به میزان $dW_X = \frac{1}{2} i_{sh}^2 \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} dx$ تغییر می کند. همین تغییر مکانی سیم پیچی باعث تغییر نیروی محرکه سیم پیچی خواهد شد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$d\phi_x = i_{sh} dl_{sh} = i_{sh} \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} dx$$

$$e_x = -\frac{\partial \phi_x}{\partial t} = -i_{sh} \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} \frac{dx}{dt}$$



سیم پیچی جابجا شده بر اثر نیروی یکی از سیم پیچها

اگر افت ولتاژ در نظر گرفته نشود می توانیم فرض کنیم که نیروی محرکه با ولتاژ U_x برابر است (با علامت مخالف) $U_x = -e_x$ بنابراین انرژی الکتریکی به این صورت به دست می آید :

$$dW_{es} = u_x i_{sh} dt = i_{sh}^2 \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} dx$$

با توجه به اینکه این انرژی صرف انجام کار dA_x و همچنین تغییر شار برای تغییر انرژی الکترومغناطیسی ذخیره شده در سیستم می گردد می توانیم بنویسیم.

$$dW_{ec} = dA_x + dW_x$$

$$i_{sh}^2 \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} dx = F_x dx + \frac{1}{2} i_{sh}^2 \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x} dx \quad (۲-۱۳)$$

$$F_x = \frac{1}{2} i_{sh}^2 \cdot \frac{\partial l_{sh}}{\partial x}$$

نیروهای F_x, F_y در یک طرح معمولی ترانسفورماتور و به طور تقریبی قابل صرف نظر هستند

و در نظر گرفته نمی شوند .

۴-۵- ماهیت و علت اضافه ولتاژها در ترانسفورماتور :

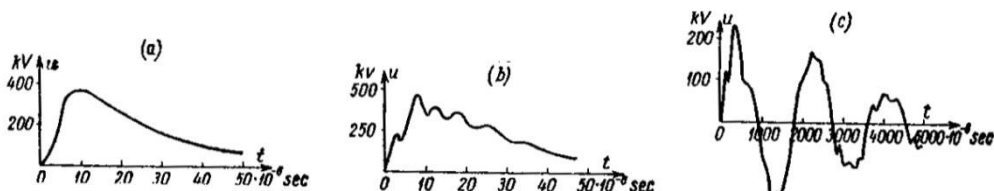
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

هر نوع افزایش ولتاژ در ترانسفورماتور که بیش از حد ولتاژ نامی می‌باشد به عنوان اضافه ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. این اضافه ولتاژ به صورت پالسی می‌باشد و این پالس‌ها می‌توانند پریودیک و یا غیر پریودیک باشند. علت‌های اضافه ولتاژ در ترانسفورماتور به شرح زیر است. پدیده‌های جوی: به طور مثال رعد و برق که مستقیماً به خطوط انتقال و ترانسفورماتور برخورد می‌کنند. نیروی استاتیکی القایی به خط و ترانسفورماتور به دلیل دشارژ شدن ابر و نیروهای الکترواستاتیکی القایی بر اثر شارژ شدن ابرها.

عمل سوئیچینگ: قطع و وصل کردن ترانسفورماتور و یا تغییرات سریع بار.

حالت‌های اضطراری: بدین ترتیب که در مدار اتصال کوتاهی رخ دهد و یا جرقه‌هایی که در تجهیزات زده می‌شود (به صورت تکراری و یا پالس غیر پریودیک)

شکل‌های (a, b, c) امواج غیر پریودیک را به صورت ساده و ترکیبی نشان می‌دهد که این نوع ولتاژهای زیاد بیشتر در رعد و برق دیده می‌شود. ولی شکل (c) موج پریودیکی را نشان می‌دهد که بیشتر در سوئیچینگ دیده می‌شود [۱۵] و [۱۳]



شکل (۲-۹) امواج اضافه ولتاژ (a, b) اضافه ولتاژ بر اثر رعد و برق

(c) اضافه ولتاژ سوئیچینگ

اضافه ولتاژهایی که به ترمینال‌های ترانسفورماتور می‌رسند می‌توانند توسط وسایل حفاظتی محدود گردند و بیشتر خطرات اضافه ولتاژ وقتی مشاهده می‌گردد که امواج اضافه ولتاژ داخل ترانسفورماتور در راستای سیم‌پیچ توزیع گردد و این توزیع ولتاژ به صورت یکسان نخواهد بود و توزیع ولتاژ بر روی سیم‌پیچ‌ها به صورت توابع سینوس و کسینوس هیپربولیک خواهد بود

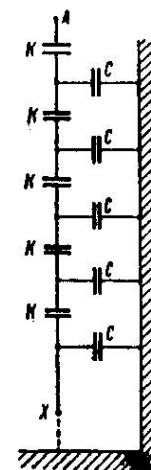
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

که در همین بخش راجع به آنها به طور مفصل بحث خواهد شد. البته توجه به این نکته حائز اهمیت است که امواج اضافه ولتاژ که بر اثر صاعقه و سوئیچینگ هستند ماهیتی غیر مشخص دارند و نمی توان با یک فرم خاص از منحنی ها آن را تقریب زد ولی در عمل اینکار را با یکسری از فرضیات و کارهای آماری انجام می دهند و همچنین برای خود ترانسفورماتور هم با توجه به فرضیات ساده سازی هایی انجام می دهند تا بتوان این پدیده را آشکار نموده و تحلیلی ریاضی برای آن انجام داد با توجه به این مطلب مدار معادل خاصی برای ترانسفورماتور در نظر می گیریم

۴-۶- مدار معادل ترانسفورماتور در حالت اضافه ولتاژ [۱۶]:

مدار معادل ترانسفورماتور برای بررسی حالت گذرای اضافه ولتاژ پیچیده است [۱۴]. برای سادگی می توان تصور کرد که هر حلقه از سیم پیچی یک اندوکتانس را تشکیل می دهد. این اندوکتانس با دیگر اندوکتانس ها (حلقه ها) دارای القاء متقابل است. حلقه های مجاور نسبت به یکدیگر دارای ظرفیت خازنی هستند [۱۸] که در مدار معادل می توان این ظرفیت ها را به صورت فشرده بین دو سر اندوکتانس ها تصور نمود. همچنین هر حلقه نسبت به بدنه و نسبت به سیم پیچ های مجاور دارای ظرفیت خازنی است که آن را نیز می توان به صورت فشرده متصل به ابتدای حلقه تصور کرد. البته برای به دست آوردن فرکانس های طبیعی یک سیم پیچی و فرکانس هایی که در آنها ممکن است سیم پیچ ها در حالت گذرا تشدید کنند سیم پیچی و خازن ها و همچنین القاء متقابل را در نظر می گیرند [۱۴] ولی برای توزیع ولتاژ بهتر است فقط خازن ها را در نظر گرفت و با این فرض محاسبات ریاضی را انجام داد برای مشاهده ی قرارگیری خازن های در نظر گرفته شده به شکل (۱۰-۲) مراجعه می کنیم.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل : مدار معادل ترانس برای اضافه ولتاژ

همانطوریکه از شکل پیداست ترمینال A به خط متصل است و ترمینال دیگر یعنی X می تواند عایق گردیده و یا به زمین متصل گردد. در حالت پایدار جریان عبور کرده از ترانس با احتساب مقاومت ها و راکتانس ها به دست می آید اما برای حالت اضافه ولتاژ این مطلب تغییر می کند و همین مدار معادل است که در ترانس تاثیرات فوق العاده ای داشته و باعث بحث اضافه ولتاژ می شود.

برای بررسی حالت تشدید بایستی هم سلف و هم خازن را در نظر گرفت تا فرکانس های تشدید را به دست آورد ولی در یک محدوده فرکانسی برای حالت اضافه ولتاژ می توان فقط راکتانس خازنی را در نظر گرفت. خازن هایی که به وجود می آیند عبارتند از خازن های عمودی که دو سر سیم پیچی می باشند که با k نشان داده می شوند و خازن های افقی که بین سیم پیچی و بدنه هستند که با C نشان داده می شوند. اگر خازن های سری را به صورت مجزا در نظر بگیریم خازن سیم پیچی به صورت :

$$K_w = \frac{k}{n} \quad (2-14a)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

می شود. و همچنین اگر C خازن های دو سر هر دور سیم پیچی با بدنه باشد مقدار آن به صورت:

$$C = nc \quad (2-14b)$$

محاسبه می شود. خازن های C, K_w می توانند با یک خازن ورودی معادل به نام C_{in} جایگزین گردد. زمانیکه می خواهیم اضافه ولتاژ بر اثر یکی از موارد ذکر شده را بررسی کنیم باید قبلاً توضیحاتی راجع به امپدانس موجی ترانس به ولتاژ اعمالی بر اثر کلیدزنی داشته باشیم. امپدانس موجی برای خطوط انتقال کوتاه و متوسط و بلند با هم فرق دارد که از روی معادلات این خطوط به دست می آید. امپدانس خط بلند در حدود ۴۰۰ تا ۳۵۰ اهم می باشد و برای خطوطی که کابل در آنها به کار رفته در حدود ۵۰ اهم است. امپدانس موجی ترانس چندین برابر خط بلند می باشد که نسبت به فرکانس متغیر است. برای حالت سوئیچینگ امپدانس موجی ترانس را نسبت به خط واصل بین ترانس و کلید بی نهایت در نظر می گیرند یعنی تقریباً باز است. اگر ترانس را مستقیم با یک کلید به یک شبکه متصل کنیم و بخواهیم کلیدزنی انجام دهیم می توانیم با توجه به معادلات زیر مقدار ولتاژ رسیده به سرترانس را به دست آوریم

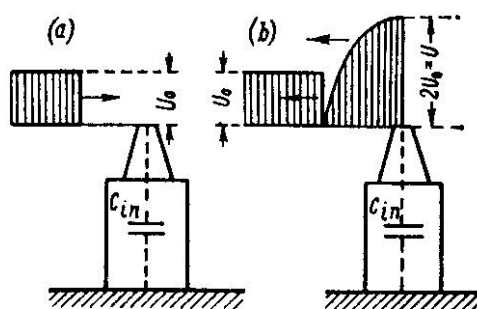
$$\begin{aligned} u &= u_f + u_b \\ i &= i_f + i_b \\ \text{ولتاژ} \quad u_f &= z i_f \\ \text{ولتاژ} \quad u_b &= -z i_b \end{aligned}$$

امپدانس موجی ترانس به طور تقریبی بی نهایت در نظر گرفته می شود.

$$\begin{aligned} i_r + i_c &= 0 \Rightarrow i_c = -i_b \\ \text{مدار باز} \quad i_f &= u_b \\ -\left(\frac{z'}{z}\right) i_f &= u_b \\ u &= u_f + u_b = 2u_f, u_f = u_0 \end{aligned}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازمه

زمانی که طول می کشد تا ولتاژ دو سر ترانسفورماتور به دو برابر افزایش یابد بسیار کوتاه است و اگر مدار قبلی را در نظر بگیریم (در شکل خازن ها را به صورت یک خازن ورودی در نظر گرفته شده است)



شکل (a) : ولتاژ اعمالی به ترانس (b) ولتاژ دو سر ترانس

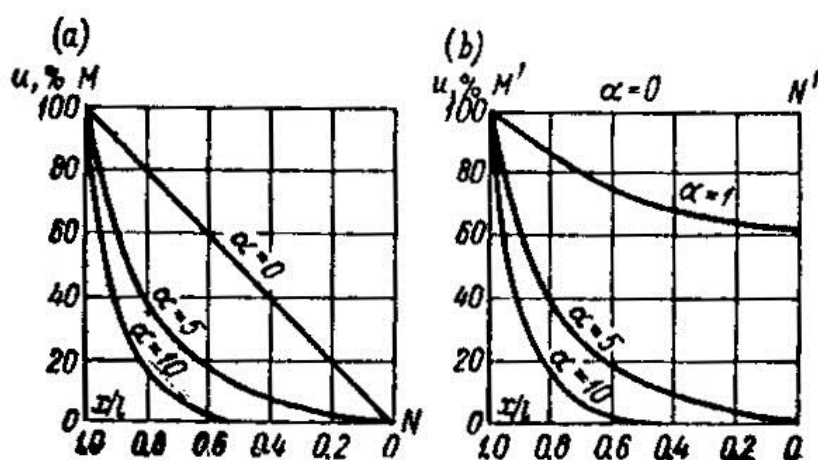
برای بررسی بیشتر می توان به مرجع [۱۵] مراجعه کرد .

۴-۷- توزیع ولتاژ اولیه در طول سیم پیچ ترانسفورماتور

فرض می کنیم که انتهای سیم پیچی (X) به زمین متصل شده باشد . اگر $(c = 0)$ باشد تمام خازن های k به یکدیگر به صورت سری متصل شده اند و جریان یکسانی از تمامی مدار عبور می کند و با توجه به برابر بودن خازن های k یک ولتاژ توزیع شده ی یک شکل در سیم پیچ به دست می آید که مانند حالت پایدار است . این توزیع در شکل (a ۱۲-۲) به صورت یک پاره خط که نقاط M, N را به هم وصل کرده است نمایش داده شده که مطابق با آن ورودی ترمینال سیم پیچ با ولتاژ U تغذیه گردیده و در پایان دارای پتانسیل صفر می باشد و بعکس اگر خازن های افقی وجود نداشته باشد $(k=0)$ جریان از خط به زمین فقط از طریق اولین خازن عبور می نماید که این خازن در سر سیم پیچی قرار دارد و از نظر تقسیم ولتاژ یعنی اینکه تمام ولتاژ در دور اولیه قرار دارد بنابراین دور مورد نظر تحت فشار الکتریکی فوق العاده ای قرار دارد و در شکل (a ۱۲-۲) با یک پاره خط عمودی که نقطه M را به مبدأ مختصات وصل می کند

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

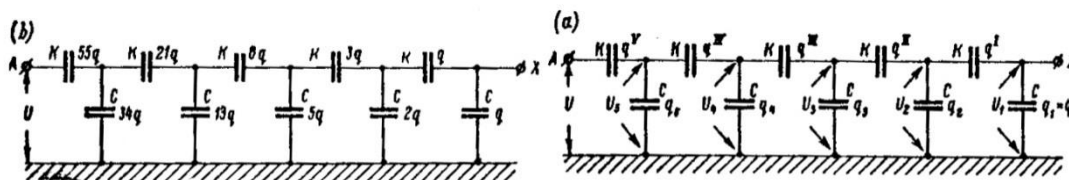
نشان داده شده است. توزیع ولتاژ واقعی در سیم پیچی در بین این دو توزیع محدود می شود.
 برای مثال ولتاژ توزیع شده روی سیم پیچی را برای یک حالت خاص بررسی می کنیم.
 فرض می کنیم تعداد دور سیم پیچی $n=5$ باشد و $k=C$ مدار معادل این مثال در شکل (a) (۲-۱۳) نشان داده شده است.



توزیع ولتاژ در ترانسفورماتور در حالت اضافه ولتاژ

(a) با نقطه خنثی زمین شده

(b) با نقطه خنثی ایزوله شده



مدار معادل برای مثال در نظر گرفته شده

(a) مدار اولیه برای بدست آوردن ولتاژ خازنها

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

(b) مقدار بار توزیع شده روی خازنها

ولتاژهای u_1 تا u_5 را ولتاژهایی در نظر می‌گیریم که بر سر پایه‌های خازن‌های c وجود دارند.

ولتاژها را از انتهای سیم‌پیچی شماره‌گذاری می‌کنیم. $u_1 = \frac{q_1}{c} = \frac{q}{c}$ پس مقدار بار

الکتریکی خازن اول می‌باشد و به همین ترتیب محاسبات را انجام می‌دهیم.

$$q^I = q$$

$$u_2 = u_1 + \frac{q^I}{c} = \frac{q}{c} + \frac{q}{c} = \frac{2q}{c}$$

$$q^{II} = q_2 + q^I = 2q + q = 3q$$

$$u_3 = \frac{q_3}{c} = u_2 + \frac{q^{II}}{c} = \frac{2q}{c} + \frac{3q}{c} = \frac{5q}{c}$$

و اگر مقادیر بارها را به ترتیب به دست آوریم به نتایج زیر می‌رسیم.

$$q^{III} = q_3 + q^{II} = 5q + 3q = 8q, q_4 = q^{III} + q_3 = 13q$$

$$q^{IV} = q_4 + q^{III} = 21q, q_5 = q^{IV} + q_4 = 34q$$

$$q^V = q_5 + q^{IV} = 55q$$

همانطور که از محاسبات بالا پیداست این محاسبات دقیق نیستند زیرا خازن‌های در نظر گرفته شده تعدادشان کم است و بایستی به صورت جزئی در نظر گرفته شوند و به این منظور محاسبات را دقیق انجام داده و نتایج به دست آمده را به صورت یک تابع ریاضی خواهیم داشت. راه به دست آوردن این فرمول در فصل چهارم آورده شده است [۱۳]. البته فرمول به دست آمده به این صورت است.

$$u = \frac{u_0 \sinh \alpha \frac{x}{l}}{\sinh \alpha} \quad (2-20)$$

در رابطه به دست آمده مقدار $\alpha = \sqrt{\frac{c}{k}}$ می‌باشد که در ترانس‌های مختلف مقادیر متفاوتی

دارد. هر چه مقدار α کوچکتر باشد توزیع ولتاژ به حالت پایدار نزدیکتر است. ($\alpha = 0$)

$$\alpha = 5$$

$$\alpha = 15$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آر سایت و به همراه فونت های لازمه

$\frac{x}{l} = .1$	$u_0 0.00702$	$1.3 * 10^{-6} u_0$
$\frac{x}{l} = .5$	$0.001816 u_0$	$5.5 * 10^{-4} u_0$
$\frac{x}{l} = .9$	$0.6065 u_0$	$0.223 u_0$

از نتایج بالا این طور برمی آید که هر چه α بزرگتر می شود ولتاژ بیشتری در ابتدای سیم پیچی خواهیم داشت مثلاً برای $\alpha = 15$ مقدار ولتاژی که در 0.1 اول سیم پیچ می باشد $0.777 u_0$ که مقدار حالت پایدار که $0.1 u_0$ خواهد بود تفاوت زیادی دارد. اگر برای حالتی که انتهای سیم پیچ ایزوله شده باشد تمامی مراحل قبل را انجام دهیم به فرمول دیگری می رسیم :

$$u_x = \frac{u_0 \cosh \alpha \frac{x}{l}}{\cosh \alpha} \quad (2-15)$$

که در شکل (b ۲-۱۲) این منحنی نمایش داده شده است .

برای آنکه گرادیان ولتاژ را ببینیم و حداکثر آن را بیابیم بایستی مشتق گیری انجام دهیم حداکثر این گرادیان در لحظه شروع می باشد یعنی با فرض اینکه برای $\alpha \geq 3$ داریم $\tanh \alpha \cong \coth \alpha \cong 1$ و مشتق گیری از رابطه های ولتاژ حداکثر دامنه این گرادیان ولتاژ به دست می آید.

$$\left[\frac{\partial u_x}{\partial x} \right]_{x=1} = \frac{u}{l} \alpha \quad (2-16)$$

با توجه به فرمول بالا می بینیم که جزء اول نشان می دهد که حداکثر گرادیان ولتاژ برای حداکثر طول سیم پیچی به وجود می آید و دامنه آن دارای دو جزء است یکی از این دو جزء نشان می دهد که این دامنه برابر یک مقدار ثابت است که مربوط به حالت پایدار می شود و دیگری عددی بزرگتر از ۳ که نشان دهنده حالت گذرای می باشد که ما در نظر گرفتیم . برای بحث بیشتر راجع به این شدت میدان به این نکته توجه می کنیم که در حالت پایدار شدت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

میدان یک مقدار ثابت است زیرا ولتاژ نسبت به مکان تغییری ندارد و در تمام نقاط یکسان است و در حالت گذرا در فرمول‌های قبلی دیدیم که ولتاژ با یک تابع سینوس و یا کسینوس هیپربولیک تعریف شد. پس مقدار شدت میدان بستگی به مکان دارد و در هر نقطه‌ای به یک اندازه می‌باشد.

$$E_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{u_0 \alpha}{I \sinh \alpha} \cosh \alpha \frac{x}{l}$$

$$[E_x]_{\frac{x}{l}=1, \alpha \geq 3} = E_{\max} = \frac{u_0 \alpha}{I}$$

بنابراین حالت گذرا دارای شدت میدانی چند برابر شدت میدان حالت پایدار است و بایستی برای این مقدار شدت میدان و تبع آن ولتاژ حفاظتی قرار داد تا این مقادیر کمتر شوند و یا از بین بروند. در عمل نمی‌توان هر قسمت از سیم‌پیچی را به یک صورت عایق‌بندی کرد و عایق قسمت‌هایی را که دارای ولتاژ بیشتری است قویتر در نظر گرفت پس بایستی از راه‌های دیگری این توزیع میدان را یکنواخت‌تر کرد تا با یک عایق‌بندی یکسان و مناسب سیم‌پیچی ترانس را حفاظت کرد.

۴-۸- حفاظت ترانسفورماتور در برابر اضافه ولتاژها:

در ترانسفورماتور دو نوع حفاظت برای ولتاژ زیاد ترانسفورماتور وجود دارد که یکی از آنها حفاظت داخلی و دیگری حفاظت خارجی می‌باشد. موضوع حفاظت خارجی بر این مبناء استوار است که بتوان موج برخورد کرده به ترانسفورماتور را تا حد ممکن بی‌خطر نمود. این کار با پایین آوردن و تخت نمودن دامنه ولتاژ موج امکان‌پذیر است. حفاظت خارجی شامل انتخاب‌های صحیح و دقیق در مورد خط انتقال و مهیاسازی کابل‌های اتصال به زمین، نصب برقگیر مناسب می‌باشد و بدین ترتیب سیستم موجود قویترین حالت را از نظر حفاظتی می‌یابد. سیستم خازن - سیم‌پیچ که قبلاً به کار می‌رفتند نیز می‌توانند به کار گرفته شوند البته چنین حفاظتی کافی نمی‌باشد و بایستی تمامی مسائل ممکن برای یک حفاظت مناسب را در نظر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

گرفت . بعد از حفاظت خارجی نوبت به حفاظت داخلی می‌رسد . دو راه برای حفاظت داخلی ترانسفورماتور وجود دارد :

راه اول [۴] - برای محافظت ترانسفورماتور از اضافه ولتاژ : بایستی مانند توضیحاتی که قبلاً داده شده است عایق‌بندی سیم‌پیچی را یکنواخت در نظر گرفت به این صورت که چون دوره‌های ابتدایی دارای ولتاژ بیشتری هستند و بایستی ولتاژ بیش از حد را تحمل کنند دارای عایقی قویتر از نظر الکتریکی باشند و برای تعداد دوره‌هایی که لازم است ولتاژ کمتری را تحمل کنند عایق ضعیفتری را در نظر گرفت . مثلاً برای یک نمونه ترانس ولتاژ بالا ضخامت عایق برای کل سیم‌پیچی $0.5mm$ در حالت پایدار در نظر گرفته شده است ولی برای قسمت‌های اولیه حدود $1.4mm$ که تقریباً ضخامتی سه برابر اولی دارد .

