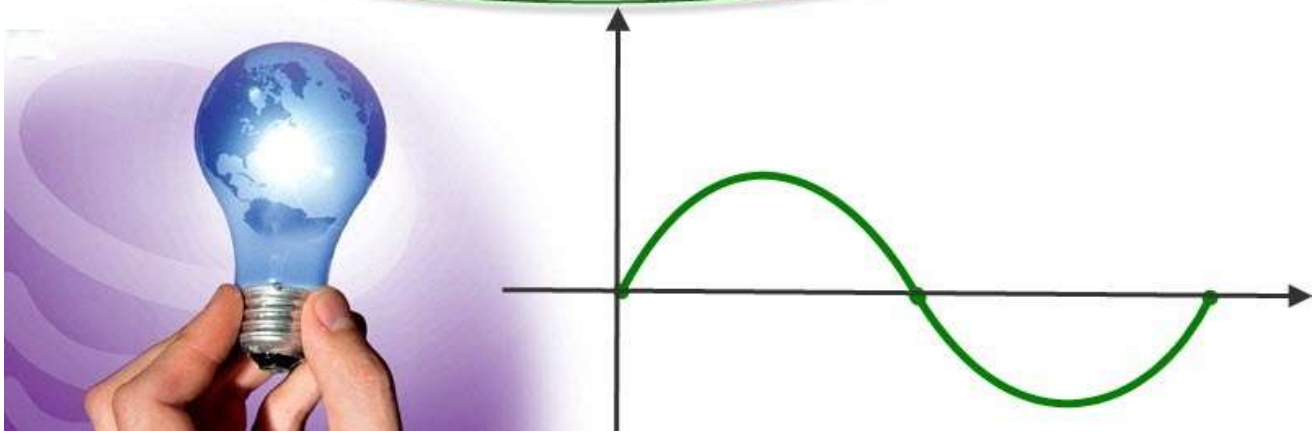
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بسم الله الرحمن الرحیم



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

موضوع پروژه:

بررسی ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه های توزیع برق

WikiPower.ir

برای خرید فایل word این پروژه اینجا کلیک کنید.
(شماره پروژه = ۲۴۷)
پشتیبانی: ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

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

ترانسفورماتورهای توزیع

به طور کلی برای تبدیل ولتاژ در شبکه از ترانسفورماتور استفاده می شود . در سیستم های توزیع انرژی برای تبدیل ولتاژ از سطح فوق توزیع (مثلا ۶۳ کیلو ولت) به توزیع (مثلا ۲۰ کیلو ولت) و یا از سطح ولتاژ توزیع به توزیع فشار ضعیف (مثلا ۳۸۰ ولت) از ترانسفورماتور استفاده می شود . ترانسفورماتورهای مورد استفاده ، به ترتیب ترانسفورماتورهای قدرت و ترانسفورماتور های توزیع نامیده می شوند. در این فصل انواع، کاربردها، استانداردها، ساختار، شیوه های بارگیری، مدار معادل و اتصالات ترانسفورماتورهای توزیع مطرح می شود. مشخصه های الکتریکی و محاسبات تنظیم ولتاژ و جریان اتصال کوتاه نیز مورد بررسی قرار می گیرند. نظر به این که در این فصل ترانسفورماتور به عنوان یک المان سیستم توزیع از نقطه نظر بهره برداری و نه طراحی مورد بررسی قرار می گیرد طراحی ساختمان ترانسفورماتور، نوع هسته و جزئیات دیگر مطرح نمی شود .

ترانسفورماتورهای تا قدرت حدود ۱۰۰۰KVA به عنوان ترانسفورماتورهای توزیع و ترانسفورماتورهای با قدرت بیشتر به ترانسفورماتورهای قدرت موسوم هستند . ولی گاهی ترانسفورماتورهای توزیع در ابعاد بزرگتری نیز ساخته می شوند . در این فصل ترانسفورماتورهای توزیع مورد بررسی قرار می گیرند اگر چه اشاره ای نیز به ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده در سطح فوق توزیع می شود .

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

۱-۱ انواع ترانسفورماتورهای توزیع

ترانسفورماتورهای توزیع را از نقطه نظر نوع سیستم خنک کننده و یا نوع ساختمان و قدرت آن ها می توان تقسیم بندی کرد .

۱-۱-۱تقسیم بندی ترانسفورماتور از نقطه نظر سیستم خنک کننده

یکی از راه های طبقه بندی ترانسفورماتورهای توزیع شیوه ی خنک کردن و محیط عایقی به کار رفته می باشد. در حالت کلی، ترانسفورماتورهای توزیع از نوع خشک[۱] یا روغنی[۲] هستند.

ترانسفورماتورهای نوع خشک به کمک هوا خنک و عایق بندی می شوند . این ترانسفورماتورها در مکان هایی که روغنی بودن ترانسفورماتور از نظر ایمنی خطرناک می باشد، همانند صنایع و مؤسسات تجاری، کاربرد گسترده ای دارند. این ترانسفورماتورها برای مقادیر توان نامی تا حدود ۱۰۰۰KVA و سطح ولتاژهای نامی تا ۱۵KV ساخته می شوند .

ترانسفورماتورهای روغنی دو نوع می باشند : انواع روغنی معمولی[۳] و انواع روغنی مخصوص[۴] که در نوع اخیر، محلول خنک کننده یک اسکرل[۵] نسوز می باشد .انواع روغنی معمولا برای نصب روی تیرهای برق، در پست های زیر توزیع (برای مصرف کننده های خانگی) به کار می روند .

ترانسفورماتورهای روغنی مخصوص در جاهایی که ریسک آتش سوزی زیاد است استفاده می شوند .

[1] Dry Type
[2] Liquid - Filled
[3] Oil - Filled
[4] Inerteen - Filled
[5] Askerel

تقریبا تمامی ترانسفورماتورهای معرفی شده، خود خنک کن [1] می باشند وخنک سازی اجباری با هوا [2] و اجباری با روغن [3] در ترانسفورماتورهای کلاس توزیع استفاده نمی شود. در سال های اخیر ترانسفورماتورهایی با محیط های خنک کننده دیگر ساخته شده است، از جمله ترانسفورماتورهای با ایزولاسیون گازی که با بخار خنک می شوند . با این وجود، در حال حاضر این محیط های خنک کننده جدید در ترانسفورماتورهای توزیع کاربرد چندانی ندارند .

۱-۱-۲ تقسیم بندی ترانسفورماتور از نظر ساختمان و قدرت

ترانسفورماتورهای توزیع شامل ترانسفورماتورهای توزیع هوایی و زمینی هستند . ترانسفورماتورهای هوایی، حجم و قدرت کمتری نسبت به ترانسفورماتورهای زمینی دارند . شکل های (۱-۱) و (۱-۲) یک نمونه از این ترانسفورماتورها را نشان می دهند . در ادامه به توضیح بیشتر در مورد هر یک می پردازیم.

WikiPower.ir

ترانسفورماتورهای سیستم توزیع هوایی

[1] Self - Cooled
[2] Forced - air
[3] Forced - oil

ترانسفورماتورهای سیستم توزیع هوایی (در مقابل سیستم توزیع زیر زمینی) به سه نوع کلی ترانسفورماتورهای معمولی، خود محافظ کامل (CSP) و خود محافظ کامل برای بانک ثانویه (CSPB) تقسیم می شوند . در ادامه هر یک از این انواع و کاربردهای عمومی آن ها شرح داده خواهد شد .

ترانسفورماتورهای معمولی : در ترانسفورماتورهای معمولی، تجهیزات حفاظتی به صورت یکپارچه به صورت جزئی از ترانسفورماتور وجود ندارد . تجهیزات حفاظتی این ترانسفورماتورها باید جداگانه خریداری و نصب شوند . ترانسفورماتورهای معمولی نصب شده روی تیر، برای تغذیه مصرف کنندگان مسکونی، صنعتی کوچک و تجاری کوچک به کار می روند . البته ترانسفورماتورهای با ولتاژ نامی بالاتر از محدوده ذکر شده که برای مقاصدی خاص همچون تأمین توان کمکی در پست ها به کار می روند را نیز می توان روی تیر نصب کرد . ترانسفورماتورهای توزیع با مقادیر نامی بیشتر از محدوده یاد شده، روی یک زمین هموار یا در پست های کوچک نصب می شوند .

ترانسفورماتورهای خود محافظ کامل (CSP)[1] : ترانسفورماتورهای خود محافظ کامل، دارای حفاظت خودی در مقابل صاعقه یا امواج ضربه خط، اضافه بارها و اتصال کوتاه ها می باشند . حفاظت سیم پیچی اولیه در برابر صاعقه، بوسیله ی برقگیر های نصب شده روی تانک ترانسفورماتور انجام می گیرد .

[1] Completely self protected

هر کدام از بوشینگ های اولیه خارجی که به طور کامل زمین نشده اند، برقگیر مخصوص به خود دارند . حفاظت صاعقه سیم پیچی ثانویه انجام می شود . نیازی به برقگیر در ثانویه نیست زیرا ولتاژ نامی ثانویه در حدی نیست که موجب جرقه زدن یا تخلیه الکتریکی در شکاف هوایی گردد . برقگیر های اولیه معمولا از نوع دفع کننده [1] هستند .

حفاظت اضافه بار به کمک مدار شکن های داخل تانک ترانسفورماتور انجام می شود . مدار شکن ها از نظر حرارتی با مقادیر نامی ترانسفورماتور هماهنگ شده اند تا دقیقا تابع دمای واقعی مس کلاف ها باشند . بدین منظور، جریان ثانویه را از بی متال مدار شکن که در مسیر جریان روغن بکار رفته برای خنک کردن سیم پیچی قرار داده شده است، عبور می دهند . بالاتر رفتن دمای بی متال (و بنابراین کلاف ها) از حدی موجب تریپ مدار شکن ها به وضعیت مدار باز می شود . اکثر ترانسفورماتور های CSP روی اهرم خارجی مدار شکن خود یک لامپ هشدار دهنده قرمز رنگ که نشانگر بیش از گرم بودن سیم پیچی ها می باشد دارند . لامپ هنگامی روشن می شود که دمای سیم پیچی به حد دمای ASA برای کلاس A رسیده باشد . در صورت عدم توجه به لامپ هشدار دهنده و رسیدن دمای سیم پیچی به سطحی خطرناک، مدار شکن ها تریپ خواهند کرد .

پس از تریپ، مدار شکن را می توان بوسیله یک اهرم شارژ نمود . در اکثر ترانسفورماتور های CSP می توان اهرم را روی یک وضعیت اضطراری تنظیم کرد که در این صورت امکان تحمل اضافه بار تا زمانی که تعویض ترانسفورماتور میسر شود ، فراهم می گردد .

اتصالات حفاظتی درونی میان سیم پیچی اولیه و بوشینگ اولیه، ترانسفورماتور را هنگام وقوع خطای داخلی ایزوله می کنند و در نتیجه بقیه سیستم اولیه را در مقابل خطای ترانسفورماتور حفاظت می

[1] Expulsion

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

نمایند و همچنین احتمال وقوع و گسترش آتش سوزی در روغن ترانسفورماتور را به حداقل می رسانند

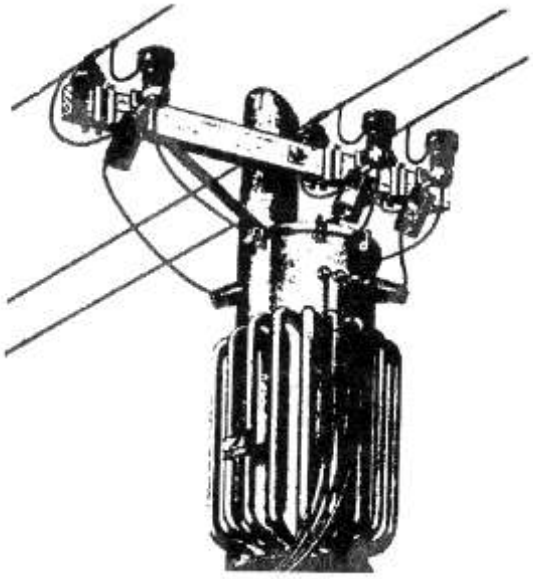
.

تمام ترانسفورماتور های توزیع CSP قابل نصب روی تیر هستند .

ترانسفورماتور های خود محافظ کامل با بانک ثانویه [1] (CSPB) :

ترانسفورماتور توزیع CSPB برای کار با بانک ثانویه طراحی شده اند . این ترانسفورماتور ها متشکل از چندین ترانسفورماتور توزیع هستند که ثانویه آن ها با هم موازی شده است و همگی از یک فیدر اولیه تغذیه می شوند. با این تدبیر، اضافه بارهای لحظه ای بین سه یا تعداد بیشتری ترانسفورماتور، توزیع می شود و در نتیجه نوسان ولتاژ ناشی از تغییرات ناگهانی بار کاهش می یابد و همچنین از خاموشی ناشی از خطای یک ترانسفورماتور جلوگیری می شود . بانک ترانسفورماتوری می تواند به شکل حلقه ثانویه باز یا بسته باشد .

WikiPower.ir



[1] Completely – Self – Protected for banking

شکل ۱-۱ یک ترانسفورماتور توزیع هوایی

حفاظت صاعقه و اتصال کوتاه ترانسفورماتور CSPB همانند حفاظت ترانسفورماتور CSP است . ولی ترانسفورماتور های CSPB دو سری مدار شکن دارند که سری دوم برای عمل تقسیم بندی [1] ثانویه به کار می رود . بنابراین در صورتی که فازی دچار خطا شود یا قسمتی از خط روی ثانویه اضافه بار گردد می توان آن را از بقیه قسمت ها جدا نمود ، بی آن که هیچ ظرفیت ترانسفورماتوری از بانک جدا شود یا این که خطا به دیگر فازها منتقل شود . ترانسفورماتور های CSPB تک فاز تنها برای کاربردهای تک فاز و ترانسفورماتور های CSPB سه فاز تنها برای کاربردهای سه فاز طراحی می شوند .

WikiPower.ir

ترانسفورماتورهای سیستم توزیع زمینی

نصب ترانسفورماتور های توزیع به صورت هوایی در مناطق پر ازدحام و مکان هایی که زیبایی ظاهری مورد توجه می باشد، مناسب نیست .در چنین جاهایی که از ترانسفورماتور های توزیع زمینی استفاده می شود . ترانسفورماتور های زمینی به سه نوع مترو، مسکونی کم مصرف و ترانسفورماتور های شبکه تقسیم می شوند . هرکدام از این ترانسفورماتور ها نیاز به نوع ویژه ای از سیستم توزیع دارد .

ترانسفورماتورهای مترو : ترانسفورماتور های مترو عموما در انبارهای زیر زمینی یا در سطح زمین نصب می شوند . ترانسفورماتور های مترو از نوع معمولی و یا از نوع CP (با حفاظت جریانی)

[1] Sectionalizing

می باشند . مدار شکن های فشار ضعیف و اتصالات حفاظتی فشار قوی در داخل ترانسفورماتور های CP نصب شده است . ویژگی های حفاظتی ترانسفورماتور های CP همانند ترانسفورماتور های CSP است جز اینکه حفاظت صاعقه ندارند . در سیستم های تغذیه شده با کابل معمولا نیازی به حفاظت صاعقه نیست .

مناطق مسکونی کم مصرف : برای سیستم های زمینی مسکونی کم مصرف نیز از همان ترانسفورماتور های معمولی بکار رفته در سیستم توزیع هوایی می توان استفاده کرد . این ترانسفورماتور ها باید داخل یک اتاقک روی سطح زمین یا نیمه مدفون در زمین قرار گیرد . این ترانسفورماتور ها می توانند از نوع معمولی یا CSP باشند .

WikiPower.ir

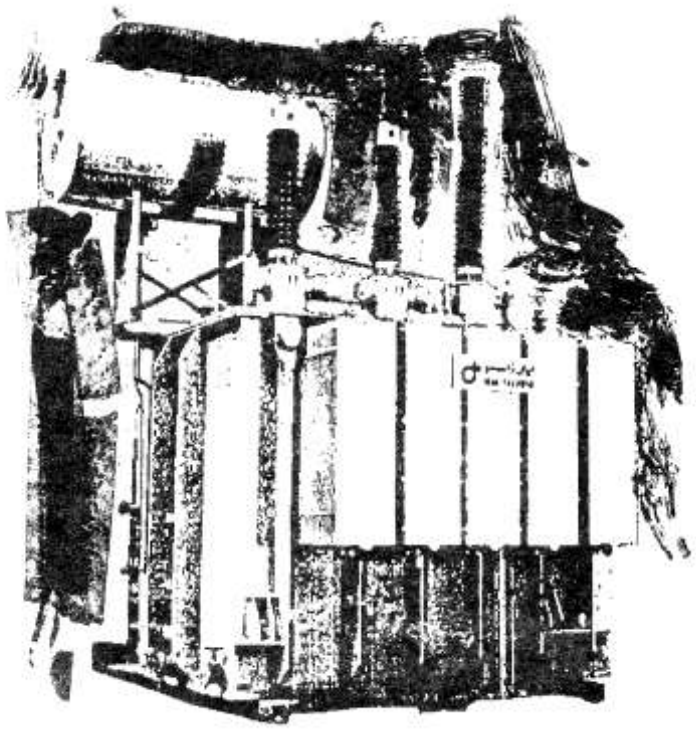
ترانسفورماتورهای شبکه : ترانسفورماتور شبکه برای انتقال توان به ثانویه ولتاژ پایین سیستم شبکه به کار می رود . کلید جداکننده و زمین کننده اولیه و حفاظت کننده شبکه به صورت یکپارچه روی ترانسفورماتور نصب می شوند . کلید اولیه، تعمیر و سرویس ترانسفورماتور و فیدر ورودی را تسهیل می نماید . محافظ شبکه، فیدر اولیه و ترانسفورماتور را در برابر خطا و اضافه بار حفاظت می کند .

سه نوع ترانسفورماتور شبکه وجود دارد : مایعی، نوع خشک با تهویه و نوع خشک . هر سه نوع دارای توان نامی از ۱۵۰ تا ۲۰۰۰ KVA می باشند . واحدهای مایعی توان نامی تا ۲۵۰۰KVAنیز دارند . ترانسفورماتور های شبکه با توان نامی بیش از ۱۰۰۰ KVA دارای ولتاژ ثانویه ۴۸۰ ولت یا بالاتر می

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

باشند . ترانسفورماتور های نوع مایعی از همه رایج ترند و تقریبا در همه سیستم های شبکه ثانویه به کار می روند .

واحد های نوع خشک با تهویه، در جاهایی که روغن خطر آتش سوزی ایجاد می کند و مکان هایی که آلودگی هوا مشکلی برای سیستم تهویه باز پدید نمی آورد، استفاده می شوند . این واحدها اغلب برای تغذیه سیستم شبکه ای کارخانه های صنعتی یا اماکن تجاری به کار می روند.



شکل ۱-۲ یک ترانسفورماتور توزیع زمینی

۱-۲ استانداردهای ترانسفورماتور توزیع

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

۱-۲-۱ استانداردهای حرارتی و اتصال کوتاه

استانداردهای حرارتی به کار رفته در ترانسفورماتور های توزیع همانند استانداردهای حرارتی ترانسفورماتور های قدرت می باشد .

ترانسفورماتور باید قادر به تحمل فشارهای مکانیکی و گرمایی ناشی از اتصال کوتاه های روی ترمینال های هر سیم پیچی باشد بدون این که صدمه ببیند .

اگر ولتاژ نامی در ترمینال های دیگر سیم پیچی ها که برای اتصال به منابع انرژی در نظر گرفته شده اند برقرار باشد، باید شرایط ذیل تأمین شود :

۱ –دامنه جریان اتصال کوتاه متقارن RMS در هر یک از سیم پیچی های ترانسفورماتور نباید از ۲۵ برابر جریان نامی سیم پیچی فراتر رود . برای تعیین فشارهای مکانیکی، جریان اولیه در حالت اتصال کوتاه در نظر گرفته می شود .

۲ –طول مدت اتصال کوتاه به پریودهای زمانی ذیل محدود می شود . مقادیر میانی به کمک میانیابی به دست می آیند . در مورد مدارهایی که ویژگی باز – بست دارند، ترانسفورماتور باید قادر به تحمل اتصال کوتاه های متوالی باشد، با این فرض که مابین وقوع پی در پی اتصال کوتاه ها تا دمای کار عادی خنک نشود البته مجموع طول مدت های اتصال کوتاه ها نباید از زمان داده شده در جدول (۱– ۱) تجاوز نماید .

جدول ۱–۱ جریان اتصال کوتاه مجاز برای ترانسفورماتور های توزیع به صورت تابعی از مدت زمان آن

جریان RMS متقارن در هر سیم پیچی	پریود زمانی (ثانیه)

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

۲۵ برابر جریان پایه	۲
۲۰ برابر جریان پایه	۳
۱۶/۶ برابر جریان پایه	٤
۱٤/۳ برابر جریان پایه یا کمتر	٥

از شرط اول چنین بر می آید که اگر اتصال کوتاه خارجی، جریانی بیش از ۲۵ برابر جریان نامی را در سیم پیچی به وجود آورد تضمینی به حفاظت خودی ترانسفورماتور در مقابل فشارهای مکانیکی داخلی وجود ندارد . ترانسفورماتوری خود محافظ است که امپدانس آن بر مبنای مشخصات ترانسفورماتور، ٤ درصد یا بیشتر باشد و تنها یک سیم پیچی آن به منبعی که در جریان اتصال کوتاه دخیل است، متصل باشد . این مسأله در ترانسفورماتور های قدرت اهمیت چندانی ندارد زیرا راکتانس ترانسفورماتور های قدرت معمولا به میزان قابل توجهی بیشتر از ٤ درصد است .

ترانسفورماتور های توزیع اغلب امپدانسی زیر ٤ درصد و گاهی کمتر از ۲ درصد دارند . در این ترانسفورماتور ها ضمانتی به حفاظت خودی در برابر جریان های اتصال کوتاه بیش از ۲۵ برابر جریان نامی وجود ندارد . البته با توجه به اثر محدود کننده امپدانس سیستم و امپدانس خطا، امکان وقوع خطاهایی با چنین جریان هایی بعید است . با این حال در موارد خاص باید احتیاط های لازم برای محدود کردن جریان خطا به عمل آورده شود .

۱-۲-۲ علامت گذاری ترمینال ها یا سر سیم ها

ترمینال ها یا سرهای یک ترانسفورماتور نقاطی هستند که مدارهای الکتریکی خارجی به آن ها متصل می شوند . مطابق با استانداردهای NEMA و ASA، سیم پیچی فشار قوی با علامت HV یا H و سیم پیچی فشار ضعیف با LV یا X مشخص می شود . در ترانسفورماتور هایی با بیش از دو عدد سیم پیچی، سیم پیچی ها بترتیب کاهش ولتاژ با حروف H، X، Y و Z علامت گذاری می شوند .

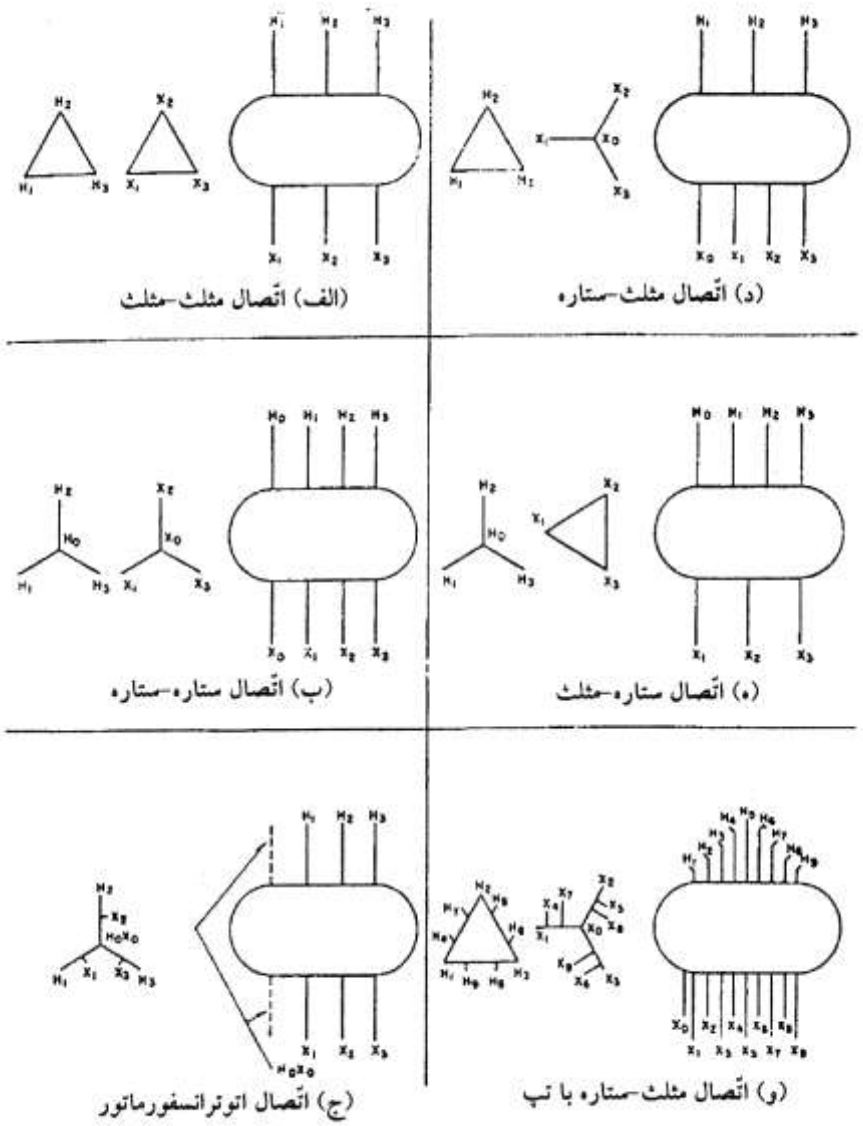
اگر از روبرو به طرف فشار قوی نگاه کنیم، ترمینال H_1 سمت راست قرار دارد . در ترانسفورماتور های تک فاز سرها به گونه ای شماره گذاری می شوند که هنگامی که H_1 به X_1 متصل می گردد ولتاژ میان سر H با بزرگترین شماره و سر X با بزرگترین شماره، کمتر از ولتاژ سیم پیچی فشار قوی می باشد .

در ترانسفورماتور های سه فاز، اگر از روبرو به سیم پیچی فشار قوی نگاه کنیم ترمینال های H_1 سمت راست قرار دارد و ترمینال های H_2 و H_3 به ترتیب شماره از راست به چپ قرار دارند . هنگامی که از روبرو به سیم پیچی فشار ضعیف نگاه کنیم ترمینال X_1 سمت چپ قرار دارد و ترمینال های X_2 و X_3 به ترتیب شماره به دنبال X_1 از چپ به راست قرار دارند . علامت گذاری یک ترانسفورماتور سه فاز مطابق شکل (۱-۳) است.

۱-۲-۳ پلاریته ترانسفورماتور

ترمینال های سیم پیچی ترانسفورماتور برای نشان دادن پلاریته و تمایز طرف فشار قوی و فشار ضعیف علامت گذاری شده اند . البته اولیه و ثانویه بودن بدین صورت مشخص نمی شود زیرا اولیه یا ثانویه بودن هر کدام از سیم پیچی ها بستگی به اتصالات ورودی و خروجی دارد .

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



شکل ۱-۳ علامت گذاری ترمینال ترانسفورماتور های سه فاز

پلاریته ترانسفورماتور بیانگر جهت جریان جاری شده در سرهای فشار قوی نسبت به جهت جریان جاری شده در سرهای فشار ضعیف، در هر لحظه می باشد . به عبارتی ساده تر، پلاریته ترانسفورماتور جهت نسبی ولتاژهای القا شده بین سرهای فشار قوی و ترمینال های فشار ضعیف را

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

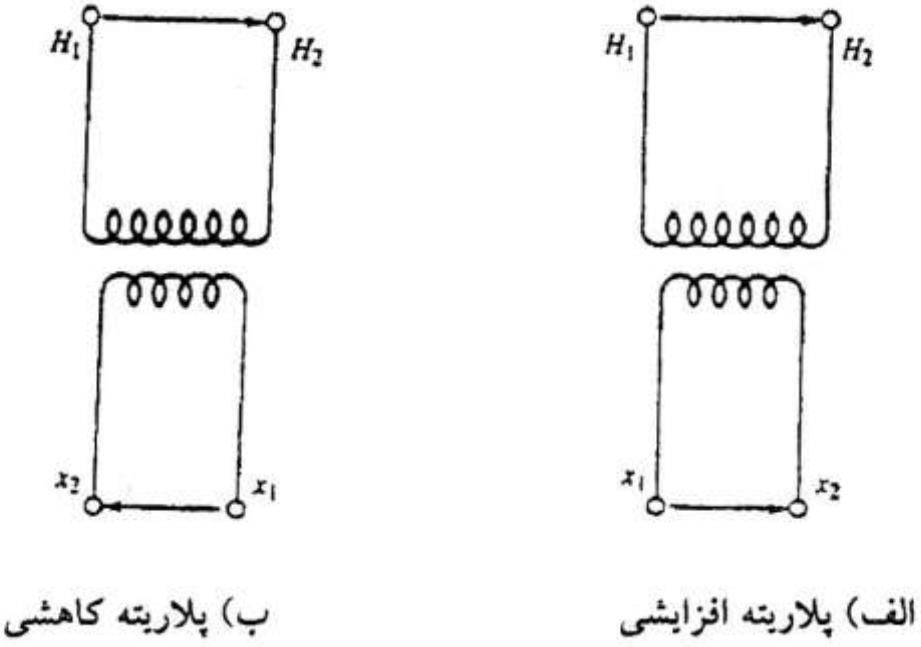
نشان می دهد . پلاریته یک ترانسفورماتور توزیع تک فاز می تواند افزایشی [1] یا کاهشی [2] باشد . اگر علامت گذاری ها استاندارد باشند، ولتاژ از H_1 به H_2 همیشه هم جهت یا هم فاز با ولتاژ از X_1 به X_2 خواهد بود . اگر در ترانسفورماتوری ترمینال های H_1 و X_1 مجاور باشند، همان گونه که در شکل (۱-٤- الف) نشان داده شده است، ترانسفورماتور پلاریته افزایشی دارد .

پلاریته ترانسفورماتور را با انجام یک آزمایش ساده می توان تعیین کرد . ابتدا دو ترمینال مجاور سیم پیچی های فشار قوی و فشار ضعیف به یکدیگر متصل می شوند و سپس یک ولتاژ معمولی مطابق شکل (۱-۵) به سیم پیچی فشار قوی اعمال می گردد و ولتاژ بین ترمینال هایی از سیم پیچی های فشار قوی و فشار ضعیف که به یکدیگر متصل نشده اند اندازه گیری می شود . همانگونه که در شکل (۱-۵- الف) نشان داده شده است، اگر ولتاژ خوانده شده کمتر از ولتاژ اعمال شده به سیم پیچی فشار قوی باشد، پلاریته کاهشی می باشد . مطابق شکل (۱-۵- ب)، اگر ولتاژ خوانده شده بزرگتر از ولتاژ اعمالی باشد پلاریته افزایشی است .

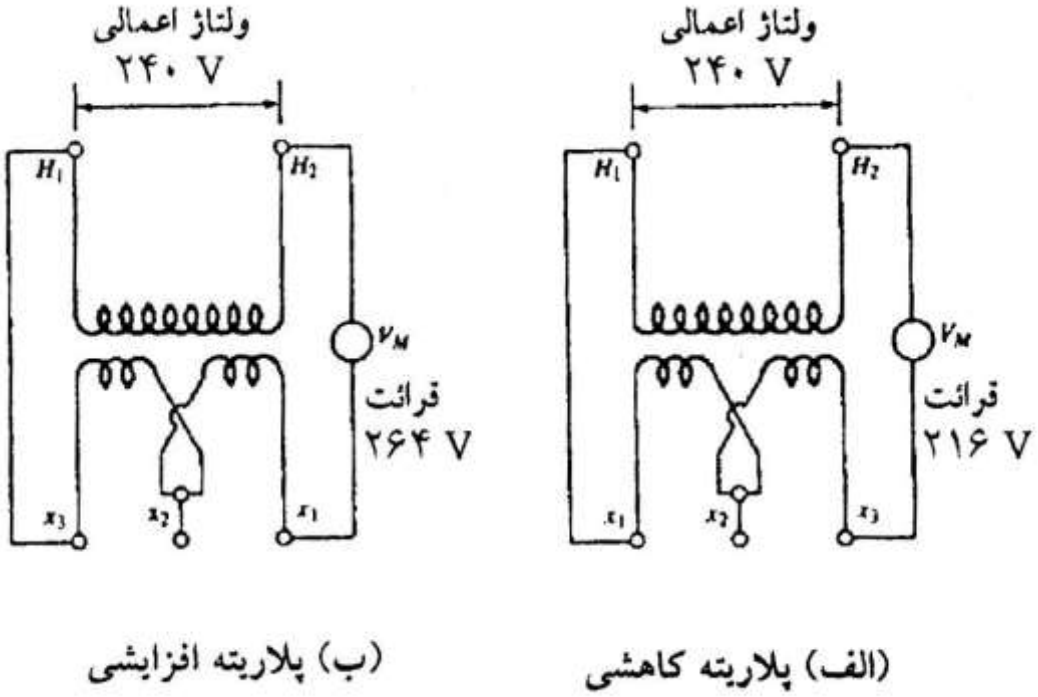
مطابق استانداردهای صنعتی، تمام ترانسفورماتور های تک فاز ۲۰۰KVA و کوچکتر با ولتاژ های فشار قوی ۸٦٦۰V و کمتر (ولتاژ های سیم پیچی)، پلاریته افزایشی دارند . تمام ترانسفورماتور های تک فاز دیگر، پلاریته کاهشی دارند . علامت گذاری های پلاریته هنگام اتصال ترانسفورماتور ها به بانک های سه فاز به کار می آیند .

[1] Additive
[2] Subtractive

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



شکل ۱-٤ اتصالات افزایشی و کاهشی سیم پیچی ترانسفورماتور



شکل ۱-۵ آزمایش پلاریته

۱-۲-٤ کلاس های عایق بندی ترانسفورماتور توزیع

کلاس عایق بندی یک ترانسفورماتور توزیع نشان گر آزمایش های دی الکتریکی است که ترانسفورماتور می تواند تحمل کند . کلاس های عایق بندی معمولا به صورت عددی بر حسب KV مشخص می شود . این عدد مربوط به حداکثر مقدار بالاترین ولتاژ نامی میان ترمینال ها برای اتصال فاز به فاز می باشد که روی این کلاس عایق بندی خاص می افتد . برای نمونه، ترانسفورماتوری که به صورت ستاره یا مثلث به یک سیستم ٦۹KV متصل می شود در کلاس عایق بندی ٦۹KV قرار می گیرد .

در مورد قانون بالا استثنایی برای تعیین کلاس ولتاژ وجود دارد . ترانسفورماتور های تک فاز با ولتاژ نامی ۸/٦٦KV و کمتر، برای ولتاژهای آزمایش مربوط به اتصال ستاره عایق بندی شده اند بنابراین اگر این ترانسفورماتور ها در یک اتصال مثلث به کار روند، کلاس عایق بندی آن ها یک کلاس لازم برای ولتاژ نامی آن ها خواهد بود . بنابراین یک ترانسفورماتور تک فاز با سیم پیچی ۲٤۰۰ ولت، برای اتصال به یک سیستم متصل شده به صورت ستاره ٤۱٦۰ ولت، دارای عایق بندی کافی می باشد .

آزمایش دی الکتریک

کلاس عایق بندی، معرف آزمایش های دی الکتریک استانداردی است که ترانسفورماتور باید قادر به تحمل آن ها باشد . این آزمایش های دی الکتریک شامل آزمایش موج ضربه، آزمایش پتانسیل اعمالی و آزمایش پتانسیل القایی است . ولتاژهای آزمایش دی الکتریک برای کلاس های عایقی مختلف در استاندارد NEMA آمده است .

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

آزمایش های دی الکتریک ترانسفورماتور های توزیع بجز در دو مورد خاص، شبیه آزمایش های دی الکتریک ترانسفورماتور های قدرت که در مرجع ۷ تشریح شده اند هستند :

(۱) دامنه موج ضربه بکار رفته برای ترانسفورماتور های توزیع کلاس ۱۰KV و پایین تر، کمتر از دامنه موج ضربه بکار رفته برای آزمایش ترانسفورماتور های قدرت می باشد .

(۲) ترانسفورماتور های توزیع کلاس ۱۵KV و پایین تر، هیچ آزمایش پیشانی موج ضربه با استاندارد ثبت شده ای ندارند .

۱-۳ مشخصه های الکتریکی

۱-۳-۱ مدار معادل های ترانسفورماتور

نمایشی طرحواره ای از یک ترانسفورماتور در شکل (۱-۶- الف) نشان داده شده است . سیم پیچی اولیه متشکل از چندین دور سیم عایق بندی شده دور یک هسته آهنی می باشد . سیم پیچی ثانویه (X_1-X_2) نیز به شکلی مشابه متشکل از چندین دور سیم روی همان هسته آهنی می باشد . سیم پیچی اولیه به منبع تأمین قدرت و سیم پیچی ثانویه به سیستم ثانویه که بار را تغذیه می کند متصل شده است . در یک ترانسفورماتور توزیع با دو سیم پیچی، معمولا ولتاژ نامی سیم پیچی اولیه بالاتر از سیم پیچی ثانویه می باشد .

سیم پیچی اولیه شار Φ_m را که سیم پیچی ثانویه را نیز قطع می کند، تولید می نماید . تغییر شار دور در اثر تغییرات سینوسی ولتاژ اعمال شده به سیم پیچی اولیه، ولتاژی در سیم پیچی ثانویه القا می کند که با معکوس نسبت دورهای سیم پیچی اولیه و ثانویه (N) متناسب است . اتصال بار به ترمینال

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

های ثانویه، موجب جاری شدن جریان I_s در سیم پیچی ثانویه و جریان I_p در سیم پیچی اولیه خواهد شد .

اگر ترانسفورماتور ایده آل باشد بدین معنی که قابلیت نفوذ پذیری آن در آهن، بی نهایت و تلفات آهنی آن صفر باشد مقاومت سیم پیچی های آن صفر بوده و شار نشتی سیم پیچی که دیگر سیم پیچی ها را قطع نمی کند نداشته باشد، کمیت های اولیه و ثانویه به صورت ذیل به یکدیگر مربوط خواهند بود :

$$E_s = \frac{Ep}{N} \qquad (۱-۱)$$

$$I_p = \frac{I_s}{N} \qquad (۱-۲)$$

WikiPower.ir

البته یک ترانسفورماتور واقعی مطابق این مشخصه های ایده آل رفتار نمی کند . مدار معادل کامل یک ترانسفورماتور واقعی در شکل (۱-۶- ب) نشان داده شده است . عناصر سری، نشانگر افت مقاومتی و افت ظاهری ناشی از نشتی در هر یک از سیم پیچی ها هستند . شاخه موازی Z_m نشان دهنده ی اثر جریان لازم برای مغناطیس کردن هسته و تلفات منبع قدرت ناشی از هیسترزیس و جریان های گردابی در هسته می باشد . عناصر موازی به صورت عناصر متغیر نشان داده شده اند چرا که وابستگی جریان مغناطیس کننده و جریان مربوط به تلفات آهنی به دامنه ولتاژ اعمالی، خطی نیست .

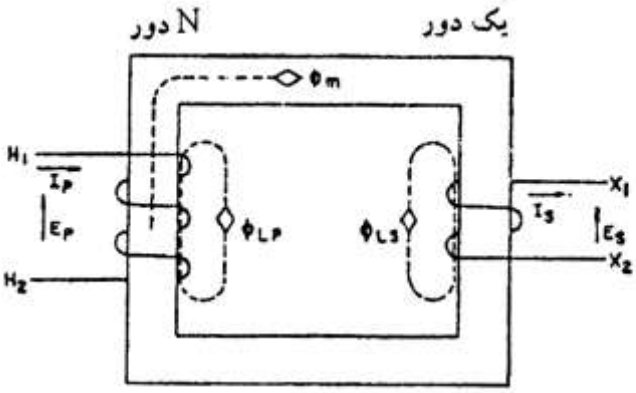
در بیشتر کاربردهای عملی، در محاسبات اتصال کوتاه و افت ولتاژ از شاخه موازی صرفنظر می گردد در عین حال نتایج محاسبات از دقت کافی برخوردار خواهد بود . در این حالت می توان

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

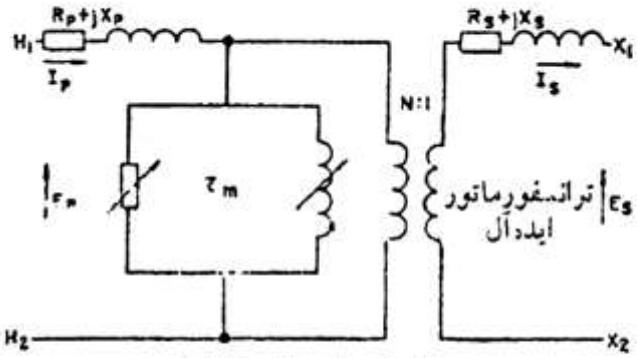
ترانسفورماتور را با یک امپدانس که با یک ترانسفورماتور ایده آل با همان نسبت دور ترانسفورماتور واقعی سری شده است نشان داد که در شکل (۱-٦- ج) آورده شده است . با استفاده از سیستم پریونیت و حذف ترانسفورماتور ایده آل، این نمایش ساده تر نیز می شود که در شکل (۱-٦- د) نشان داده شده است .

WikiPower.ir

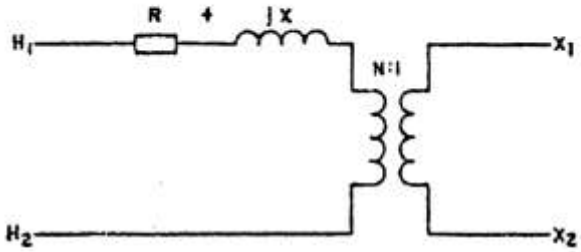
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



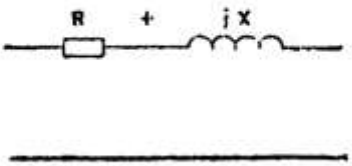
(الف) نمایش طرحواره‌ای



(ب) مدار معادل کامل



(ج) مدار معادل ساده شده با چشم‌پوشی از شاخه موازی



(د) مدار معادل ساده شده برحسب سیستم پریونیت

شکل ۱-۶ مدار معادل یک ترانسفورماتور ساده

۱-۳-۲ امپدانس های ترانسفورماتور

امپدانسی که معمولا برای یک ترانسفورماتور عنوان می گردد، همان امپدانس معادل سری نشان داده شده در شکل های (۱-۶- الف و ب) می باشد . راحت تر است که این امپدانس بر حسب درصدی از KVA پایه ترانسفورماتور بیان شود . امپدانس درصدی یک ترانسفورماتور را می توان با اتصال کوتاه کردن یک سیم پیچی و اعمال ولتاژ کافی به سیم پیچی دیگر، برای عبور جریان نامی از ترانسفورماتور، به دست آورد . ولتاژ لازم برای عبور جریان نامی که به صورت درصدی از ولتاژ نامی سیم پیچی که ولتاژ به آن اعمال می گردد بیان

می شود، از نظر عددی برابر امپدانس درصدی ترانسفورماتور است . با استفاده از فرمول ذیل می توان امپدانس درصدی را به مقدار اهمی در طرف فشار قوی یا ضعیف تبدیل نمود :

$$Z\left(\text{برحسب اهم}\right) = Z\left(\text{به درصد}\right) \times \frac{10\times(KV_{rated})^2}{KVA_{rated}} \qquad (۳-۱)$$

که در آن KVA_{rated} ، قدرت نامی ترانسفورماتور و KV_{rated} ، ولتاژ نامی سیم پیچی در طرفی از ترانسفورماتور که امپدانسی اهمی بیان می گردد می باشد .

در ترانسفورماتور های قدرت، راکتانس معمولا بسیار بزرگتر از مقاومت است و اغلب با چشم پوشی از مقاومت، امپدانس کاملا راکتیو در نظر گرفته می شود . ولی در ترانسفورماتور های توزیع بخصوص با KVA کوچک، راکتانس بسیار کوچکتر است و حتی ممکن است از مقاومت ترانسفورماتور کمتر باشد . بنابراین برای ترانسفورماتور های توزیع کوچک ، معمولا هم راکتانس و هم مقاومت در نظر گرفته می شود .

در بررسی راکتانس های نمونه ای برای ترانسفورماتور های توزیع، باید میان ترانسفورماتور های استاندارد شده و غیر استاندارد تمایز قائل شد . در مورد ترانسفورماتور های استاندارد شده EEI –

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

NEMA ، خریدار راکتانس ترانسفورماتور را مشخص نمی کند و راکتانس ذاتی مربوط به طراحی استاندارد سازنده را می پذیرد .

هر سازنده ای مقادیر امپدانس طراحی خاص خویش را منتشر می نماید . اگر خریدار، ترانسفورماتوری غیر استاندارد بخواهد، محدوده ای از امپدانس ها وجود خواهد داشت که می تواند مقدار امپدانس دلخواه خود را از آن میان انتخاب کند .

۱-۳-۳ تلفات ترانسفورماتور و جریان تحریک

عوامل دیگری افزون بر افت امپدانسی موجب تفاوت ترانسفورماتور واقعی از ترانسفورماتور ایده آل می شود . دو عاملی که از نقطه نظر کاربردی حائز اهمیت هستند، تلفات قدرت در ترانسفورماتور و جریان تحریک بی باری می باشند .

WikiPower.ir

تلفات بار (سیم پیچی)

تلفات بار یا تلفات سیم پیچی ترانسفورماتور، به صورت تلفات قدرت که موقع بارداری ترانسفورماتور وجود دارد ولی هنگام بی باری وجود ندارد، تعریف می شود . شکل (۱-۶- ب) نشان می دهد که تلفات بار تقریبا به طور کامل ناشی از مقاومت های سیم پیچی های اولیه و ثانویه (R_S و R_P) می باشد زیرا تلفات در Z_m تقریبا مستقل از جریان بار است . بنابراین تلفات بار نسبت مستقیم با مجذور جریان بار دارد .

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

محاسبه تلفات بار، سر راست است و شیوه ها و فرمول های بکار رفته بستگی به نحوه ارائه مشخصه های تلفات دارد . کارخانه های سازنده معمولا اطلاعات مربوط به تلفات را به صورت تلفات بار واتی یا تلفات بار درصدی (بر پایه KVA نامی ترانسفورماتور) با توجه به جریان بار نامی داخل سیم پیچی ها ارائه می دهند . اگر اطلاعات بدین شکل در دست باشد تلفات بار در شرایطی غیر از شرایط نامی به کمک فرمول های ذیل قابل محاسبه می باشد :

$$\text{تلفات بار} = \left(\frac{I_{load}}{\mathrm{I_{rated}}}\right)^2 \quad \text{(تلفات بار در بار نامی)} \qquad (۱-۴)$$

$$= \left(\frac{\mathrm{KVA_{load}}}{\mathrm{KVA_{rated}}} \times \frac{\mathrm{KV_{rated}}}{\mathrm{KV_{actual}}}\right)^2 \quad \text{(تلفات بار در بار نامی)} \qquad (۱-۵)$$

اگر بار ترانسفورماتور بجای آمپر برحسب KVA داده شده باشد، معادله (۱-۵) نشان دهنده ی امکان اعمال یک ترانسفورماتور به یک سیستم که ولتاژ واقعی آن اندکی با ولتاژ نامی ترانسفورماتور اختلاف دارد می باشد . واحد های معادله های (۱-۴) و (۱-۵) یکی است بدین معنی که اگر تلفات بار کامل بر حسب وات باشد، تلفات محاسبه شده نیز بر حسب وات خواهد بود . با رابطه ذیل می توان تلفات واتی را به تلفات درصدی تبدیل نمود :

$$\text{تلفات درصدی} = \frac{\text{تلفات بار واتی}}{10KVA_{\text{rated}}} \qquad (۱-۶)$$

مشخصه های تلفات نیز می تواند بر حسب مقاومت اهمی ارجاع داده شده به سمت فشار قوی یا ضعیف یا بر حسب درصد معلوم باشد . باید توجه داشت که مقاومت به درصد همانند تلفات بار در

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

بار کامل است و معادلات (۱-٤) و (۱-٥) را میتوان به صورت مستقیم به کار برد . اگر مقاومت بر حسب اهم ارجاع داده شده به یکی از سیم پیچی ها معلوم باشد، فرمول های تلفات ذیل را از شکل (۱-٦- ب) با چشم پوشی از شاخه موازی Z'_m و همچنین با توجه به رابطه $I_S=NI_P$ می توان به دست آورد :

$$\text{تلفات بار} = I_P{}^2 \ (R_P \pm N^2 R_S) \qquad (۱-۷)$$

$$= I_S{}^2 \left(R_S + {}^{R_P}/_{N^2}\right) \qquad (۱-۸)$$

که در آن، عبارت داخل پرانتز در معادله (۱-۷) مبین مقاومت ارجاع داده شده به سیم پیچی فشار قوی و عبارت داخل پرانتز در معادله (۱-۸) مبین مقاومت ارجاع داده شده به سیم پیچی فشار ضعیف است .

تلفات بار تابعی خطی از مقاومت سیم پیچی ها می باشد . با توجه به این که مقاومت سیم پیچی با دما تغییر می کند، تلفات بار نیز به همان شکل با دمای سیم پیچی ها تغییر می کند . تلفاتی که توسط کارخانه سازنده داده می شود معمولا بر پایه دمای سیم پیچی ۷٥ °C باشد، مقاومت سیم پیچی را در دمای جدید t، به کمک فرمول زیر می توان تعیین کرد :

$$\text{مقاومت در دمای t} = \frac{t+234/4}{309/4}(\text{مقاومت در } ۷٥\ ^\circ C) \qquad (۱-۹)$$

که در آن t بر حسب درجه سانتی گراد می باشد . در این صورت تلفات بار با تغییر مقاومت به صورت خطی تغییر می نماید .

جریان تحریک و تلفات بی باری

در مدار معادل ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل (۱-۶- ب) یک شاخه موازی Z_m وجود دارد . اگر یک سیم پیچی تحریک گردد و سیم پیچی (یا سیم پیچی های) دیگر مدار باز باشد این شاخه موازی مبین جریان کشیده شده از سیستم تغذیه خواهد بود . این جریان بی باری یا تحریک، شامل یک مؤلفه مغناطیس کننده و یک مؤلفه تلف است .

مؤلفه مغناطیس کننده، جریان مورد نیاز برای تولید شار در هسته می باشد به گونه ای که ولتاژ اعمالی با ولتاژ القایی در سیم پیچی برابر گردد . اگر هسته به اشباع نرفته باشد جریان مغناطیس کننده شکلی سینوسی داشته، با شار هم فاز بوده و ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ اعمالی تأخیر فاز خواهد داشت . با این وجود بنابر مصالح اقتصادی، برای حداقل شدن آهن مصرفی تا حد ممکن، ترانسفورماتور باید در حالت عادی نزدیک نقطه زانویی منحنی اشباع کار کند . در نتیجه شکل موج جریان تحریک اعوجاج خواهد داشت و علاوه بر جریان سینوسی اصلی دارای محدوده ای از هارمونیک مرتبه فرد نیز خواهد بود . راکتور موازی X_m در شکل (۱-۵- ب) به صورت متغیر نشان داده شده است که بیانگر غیر خطی بودن مشخصه مغناطیسی هسته می باشد .

تلفات بی باری یک ترانسفورماتور، مجموع تلفات آهن، تلفات دی الکتریک و تلفات مسی ناشی از جریان تحریک می باشد .

معمولا تنها تلفات آهن که متشکل از تلفات هیسترزیس و جریان گردابی است حائز اهمیت می باشد . این تلفات به صورت مقاومت متغیر Z_m در شکل (۱-۶- ب) نمایش داده شده است چرا که این تلفات دقیقا متناسب با مجذور ولتاژ اعمالی نیست .

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

جریان تحریک کلی برابر مجموع مؤلفه های مغناطیس کننده و تلفات است . نظر به این که ولتاژ نامی نزدیک نقطه زانویی منحنی اشباع می باشد، اگر ولتاژ اعمالی به میزان قابل توجهی از ولتاژ نامی فراتر رود جریان تحریک به سرعت افزایش می یابد .

بازده

بازده یک ترانسفورماتور برحسب پریونیت برابر نسبت توان خروجی به توان ورودی می باشد . تلفات کل برابر مجموع تلفات بی باری و تلفات بار است .

۱-۳-٤ جریان تحریک جریان های هجومی

اگر ولتاژ نامی دو سر اولیه یک ترانسفورماتور در حالتی که طرف ثانویه آن باز است اعمال شود، جریان تحریک از ترانسفورماتور عبور می کند . این جریان تحریک شامل دو مؤلفه، یکی مؤلفه تلفاتی و دیگر مؤلفه مغناطیس کننده است . مؤلفه تلفاتی همفاز با ولتاژ اعمالی و مقدار آن تابع تلفات بی باری ترانسفورماتور می باشد . مؤلفه مغناطیس کننده پس فاز است و ۹۰ درجه با ولتاژ اعمال شده اختلاف فاز دارد و مقدار آن تابع تعداد دور سیم پیچی اولیه و شکل منحنی اشباع ترانسفورماتور و حداکثر چگالی شار مغناطیسی طراحی ترانسفورماتور می باشد . در زیر به توضیح مختصر هر یک می پردازیم .

مؤلفه مغناطیس کننده جریان تحریک

اگر سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور باز باشد، ترانسفورماتور مانند یک راکتور با هسته ی آهنی رفتار می کند . معادله دیفرانسیل مدار شامل منبع و ترانسفورماتور به صورت زیر نوشته می شود :

$$e = R_i + n_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (۱۰-۱)$$

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

که در آن :

e = ولتاژ لحظه ای منبع

i = جریان لحظه ای مدار

R = مقاومت مؤثر سیم پیچ

Φ = شار لحظه ای در بر گیرنده سیم پیچ اولیه

n= تعداد دور سیم پیچ اولیه است .

معمولا مقاومت R و جریان تحریک i کوچک هستند . در نتیجه Ri در رابطه بالا کوچک و اثر آن روی شار ترانسفورماتور کم و قابل اغماض است . در این شرایط رابطه قبل را می توان به صورت زیر نوشت :

$$e = n_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (۱-۱۱)$$

اگر شکل موج ولتاژ تغذیه سینوسی باشد داریم :

$$e = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \lambda) \qquad (۱-۱۲)$$

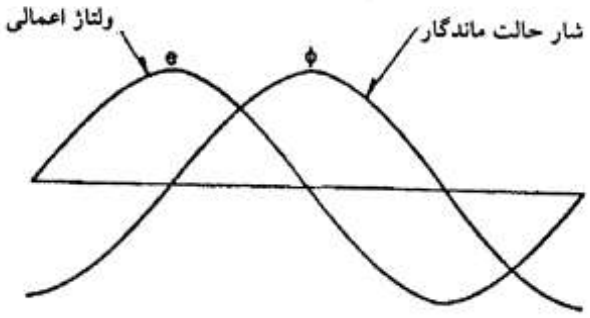
E مقدار مؤثر ولتاژ تغذیه است . با مساوی قرار دادن طرف دوم معادلات بالا و با حل معادله دیفرانسیل حاصل داریم :

$$\Phi = \frac{-\sqrt{2}E}{\omega n_1}\cos(\omega t + \lambda) + \Phi_t \qquad (۱-۱۳)$$

در رابطه بالا، عبارت اول شار حالت ماندگار و عبارت دوم شار حالت گذرا می باشد که مقدار آن تابع لحظه برقدار کردن ترانسفورماتور، مقدار حداکثر شار حالت طبیعی و شار باقیمانده در هسته در لحظه برقدار کردن ترانسفورماتور است . در شرایط ماندگار این مؤلفه برابر صفر است .

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

از معادله بالا پیداست که شار حالت ماندگار به شکل سینوسی و به اندازه ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ اعمال شده پس فاز است . منحنی ولتاژ اعمال شده و شار حالت ماندگار در شکل (۱-۷) رسم شده است .

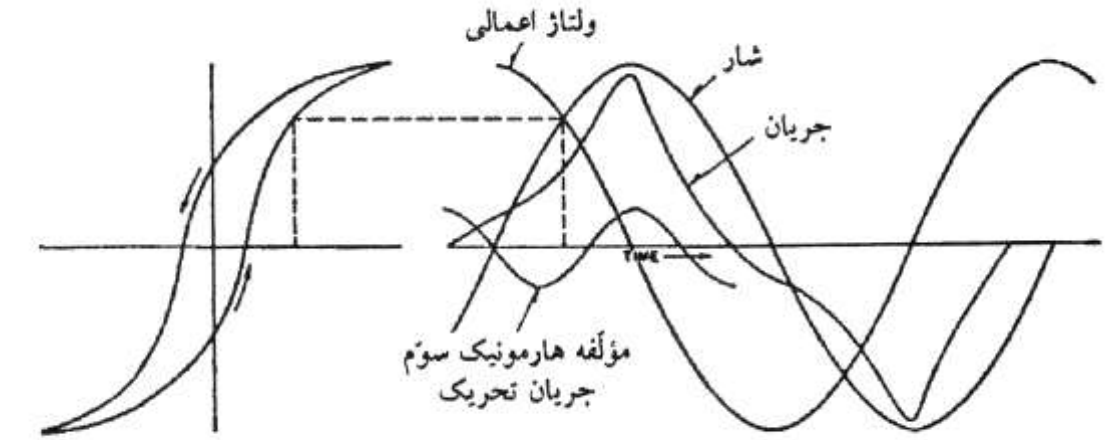


شکل ۱-۷ شکل موج ولتاژ و شار حالت ماندگار در یک ترانسفورماتور

اگر اشباع قابل توجهی در مدار مغناطیسی ترانسفورماتور وجود نداشته باشد، جریان مغناطیس کننده و شار حاصل با هم نسبت مستقیم خواهند داشت و در نتیجه شکل موج جریان مغناطیس کننده سینوسی و هم فاز با شار خواهد بود . ولی طراحی اقتصادی ترانسفورماتور های قدرت ما را به بهره برداری از ترانسفورماتور در منطقه منحنی شکل مشخصه مغناطیس وا می دارد و باعث ایجاد حالت اشباع می شود . در این شرایط منحنی جریان مغناطیسی، سینوسی نیست و شکل آن تابع منحنی مشخصه (منحنی B-H) مدار مغناطیسی ترانسفورماتور می باشد . شکل موج جریان به صورت گرافیکی مطابق شکل (۱-۸) به دست می آید . برای هر مقدار شار، مقدار جریان مربوطه از منحنی B-H به دست می آید . با توجه به روش فوق، کل منحنی جریان قابل رسم می باشد . جریان بدست آمده به این طریق،

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

فقط شامل جریان مغناطیسی نبوده بلکه شامل مؤلفه تلفات برای تأمین تلفات هیسترزیس هسته است . به هر حال این مؤلفه در مقایسه با مؤلفه مغناطیس کننده کاملا کوچک است و اثر کمی روی کل حداکثر جریان دارد .



شکل ۱–۸ محاسبه گرافیکی جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور

WikiPower.ir

مطالعه شکل (۱–۸) نشان می دهد که اگر چه شار به شکل سینوسی است، موج جریان دارای اعوجاج است .آنالیز این موج جریان نشان می دهد که دارای مؤلفه های هارمونیکی فرد قابل توجهی می باشد . هارمونیک سوم نیز در شکل (۱–۸) وجود دارد . در یک حالت نمونه، توزیع هارمونیک ها به صورت ٤٥ درصد هارمونیک سوم، ۱۵ درصد هارمونیک پنجم، ۳ درصد هارمونیک هفتم و درصد های کمتر از هارمونیک های درجات بالاتر است . مؤلفه های فوق به صورت درصدی از مقدار معادل موج سینوسی کل جریان تحریک می باشند که با تغییر ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور زیاد تغییر نمی کنند .

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

مؤلفه تلفات جریان تحریک

تلفات بی باری یک ترانسفورماتور شامل تلفات آهنی، مقدار کمی تلفات دی الکتریک و تلفات مسی در اثر جریان تحریک است . معمولا فقط تلفات آهنی یعنی تلفات هیسترزیس و فوکو اهمیت دارند . این تلفات تابع فرکانس حداکثر چگالی شار و مختصات مدار مغناطیسی است .

در عمل، تلفات آهنی از طریق آزمایش هایی در آزمایشگاه روی نمونه ای از فولاد ترانسفورماتور تعیین می شود ولی فرمول های داده شده در زیر برای نشان دادن اثر فاکتور های مختلف در این تلفات اهمیت دارند .

تلفات آهنی = تلفات هیسترزیس + تلفات فوکو (۱-۱٤)

تلفات هیسترزیس = $K_h f B^2_{max}$ (۱-۱۵)

تلفات فوکو = $K_e f^2 t^2 B^2_{max}$ (۱-۱٦)

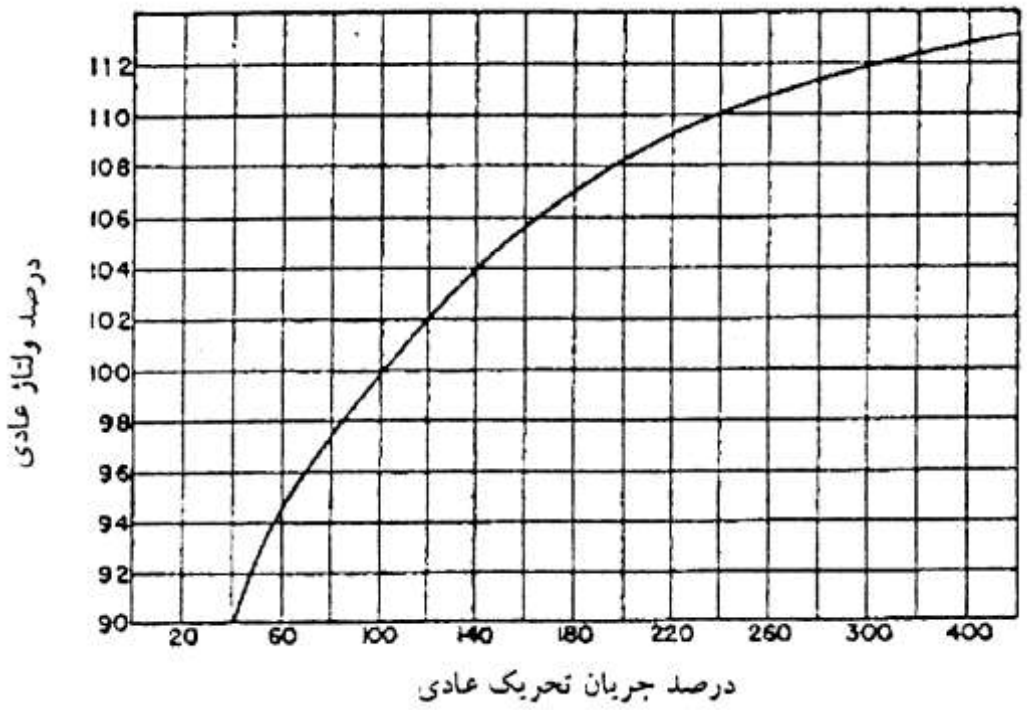
که در آن ها f فرکانس، t ضخامت لایه های هسته ترانسفورماتور و B_{max} حداکثر چگالی شار مغناطیسی است . ضرایب k_e،k_h و x فاکتورهایی تابع کیفیت فولاد بکار رفته در هسته می باشند. در هسته ترانسفورماتور های اولیه x برابر ۱/٦ و برای ترانسفورماتور های مدرن x می تواند حتی ۳ نیز باشد . تلفات آهنی در ترانسفورماتور های قدرت در فرکانس ٦۰ هرتز تقریبا ۲ وات در هر کیلو است . نسبت تلفات هیسترزیس به فوکو حدود ۳ برابر فولادهای سیلیکونی و $\frac{2}{3}$ برای فولادهای جهت دار [1] است . لازم به ذکر است که این مقادیر تقریبی می باشد و به میزان قابل توجهی با طراحی ترانسفورماتور تغییر می کند .

[1] Oriented - Steel

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

جریان تحریک کلی

همانطور که در بالا ذکر شد کل جریان تحریک یک ترانسفورماتور شامل مؤلفه های مغناطیس کننده و تلفات است . طراحی اقتصادی ترانسفورماتور ما را بر آن می دارد که در ولتاژ نامی، ترانسفورماتور را در قسمت منحنی شکل مشخصه آن مورد بهره برداری قرار دهیم و در نتیجه، بهره برداری از ترانسفورماتور بالاتر از ولتاژ نامی، جریان تحریک را به شدت افزایش می دهد . در شکل (۱-۹) جریان تحریک یک ترانسفورماتور نمونه به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی در ترمینال آن داده شده است . شکل جریان تحریک تابع طراحی ترانسفورماتور و جنس هسته است. همانطور که مشاهده می شود افزایش جریان تحریک در اثر ولتاژ اعمالی بسیار زیاد است . به طور مثال ۸ درصد افزایش ولتاژ ترمینال باعث دو برابر شدن جریان تحریک می شود .



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

شکل ۱-۹ منحنی تغییرات جریان تحریک بر حسب ولتاژ ترمینال برای یک ترانسفورماتور نمونه

جریان هجومی

وقتی که یک ترانسفورماتور به طور ناگهانی برقدار می شود یک جریان گذرا در اثر تغییر وضعیت ترانسفورماتور از حالت بی برقی به حالت کار ماندگار در آن ایجاد می شود . برای هر ترانسفورماتور این جریان گذرا بستگی به اندازه ولتاژ منبع تغذیه در لحظه برقدار شدن ترانسفورماتور، شار باقی مانده در هسته و امپدانس مدار تغذیه دارد . اغلب مقدار این جریان گذرا از جریان بار کامل تجاوز می کند و ممکن است به ۸ تا ۱۰ برابر جریان بار کامل برسد . این جریان هجومی زیاد مخصوصا به خاطر تأثیر آن روی عملکرد رله های مورد استفاده برای حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور اهمیت دارد .

WikiPower.ir

در مطالعه ی این پدیده در لحظه برقدار شدن یک ترانسفورماتور بهتر است که ابتدا شار مدار مغناطیسی ترانسفورماتور را تعیین و با استفاده از آن جریان عبوری را محاسبه کرد . این روش معمولا ترجیح داده می شود زیرا شار عبوری به شکل سینوسی است و زیاد از این شکل خارج نمی شود . در صورتیکه جریان عبوری معمولا دارای اعوجاج است .

کل شار هسته ترانسفورماتور برابر شار حالت پایدار به علاوه یک مؤلفه شار گذرا مطابق معادله (۱-۱۵) است . این رابطه برای محاسبه شار گذرا از هسته ترانسفورماتور بعد از برقدار شدن

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

ترانسفورماتور به کار می رود . نظر به این که عبارت $\frac{\sqrt{2}E}{\omega n_1}$ نمایانگر دامنه شار حالت ماندگار است، معادله (۱-۱٤) را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \lambda) + \Phi_t \qquad (۱-۱۷)$$

وقتی که $\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E}{\omega n_1}$ ، در لحظه t= ۰ داریم :

$$\Phi_0 = -\Phi_m \cos\lambda + \Phi_{t0} \qquad (۱-۱۸)$$

که در آن :

Φ_0 = شار باقیمانده در ترانسفورماتور

$\Phi_m \cos\lambda$ = شار حالت ماندگار در لحظه t=۰

Φ_{to} = شار گذرای اولیه است .

در معادله بالا زاویه λ بستگی به مقدار لحظه ای ولتاژ منبع در لحظه برقدار شدن ترانسفورماتور دارد . اگر ترانسفورماتور در لحظه صفر ولتاژ برقرار شود، λ برابر صفر است . در صورتی که اگر در لحظه برقدار شدن ترانسفورماتور در حداکثر مقدار مثبت ولتاژ منبع باشد، مقدار $\lambda = ۹۰^\circ$ است . فرض کنید یک ترانسفورماتور دارای شار باقیمانده صفر باشد و در زمان حداکثر مقدار مثبت ولتاژ منبع، برقدار گردد .

برای این وضعیت Φ_0 و $\cos\lambda$ هر دو برابر صفر و در نتیجه Φ_{to} مساوی صفر است . در نتیجه شار ترانسفورماتور در شرایط نامی شروع می شود و حالت گذرا وجود نخواهد داشت . ولی اگر ترانسفورماتور با شار باقیمانده صفر، در لحظه صفر منبع ولتاژ برقدار شود شرایط زیر وجود خواهد داشت :

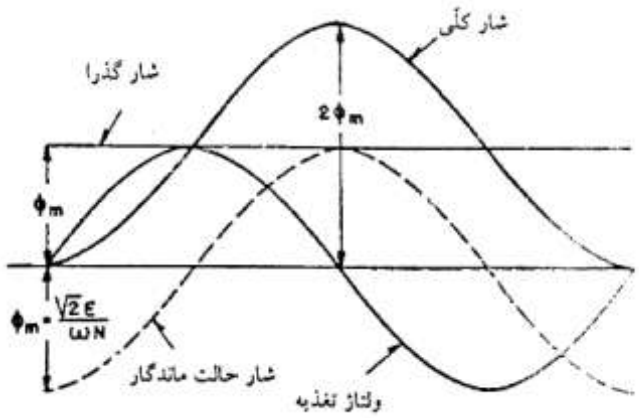
$\Phi_m = \Phi_{to}$ $\quad \Phi_0 = ۰$ $\quad -\Phi_m \cos\lambda = -\Phi_m$ $\quad \lambda = ۰$

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

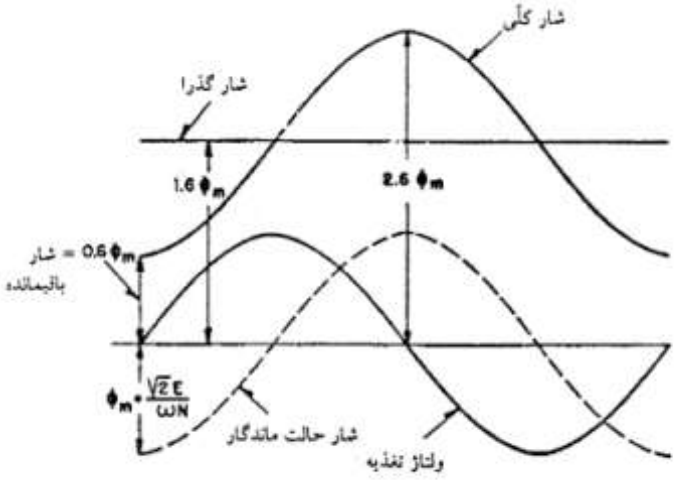
با جایگزینی در رابطه (۱-۱۹) داریم :

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t) + \Phi_m \qquad (۱-۲۰)$$

شکل موج شار نشان داده شده بوسیله رابطه (۱-۲۰) در شکل (۱-۱۰) رسم شده است . کل موج شار، شامل موج شار سینوسی شکل به علاوه یک موج شار dc است که به پیشانی با حداکثر دو برابر حداکثر شار حالت ماندگار می رسد . در این شکل فرض شده است که شار گذرا با گذشت زمان کاهش نمی یابد و مقدار پیشانی موج شار کل، کمتر از مقدار نشان داده شده است . در شکل موج های مشابه برای یک ترانسفورماتور با شار باقیمانده ۶۰ درصد در لحظه صفر ولتاژ رسم شده است .



الف) اولیه در ولتاژ صفر و شار باقیمانده صفر بسته می شود



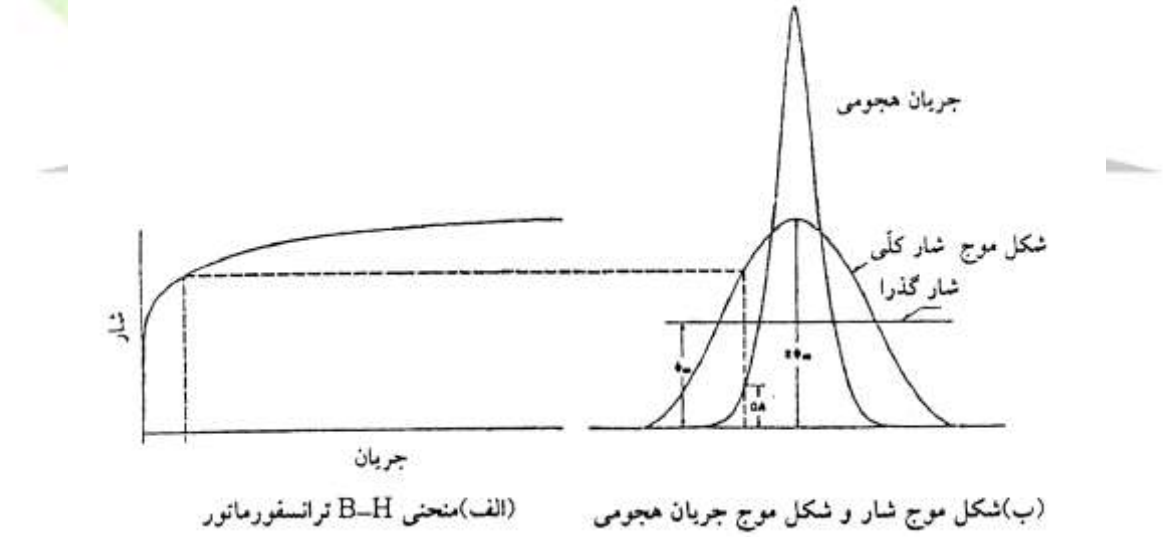
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ب) اولیه در ولتاژ صفر و شار باقیمانده مثبت ۶۰٪ بسته می شود

شکل ۱-۱۰ شار ترانسفورماتور در شرایط گذرا

محاسبه جریان هجومی

بعد از تعیین تغییرات شار بوسیله روش های فوق، شکل موج جریان به صورت گرافیکی مطابق شکل (۱-۱۱) به دست می آید . در حالت نشان داده شده در شکل (۱-۱۱) فرض بر این است که ترانسفورماتور دارای شار باقیمانده صفر بوده در لحظه صفر منبع ولتاژ برقدار می شود .



شکل ۱-۱۱ روش گرافیکی محاسبه جریان عمومی

در نتیجه شار دو برابر فلوی پیشانی در حالت عادی است . برای هر شار، جریان مربوطه از منحنی B-H ترانسفورماتور به دست می آید . اگر چه شار حداکثر فقط دو برابر مقدار زمانی آن است، جریان به مقداری برابر چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور می رسد . این مقدار زیاد جریان به علت درجه بالای اشباع مدار مغناطیسی ترانسفورماتور می باشد .

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

در بحث فوق به سادگی از تلفات مسأله صرف نظر شده است . در یک ترانسفورماتور واقعی، تلفات اهمیت زیادی دارد زیرا جریان هجومی حداکثر و جریان تحریک را کاهش می دهد . تلفاتی که اهمیت دارند تلفات مقاومتی مدار تغذیه و تلفات مقاومتی و هسته در ترانسفورماتور ها است .

شکل (۱-۱۲) اسیلوگرام یک جریان تحریک هجومی نمونه برای یک ترانسفورماتور تک فاز که در لحظه صفر ولتاژ، برقدار شده است را نشان می دهد . جریان گذرا دارای یک قسمت کاهش سریع در طول چند سیکل اول و کاهش آهسته تر بعد از آن است . ضریب میرایی $\frac{R}{L}$ در این مدار ثابت نیست زیرا اندوکتانس ترانسفورماتور با اشباع تغییر می کند . در طول چند پیک اول جریان، درجه اشباع هسته بالا است و مقدار L را کم می کند . اندوکتانس ترانسفورماتور با کاهش اشباع افزایش می یابد و ضریب میرایی با کاهش جریان کوچکتر می شود .

شکل ۱-۱۲ اسیلو گراف یک جریان تحریک هجومی نمونه برای یک ترانسفورماتور تکفاز

ارزیابی جریان های هجومی

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

محاسبه جریان هجومی در یک ترانسفورماتور قدرت بستگی به اطلاعات کامل طراحی ترانسفورماتور دارد که ممکن است تمام آنها موجود نباشد . بدین جهت باید به دستوالعمل سازندگان ترانسفورماتور مراجعه نمود . مقدار جریان هجومی یک ترانسفورماتور تک فاز در فرکانس ۶۰ سیکل مطابق جدول (۱-۲) است . مقادیر داده شده برای ترانسفورماتور برقدار شده از طرف فشار قوی در لحظه صفر ولتاژ منبع است . برقدار کردن یک ترانسفورماتور هسته ای شکل از طرف فشار ضعیف می تواند جریان هجومی تا دو برابر مقادیر داده شده درجدول (۱-۲) ایجاد کند . جریان هجومی بر حسب پریونیت در یک ترانسفورماتور با هسته زرهی شکل تقریبا از هر دو طرف مساوی است . مقادیر جریان های هجومی در جدول (۱-۲) بر مبنای برقدار کردن ترانسفورماتور از یک منبع با راکتانس صفر است . اگر منبع دارای راکتانس X باشد جریان هجومی از رابطه زیر به دست می آید :

$$I = \frac{I_0}{1+I_0 X} \qquad (۱-۲۱)$$

که در آن :

I_0 = جریان هجومی با صرفنظر از راکتانس منبع بر مبنای جریان نامی ترانسفورماتور

X = راکتانس مؤثر منبع بر مبنای قدرت ترانسفورماتور

جدول ۱-۲ جریان های تقریبی هجومی ترانسفورماتورهای قدرت تغذیه شده از طرف فشار قوی در فرکانس ۶۰ هرتز

قدرت نامی ترانسفورماتور (KVA)	هسته ای شکل	هسته زرهی شکل
۲۰۰۰	۵-۸	۲/۵-۵

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

۱۰۰۰۰	۷-٤	۵-۲/۵
۲۰۰۰۰		٤-۲

۱-۳-۵ تنظیم ولتاژ

تنظیم ولتاژ بار کامل یک ترانسفورماتور، میزان تغییر ولتاژ ثانویه به صورت درصدی از ولتاژ نامی ثانویه می باشد وقتی که خروجی KVA نامی در یک ضریب قدرت خاص به صفر کاهش داده شود و ولتاژ ترمینال اولیه ثابت باقی بماند . به کمک فرمول زیر، تنظیم ولتاژ درصدی را می توان در هر بار ضریب قدرت محاسبه کرد :

$$\%\text{تنظیم ولتاژ} = \left[pr + qx + \frac{(px-qr)^2}{200}\right] \times \frac{\text{جریان نامی}}{\text{جریان}} \qquad (۱-۲۲)$$

که در آن :

r = مقاومت به درصد = $\frac{\text{تلفات بار نامی به وات}}{10 \times KVA\text{نامی}}$

Z = امپدانس به درصد

X = راکتانس به درصد = $\sqrt{z^2 - r^2}$

θ = زاویه ضریب قدرت بار (وقتی جریان نسبت به ولتاژ پس فاز مثبت است)

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

۱-٤ اتصالات و معادل های ترانسفورماتور تک فاز

از نقطه نظر کاربردی، مهمترین مشخصه هایی که عملکرد یک ترانسفورماتور تک فاز را توصیف می کنند، تنظیم ولتاژ تحت شرایط باری مختلف و جریان های اتصال کوتاه که در طول شرایط خطا جاری می شوند هستند . تعیین این مشخصه ها با استفاده از کمیت هایی نظیر شار های نشتی و متقابل، وقتی که ترانسفورماتور به یک سیستم قدرت پیچیده متصل است، بسیار دشوار می باشد . بنابراین، نمایش یک ترانسفورماتور بوسیله یک مدار معادل متشکل از امپدانس های ساده و ترانسفورماتور های ایده آل برای تعیین عملکرد ترانسفورماتور، بهترین راه است .

برای محاسبه جریان های اتصال کوتاه و تنظیم ولتاژ، معمولا می توان از شاخه مغناطیس کننده موازی در شکل (۱-٦) صرف نظر کرد . در نتیجه در تمامی مدار معادل های ذیل از شاخه مغناطیس کننده صرفنظر می شود .

۱-٤-۱ ترانسفورماتور دو سیم پیچه ساده

ساده ترین شکل ترانسفورماتور تک فاز، ترانسفورماتور دو سیم پیچه ساده با یک اولیه دو سیمه و ثانویه دو سیمه مطابق شکل (۱-۱۳) می باشد . این نوع ترانسفورماتور را می توان توسط مدار معادل نشان داده شده در شکل (۱-۱۳- الف) نمایش داد . امپدانس Z_{HX} بر حسب اهم می باشد و از دو سر سیم پیچی H در حالی که سیم پیچی X اتصال کوتاه شده است اندازه گیری می شود. نسبت دورهای N ترانسفورماتور ایده آل همانند نسبت دورهای ترانسفورماتور واقعی می باشد . در صورت نیاز با استفاده از رابطه ذیل می توان امپدانس معادل ترانسفورماتور را به جای سرهای H از سرهای X به دست آورد :

$$Z_{XH} = \frac{1}{N^2} \quad Z_{HX} \qquad (۱-۲۳)$$

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

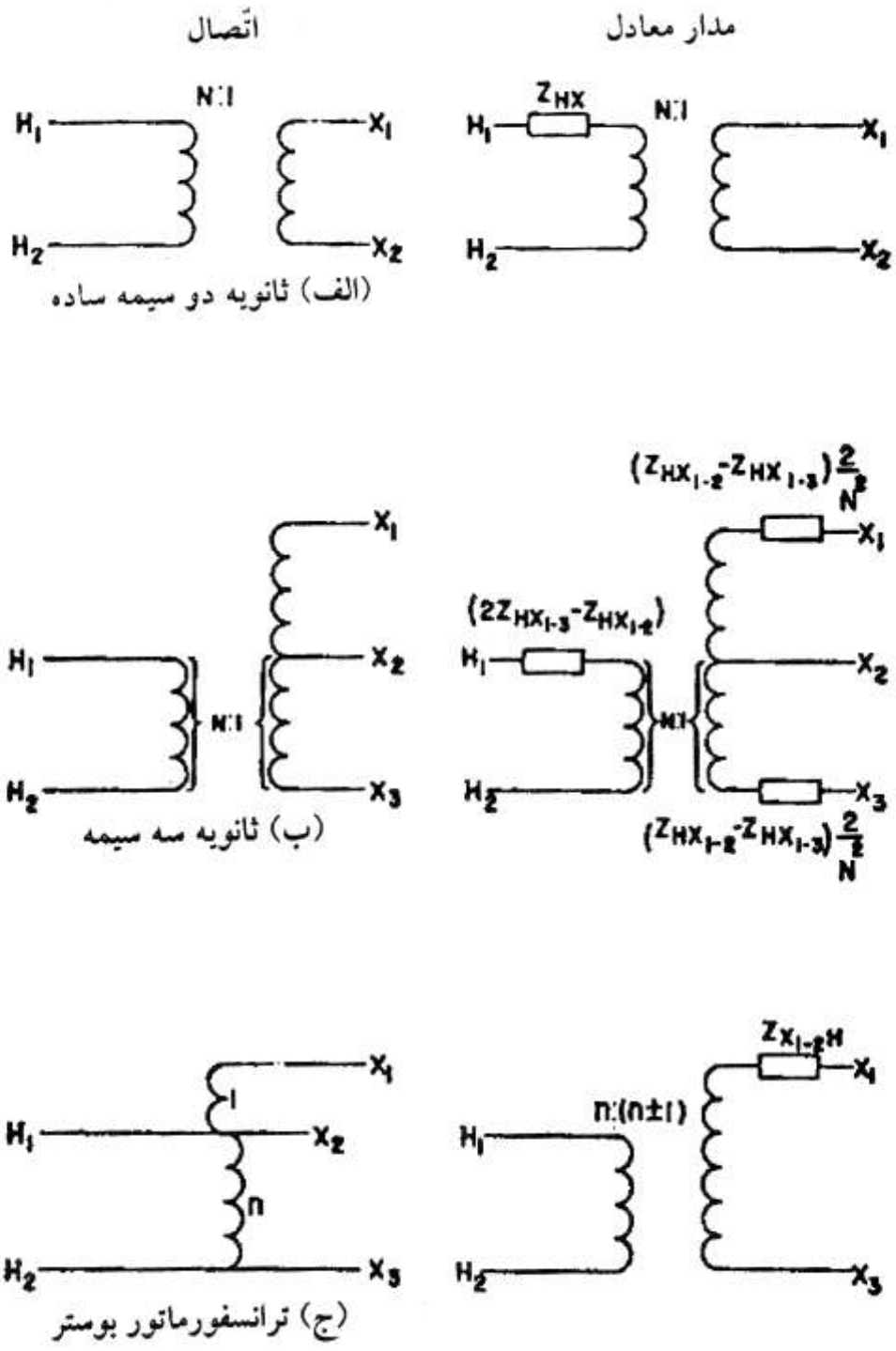
امپدانس Z_{XH} امپدانس بر حسب اهم از دو سر سیم پیچی X می باشد، در حالی که سیم پیچی H اتصال کوتاه شده است .

۱-٤-۲ ترانسفورماتور با چند سیم پیچ ثانویه

یکی از انواع متداول ترانسفورماتور توزیع، ترانسفورماتوری است که دارای یک سیم پیچی اولیه و دو سیم پیچی ثانویه که می توانند به صورت سری یا موازی متصل گردند می باشد . اتصال موازی را می توان با مدار معادل شکل (۱-۱۳- الف) نمایش داد که در آن نسبت دورهای N برابر نسبت دورهای اولیه به نصف دورهای سیم پیچی ثانویه است . امپدانس Z_{HX} امپدانس از دو سر سیم پیچی H می باشد در حالی که تمام سرهای ثانویه به یکدیگر اتصال کوتاه شده اند .

WikiPower.ir

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



شکل ۱-۱۳ مدار معادل های مختلف برای یک ترانسفورماتور تک فاز با اتصالات مختلف

اگر برای عملکرد دو سیمه، دو نیمه سیم پیچی ثانویه با هم سری شوند مدار معادل شکل (۱-۱۳- الف) را برای این حالت نیز می توان به کار برد . مقدار Z_{HX} در این اتصال با حالت موازی یکی است . اما نسبت دورهای ترانسفورماتور ایده آل نصف نسبت دورهای اتصال موازی می باشد . اگر امپدانس ترانسفورماتور از سرهای H به سرهای X منتقل شود، امپدانس حالت اتصال سری چهار برابر امپدانس بکار رفته در اتصال موازی خواهد بود .

۱-٤-۳ ثانویه های سه سیمه

بسیاری از ترانسفورماتور های توزیع برای تغذیه در حالت سه سیمه، سیم پیچی های ثانویه با تپ میانی یا سیم پیچی های ثانویه سری – موازی دارند که برای اتصال سری به منظور تغذیه سه سیمه مناسبند . نمودار این نوع ترانسفورماتور در شکل (۱-۱۳- ب) نشان داده شده است . معمولا و البته نه لزوما، هادی تپ میانی مستقیما زمین می شود .

مدار معادل این نوع اتصال تا اندازه ای پیچیده است زیرا بارهای روی دو نیمه سیم پیچی ثانویه لزوما برابر نیستند . امپدانس مربوط به سیم پیچی H نسبت به نصف سیم پیچی X با امپدانس مربوط به سیم پیچی H نسبت به کل سیم پیچی X متفاوت است . در مدار معادل لازم است که یک امپدانس جزئی در سرهای اولیه و یک امپدانس دیگر در سرهای X_1 و X_3 ظاهر گردد .

بیان امپدانس یک ترانسفورماتور با ثانویه سه سیمه بر حسب امپدانس های دیده شده از سیم پیچی H ، ابتدا با اتصال کوتاه نمودن نصف ثانویه و سپس با اتصال کوتاه نمودن کل ثانویه، بسیار ساده تر است . این دو امپدانس بترتیب Z_{HX1-3} و Z_{HX1-2} باید توسط کارخانه سازنده مشخص شوند . به طور کلی ، مقدار Z_{HX1-3} از روی پلاک ترانسفورماتور یا اطلاعات منتشر شده به دست می آید ولی

مقدار Z_{HX1-2} به سهولت به دست نمی آید . در صورت نبود داده های دقیقتر برای ترانسفورماتور های توزیع، از تقریب ذیل می توان استفاده کرد . اگر Z_{HX1-3} به صورت (r_t+jx_t) تعریف شود :

$$Z_{HX1-2} = 1/5r_t+j1/2x_t \qquad (۲٤-۱)$$

ترانسفورماتور بوستر[1]

ترانسفورماتور بوستر ولتاژ طرف اولیه سیستم توزیع را ثابت نگاه می دارد . این کار با اتصال سیم پیچی ثانویه به صورت سری با سیم پیچی اولیه مطابق شکل (۱-۱۳- پ) میسر می شود . سیم پیچی ثانویه به گونه ای عایق بندی شده است که BIL آن همانند سیم پیچی اولیه است .

ترانسفورماتور بوستر دقیقا شبیه اتو ترانسفورماتور عمل می کند و مدار معادلی همچون اتو ترانسفورماتور دارد . بسته به نوع تعریف، این ترانسفورماتور می تواند دارای ثانویه ای متشکل از سیم پیچی میان X_1 و X_2 یا میان X_1 و X_3 باشد .

بهترین روش برای تعیین امپدانس معادل، تعیین Z_{X1-2H} می باشد که برابر امپدانس اهمی دیده شده از ترمینال های X_1 و X_2 است در حالی که ترمینال های H_1 و H_2 اتصال کوتاه شده اند . همچنانکه از شکل (۱-۱۳- ج) پیدا است، این امپدانس در سرهای X یک ترانسفورماتور ایده آل با نسبت دور $n:(n\pm1)$ که در آن n نسبت دورهای میان H_1 و H_2 به دورهای میان X_1 و X_2 می باشد قرار داده شده است . در عبارت $(n\pm1)$، علامت مثبت هنگامی به کار می رود که ولتاژ مدار باز بین X_1 و X_3 بیشتر از ولتاژ بین H_1 و H_2 گردد، در غیر این صورت علامت منفی به کار می رود .

[1] Booster transformer

مقدار باری که یک ترانسفورماتور بوستر می تواند تحمل کند به میزان قابل توجهی بزرگتر از KVA واقعی سیم پیچی های اولیه و ثانویه می باشد . اگر KVA قدرت سیم پیچی اولیه یا ثانویه باشد، KVA قدرت ترانسفورماتور بوستر برابر خواهد بود با :

$$KVA = KVA_1 (n \pm 1) \qquad (۲۶-۱)$$

که در آن علامت مثبت موقعی انتخاب می شود که ثانویه به گونه ای متصل شده است که ولتاژ آن به ولتاژ اولیه اضافه می شود و علامت منفی هنگامی انتخاب می شود که ثانویه به صورتی متصل شده است که ولتاژ آن از ولتاژ اولیه کم می شود .

تعیین مدار معادل برحسب پریونیت، گاهی اوقات به خاطر متفاوت بودن پایه KVA گذرنده با مقادیر نامی سیم پیچی ها و شاید تعبیر نادرست از واژه ی "ثانویه"، باعث سردرگمی می شود . برای جلوگیری از این سردرگمی معمولا ابتدا مدار معادل اهمی مطابق شکل (۶-۱۳- ج) به دست آورده می شود . پس از انجام این کار می توان هر ولتاژ و KVA مبنای دلخواه مناسبی را برگزید و امپدانس Z_{X1-2H} را بر حسب پریونیت این مبنا بیان کرد . فرمول های کوتاه نیز برای تبدیل مستقیم امپدانس های سیم پیچی پریونیت به مدار معادل پریونیت وجود دارد . با این حال، تا وقتی که تجربه کافی در استفاده از این فرمول ها به دست نیامده است بهتر است از شیوه معمولی تعیین مدار معادل اهمی که پیچیدگی کمتری دارد استفاده شود .

۱-۵ اتصالات و مدار معادل های بانک های سه فاز متعادل

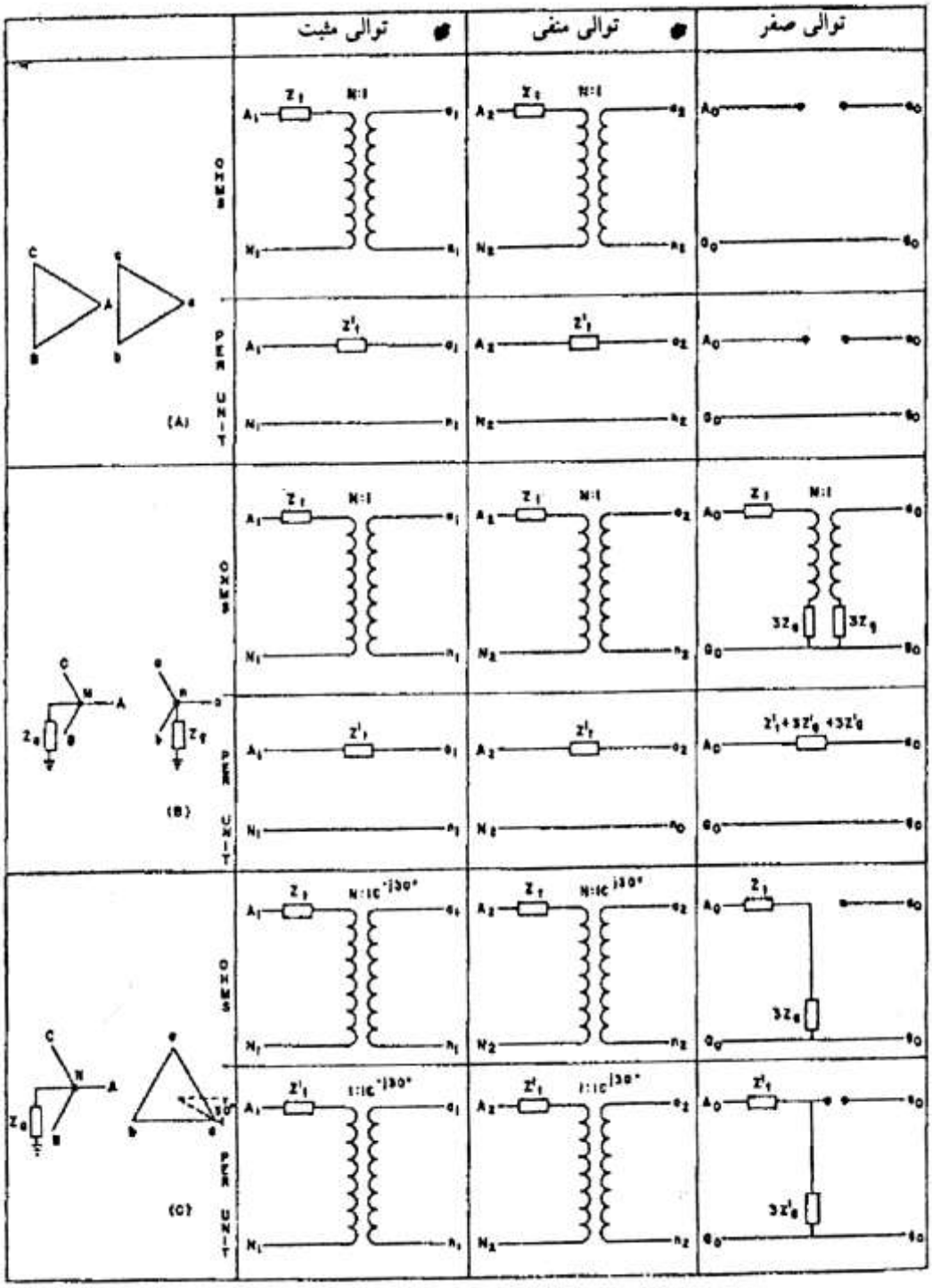
یک بانک ترانسفورماتور ی متعادل، متشکل از یک ترانسفورماتور سه فاز یا سه ترانسفورماتور تک فاز مشابه می باشد که به منبع سه فاز متصل شده اند . سیم پیچی ها هم به صورت مثلث (خط به خط) و هم به صورت ستاره (از خط به نقطه خنثی) می توانند متصل شوند . سه نوع اتصال متعادل (

مثلث – مثلث، ستاره – ستاره و ستاره – مثلث) در شکل (۱-۱٤) نشان داده شده اند . این ترانسفورماتور ها می توانند بارهای سه فاز و بارهای تک فاز متصل شده بین خط و نقطه خنثی را در صورتی که نقطه خنثی زیاد جابجا نشود، تغذیه کنند .

امپدانس ترانسفورماتور تک فاز یا سه فاز عموما به صورت درصد یا پریونیت بر پایه KVA نامی ترانسفورماتور داده می شود . برای تشکیل مدار معادل های شکل (۱-۱٤)، امپدانس درصدی ترانسفورماتور سه فاز یا ترانسفورماتور تک فاز یک بانک سه فاز متعادل را می توان مستقیما در مدار معادل های پریونیت به کار برد . برای نمونه اگر شکل (۱-۱٤- الف) مربوط به ترانسفورماتور سه فاز با امپدانس درصدی برابر ۵ درصد باشد، مقدار Z'_t در معادل توالی مثبت پریونیتی ۰/۰۵ پریونیت خواهد بود . اگر سیم پیچی ها مطابق شکل (۱-۱٤- ب) به صورت ستاره متصل شده باشند، مقدار Z'_t باز هم ۰/۰۵ پریونیت خواهد بود . به کمک معادله (۱-۳) این امپدانس های درصدی را می توان به اهم تبدیل کرد که در آن KV,KV_{rated} خط به خط نامی بانک ترانسفورماتوری و KVA,KVA_{rated} سه فاز نامی بانک می باشد .

WikiPower.ir

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



شکل ۱-۱٤ مدار های معادل برای اتصالات متعادل ترانسفورماتورهای سه فاز

N : نسبت ولتاژهای E_{BA}/E_{ba} با ولتاژ متعادل اعمالی Z_t : امپدانس ترانسفورماتور بر حسب اهم

Z'_t : امپدانس ترانسفورماتور بر حسب پریونیت * : برای اتصالات ستاره- مثلث زاویه فاز A ، ۳۰ درجه از فاز a جلوتر است

در شکل (۱-۱٤) که در آن مدار معادل ها بر حسب اهم بیان شده اند، ولتاژهایی که باید به کار روند ولتاژهای خط به نقطه خنثی سیستم می باشند . جریان ها به جای جریان های مثلث، جریان های فاز هستند و امپدانس ها آن هایی هستند که بین سرهای فازها ظاهر می شوند (به جای امپدانس داخل مثلث) . اگر ترانسفورماتور های تک فاز به صورت مثلث متصل شوند در صورتی که امپدانس های اهمی ترانسفورماتور معلوم باشد (به جای امپدانس درصدی) پیش از وارد کردن Z_t در مدار معادل ها، امپدانس اهمی باید بر ۳ تقسیم گردد .

کمیت N برابر نسبت ولتاژهای خط به خط اولیه به ثانویه می باشد در حالی که باری روی ترانسفورماتور وجود ندارد . در ترانسفورماتور های ستاره – مثلث این نسبت N به اندازه $\sqrt{3}$ برابر با نسبت سیم پیچی تفاوت دارد .

مدار معادل های شکل (۱-۱٤) بر حسب مدار معادل های توالی مثبت، منفی و صفر داده شده اند . کاربرد معادل های توالی و تعیین جریان های اتصال کوتاه و تنظیم ولتاژ در مراجع انتهای فصل تشریح شده است .

۱-۵-۱ امپدانس توالی صفر بانک های سه فاز

معمولا امپدانس معادل یک ترانسفورماتور، با اتصال کوتاه نمودن یکی از سیم پیچی ها و اندازه گیری امپدانس از ترمینال های سیم پیچی دیگر تعیین می شود . برای تعیین امپدانس توالی مثبت (که برابر امپدانس توالی منفی می باشد)، ولتاژ های اعمالی برای اندازه گیری امپدانس، ولتاژ های توالی مثبت متعادل هستند . برای تعیین امپدانس معادل توالی صفر، سه ترمینال خط به یکدیگر متصل می شود

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

و یک ولتاژ تک فاز بین ترمینال ها و زمین اعمال می گردد . امپدانس بدست آمده برای توالی مثبت یا صفر، تقریبا معادل مجموع امپدانس های نشتی اولیه و ثانویه موازی شده با امپدانس تحریک می باشد . برای ولتاژ های اعمالی توالی مثبت، امپدانس تحریک در مقایسه با امپدانس نشتی بسیار بزرگ است و معمولا در تعیین مدار معادل توالی مثبت از شاخه امپدانس تحریک صرفنظر می شود . با این حال، هنگامی که یک ولتاژ توالی صفر (یا تک فاز) به ترمینال های یک سیم پیچی با اتصال ستاره اعمال می گردد، امپدانس مغناطیس کننده لزوما در مقایسه با امپدانس نشتی توالی صفر کوچک و قابل اغماض نیست . دلیل این امر در شکل(۱-۱۵)تشریح شده است.

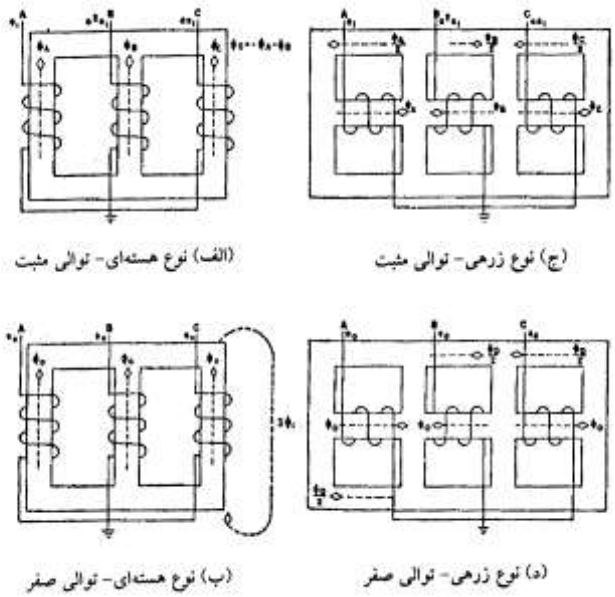
شکل (۱-۱۵- الف و ب) مسیرهای شار در یک ترانسفورماتور نوع هسته ای [1] (یا سه بازو) را نشان می دهد که ولتاژ های اعمالی می توانند توالی مثبت یا توالی صفر باشند . برای ولتاژ های توالی مثبت، شار تولید شده در بازوهای فاز A و فاز B مسیر برگشت ساده ای از طریق بازوی فاز C می یابند زیرا شار در بازوی فاز C نسبت به شار های تولید شده در بازوهای فاز های A و B منفی است .

با این وجود، وقتی ولتاژ های توالی صفر اعمال می شوند شار های تولید شده در سه بازو هم از نظر اندازه و هم از نظر فاز با هم برابرند (به جای این که ۱۲۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند)، بنابراین این شار Φ_0 ۳باید مسیر خود را از هوا، تانک ترانسفورماتور و دیگر قسمت های محافظ ببندد . این مسیر مغناطیسی رلوکتانس بالایی دارد و باعث می شود شاخه امپدانس تحریک بر خلاف حالت ولتاژ های توالی مثبت، بسیار کوچک باشد . برای ترانسفورماتور های توزیع سه فاز کوچک، امپدانس تحریک توالی صفر بین ۱۵ تا ۳۰ درصد است . برای ترانسفورماتور های بزرگتر، این امپدانس حدود ۳۰ تا ۷۵ در صد می باشد . در نتیجه برای

[1] Core type

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

ترانسفورماتور های سه فاز نوع هسته ای برای انواع معینی از اتصالات سیم پیچی، امپدانس تحریک توالی باید صفر در نظر گرفته شود .



شکل ۱-۱۵ مسیر شار های مؤلفه های مثبت و صفر برای ترانسفورماتور های نوع هسته ای و زرهی

شکل (۱-۱۵- ج) مسیر های شار توالی صفر را برای یک ترانسفورماتور سه فاز با ساختار زرهی شکل [1] نشان می دهد . بازوهای خارجی هسته مسیری برای شار توالی صفر فراهم می کنند . در ساختار زرهی شکل، امپدانس تحریک برای ولتاژ های توالی صفر تفاوت چندانی با امپدانس های تحریک ولتاژ های توالی مثبت ندارد . لازم به ذکر است که ساختار زرهی در ترانسفورماتور های توزیع به کار نمی رود با این حال بعضی ترانسفورماتور ها دارای سه هسته جداگانه داخل یک تانک می باشند .

۱-۵-۲ اتصال مثلث – مثلث

[1] Shell type

شکل (۱-۱٤- الف) اتصال مثلث – مثلث را نشان می دهد . مدار معادل های توالی مثبت، منفی و صفر بر حسب اهم و پریونیت آورده شده اند . معادل های اهمی از ترانسفورماتور های ایزوله ایده آل با نسبت دور N که برابر نسبت ولتاژ مدار باز از A به B به ولتاژ از a به b می باشد بهره می برند . اگر ترمینال ها به گونه ای شماره گذاری شده باشند که ولتاژ ترمینال a هم فاز با ولتاژ ترمینال A باشد، ترانسفورماتور ایزوله انتقال فاز نخواهدداشت . اگر ترمینالها به گونه ای نام گذاری شده باشند که فاز a به اندازه ۱۲۰ درجه یا ۲٤۰ درجه جلوتر از فاز A باشد، ترانسفورماتور های ایزوله چنان انتقال فازی خواهند داشت که نسبت فازوری در مدار توالی مثبت به ترتیب برابر $N:e^{j120}$ یا $N:e^{j240}$ خواهد بود . انتقال فاز ترانسفورماتور های ایزوله در مدار معادل توالی منفی مزدوج انتقال فاز توالی مثبت می باشد یعنی ۱۲۰- یا ۲٤۰- . در توالی صفر نیازی به انتقال فاز نیست .

۱-۵-۳ اتصال ستاره – ستاره

شکل (۱-۱٤- ب) اتصال ستاره – ستاره را که در آن هر یک از نقاط خنثی از طریق یک امپدانس زمین شده است نشان می دهد . در ترانسفورماتور های ایزوله نشان داده شده ، فاز a با فاز A هم فاز می باشند . اگر ترمینال ها به گونه ای شده باشند که فاز a، ۱۲۰ یا ۲٤۰ درجه از فاز A جلوتر باشد ترانسفورماتور های ایزوله در مدار توالی مثبت به ترتیب دارای نسبت فازوری $N:1e^{j120}$ یا $N:1e^{j240}$ خواهند بود . انتقال فاز ترانسفورماتور های ایزوله در مدار معادل توالی منفی، مزدوج انتقال فاز توالی مثبت می باشد یعنی ۱۲۰- یا ۲٤۰- . در مدار توالی صفر نیازی به انتقال فاز نیست .

نمایش امپدانس سری ساده در مدار معادل توالی صفر نشان می دهد که بجز در مورد جریان مغناطیس کننده، هر جریان توالی صفری که وارد یک سیم پیچی می شود باید مسیری برای عبور در مدار توالی صفر به سوی سیم پیچی دیگر بیابد . اتصال ستاره – ستاره زمین شده، جریان توالی صفر را

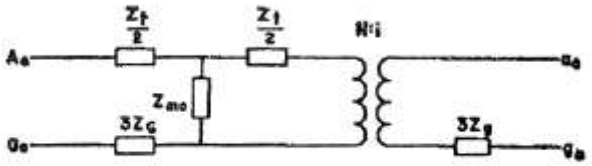
عبور نمی دهد مگر این که هر دو مدار خارجی متصل شده منابعی از جریان زمین داشته باشند . اگر نقاط خنثی به صورت مستقیم زمین شده باشند یا زمین نشده باشند، این مسأله را به ترتیب با صفر یا بی نهایت قرار دادن امپدانس زمین مربوطه در مدار معادل می توان نشان داد .

امپدانس ترانسفورماتوری معادل بکار رفته در مدار معادل های توالی صفر و توالی مثبت در اتصال ستاره – ستاره یکی هستند . چنانکه پیشتر توضیح داده شد این موضوع برای بانک متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز یا ترانسفورماتور زرهی شکل مطرح است . اگر ترانسفورماتور هسته ای شکل باشد و بخواهیم شاخه تحریک را اضافه کنیم ، باید مطابق شکل (۱-۱۶- الف) عمل نماییم . راکتانس نشتی ترانسفورماتور به دو قسمت تقسیم می شود با این فرض که نیمی از افت نشتی درصدی، در اولیه و نیم دیگر در ثانویه رخ می دهد. تقسیم امپدانس نشتی به طور مساوی میان سیم پیچی های اولیه و ثانویه تقریب زیادی دارد ولی این مسأله خطای خیلی زیادی را موجب نمی گردد زیرا امپدانس مغناطیس کننده بسیار بزرگتر از راکتانس نشتی است . در این صورت شاخه تحریک، میان امپدانس های نشتی و نقطه خنثی ترانسفورماتور متصل می شود .

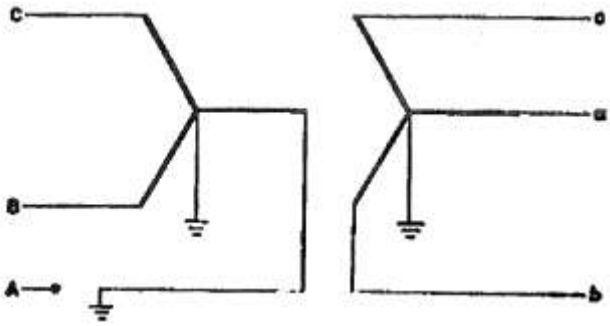
در ترانسفورماتور های سه فاز ستاره – ستاره زمین شده با ساختار هسته ای تحت شرایط خطای نامعمول خاص، تانک به شدت گرم می شود و در نتیجه ولتاژ توالی صفری به صورت دائم روی سیم پیچی می افتد . برای مثال ، شکل (۱-۱۶- ب) را در نظر بگیرید که درآن یکی از سیم های اولیه قطع شده و به زمین افتاده است . قطع شدن سیم اولیه مانع از جاری شدن جریان در سیم پیچی فاز A می گردد . اتصال کوتاه سیم پیچی فاز A جریان های خیلی بزرگی را به وجود نمی آورد بنابراین هیچ یک از وسایل حفاظتی اتوماتیک همچون تجهیزات باز – بست یا فیوز ها، خطای اولیه را قطع نخواهند کرد . با این حال، سیم پیچی اتصال کوتاه شده به شکلی مؤثر از عبور شار از بازوی هسته مربوط به فاز A جلوگیری می نماید و شار بازوهای BوC همانطور که در شکل (۱-۱۶- ج) نشان داده شده است

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

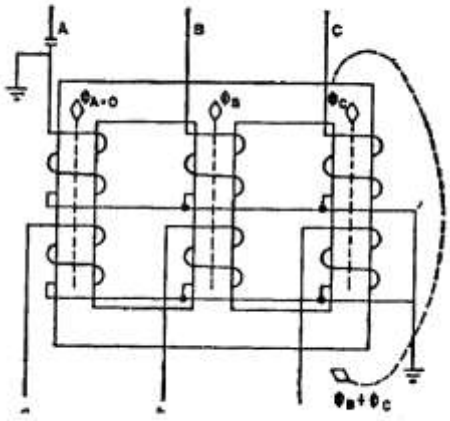
مجبورند مسیر خود را از طریق هوا یا تانک ترانسفورماتور ببیند . در چنین شرایطی ممکن است تانک به شدت گرم شود و ترانسفورماتور آسیب ببیند . شرایط خطای بسیار خاص دیگری نیز علاوه بر مورد تشریح شده می توانند این پدیده ی گرم شدن تانک را موجب شوند ، حالتی که شار توالی صفر به صورت دائمی وجود دارد بی آنکه جریان هایی با دامنه خطا جاری شوند . برای رهایی از چنین معضلی می توان از وسایل حفاظتی حساس و اتوماتیک استفاده نمود .



(الف) معادل توالی صفر با در نظر گرفتن شاخه مغناطیس کننده



(ب) اتّصال ستاره-ستاره با سیم تغذیه بریده و زمین شده



(ج) مسیرهای شار برای اتصال نشان داده شده در شکل (ب)

شکل ۱-۱۶ نمایش گرم شدن تانک ترانسفورماتور در اثر یک شرایط خطای خاص در یک ترانسفورماتور هسته ای شکل

۱-۵-٤ اتصال ستاره – مثلث

اتصال ستاره – مثلث و مدار معادل های آن در شکل (۱-۱۳- ج) نشان داده شده است . در این اتصال همواره جابجایی فاز میان ترمینال های اولیه و ثانویه وجود دارد . اتصال استاندارد NEMA و ASA که امروزه کاربرد بیشتری دارد، این اتصال می باشد که در آن ولتاژ ترمینال فشار قوی به اندازه ۳۰ درجه از ولتاژ ترمینال به نقطه خنثی ترمینال فشار ضعیف با نام گذاری مشابه، جلوتر است . البته سیستم های بسیاری نیز در حال حاضر از اتصالاتی غیر از اتصال ۳۰ درجه استفاده می نمایند .

این انتقال فاز با استفاده از ترانسفورماتور های ایزوله انتقال فاز، در مدار های معادل در نظر گرفته می شود . انتقال فاز در توالی مثبت برابر زاویه میان بردار ولتاژ از A به نقطه خنثی و بردار ولتاژ از a به نقطه خنثی است . انتقال فاز در مدار معادل توالی منفی برابر منفی انتقال فاز مدار توالی مثبت می باشد .

مدار معادل توالی صفر نیازی به ترانسفورماتور های انتقال دهنده فاز ندارد . امپدانس نشتی توالی صفر ترانسفورماتور همانگونه که نشان داده شده است، برابر امپدانس نشتی توالی مثبت می باشد. این فرض برای ترانسفورماتور های زرهی شکل و بانک های متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز معتبر است . در ترانسفورماتور های سه فاز هسته ای شکل ، امپدانس معادل در مدار توالی صفر به خاطر کوچکتر بودن امپدانس شاخه موازی آن، ۸۰ تا ۹۰ درصد امپدانس توالی مثبت می باشد.

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

استفاده از اتصال اولیه مثلث و ثانویه ستاره نیز متداول می باشد . با انتخاب a_0 ، a_1 و a_2 به عنوان ترمینال های اولیه و انتخاب نسبت دور و انتقال فاز مناسب، مدار معادل شکل (۱-۱۳- ج) را می توان برای این اتصال نیز به کار برد .

۱-٦ اتصال ها و معادل های نامتعادل ترانسفورماتور

اتصالات ترانسفورماتوری نامتعادل بسیار زیادی وجود دارد که معمولا متشکل از ترانسفورماتور های تک فاز می باشند و برای تغذیه بارهای سه فاز، بارهای تک فاز و ترکیب بارهای سه فاز و تک فاز به کار می روند . این اتصالات نامتعادل در مدارهای انتقال و زیر انتقال کمتر به چشم می خورند و اغلب در مدار های توزیع به کار می روند . این اتصالات بیشتر در جاهایی استفاده می شوند که بار سه فاز کوچک است و یا جاهایی که قسمت اعظم بار تک فاز یا سه فاز می باشد ولی مقدار کمی از نوع دیگر بار نیز باید تغذیه شود .

در این بخش ، همه اتصالات نامتعادل موجود را بررسی نمی کنیم و به تعدادی از اتصالات که رایج ترند ، بسنده می کنیم . مدارهای معادل این اتصالات به گونه ای ارائه می شوند که حل آن ها به وسیله معادلات حلقه معمولی یا به کمک مؤلفه های متقارن میسر شود . در اتصالات توالی، عدم تعادل بانک موجب یک یا چند عدم تعادل در نمایش ترانسفورماتور می گردد . در مورد خطاهای نامتعادل این بانک ها، باید معادل های توالی را همراه عدم تعادل های متعدد حل کرد . حل این حالت ها گاهی اوقات بسیار پیچیده می شود و در بسیاری موارد حل معادلات حلقه ساده تر از استفاده از معادل های توالی است . انتخاب روش ساده تر باید با توجه به مورد خاص انجام گیرد .

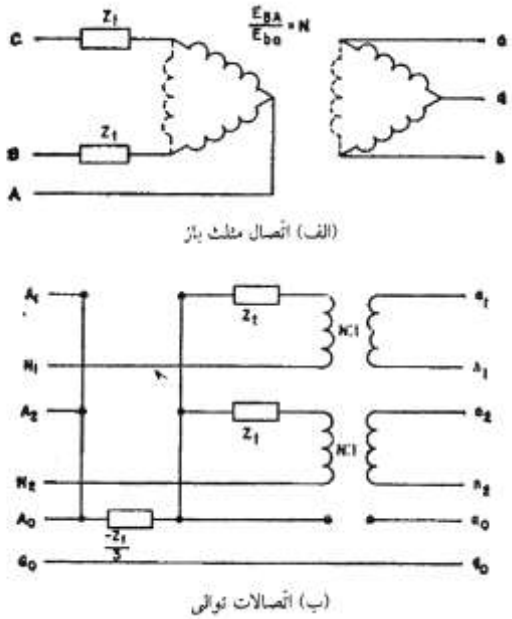
مدار معادل های ذیل به جای سیستم پریونیت ، بر حسب اهم داده شده اند . برای این اتصالات نامتعادل ، ممکن است سردرگمی ها و ابهامات زیادی در تعیین مبناهای قدرت و ولتاژ مناسب برای امپدانس های بانک به وجود آید و استفاده از سر راست ترین شیوه یعنی به دست آوردن مدار معادل بر حسب اهم و ولت، احتمال خطای کمتری را در تعیین امپدانس های مورد نیاز برای مدار معادل ها در بر دارد . اگر بخواهیم در سیستم پریونیت روی مسأله کار کنیم بهتر است ابتدا مدار معادل اهمی را به دست آوریم و آنگاه امپدانس ها را به یک مبنای پریونیت تبدیل کنیم.

۱-۶-۱ اتصال مثلث – باز

اتصال مثلث – باز معمولا با اتصال دو ترانسفورماتور تک فاز مشابه که در شکل (۱-۱۷- الف) با خطوط تو پر نشان داده شده اند ساخته می شود . این اتصال شبیه اتصال مثلث – مثلث معمولی است با این تفاوت که یکی از ترانسفورماتور ها حذف گردیده است . بانک را می توان مطابق شکل (۱-۱۷- الف) نمایش داد که در آن هر ترانسفورماتور به صورت یک امپدانس نشتی Z_t سری با یک ترانسفورماتور ایده آل که نسبت دور آن همانند ترانسفورماتور واقعی است، نمایش داده شده است . با توجه به این که ترانسفورماتور های ایده آل تلفات و تنظیم ولتاژ ندارند، ولتاژ های ثانویه ترانسفورماتور های ایده آل تنها در ضریب نسبت دور با ولتاژ های اولیه فرق دارند . در نتیجه، اتصال مثلث باز ترانسفورماتور های ایده آل را با افزودن یک ترانسفورماتور ایده آل که در شکل با نقطه چین نشان داده شده است، می توان بست بی آن که ولتاژ ها یا جریان ها تغییر کنند . افزودن ترانسفورماتور ایده آل سوم، مدار معادل را به یک ترانسفورماتور سه فاز ایده آل متعادل سری با دو امپدانس برابر در سرهای B و C و امپدانس صفر در سر A تبدیل می نماید . با متصل کردن نمودار های توالی، مطابق مرجع ۸ برای این اتصال نامتعادل سری، معادل ترانسفورماتوری شکل (۱-۱۷- ب) به دست می آید

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

. اگر دو ترانسفورماتور مشابه نباشند مدار معادل کمی پیچیده تر می گردد و مستلزم نمایش دو عدم تعادل سری در معادل توالی می باشد .



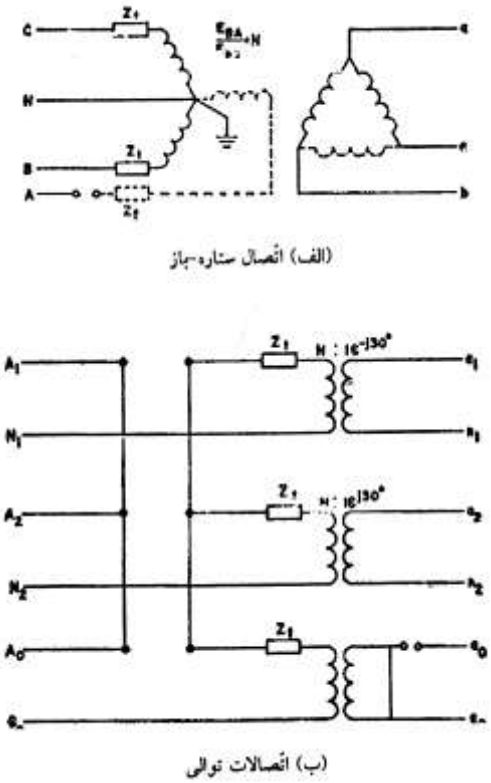
شکل ۱-۱۷ مدارهای معادل برای ترانسفورماتور های با اتصال مثلث باز (ترانسفورماتورهای مشابه)

WikiPower.ir

۱-۶-۲ اتصال ستاره – باز

اتصال ستاره – باز شامل دو ترانسفورماتور مشابه توسط خطوط تو پر در شکل (۱-۱۸- الف) نشان داده شده است . این مدار را با شکل (۱-۱۸- الف) می توان نمایش داد که در آن اولیه ستاره و ثانویه مثلث – باز، با افزودن یک ترانسفورماتور سوم که با نقطه چین نشان داده شده است تکمیل شده است اما سر اولیه مربوط به این ترانسفورماتور مدار باز است . اکنون بانک ترانسفورماتوری را می توان متعادل در نظر گرفت تنها با این عدم تعادل که سر مربوط به فاز A اولیه مدار باز می باشد . با استفاده از اتصالات اشاره شده در مرجع ۸ ، مدار های توالی و اتصالات شکل (۱-۱۸- ب) به دست می آید .

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



(الف) اتصال ستاره-باز

(ب) اتصالات توالی

شکل ۱-۱۸ مدار های معادل برای ترانسفورماتور با اتصال ستاره باز (ترانسفورماتور مشابه)

اگر دو ترانسفورماتور از نظر اندازه متفاوت باشند، عدم تعادل سری دیگری نیز به وجود می آید زیرا امپدانس سر فاز C با امپدانس سرهای B و A تفاوت خواهد داشت . این مطلب در بخش (۱-۶-٤) تشریح خواهد شد .

۱-۶-۳ بانک های سه ترانسفورماتور ی با ترانسفورماتور های با اندازه های نابرابر

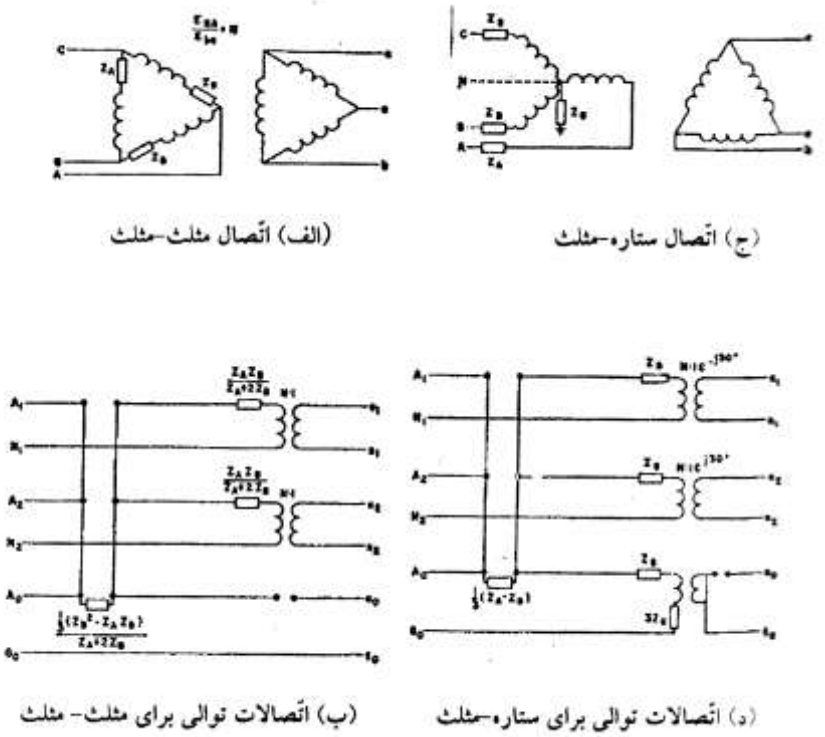
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در بعضی موارد، در بانک های سه فاز یکی از ترانسفورماتور ها بسیار بزرگتر از دو تای دیگری است به طوری که بارهای تک فاز می توانند از ثانویه آن ترانسفورماتور تغذیه شوند . شکل (۱-۱۹- الف) اتصالات مربوط به یک بانک مثلث – مثلث را که اندازه یکی از ترانسفورماتورهای آن با دو تای دیگر تفاوت دارد، نشان می دهد . معادل سه فاز مشتمل بر ترانسفورماتورهای ایده آل و امپدانس های نشتی ترانسفورماتور برحسب اهم در شکل (۱-۱۹- الف) نشان داده شده است . روشن است که امپدانس های Z_A و Z_B امپدانس های ترانسفورماتور تک فاز بر حسب اهم از دید طرف فشار قوی هستند . شکل (۱-۱۹- ب) اتصال معادل های توالی این ترکیب ترانسفورماتور را نشان می دهد .

شکل (۱-۱۹- ج) اتصالات یک بانک ستاره – مثلث که اندازه یکی از ترانسفورماتور های آن با دو تای دیگر فرق دارد را نشان می دهد . مدار معادل اهمی این بانک در شکل (۱-۱۹- ج) و اتصال مدارهای توالی آن در شکل (۱-۱۹- د) آورده شده است .

معادل های توالی بانک های ستاره – ستاره که یک ترانسفورماتور متفاوت با دو تای دیگر دارند شبیه شکل (۱-۱۹- د) می باشد جز این که ترانسفورماتور های ایزوله انتقال فاز ندارند و ثانویه ترانسفورماتور ایده آل در مدار توالی صفر به جای اتصال کوتاه شدن، به a_0 و g_0 متصل می گردد . نسبت دور در مدار توالی صفر $N:1$ می باشد .

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



(الف) اتّصال مثلث-مثلث (ج) اتّصال ستاره-مثلث

(ب) اتّصالات توالی برای مثلث- مثلث (د) اتّصالات توالی برای ستاره-مثلث

شکل ۱-۱۹ مدار های معادل برای اتصالات مثلث – مثلث و ستاره – مثلث ترانسفورماتور وقتی که یکی از ترانسفورماتورها از نظر اندازه با دو ترانسفورماتور دیگر متفاوت باشد . نسبت ولتاژ هر سه ترانسفورماتور برابر است .

۱-٦-٤ ترانسفورماتور دوبلکس [1]

ترانسفورماتور دوبلکس متشکل از دو هسته و دو سیم پیچی تک فاز است که معمولا KVA نامی آنها نابرابر است و در یک تانک نصب می شوند . دو سیم پیچی اولیه به صورت ستاره – باز یا مثلث باز و طرف فشار ضعیف به صورت مثلث – باز ۲٤۰ ولت با تپ میانی ۱۲۰ ولت در یک فاز سیم پیچی بزرگتر، متصل می شوند . در نتیجه این ترانسفورماتور هم بار تک فاز و هم سه فاز را می تواند تغذیه کند .

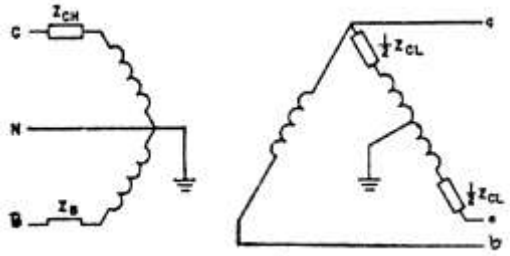
[1] Duplex Transformer

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

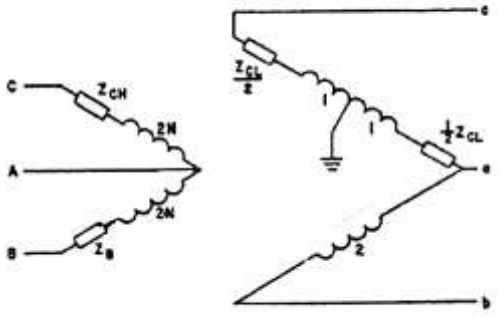
مدار معادل ترانسفورماتور دوبلکس در شکل (۱-۲۰) نشان داده شده است . در اغلب ترانسفورماتورهای دوبلکس KVA نامی یکی از سیم پیچی ها بزرگتر از دیگری است در نتیجه سه عدم تعادل مجزا در اتصالات توالی این ترکیب وجود دارد . اول این که ترانسفورماتوری که بانک را می بست وجود ندارد بنابراین یک عدم تعادل سری به وجود می آید، دوم این که ترانسفورماتورها امپدانس های متفاوتی دارند که عدم تعادل دیگری را باعث می شود و بالاخره این که یک سیم پیچی فشار ضعیف در نقطه میانی زمین شده است که منجر به یک عدم تعادل موازی می گردد . بنابراین اتصالات توالی معادل بسیار پیچیده خواهند بود و برای مقاصد محاسباتی بهتر است از معادل های شکل (۱-۲۰) استفاده شود . شکل (۱-۲۰) نشان می دهد که امپدانس های فازی که ثانویه با تپ میانی آن زمین شده است باید بین سیم پیچی های اولیه و ثانویه تقسیم شود .

با توجه به این که ترانسفورماتور های دوبلکس قادر به تغذیه همزمان بارهای تک فاز و سه فاز می باشند، مقدار بار تک فازی که ترانسفورماتور می تواند تحمل کند بی آن که دمای سیم پیچی بیش از حد بالا رود بستگی به مقدار بار سه فازی دارد که به صورت همزمان تغذیه می شود .

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



(الف) اتّصال ستاره-باز



(ب) اتّصال مثلث-باز

شکل ۱-۲۰ مدارهای معادل ترانسفورماتورهای دوبلکس (Z_{CH} و Z_{CL} از آزمایش یا اطلاعات سازنده به دست آمده اند)

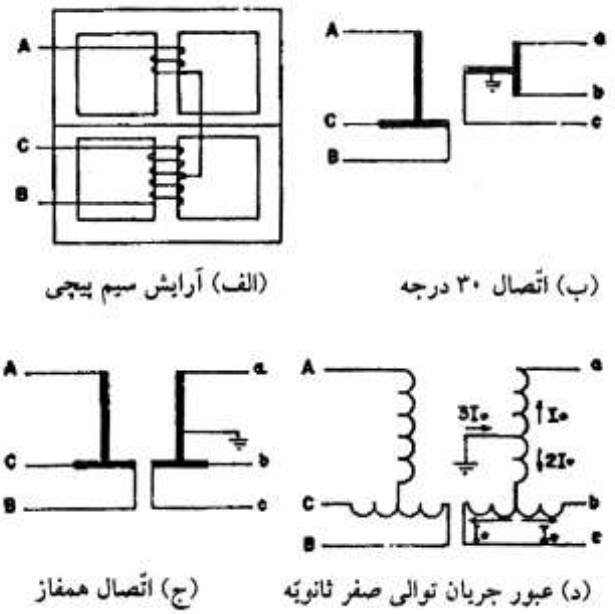
WikiPower.ir

۱-۶-۵ ترانسفورماتور با اتصال T-T

شکلی دیگر از ترانسفورماتور نامتعادل، ترانسفورماتور سه فاز با اتصال T-T می باشد که در شکل(۱-۲۱) نشان داده شده است . این ترانسفورماتور اساسا متشکل از دو هسته تک فاز می باشد که سیم پیچی های آن مطابق شکل (۱-۲۱) متصل می شوند و یک منبع ولتاژ سه فاز را به وجود می آورند . در حالت عادی سیم پیچی اولیه زمین نمی شود و معمولا نقطه تپ سیم پیچی ثانویه زمین می گردد .

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

مزیت اصلی این ترانسفورماتور در مقایسه با یک ترانسفورماتور سه فاز معمولی با همان مقادیر نامی، داشتن تانک، هسته و کلاف های کوچکتر است . با توزیع مناسب امپدانس ها، ترانسفورماتور T-T در صورت متعادل بودن بار، افت ولتاژ نامتعادل ناچیزی را موجب می شود . همچنین این طراحی انعطاف بیشتری در اتصال دارد بدین معنی که ترانسفورماتورهایی با اتصال هم فاز یا اتصال ۳۰ درجه می توان به دست آورد .



(الف) آرایش سیم پیچی (ب) اتّصال ۳۰ درجه

(ج) اتّصال همفاز (د) عبور جریان توالی صفر ثانویّه

شکل ۱-۲۱ اتصال T-T ترانسفورماتور سه فاز

در اتصال T-T، مسیری که جریان های توالی صفر ثانویه طی می کنند امپدانس کمی دارد و این جریان ها به سیم پیچی های اولیه منتقل نمی شوند (شکل ۱-۲۱- د) . اولیه را می توان زمین نشده باقی گذاشت درحالی که بارهای فاز به زمین ثانویه هنوز با تنظیم ولتاژ عادی می توانند تغذیه شوند . به همین جهت، ترانسفورماتور T-T بسیار شبیه یک ترانسفورماتور مثلث – ستاره عمل می کند .

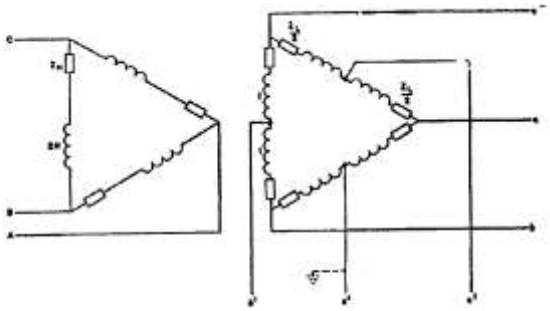
مدار معادل کامل ترانسفورماتور T-T بسیار پیچیده است . با این حال سیم پیچی ها به گونه ای قرار داده شده اند که در عمل، تزویجی میان مدار های توالی وجود ندارد . بنابراین برای محاسبات عملی، هنگامی که اولیه زمین نشده و ثانویه زمین شده است از مدار معادل ترانسفورماتور ستاره – مثلث می توان استفاده کرد . برای اتصال هم فاز، انتقال فاز در ترانسفورماتور ایده آل وجود ندارد .

۱-۶-۶ ثانویه مثلث با تپ میانی زمین شده

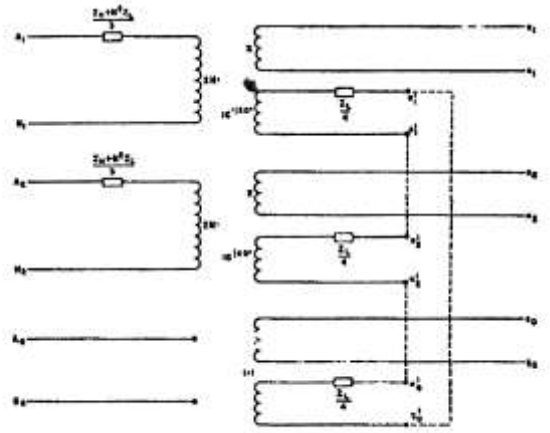
یک اتصال مثلث بسته با ثانویه ای که تپ میانی آن زمین شده در شکل(۱-۲۲) نشان داده شده است . این نوع اتصال برای تغذیه همزمان بارهای ثانویه تک فاز و سه فاز به کار می رود .اگر اندازه سه ترانسفورماتور این اتصال یکی باشد، این اتصال در اتصالات معادل توالی تنها یک عدم تعادل خواهد داشت . این عدم تعادل ناشی از زمین کردن تپ میانی یکی از سیم پیچی های ثانویه می باشد .

این ترکیب را می توان به صورت یک ترانسفورماتور با سه سیم پیچی که دارای یک اولیه (ABC) و دو ثانویه $(a'b'c',abc)$ می باشد در نظر گرفت . مدار معادل ترانسفورماتور سه سیم پیچه در شکل (۱-۲۲- ب) نشان داده شده است . زمین کردن نقطه میانی a' را می توان با اتصال ترمینال های a'_0 به n'_2 ، a' به n' و a' به g'_0 نمایش داد . در این صورت ترمینال های سمت چپ و سمت راست ترمینال هایی هستند که به همراه زمین ترمینال a' در شکل (۱-۲۲- الف) برای نمایش معادل ترانسفورماتور به کار می روند .

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



(الف) اتّصال ترانسفورماتور



(ب) نمودارهای توالی

شکل ۱-۲۲ مدارهای معادل برای ترانسفورماتور با اتصال مثلث – مثلث با سر وسط سیم پیچ ثانویه (خط چین ها اتصالات زمین کردن a' را نشان می دهند)

WikiPower.ir

مثال

با توجه به این که بسیاری از اتصالات معادل توالی ، برای نمایش اتصال نا متعادل نیاز به ترانسفورماتور های ایزوله دارند ارئه یک مثال برای تشریح چگونگی حل مسأله ای مربوط به مؤلفه های متقارن به کمک این ترانسفورماتور های ایزوله سودمند است . برای این کار از ثانویه مثلث با تپ میانی زمین شده به عنوان یک اتصال نمونه و البته نه پیچیده که نشان دهنده کاربرد این ترانسفورماتور ها است استفاده می شود .

شکل (۱-۲۳) یک اتصال مثلث – مثلث با تپ میانی ثانویه c' زمین شده را نشان می دهد . امپدانس های ترانسفورماتور مقادیر نمونه می باشند . ولتاژ های متعادل به سیم پیچی اولیه اعمال شده اند و سر فاز b ثانویه اتصال کوتاه به زمین شده است . مجموعه نخست از ترانسفورماتورهای ایزوله شکل (۱-۲۳) برای بانک هستند، مجموعه دوم برای قرار دادن دو خطا روی فاز های b و c' به جای فاز های a و a' می باشد . مدارهای توالی طبق مرجع ۸ در نقطه خطا به صورت سری متصل شده اند . ولتاژهای دلخواه $2E_x$ در نمودار توالی مثبت در نقطه خطا، $2E_Y$ در نمودار توالی منفی در نقطه خطا و جریان I_X که ترمینال a_1 را در نقطه خطا ترک می کند، در نظر بگیرید . در این صورت تمامی ولتاژ های و جریان ها در تمام نقاط مدارها را

می توان بر حسب این کمیت ها نوشت . افت ولتاژ های حلقه های شروع شده با A_1 ، A_2 و a' را می توان بر حسب این کمیت ها دلخواه مطابق ذیل نوشت :

WikiPower.ir

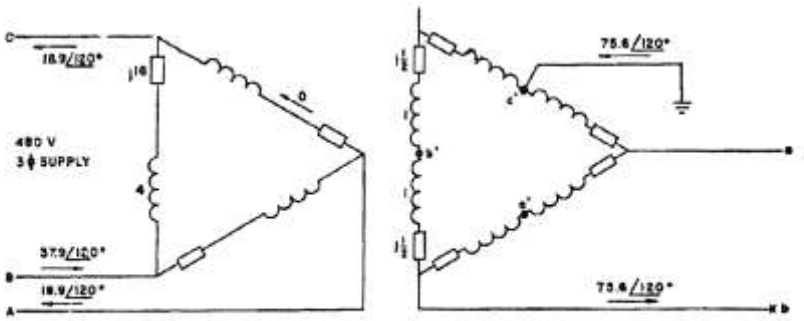
$$4E_X e^{j120} + j\frac{20}{3} I_x \left(\frac{1}{2} e^{j120} - \frac{1}{4} e^{-j60}\right) = 227e^{-j30} \qquad (۱-۲۷)$$

$$j\frac{20}{3} I_x \left(\frac{1}{2} e^{-j120} - \frac{1}{4} e^{j60}\right) + 4E_y e^{-j120} = 0 \qquad (۱-۲۸)$$

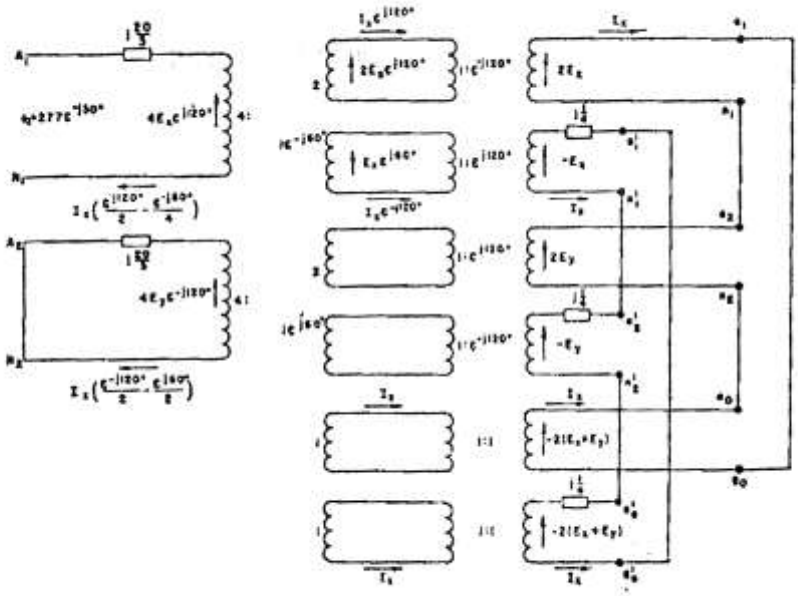
$$3E_x - j\frac{3}{4} I_X + 3E_Y = 0 \qquad (۱-۲۹)$$

www.wikipower.ir

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



(الف) اتّصالات ترانسفورماتور و جریانهای خطا



(ب) اتّصالات توالی

شکل ۱- ۲۳ جواب برای یک خطای فاز به زمین در ثانویه یک ترانسفورماتور ۲۴۰ -۴۸۰ ولت با اتصال مثلث – مثلث و شبکه سر وسط سیم پیچ ثانویه زمین شده باشد

توجه داشته باشید که ترانسفورماتور های انتقال فاز، بردارهای ولتاژ و جریان را به یک اندازه دوران می دهند .

باید توجه داشت که در صورت ارجاع امپدانس ها از طریق یک ترانسفورماتور انتقال فاز، تنها اندازه نسبت دورها برای ارجاع امپدانس ها به کار می رود . از انتقال فاز حین ارجاع امپدانس ها از یک طرف به طرف دیگر چشم پوشی می شود .

در سه معادله بالا سه کمیت مجهول (I_X , E_X , E_Y) وجود دارد که به روش های عددی قابل محاسبه اند . این کار انجام شده است و ولتاژ ها و جریان های منتجه در شکل (۱-۲۳- الف) آورده شده اند .لازم به ذکر است که در این مثال که در آن از امپدانس های سیستم صرفنظر شده است محاسبه به کمک معادلات حلقه، ساده تر از استفاده از مدارهای توالی می باشد .

۱-۷ ملاحظات مربوط به انتخاب اتصالات بانک های سه فاز

انواع مختلفی از اتصالات برای بانک های سه فاز وجود دارد ولی معمولا برای یک کاربرد خاص، تنها یک یا دو اتصال از همه مناسبتر می باشند . در این بخش تعدادی از ملاحظات مربوط به انتخاب بهترین اتصالات ارائه می شود .

۱-۷-۱ انتقال فاز یا ملاحظات ولتاژی

اگر قرار باشد که ترانسفورماتور به صورت موازی به یک بانک موجود یا یک سیستم موجود متصل شود باید وضعیت فازی ولتاژ ثانویه نسبت به اولیه مشخص گردد . این ارتباط فازی موجود، باعث می شود که تعدادی از اتصالات ترانسفورماتور را در نظر نگیریم . برای مثال اگر ولتاژ ثانویه ۳۰ درجه از ولتاژ اولیه عقبتر باشد نمی توان سیستم موجود را با یک بانک ستاره _ ستاره یا مثلث _ مثلث ،

با اتصال و نامگذاری مناسب ترمینال های ثانویه، انتقال فاز های ۶۰،۱۲۰،۱۸۰،۲۴۰ و ۳۶۰ درجه می توان به دست آورد . در بانک های ستاره – مثلث نیز با اتصال و نامگذاری مناسب ترمینال های ثانویه، انتقال فاز های ۳۰،۹۰،۱۵۰،۲۱۰،۲۷۰ و ۳۳۰ درجه را می توان به دست آورد .

دامنه ولتاژ ثانویه مورد نظر نیز اغلب در انتخاب اتصال مؤثر است . برای مثال، اگر بار نیاز به تغذیه ۲۴۰ ولت سه فاز و ۱۲۰ ولت زمین شده برای روشنایی داشته باشد باید ترانسفورماتوری با ولتاژ نامی ثانویه ۱۲۰/۲۴۰ ولت که در طرف ثانویه به صورت مثلث متصل شده و تپ میانی دارد با این که یکی از سرهایش زمین شده است به کار رود .

۱-۷-۲ اتصال های ستاره – ستاره

معادل های توالی مثبت ترانسفورماتورهای ستاره – ستاره، مثلث – مثلث و ستاره – مثلث اساسا یکی می باشد جز این که این اتصال آخری دارای انتقال فاز دیگری است . با این حال تفاوت مدار توالی صفر، مشکلاتی را در اتصال ستاره – ستاره به وجود می آورد که در دیگر انواع وجود ندارد .

جریان های تحریک هارمونیک سوم

هنگامی که یک ولتاژ سینوسی به یک سیم پیچی ترانسفورماتور اعمال می شود در حالی که سیم پیچی دیگر مدار باز است، ترانسفورماتور جریان مغناطیس کننده ای می کشد که این جریان شاری در هسته القا می نماید که این شار emf مخالفی تولید می کند که تنها به مقداری بسیار اندک، ناشی از افت نشتی، با ولتاژ اعمالی تفاوت دارد . اگر ترانسفورماتور به اشباع نرود جریان مغناطیسی سینوسی و هم فاز با موج شار خواهد بود . با این حال ملاحظات اقتصادی ایجاب می کند که ترانسفورماتور نزدیک زانوی

منحنی اشباع کار کند . این امپدانس مغناطیس کننده غیر خطی ، جریان مغناطیس کننده ای را موجب می شود که مقدار زیادی هارمونیک های فرد دارد .

مؤثرترین هارمونیک، هارمونیک سوم می باشد که می تواند ۵۰ تا ۶۰ درصد جریان تحریک اصلی باشد . دامنه محتوی هارمونیکی با افزایش مرتبه هارمونیک کاهش می یابد . این هارمونیک ها می توانند در مدارهای توالی مثبت، منفی و صفر جاری شوند . هارمونیک های مضرب سه (سوم، نهم، پانزدهم و ...) در مسیرهای توالی صفر، هارمونیک های پنجم، یازدهم، هفدهم و ... در مدار توالی منفی و هارمونیک های هفتم، سیزدهم، نوزدهم و ... در مدار توالی مثبت جاری می شوند .

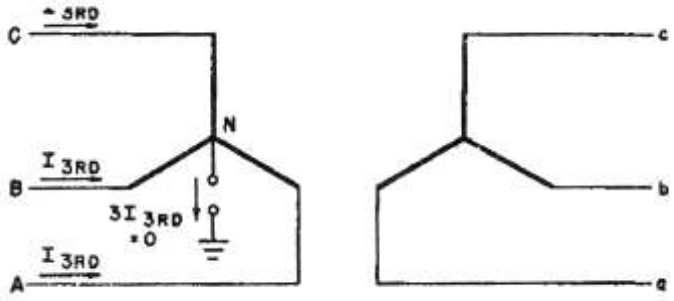
در اتصالات ستاره – ستاره معینی ، جریان های هارمونیک های مضرب سه وجود ندارد . حذف این جریان ها باعث اعوجاج شکل موج شار در هسته می شود و شارهای با فرکانس هارمونیکی مضرب سه ،روی شکل موج اصلی می افتند. هارمونیک سوم مشکل سازترین هارمونیک است زیرا دامنه آن از دیگر مولفه های هارمونیکی بیشتر است .

حذف جریان های هارمونیک سوم در شکل (۱-۲۴) که یک بانک سه فاز زمین نشده متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز را نشان می دهد تشریح شده است. جریان های هارمونیک سوم دارای مشخصه توالی صفر هستند و باید در هر سه هادی خط هم اندازه و هم فاز باشند. با توجه به این که نقطه خنثی اولیه از زمین ایزوله شده است مسیری برای جاری شدن جریان های هارمونیک سوم وجود ندارد . در نتیجه ولتا از A به N یک مولفه هارمونیک سوم بزرگ دارد . این ولتا ۵۰ تا ۶۰ درصد ولتاژ اصلی است و بنابرین ولتاژ rms آن ۱۵ درصد بیشتر یا بالاتر از ولتاژ مولفه اصلی خط به نقطه خنثی می باشد .

اگر سیم پیچی اولیه ، ثانویه و ثالثیه به صورت مثلث بسته شده باشد این اتصالات مثلث مسیر کم امپدانس برای گردش جریان های هارمونیک سوم به وجود می آورد . در این صورت موج شار و

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

ولتاژ های منتجه در طرف ستاره سینوسی خواهند بود . دامنه جریان ها در مثلث کم و برابر جریان های هارمونیک سوم معمولی مود نیاز برای تولید یک موج شار سینوسی خواهند بود.



شکل (۱-۲٤)تضعیف هارمونیک مرتبه سوم در ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره زمین نشده با سیم پیچی مثلث

بحث بالا در اصل در مورد بانک سه فاز متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز یا یک ترانسفورماتور سه فاز با هسته زرهی که در آن راکتانس مغناطیس کننده توالی صفر تقریبا برابر راکتانس مغناطیس کننده توالی مثبت می باشد، صادق است . چنان که پیش تر گفته شد در ترانسفورماتور های نوع هسته ای امپدانس های مغناطیس کننده توالی صفر بسیار کوچکتر از امپدانس های مغناطیس کننده ولتاژ های توالی مثبت است. این اثر را می توان به تقریب با یک ثالثیه مثلث امپدانس بالا در این نوع ترانسفورماتور نمایش داد . این امپدانس می تواند ۱۵ تا ۱۰۰ درصد ، بسته به اندازه و نوع ترانسفورماتور باشد . این مثلث مجازی به مقدار زیادی مولفه های هارمونیک سوم شار و ولتاژ نسبت به زمین را کاهش می دهد .

تنظیم ولتاژ با بارهای تک فاز

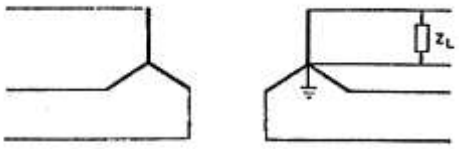
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

انواع معینی از اتصالات ستاره – ستاره برای بارهای ثانویه ای که میان خط ونقطه خنثی قرار می گیرند ، تنظیم ولتاژ بسیار بزرگی تولید می کنند . این مطلب برای یک ترانسفورماتور با اولیه زمین نشده و ثانویه زمین شده با باری که از خط به زمین گرفته شده است ، در شکل (۱–۲۵) تشریح شده است.

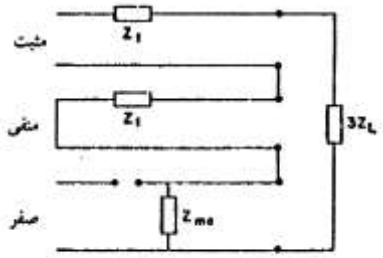
در مورد بارهای سه فاز متعادل روی بانک ، تنظیم ولتاژ به کمک جریان جاری شده در امپدانس نشتی ترانسفورماتور تعیین می شود.ولی برای یک بار تک فاز بین خط و زمین جریان باید از مجموع امپدانس نشتی و امپدانس مغناطیس کننده توالی صفر عبور کند.برای ترانسفورماتور های سه فاز نوع هسته ای ، تنظیم ولتاژ برای بارهای تک فاز ، بالا ولی قابل تحمل است . اگر بانک متشکل از یک ترانسفورماتور با هسته زرهی یا سه ترانسفورماتور تک فاز باشد ، تنظیم ولتاژ غیر قابل تحمل خواهد بود .

اگر اولیه به صورت مثلث بسته شده باشد یا یک سیم پیچی ثالثیه مثلث بسته وجو د داشته باشد ، امپدانس مغناطیس کننده با امپدانس نشتی از ثانویه به مثلث موازی خواهد بود و در نتیجه تنظیم ولتاژ برای بار های سه فاز نخواهد بود.

WikiPower.ir



(الف) اتّصال ترانسفورماتور با بار ثانویه به نقطه خنثی



(ب) اتّصالات توالی

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

شکل ۱-۲۵ تنظیم ولتاژ خطای بار تک فاز به زمین در بانک ترانسفورماتور ستاره – ستاره با سر وسط اولیه زمین نشده

جابجایی نقطه خنثی[1]

نقطه خنثی یک سیستم سه فاز زمین نشده ، معمولا بوسیله خازن سیم های سه فاز به زمین هم پتانسیل با زمین و یا خیلی نزدیک به آن نگه داشته می شود . اگر خازن های سه فاز تقریبا برابر باشند ، جابجایی نقطه خنثی نسبت به زمین بسیار اندک خواهد بود . اگر سه ترانسفورماتور به صورت ستاره زمین شده بدون سیم پیچی مثلث متصل شوند ، تحت شرایطی خاص نقطه خنثی می تواند جابجا شود و حتی از مثلث برداری معمولی ولتاژ های خط نیز خارج شود . این شرایط اخیر جابجایی نقطه خنثی نامیده می شود .

این وضعیت در شکل (۱-۲۶) که در آن سه خط ، خازنهای نسبت به زمین برابر دارند نشان داده شده است و راکتانس مغناطیس کننده آن مقادیر نشان داده شده در شکل (۱-۲۶- الف) را دارد به مدار اضافه شود . شکل (۱-۲۶- ب) ولتاژ های فاز نسبت به زمین منتجه را نشان می دهد . مشاهده می شود که نقطه خنثی کاملا به خارج از مثلث برداری منتقل شده است .

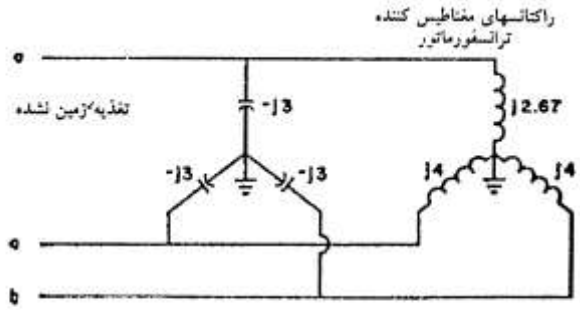
برای پدید آمدن جابجایی نقطه خنثی ، لازم است که راکتانس هاس مغناطیس کننده نابرابر گرفته شوند یعنی کمترین مقدار راکتانس ، کوچکتر از راکتانس های خازنی خط باشد و بیشترین مقدار راکتانس های مغناطیس کننده ، بزرگتر از راکتانس خازنی باشد . این اختلاف در راکتانس های مغناطیس کننده هنگامی روی می دهد که ترانسفورماتور های تشکیل دهنده بانک یکسان نباشند .حتی اگر ترانسفورماتور ها مشابه نیز باشند ، در صورت عمل کلیدزنی و یا خطای موقتی و به تبع آن فوق

[1] Neutral inversion

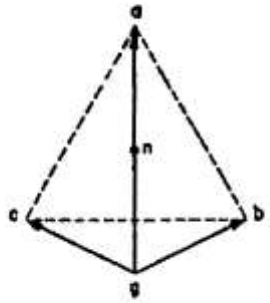
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تحریک شدن و اشباع رفتن یک یا چند تا از سیم پیچی ها ،جابجایی نقطه خنثی می تواند پیش بیاید .

اشباع به میزان قابل توجهی امپدانس مغناطیس کننده موثر آن فاز را تغییر می دهد.



(الف) نمودار امپدانسی



(ب) نمودار برداری

شکل ۱-۲۶ نمایش جابجایی نقطه خنثی مربوط به ترانسفورماتور با اتصال ستاره زمین شده (بدون سیم پیچ مثلث) در سیستم زمین نشده

پدیده جابجایی نقطه خنثی یا ناپایداری نقطه خنثی در سیستم های انتقال ، زیر انتقال یا توزیع به ندرت رخ می دهد . زیرا ترانسفورماتور های ستاره – ستاره زمین شده به ندرت در سیستم های زمین نشده به کار می روند و همچنین جریان شارژ این سیستم های نمونه ، به مقدار قابل توجهی بزرگتر از جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور است. این شرایط اغلب در ترانسفورماتور های ولتاژ ستاره – ستاره زمین شده که برای آشکارسازی خطای زمین به کار می روند حائز اهمیت می باشد . با بارگیری سیم پیچی های ثانویه ، می توان از بروز این مشکل جلوگیری نمود.

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

اتصال ستاره – ستاره با نقطه خنثی ایزوله

در بانک ستاره – ستاره با نقطه خنثی ایزوله که متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز یا یک ترانسفورماتور سه فاز با هسته نوع زرهی سه فاز می باشد ، مولفه هارمونیک سوم جریان تحریک که شاری سینوسی تولید می کند جاری نمی شود . همانطور که قبلا توضیح داده شد این متوقف شدن جریان هارمونیکی موجب به وجود آمدن یک شار هارمونیک سوم و القای ولتاژ نسبت به نقطه خنثی حدود ۵۰ درصد ولتاژ نسبت به زمین نامی می شود.

این ولتاژ هارمونیک سوم بین ترمینال فاز و نقطه خنثی بانک ظاهر می شود و بین ترمینال های فاز وجود ندارد . ولتاژ rms دو سر هر سیم پیچی حدود ۱۱۵ درصد ولی ولتاژ پیک تقریبا ۱۵۰ درصد مقدار عادی خواهد بود.

اگر سیستم تغذیه زمین شده باشد تقریبا همه ولتاژ هارمونیک سوم ، بین زمین و نقطه خنثی ترانسفورماتور ظاهر می شودو ولتاژ هارمونیک سوم ظاهر شده بین خط و زمین بسیار اندک است . اگر سیستم تغذیه زمین شده باشد تقریبا همه ولتاژ هارمونیک سوم ظاهر شده بین خط و زمین بسیار اندک است .اگر سیستم تغذیه زمین نشده باشد بسته به خازن ها نسبت به زمین سیم پیچی ترانسفورماتور و هادیهای خط ، قسمتی از ولتاژ هارمونیک سوم بین خط و زمین و قسمتی نیز بین نقطه خنثی بانک و زمین ظاهر خواهد شد.

مشکل دیگر در رابطه با این اتصال این است که نقطه خنثی بانک به وسیله جریان های تحریک تک تک ترانسفورماتور ها تثبیت می شود و نقطه خنثی بانک لزوما منطبق بر نقطه خنثی سیستم نخواهد

بود . تنظیم ولتاژ برای بار های ثانویه تک فاز بین خط و نقطه خنثی بسیار بزرگ است زیرا جریان بار باید از طریق امپدانس مغناطیس کننده کشیده شود .

برای چنین سیستمی اگر بانک متشکل از یک ترانسفورماتور نوع هسته ای سه فاز باشد ،مشکلات مربوط به ولتاژهای هارمونیک سوم و تنظیم ولتاژ بارهای تک فاز تا حدی بر طرف می شود . امپدانس مغناطیس کننده نسبتا کوچک مدار معادل توالی صفر ، بارگیری تک فاز حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد توان نامی سه فاز کلی را میسر می کند بدون اینکه تنظیم ولتاژ خیلی بزرگ باشد. قطع جریان هارمونیک سوم ، معادل عبور منفی این جریان تحریک از سیم پیچی های ترانسفورماتور است . به خاطر رلوکتانس بالای مسیر شار هارمونیک سوم ، ولتاژ هارمونیک سوم تنها ۳ تا ۵ درصد ولتاژ عادی می باشد . اثر این راکتانس کم در معادل توالی صفر می توان به صورت یک سیم پیچ ثالثیه متصل شده به صورت مثلث نمایش داد.این مثلث مصنوعی ، نقطه خنثی بانک را روی نقطه خنثی سیستم تغذیه تثبیت می کند و جریان هارمونیک سوم لازم و همچنین جریان های توالی صفر که در بارها یا خطاها از خط به نقطه جاری می شوند را تامین می کند.

WikiPower.ir

اتصال ستاره – ستاره با نقطه خنثی زمین شده و نقطه خنثی سیستم تغذیه ایزوله

زمین کردن نقطه خنثی اولیه بانک ، نقطه خنثی را در پتانسیل زمین نگه می دارد و موجب ظاهر شدن ولتاژ های هارمونیک سوم می گردد .اگر ظرفیت خازنی بین هادی های تغذیه و زمین در مقایسه با راکتانس های مغناطیس کننده خیلی کوچک باشد ، دامنه ولتاژ هارمونیک سوم نقطه خنثی برای حالت زمین نشده خواهد بود.

اگر راکتانس خازنی خط بسیار کوچک از راکتانس مغناطیس کننده باشد ، جریان های هارمونیک سوم از این خط عبور می کنند و این وضعیت به سیستم تغذیه زمین شده تبدیل می شود. در

محدوده ای که راکتانس خازنی تقریبا برابر راکتانس مغناطیس کننده می باشد ، ناپایداری نقطه خنثی رخ خواهد داد که برای تجهیزات متصل شده خطرناک است.

مشکل دیگری که زمین کردن نقطه خنثی ترانسفورماتور به وجود می آورد این است که خطای خط به زمین در اولیه (یا اتصال کوتاه خط به نقطه خنثی در ثانویه) باعث انتقال کامل نقطه خنثی و قطع شدن ولتاژ خط به خط دو فاز دیگر می شود. با فرض این که ولتاژ به نقطه خنثی ترانسفورماتور مقدار معمول می باشد، این انتقال باعث می گردد که ولتاژ اعمالی ۱/۷۳۲ برابر مقدار معمول شود و جریان تحریک ممکن است چندین برابر جریان بار کامل شود .این مسئله می تواند موجب آسیب دیدن شدید ترانسفورماتور شود مگر این که خطا برطرف شود . با این حال جریان خطا کم است (حتی برای ترانسفورماتور های نوع هسته ای سه فاز با مثلث مجازی) زیرا سیستم تغذیه ، زمین نشده است .برای آشکار سازی و حذف بی درنگ این خطاها باید پیش بینی های لازم به عمل آورده شود یا این که (در مورد ترانسفورماتور های ولتاژ به کار رفته آشکار سازی خطا) از ترانسفورماتور هایی با ولتاژ نامی برابر ولتاژ خط به خط استفاده شود .

اتصال ستاره – ستاره با نقطه خنثی زمین شده و نقطه خنثی سیستم تغذیه زمین شده

هنگامی که نقطه خنثی اولیه ترانسفورماتور و سیستم تغذیه هر دو زمین شده باشند بیشتر مشکلاتی که پیشتر اشاره شد ناپدید می شوند . نقطه خنثی سیستم و نقطه خنثی بانک پایدار می گردند و تنظیم ولتاژ برای بارهای ثانویه تک فاز عادی می شود . جریان تحریک هارمونیک سوم همچنان باید باید از طریق خطوط تغذیه به ترانسفورماتور اعمال گردد . این مسئله گاهی اوقات موجب تداخل تلفی در طول خطوط اولیه می شود. به خصوص اگر سیم نول وجود نداشته باشد و جریان های هارمونیک سوم مجبور باشند از طریق زمین برگردند . این حالت مقدار ولتاژ هارمونیک سوم در هر یک از فاز ها

بسیار کمتر از ولتاژ هارمونیک سوم در حالتی که نقطه خنثی تغذیه ایزوله است ، می باشد . میزان این کاهش توسط امپدانس های خطوط ، تغذیه و زمین تعیین می شود.

اگر ترانسفورماتور سه فاز و از نوع هسته ای ، مثلث مجازی احتمال تداخل تلفی ناشی از هارمونیک های مضرب سه را کاهش می دهد . مقدار این کاهش بستگی به امپدانس های نسبی مثلث و سیستم تغذیه دارد .

۱-۷-۳ بانک های مثلث - مثلث

بانک های مثلث – مثلث مشکل جابجایی نقطه خنثی سیستم یا مشکلات ناشی از هارمونیک های مضرب سه را ندارند. جریان های توالی صفر نمی توانند از بانکی با چنین اتصال ، عبور کنند . برای تقسیم متناسب بار ها میان سیم پیچی ها ، تک تک ترانسفورماتور ها باید نسبت های ولتاژ و امپدانس های تقریبا یکسان داشته باشد جریان های گردشی در مثلث ایجاد می شود .

اگر ترانسفورماتور های بانک مشابه و ولتاژ های سینوسی متعادل اعمال گردد، جریان های تحریک خطوط حاوی مولفه های هارمونیک مضرب سه نخواهند بود . این مولفه ها در سیم پیچی های اولیه و ثانویه گردش خواهند نمود و در خطوط خارجی ظاهر نخواهند شد . اعمال ولتاژ های نا متعادل به یک بانک متقارن ، جریان های گردشی داخل سیم پیچی های مثلث تولید نخواهند کرد.

بارهای تک فاز قدرت را می توان بین خطوط طرف ثانویه متصل نمود . بارهای روشنایی تک فاز و دیگر بارهایی را که نیاز به تغذیه زمین شده دارند می توان به یکی از خطوط ثانویه متصل کرد و سر دیگر مثلث ثانویه یا نقطه میانی یکی از سیم پیچی های ثانویه را زمین کرد.

شاید اتصال مثلث – مثلث ساده ترین اتصالی باشد که می توان به کار برد . مسائل مربوط به عبور جریان های زمین و مولفه های هارمونیکی جریان های مغناطیس کننده در این اتصال وجود ندارد.

معمولا مهمترین ملاحظات در این اتصال ، بارگیری هر یک از واحد های ترانسفورماتوری ، تنظیم ولتاژ و ولتاژ های نامتعادل هنگامی که واحد ها مشابه نیستند و یا هنگامی که بار ثانویه متعادل نیست، می باشد.

اتصال مثلث – باز

برای تغذیه بار های سه فاز می توان از دو ترانسفورماتور که به صورت مثلث باز متصل شده اند استفاده نمود . بارهای تک فاز را نیز می توان میان فازهای ثانویه یا یک فاز و زمین در حالی که یکی از ترمینال ها یا نقطه میانی یکی از سیم پیچی ها زمین شده است قرار داد .

برای استفاده از اتصال مثلث باز باید سه هادی فاز اولیه را وارد بانک ترانسفورماتوری نمود . بنابرین صرفه جویی در سیم کشی اولیه نسبت به حالتی که از یک مثلث بسته استفاده می شود وجود ندارد .

اتصال مثلث باز که متشکل از دو ترانسفورماتور تک فاز می باشد ، عمدتا موارد ذیل به کار می رود :

۱)در شرایط اضطراری که یکی از ترانسفورماتور های بانک دچار نقص شده است . با خارج کردن ترانسفورماتور آسیب دیده (با قطع کردن اتصال اولیه و ثانویه)، تغذیه بار روی بانک از طریق اتصال مثلث باز به وجود آمده امکان پذیر است البته به شرطی که ترانسفورماتور های باقیمانده خیلی اضافه بار نشوند . اگر بانک متشکل از یک ترانسفورماتور سه فاز باشد، در حالتی که ترانسفور ماتور از نوع زرهی است با اتصال کوتاه نمودن سیم پیچی های فاز خطادار می توان از اتصال مثلث – باز استفاده نمود و در حالتی که ترانسفورماتور از نوع هسته ای با سه بازو می باشد می توان آن فاز را به طور کامل خارج کرد .

۲) گاهی اوقات برای تغذیه بارهای سه فازی که امید می رود در آینده مقدار آن ها به میزان قابل توجهی افزایش یابد، از اتصال مثلث – باز استفاده می شود . در صورت نیاز به افزایش ظرفیت بانک، نیازی به عوض کردن کل بانک یا اضافه کردن یک بانک موازی نمی باشد و تنها کافیست مثلث با افزودن یک ترانسفورماتور سوم بسته شود .

۳) اغلب برای تغذیه همزمان یک بار تک فاز بزرگ و یک بار سه فاز کوچک از اتصال مثلث – باز که ترانسفورماتورهای با اندازه های متفاوت دارد استفاده می شود . ترانسفورماتور بزرگتر تمام بار تک فاز و قسمتی از بار سه فاز را تغذیه می کند . البته برای چنین کاربردی همانطور که قبلا تشریح شد می توان از دو ترانسفورماتور جداگانه یا یک ترانسفورماتور دوبلکس استفاده نمود .

برای تغذیه بارهای سه فاز متعادل، KVA خروجی تنها ۸۶/۶ درصد KVA باریست که واقعا به دو ترانسفورماتور بانک تحمیل می شود . برای مثال، فرض کنید که جریان خروجی از بانک، ۱ پریونیت و ولتاژ نامی ثانویه نسبت به زمین ۱ پریونیت باشد . در این صورت KVA خروجی کل ۳ پریونیت خواهد بود . در حالی که ترانسفورماتور جریان باری معادل ۱ پریونیت خواهد داشت و ولتاژ سیم پیچی ترانسفورماتور۱/۷۲۳ خواهد بود . در این صورت KVA دو ترانسفورماتور ۳/٤٦٤ خواهد بود .

در اتصال مثلث باز، مؤلفه هارمونیک سوم جریان تحریک باید از سیستم تغذیه تـأمین شود . با این حال این جریان در مسیرهای توالی مثبت و منفی و نه از طریق زمین، گردش خواهد نمود . بنابراین مشکلات مربوط به تداخل تلفنی بسیار کمتر از ترانسفورماتور های با اتصال ستاره می باشد . ولتاژهای هارمونیک سوم کوچکی در فازها وجود دارد که دامنه آن بستگی به امپدانس تغذیه دارد .

تنظیم ولتاژ در سه فاز حتی برای بارهای ثانویه نا متعادل، متفاوت می باشد . در حالت کلی این مسأله باعث می شود ولتاژهای ثانویه از نظر دامنه اندکی با هم تفاوت داشته باشند و اختلاف فازشان دقیقا ۱۲۰ درجه نباشد . این عدم تعادل، یک ولتاژ توالی منفی در ترمینال های ثانویه به وجود می آورد

که این ولتاژ توالی منفی می تواند برای تغذیه موتورهای سه فاز بسیار زیان بار باشد . برای نمونه، امپدانس توالی منفی موتورهای القایی سه فاز می تواند تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد امپدانس توالی مثبت باشد . جریان توالی منفی که یک ولتاژ توالی منفی با دامنه معلوم تولید می کند ۵ تا ۱۰ برابر جریانی است که اعمال همین ولتاژ به توالی مثبت ایجاد می نماید . به علاوه، اعمال ولتاژ توالی منفی به یک ماشین دوار، شاری را در ماشین به وجود می آورد که در خلاف جهت گردش موتور می چرخد . اثرات گرمایی ناشی از عبور این شار از رتور، بسیار شدیدتر از اثرات عبور همین جریان از توالی مثبت می باشد .

با توجه به این که در طراحی موتورهای سه فاز هیچ گونه پیش بینی خاصی برای تحمل جریان توالی منفی به عمل نمی آید عدم تعادل ولتاژ تا حد ممکن باید کوچک نگه داشته شود . به طور کلی، حداکثر ولتاژ فاز ثانویه نباید بیش از ۵ تا ٦ درصد از حداقل ولتاژ ثانویه تجاوز کند . بعضی موتورها حتی محدودیت های شدید تری نیز در این رابطه دارند .

WikiPower.ir

۱-۷-٤ بانک های ستاره – مثلث

بسیاری از مشکلات مطرح شده برای اتصال های ستاره – ستاره در اتصال ستاره – مثلث وجود ندارد . مثلث مسیری برای گردش جریان های هارمونیک سوم ایجاد می کند بنابراین عملا جریان های هارمونیک سوم در خطوط تغذیه ظاهر نمی شوند . مثلث بسته عملا نقطه خنثی بانک را به نقطه خنثی سیستم قفل می کند به گونه ای که مسائل مربوط به انتقال نقطه خنثی در این اتصال به ندرت پدید می آید . البته هم سیم پیچی اولیه و هم ثانویه را می توان به عنوان مثلث انتخاب نمود و مثلث برای پایدار کردن نقطه خنثی طرف ستاره و نه طرف مثلث به کار می رود .

اگر طرف ستاره زمین شده باشد ستاره منبعی از جریان زمین خواهد بود . در نتیجه، هر خطای زمینی روی سیستم متصل شده (چه منابع زمین اضافی باشد چه نباشد) باعث جاری شدن جریان

اتصال کوتاه در ترانسفورماتور خواهد شد . برای حذف این جریان های اتصال کوتاه از روی سیستم یا جدا کردن ترانسفورماتور زمین شده به منظور جلوگیری از آسیب دیدن ترانسفورماتور، باید وسایل لازم تعبیه شود . این مسأله معمولا مشکل خاصی ایجاد نمی کند زیرا معمولا خطا به وسیله فیوز،مدار شکن و غیره حذف می گردد .

همچنین بانک ستاره – مثلث زمین شده تمایل به متعادل نمودن دیگر بارهای تک فاز متصل شده بین خط و نقطه خنثی روی سیستم ستاره دارد . یک بار تک فاز دور روی سیستم، می تواند به جای تغذیه مستقیم از منبع باعث به وجود آمدن جریان گردشی در ستاره مجاور شود . این مسأله می تواند باعث اضافه بار شدن یک بانک کوچک نزدیک یک بار تک فاز بزرگ شود .

هنگام استفاده از ترانسفورماتور های ستاره – مثلث زمین شده کوچک در یک سیستم زمین نشده که ظرفیت اتصال کوتاه بالایی برای خطاهای فاز دارد باید دقت زیادی مبذول داشت . خطاهای خط به زمین روی سیستم بوسیله ی امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور محدود می شود و تا جایی که ترانسفورماتور مؤثر است، دامنه آن در حدود دامنه جریان خطای ترانسفورماتور می باشد . با این وجود این جریان در مقایسه با جریان بار کلی سیستم مورد نظر کوچک است . بنابراین تجهیزات حفاظتی فیدرهای سیستم تغذیه، خطای زمین را حذف نخواهند کرد و جریان اتصال کوتاه ممکن است در فاصله زمانی کوتاهی به ترانسفور آسیب برساند . این وضعیت را به چند صورت می توان اصلاح کرد مثل استفاده از رله های حفاظتی که خطاهای زمین را تشخیص می دهند، تزریق امپدانس میان نقطه خنثی ترانسفورماتور و زمین، فیوزدار کردن ترانسفورماتور و غیره .

اتصال ستاره – مثلث دارای یک انتقال فاز ذاتی میان سیم پیچی های اولیه و ثانویه است . ترانسفورماتورها معمولا به گونه ای متصل می شوند که ولتاژ فاز A نسبت به نقطه خنثی در طرف فشار

قوی به اندازه ۳۰ درجه جلوتر از ولتاژ فاز a نسبت به نقطه خنثی طرف فشار ضعیف باشد . با این حال، اتصالاتی به غیر از این نیز وجود دارند .

هنگامی که بانک، متشکل از سه ترانسفورماتور تک فاز می باشد امپدانس توالی مثبت، منفی و صفر

برابرند . برای ترانسفورماتور های سه فاز با هسته زرهی امپدانس توالی صفر تقریبا برابر امپدانس توالی مثبت می باشد . در ترانسفورماتور های سه فاز نوع هسته ای ، امپدانس توالی صفر عموما ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر از امپدانس توالی مثبت می باشد زیرا امپدانس شاخه مغناطیس کننده در معادل توالی صفر نسبتا کم است .

در مورد خطاهای نزدیک یک ترانسفورماتور ستاره – مثلث زمین شده باید توجه داشت که جریان خطای زمین گاهی اوقات بیشتر از جریان خطای فاز می باشد . برای نمونه، اتصال کوتاهی روی ثانویه ستاره زمین شده یک ترانسفورماتور که اولیه آن به صورت مثلث بسته شده است در نظر بگیرید . نسبت جریان خطای زمین به جریان خطای سه فاز برابر است با :

WikiPower.ir

امپدانس توالی صفر تنها امپدانس بانک ترانسفورماتوری است در حالی که امپدانس های توالی مثبت و منفی شامل بانک به علاوه خطوط تغذیه به علاوه امپدانس سیستم می باشند . با توجه به این که Z_0 کمتر از $Z_1=Z$ می باشد، اتصال کوتاه خط به زمین روی ثانویه جریان های خطای بالاتری نسبت به یک خطای سه فاز تولید می کند .

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

از یک بانک ستاره – مثلث زمین شده می توان به عنوان ترانسفور زمین کننده روی یک سیستم زمین نشده استفاده کرد . اگر بخواهیم جریان را بیشتر از آنچه که ترانسفورماتور به تنهایی انجام می دهد محدود کنیم، می توانیم امپدانس اضافی بین نقطه خنثی بانک و زمین قرار دهیم (اگر اتصال به عنوان ترانسفورماتور زمین کننده به کار رفته است، می توان امپدانسی در مثلث ثانویه قرار داد) .

اتصال ترانسفورماتور با اولیه مثلث و ثانویه ستاره، برای تغذیه ثانویه چهار سیمه مناسب می باشد و همچنین تنظیم ولتاژ آن برای بارهای تک فاز به نقطه خنثی عادل است . اگر اولیه به صورت ستاره زمین نشده متصل شده باشد باز کردن یکی از سرهای تغذیه، ولتاژ تک فاز در ثانویه به وجود خواهد آورد . ولتاژ بین یک جفت از ترمینال های ثانویه به صفر و ولتاژ بین دو جفت دیگر به ۸۶/۶ درصد مقدار عادی افت خواهد نمود . این شرایط تک فازی برای موتورهای سه فاز متصل شده به ثانویه، قابل تحمل نیست .

این شرایط تک فازی در حالتی که نقطه خنثی بانک زمین شده و سیستم تغذیه زمین نشده است و سیم اولیه باز است نیز می تواند وجود داشته باشد . اگر نقطه خنثی بانک و سیستم تغذیه هر دو زمین شده باشند، این شرایط به وجود نخواهد آمد . این حالت اخیر از نظر الکتریکی شبیه مورد اتصال ستاره باز می باشد که بعدا بررسی خواهد شد . تک فاز شدن یا عدم تعادل قابل توجه ولتاژهای ثانویه، بسته به محل قرار گرفتن مدار شکن ها یا فیوزها، درجه زمین شدن، وجود بانک های موازی و غیره به شکل های متعددی روی می دهد . همه این ترکیب ها را نمی توان در اینجا ذکر کرد ولی در انتخاب اتصال ترانسفورماتور و کار گذاشتن فیوزها و دیگر تجهیزات حفاظتی تک فاز، احتمال و عواقب تک فاز شدن باید در نظر گرفته شود .

اتصال ستاره – باز

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

اگر سیستم اولیه یک سیستم چهار سیمه باشد با اتصال دو ترانسفورماتور به صورت ستاره باز، همانگونه که در شکل (۱-۲۷) نشان داده شده است، می توان یک تغذیه ثانویه سه فاز به دست آورد . دلایل استفاده از اتصال ستاره – باز بسیار شبیه دلایل ذکر شده برای اتصال مثلث – باز می باشد .

اتصال ستاره – باز مزایای بسیاری نسبت به اتصال مثلث – باز دارد . مزیت اصلی این است که در اتصال ستاره – باز می توان از ترانسفورماتورهایی با یک بوشینگ اولیه و با عایق بندی درجه بندی شده کاهش یافته مرحله ای استفاده نمود . در نتیجه در صورت استفاده از این اتصال، هزینه کمتری نسبت به استفاده از اتصال مثلث باز صرف می شود .

در اتصال ستاره – باز نیازی به حمل سیم های هر سه فاز به داخل تانک نیست . با این وجود، معمولا یک سیم نول به داخل بانک برده می شود به طوری که هیچ گونه صرفه جویی در مس اولیه در مقایسه با مثلث – باز وجود ندارد . امکان و میزان صرفه جویی بستگی به مورد خاص دارد و بشدت متأثر از بودن یا نبودن دیگر بانک های تک فاز یا سه فاز روی فیدر می باشد .

اتصال ستاره – باز معایبی نیز در مقایسه با مثلث باز دارد . جریان های هارمونیک سوم و جریان های بار باید از طریق مدارهای زمین اولیه باز گردند . تداخل تلفنی در این حالت بیشتر از حالت اتصال مثلث باز می باشد . همچنین تنظیم ولتاژ برای بانک ستاره – باز کمی بزرگتر از بانک مثلث – باز است . زیرا جریان بار از طریق مدار های زمین اولیه باز می گردد و به طور کلی در اتصال مثلث باز، امپدانس توالی صفر خطوط تغذیه بزرگتر از امپدانس توالی مثبت می باشد . ملاحظات مربوط به تغذیه همزمان بارهای تک فاز و سه فاز و مسائل مربوط به ولتاژ های ثانویه نا متعادل در این اتصال اساسا شبیه موارد تشریح شده برای اتصال مثلث – باز می باشد .

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

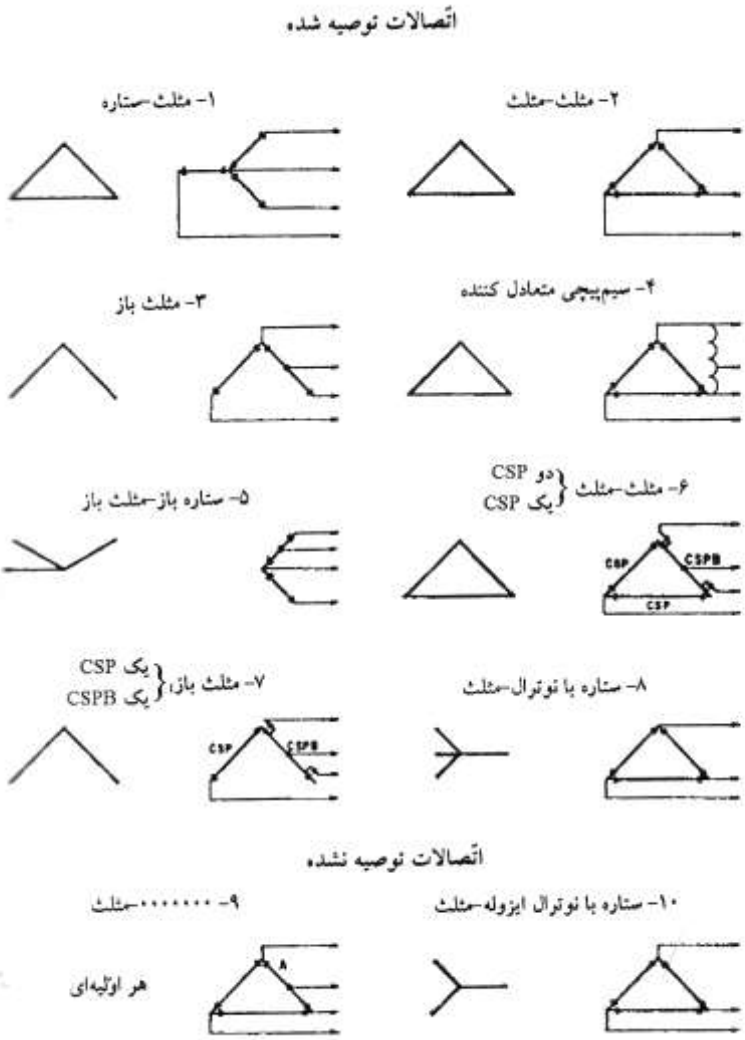
استفاده از اتصال ستاره – باز، همچنین می تواند استفاده از ترانسفورماتور های با سطح عایقی پایین تری در مقایسه با اتصال مثلث – باز را ممکن سازد . برای نمونه، در یک سیستم زمین شده 14.4/24.9kV از ترانسفورماتور های کلاس عایق بندی ۱۸ kV در اتصال ستاره – باز می توان استفاده کرد اما برای اتصال مثلث – باز باید از ترانسفورماتورهای کلاس ۲٤ kV استفاده کرد . بنابراین استفاده از اتصال ستاره – باز هزینه ی کمتری در بر دارد .

۱-۷-۵ اتصالات ترانسفورماتور CSP

اکثر اتصالات رایج ترانسفورماتور CSP تک فاز در شکل (۱-۲۷) نشان داده شده است . اتصالات ۱ تا ۸ کاربرد زیادی دارند ولی اتصالات ۹ و ۱۰ توصیه نمی شوند .

در اتصال ۹، از دست رفتن ترانسفورماتور A باعث می شود که ولتاژ خط به خط روی ترکیب سری دو گروه از بار های تک فاز که در حالت عادی توسط ترانسفورماتور A تغذیه می شوند بیافتد . با توجه به این که معمولا امپدانس د گروه بار تک فاز متفاوت می باشد، برای یک گروه از بارهای تک فاز شرایط اضافه ولتاژ و برای دیگر گروه شرایط کمبود ولتاژ پیش می آید . استفاده از یک کویل متعادل کننده همانند اتصال شماره ٤، چاره ای مناسب برای این مشکل می باشد .

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



شکل ۱-۲۷ اتصالات پیشنهادی برای ترانسفورماتورهای تک فاز CSP در بانک های سه فاز

ایراد اتصال ۱۰ این است که از دست رفتن هر یک از ترانسفورماتورها، معادل باز شدن یکی از سیم های اولیه می باشد . این مسأله باعث می گردد که به دو اولیه سری شده، باقیمانده ولتاژ تک فاز خط به خط اعمال شود . در این صورت ثانویه، بارهای سه فاز را به صورت تک فاز سه سیمه تغذیه خواهد نمود و روی بارهای تک فاز نصف ولتاژ عادی یا ولتاژ صفر خواهد افتاد . اگر یک سیم خنثی اولیه به این اتصال اضافه شود، شبیه اتصال شماره ۸ شکل (۱-۲۷) خواهد شد که اتصالی مناسب است . زمین کردن نقطه خنثی اولیه و نقطه خنثی منبع به جای اضافه کردن یک سیم نول، این وضعیت را به

طور کامل تصحیح نمی کند زیرا مسیر زمین امپدانس نسبتا بالایی دارد و همچنین امکان تداخل تلفنی نیز بیشتر است .

۱-۸ ترانسفورماتور های زمین

ترانسفورماتور های زمین برای اتصال نقطه خنثی به زمین در یک سیستم سه فاز به کار می روند . این ترانسفورماتور دارای اتصال ستاره – مثلث یا زیگزاگ مطابق شکل (۱-۲۸) است . قدرت نامی ترانسفورماتور سه فاز زمین برابر حاصلضرب ولتاژ فاز به زمین و جریان نقطه خنثی یا زمین که ترانسفورماتور در حالت اتصال کوتاه تحمل می کند می باشد . معمولا قدرت نامی زمانی برای ۱ دقیقه برای ترانسفورماتور های زمین به کار برده می شود . اگر چه ظرفیت های نامی دیگر از قبیل استانداردهای ذکر شده توسط موسسه AIEE می تواند به کار برده شود . ولتاژ نامی ترانسفورماتور زمین معمولا ولتاژ خط به خط است که ترانسفورماتور برای آن طراحی شده است . وقتی ترانسفورماتور زمین در یک شبکه سه فاز متعادل مورد بهره برداری قرار می گیرد فقط جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور از آن عبور می کند .در حالت خطای زمین جریان قابل توجهی از مسیر زمین عبور می نماید .

ترانسفورماتور های زمین به خصوص با اتصال زیگزاگ، معمولا طوری طراحی می شوند که وقتی یک اتصال فاز به زمین در ترمینال ترانسفورماتور اتفاق بیفتد جریان نامی از نقطه خنثی عبور کند . در این حالت فرض می شود که ولتاژ تغذیه ثابت بماند . این وضعیت معادل اعمال ولتاژ مؤلفه صفر به میزان ۱۰۰ درصد در ترمینال های ترانسفورماتور است که باعث عبور جریان نامی از ترانسفورماتور می شود . بعضی اوقات مقاومت یا امپدانس های دیگر به طور سری با نقطه خنثی ترانسفورماتور قرار می دهند . مدار معادل برای ترانسفورماتور های زمین با مقاومت اضافی در نقطه خنثی در ضمیمه آمده است .

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

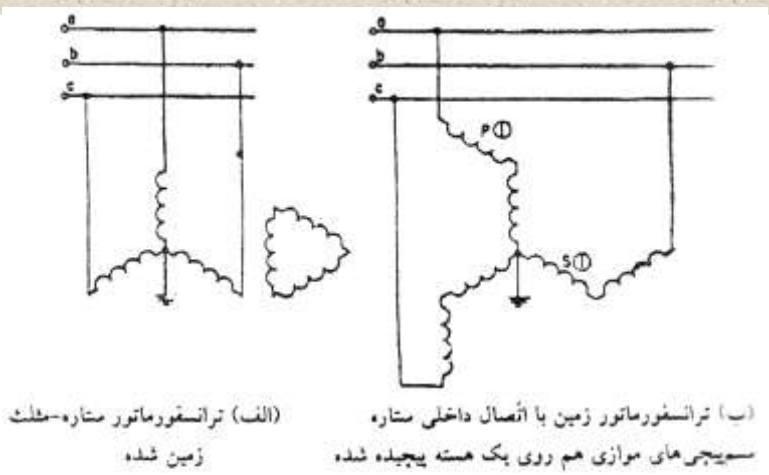
ترانسفورماتور زمین وسیله ای است که برای مدت کوتاهی به کار می رود، لذا هزینه آن به ازای یک قدرت مساوی کمتر از ترانسفورماتورهایی است که دائما تحت بارند .

۱-۸-۱ امپدانس های اتصال ستاره – مثلث

– امپدانس در مقابل جریان های مؤلفه صفر در هر فاز یک ترانسفورماتور زمین با اتصال ستاره مثلث که از سه ترانسفورماتور تک فاز تشکیل شده است Z_{PS} می باشد . امپدانس نشتی اهمی بین یک سیم پیچ اولیه (ستاره) و سیم پیچ ثانویه مربوطه (مثلث) برابر با امپدانس مؤلفه صفر است ($Z_0 = Z_{PS}$).

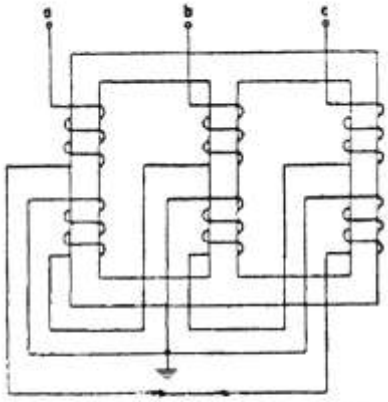
WikiPower.ir

www.wikipower.ir
برای دریافت فایل Wordپروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

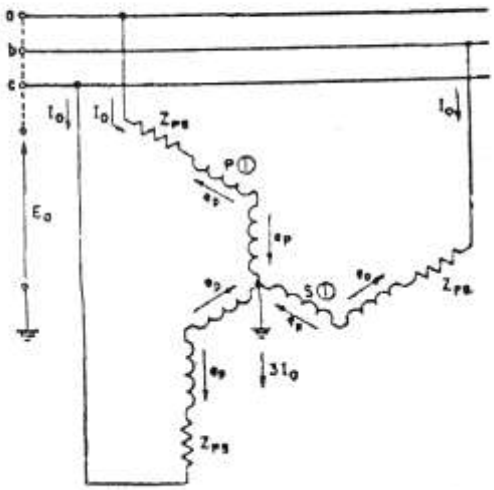


(الف) ترانسفورماتور ستاره-مثلث زمین شده

(ب) ترانسفورماتور زمین با اتصال داخلی ستاره سیم‌پیچی‌های موازی هم روی یک هسته پیچیده شده



(ج)آرایش سیم‌پیچی یک ترانسفورماتور زمین با اتصال داخلی ستاره ساختار هسته‌ای سه‌فاز



(د)مدار معادل یک ترانسفورماتور زمین با اتصال داخلی ستاره

شکل ۱-۲۸ ترانسفورماتورهای زمین ستاره – مثلث و زیگزاگ

درصد امپدانس مؤلفه صفر بر حسب KVA اتصال کوتاه و ولتاژ خط به خط برابر است با :

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

$$Z_0\% = \frac{Z_{PS} \times (KVA)}{10 \times (kV)^2} \qquad (۳۰-۱)$$

در یک ترانسفورماتور زمین با اتصال ستاره – مثلث مقدار Z_0 ممکن است کمتر از Z_{PS} باشد ($Z_0 / Z_{PS} = 0.85$).

۱-۸-۲ امپدانس های اتصال زیگزاگ

امپدانس در مقابل جریان مؤلفه صفر در هر فاز ترانسفورماتور با اتصال زیگزاگ که مستقیما به زمین وصل شده باشد با توجه به شکل (۱-۲۸- ج) از روابط زیر محاسبه می شود :

$$E_0 = I_0 Z_{PS} - e_P + \qquad (۳۱-۱)$$

e_P

درصد امپدانس مؤلفه صفر برای اتصال زیگزاگ معمولا برحسب قدرت اتصال کوتاه KVA و ولتاژ خط به خط به صورت زیر بیان می شود :

$$Z_0\% = \frac{Z_{PS}\,(KVA)}{10 \times (kV)^2} \qquad (۳۲-۱)$$

۱-۹ بارگیری ترانسفورماتور های توزیع

کیلو ولت آمپر یک ترانسفورماتور، توان خروجی است که می توان به طور پیوسته در ولتاژ و فرکانس نامی از ترانسفورماتور گرفت بی آن که افزایش دمای آن از مقدار مشخصی فراتر رود . برای مقاصد نامی به جای دمای واقعی از افزایش دما استفاده می شود زیرا دمای محیط بسته به شرایط کاری

بسیار متغیر است . عمر عایق بندی ترانسفورماتور ، بستگی به دمای عایق بندی و طول مدت تداوم این دما دارد . بنابراین پیش از تعیین قابلیت های تحمل اضافه بار ترانسفورماتور، دمای محیط، شرایط پیش از بار و طول مدت بارهای پیک باید معلوم شود .

در مرجع [٦] با عنوان " راهنمای بارگیری ترانسفورماتورهای توزیع نوع هوایی روغنی، با افزایش دمای متوسط سیم پیچی ۵۵ $^{\circ}C$ و ٦۵ $^{\circ}C$ "، که پیوستی از استاندارد ANSI می باشد منحنی های عمر عایقی بیست و دو ترانسفورماتور آورده شده است . این منحنی ها بیانگر حداقل عمر ۲۰ سال در دماهای نقطه

داغ [1] ۹۵ $^{\circ}C$ برای افزایش دماهای حول نقطه کار ۵۵ $^{\circ}C$ و ٦۵ $^{\circ}C$ می باشند . راهنماهای پیشین براگیری ترانسفورماتور برا ساس قانون عمر عایق بندی ۸ $^{\circ}C$ هستند . برای مثال، در ترانسفورماتور های با کلاس عایقی A (معمولا روغنی)، نرخ فرسودگی با ۸ $^{\circ}C$ افزایش در دما، تقریبا دو برابر می شود . به عبارت دیگر اگر ترانسفورماتوری با کلاس عایقی A، در دمایی ۸ $^{\circ}C$ بالاتر از دمای نامی خود کار کند، عمرش نصف خواهد شد . برای توضیحات بیشتر توجه خواننده را به مراجع آخر فصل به خصوص مراجع [۷و۸] جلب می نماییم .

۱-۱۰ اتو ترانسفورماتور

۱-۱۰-۱ تئوری اتو ترانسفورماتور با دو سیم پیچی

یک اتو ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه شامل یک سیم پیچی اولیه و یک سیم پیچ ثانویه بر روی یک هسته مشترک شبیه ترانسفورماتور های دو سیم پیچ معمولی است با این تفاوت که در اتو ترانسفورماتورها دو سیم پیچ به صورت الکتریکی به هم ارتباط دارند به طوریکه قدرت KVA تبدیل

[1] - HOT SPOT

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

شده به وسیله کوپلاژ مغناطیسی قسمتی از قدرت KVA منتقل شده کل است . مشخصات نامی اتو ترانسفورماتورها معمولا بر حسب KVA مدار بدون توجه به قدرت KVA سیم پیچ داخل آن است .

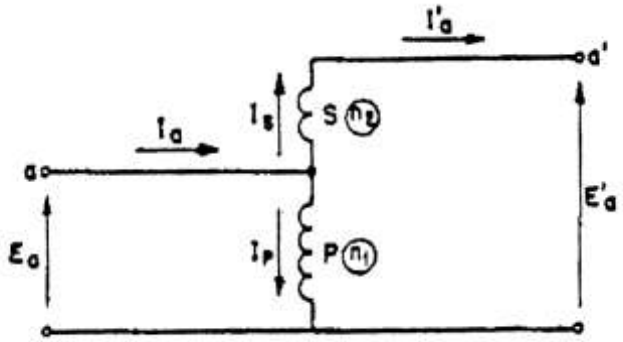
اتو ترانسفورماتور نشان داده شده در شکل (۱-۲۹) شامل سیم پیچ اولیه P است که به طور مشترک بین مدار های فشار قوی و ضعیف آن قرار گرفته است . سیم پیچ ثانویه S به طور سری با مدار فشار قوی قرار دارد . در شرایط بی باری، ولتاژ مدار فشار قوی E'a برابر مجموع ولتاژهای سیم پیچ های اولیه و ثانویه است . ولتاژ طرف فشار ضعیف E_a در این حالت برابر ولتاژ سیم پیچ اولیه است .

رابطه بین ولتاژ سیم

پیچ های اولیه و ثانویه تابع نسبت دور سیم پیچ ها $\frac{n_2}{n_1}$ می باشد :

$$\frac{E'a}{Ea} = \frac{Ea+\frac{n_2}{n_1}Ea}{Ea} = 1+\frac{n_2}{n_1} = \frac{N}{} \qquad (۱-۳۳)$$

به طوری که N نسبت به ولتاژ کلی بین سیم پیچی های مدار اولیه و ثانویه است .



شکل ۱-۲۹ مدار یک اتو ترانسفورماتور دو سیم پیچه

وقتی که ترانسفورماتور زیر بار است، آمپر دور اولیه باید متعادل با آمپر دور ثانویه باشد یعنی :

$$n_1 I_P = n_2 I_S = n_2 I'_a \qquad (۳۴-۱)$$

$$= \frac{n_1}{n_2} I_P \qquad (۳۵-۱)$$

I'_a

$$I_a = I_P + I_S \frac{n_2}{n_1} \quad I'_a + I'_a = NI'_a \qquad (۳۶-۱)$$

=

کل قدرت KVA اتو ترانسفورماتور برابر $E_a \times I_a$ یا $E'_a \times I'_a$ است در صورتی که قدرت KVA سیم پیچ ها $E_a \times I_a$ یا $\frac{n_2}{n_1} E_a I_S$ می باشد . نسبت بین قدرت سیم پیچ اولیه به قدرت مدار از رابطه زیر به دست می آید :

$$\frac{\text{KVA}_P}{\text{KVA}_t} = \frac{E_a \times I_P}{E_a \times I_a} = \frac{I_P}{\left(\frac{N}{N-1}\right) I_P} = \qquad (۳۷-۱)$$

$\frac{N-1}{N}$

برای یک اتو ترانسفورماتور با قدرت ۱۰۰۰ KVA با نسبت سیم پیچ ۲۲ kV به ۳۳ kV $\left(N = \frac{33}{22} = 1.5\right)$ قدرت کیلو ولت آمپر سیم پیچ ها از رابطه زیر به دست می آید :

$$\text{KVA}_P = \text{KVA}_S = \frac{N-1}{N} \text{KVA}_t = \frac{1.5-1}{1.5} \times 1000 = 333$$

KVA

کاهش اندازه قسمت های مختلف ترانسفورماتور در یک اتو ترانسفورماتور اندازه کلی آن را کاهش می دهد و هزینه آن را کمتر می کند در نتیجه بازده آن را در مقایسه با ترانسفورماتور های دو سیم پیچه معمولی به ازای یک قدرت KVA یکسان کاهش می دهد . در مثال بالا اتو ترانسفورماتور قدرت ۱۰۰۰KVA از نظر تئوری دارای اندازه های معادل ترانسفورماتور های معمول با قدرت

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

۳۳۳KVA است و این کاهش نسبی در اندازه اتو ترانسفورماتور هزینه آن را تقریبا به همین نسبت کاهش می دهد . تلفات کل اتو ترانسفورماتور (با قدرتت ۱۰۰۰KVA) قابل مقایسه با تلفات در یک ترانسفورماتور معمولی با قدرت ۳۳۳KVA است و در نتیجه بازده به ازای قدرت منتقل شده زیاد می باشد . یک اتو ترانسفورماتور ضمن اضافه کردن یک امپدانس سری به مدار، باعث تبدیل ولتاژ و جریان در محل اتصال به شبکه می شود . امپدانس سری با توجه به شکل (۱-۳۰) ارزیابی می گردد . در این جا ترمینال فشار ضعیف اتصال کوتاه شده است در نتیجه امپدانس اندازه گیری شده از طرف فشار قوی مساوی امپدانس سری اتو ترانسفورماتور می باشد . باید توجه داشت که شکل (۱-۳۰) دقیقا همان مدار بکار رفته برای اندازه گیری امپدانس نشتی است . اگر Z_{PS} اندازه گیری شده در طرف ثانویه در حالت اتصال کوتاه اولیه باشد، دو تبدیل باید انجام شود . ابتدا امپدانس سری را به طرف فشار ضعیف منتقل می کنیم و سپس این امپدانس را بر حسب Z_{PS} بیان می نماییم .

$$Z_a = \frac{1}{N^2} Z'_a = \frac{1}{N^2}$$ (۱-۳۸)

Z_{SP}

$$Z_{SP} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 Z_{PS} = (N -$$ (۱-۳۹)

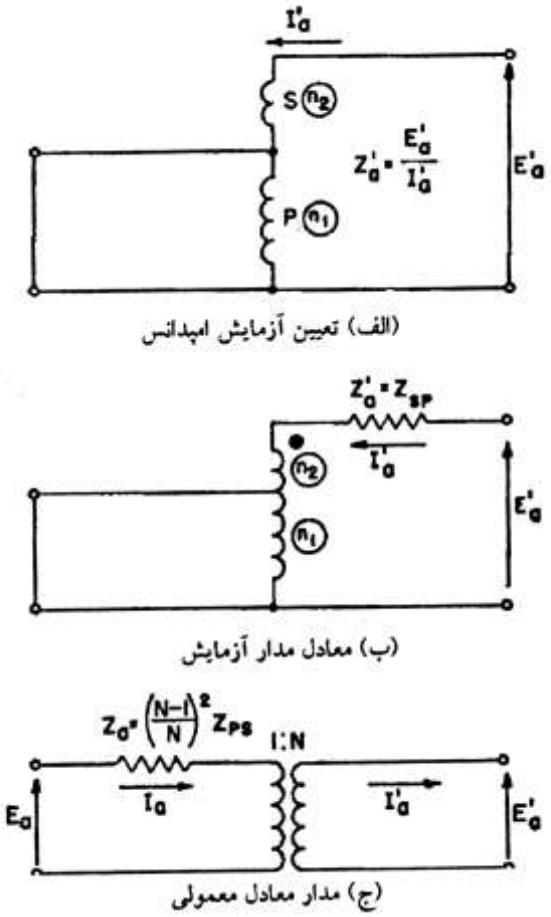
$12Z_{PS}$

از رابطه فوق مدار معادل فرم معمول اتو ترانسفورماتور مطابق شکل (۱-۳۰) به دست می آید :

$$Z_a = \quad Z_{PS}$$ (۱-۴۰)

$\left(\frac{N-1}{N}\right)^2$

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



شکل (۱-۳۰) مدار های معادل برای اتو ترانسفورماتور های دو سیم پیچه

WikiPower.ir

امپدانس مدار یک اتو ترانسفورماتور کمتر از امپدانس یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه معادل است . همانطور که در معادله (۱-۳۰) نشان داده شده است این امپدانس سری کمتر، ضمن بهبود تنظیم ولتاژ ترانسفورماتور اجازه عبور جریان اتصال کوتاه بیشتر در شرایط خطا را می دهد . اغلب این امپدانس بر مبنای مقادیر نامی اتو ترانسفورماتور، کمتر از ٤ درصد می باشد و این بدین معنی است که جریان اتصال کوتاه سه فاز از بیست و پنج برابر جریان نامی برای ۲ ثانیه که طبق استاندارد مجاز است تجاوز می کند . به این دلیل اتو ترانسفورماتورها مانند دگولاتورهای ولتاژ معمولا نمی توانند خود را در مقابل جریان اضافی خطا محافظت نمایند .

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

۱-۱۰-۲ اتو ترانسفورماتور های سه سیم پیچه

اتو ترانسفورماتورهای سه فاز معمولا به طور ستاره – ستاره با سر وسط زمین شده مورد بهره برداری قرار می گیرند . در اکثر مواقع از یک سیم پیچ سوم روی هسته با اتصال مثلث برای حمل مؤلفه هارمونیک سوم جریان تحریک استفاده می شود . ظرفیت این سیم پیچ اگر برای تحمل فقط جریان هارمونیک استفاده شود کم است . اما نظر به این که در زمان بروز خطای زمین جریان زیادی از آن می گذرد اندازه آن افزایش

می یابد . بدین منظور معمولا قدرت این اتصال مثلث را ۳۵ درصد قدرت اتو ترانسفورماتور معادل دو سیم پیچه در نظر می گیرند .

از آن جایی که لازم است در اکثر مواقع یک سیم پیچ ثالثیه با اتصال مثلث داشته باشیم، بهتر است سیم پیچ را طوری طراحی کنیم که بتوان از آن بار گرفت . با این کار، اتو ترانسفورماتور سه سیم پیچه خواهیم داشت به طوری که می تواند سه مدار خارجی را تغذیه نماید .

WikiPower.ir

۱-۱۰-۳ تپ های اتو ترانسفورماتور

معمولا از تپ های مختلف روی سیم پیچ های اتو ترانسفورماتور برای تنظیم ولتاژ یک طرف یا دو طرف اتو ترانسفورماتور استفاده می کنند . معمولا قرار دادن تپ در روی سیم پیچ نزدیک ترمینال ها برای ولتاژهای بیش از ۲۲ کیلو ولت توصیه نمی شود زیرا در این صورت عایق اضافی بین دورهای سیم پیچ در نزدیکی ترمینال های مورد نیاز است . بدین منظور تپ ها را در وسط سیم پیچی در نظر می گیرند . تپ می تواند روی سیم پیچ اولیه یا ثانویه یا هر دو در نظر گرفته شود . ولی بعضی از ترکیب

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

تپ ها بهتر از بقیه است . مدار های طرف اولیه یا ثانویه به هم مربوط هستند . در شرایط بی باری رابطه

بین ولتاژ های طرف اولیه و ثانویه به صورت زیر است :

$$E'_a = E_a \qquad (۴۱-۱)$$

$$+\frac{n_2+t_2 n_2}{n_1+t_1 n_1} E_a$$

که در آن :

n_1 : تعداد دور های سیم های طرف اولیه بدون تپ ها

n_2 : تعداد دور های سیم های طرف ثانویه بدون تپ ها

t_1 : نسبت سیم پیچ های تپ در سیم پیچ های اولیه

t_2 : نسبت سیم پیچ های تپ در سیم پیچ های ثانویه

اگر E_a ثابت برابر ۱ پریونیت فرض شود بر مبنای ولتاژ نامی طرف فشار ضعیف سه حالت مختلف

ممکن است :

الف) وجود تپ ها فقط در سیم پیچ ثانویه :

$$E'_a = 1+\frac{n_2}{n_1} + t_2 \frac{n_2}{n_1} \qquad (۴۲-۱)$$

ب) وجود تپ ها فقط در سیم پیچ اولیه :

$$E'_a = 1+ \frac{n_2}{n_1} - \frac{t_1 n_2}{n_1+n_1 t_1} \qquad (۴۳-۱)$$

ج) تپ در هر دو سیم پیچ اولیه و ثانویه :

$$E'_a = 1+\frac{n_2}{n_1} + \frac{t_2-t_1}{1+t_1} \times \frac{n_2}{n_1} \qquad (۴۴-۱)$$

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

معمولا توصیه می شود که ترکیب تپ ها را طوری مشخص گردد که اتو ترانسفورماتور در وضعیتی کار کند که افت ولتاژ روی هر دور سیم پیچ بدون توجه به محل تپ یکسان باشد .

۱-۱۰-٤ مشخصه های بهره برداری اتو ترانسفورماتور

اتو ترانسفورماتور بر خلاف ترانسفورماتور های معمولی یک اتصال فلزی بین مدارهای طرف ولتاژ قوی و ولتاژ ضعیف ایجاد می کند . اگر پتانسیل هر مدار اتو ترانسفورماتور نسبت به زمین بوسیله ای تنظیم نشود، ولتاژ مدار فشار ضعیف در اثر اضافه ولتاژ در طرف فشار قوی بالا می رود . این مشکل با اتصال نقطه خنثی اتو ترانسفورماتور به زمین حداقل می شود .

به طور کلی اتو ترانسفورماتور ها هزینه کمتر، بازده بیشتر و نتظیم ولتاژ بهتر نسبت به ترانسفورماتورها دارند . اشکال آن ها نسبت به ترانسفورماتور های معمولی، راکتانس کم است که باعث عبور جریان اتصال کوتاه بیشتر می شود و همچنین ترکیب پیچیده تپ سیم پیچ ها است . سیم پیچ اولیه و ثانویه از هم ایزوله نیستند و دو سیم پیچ بدون اختلاف فاز بین اولیه و ثانویه مورد بهره برداری قرار می گیرند مگر آن که از اتصال زیگزاگ استفاده شود . مزیت هزینه کمتر و بازده بیشتر اتو ترانسفورماتورها (در مقابل ترانسفورماتورها) با افزایش نسبت تبدیل اتو ترانسفورماتورها کاهش می یابد . بنابراین اتو ترانسفورماتورها در سیستم های قدرت برای نسبت تبدیل کم (معمولا کمتر از $\frac{2}{1}$) به کار می روند .

۱-۱۱حفاظت ترانسفورماتور های توزیع

حفاظت ترانسفورماتور های کوچک توزیع معمولا توسط فیوز انجام می شود ولی برای ترانسفورماتور های بزرگتر باید حفاظت های پیچیده و کامل با حساسیت مناسب و سرعت بالا و پوشش خوب حفاظتی در برابر وقوع انواع خطاها به کار رود .

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

رله هایی که نقش حفاظت ترانسفورماتور را بر عهده دارند به دو دسته تقسیم می شوند : یکی رله هایی که توسط پیمانکار پست بر روی تابلو های حفاظت اتاق کنترل نصب می شوند و گروه دیگر حفاظت های مکانیکی ترانسفورماتور مانند رله بوخهلتز ، رله کنترل فشار ،کنترل دمای سیم پیچی ،دمای روغن ،تپ چنجر و غیره می باشد که توسط سازنده ترانسفورماتور بر رئی ترانسفورماتور تعبیه می شود .

حفاظت های اخیر نقش مهمی را در حفظ سلامت ترانسفورماتور و پیشگیری از وقوع عیب دارند . این حفاظت ها اغلب دو پله ای هستند که در پله اول ، توجه سیستم مراقبت و کنترل و شخص اپراتور را به شرایط نامطلوبی که ناشی از شروع عیب داخلی ترانسفورماتور یا بهره برداری نادرست می باشد جلب می نماید . این هشدارها که باعث جلوگیری از معیوب شدن ترانسفورماتور می شوند ، نقش مهمی را در پیشگیری از گسترش یا وقوع عیب دارند . حفاظت های دسته اخیر به شرطی کارساز خواهند بود که پست دارای تغذیه کمکی و مدارشکن و یا سیستم مخابراتی برای انتقال اطلاعات باشد .

نکته مهم دیگری که در حفاظت ترانسفورماتور باید به آن توجه نمود این است که اغلب خطاهای داخلی ترانسفورماتور دارای دامنه کمی هستند که باعث اثرات ناچیزی در جریان ترمینال های ترانسفورماتور می شوند . به همین دلیل سنجش آنها صرفا توسط فیوز و یا رله جریان زیاد مشکل است و لذا ضرورت استفاده از حفاظت هایی که دارای حساسیت کافی و قادر به تشخیص اینگونه خطا ها هستند درک می شود .

حفاظت ترانسفورماتور همچنین باید دارای سرعت کافی باشند تا از گسترش عیب جلوگیری نمایند . بنابر این ضرورت وجود حفاظت های نوع دیفرانسیلی که محدوده مشخص را با سرعت زیاد حفاظت می نمایند حس می شود زیرا اینگونه حفاظت ها بخاطر محدوده عملکرد ، نیازی به هماهنگی با سایر رله های پست های مجاور ندارند و فقط باید قادر باشند بین شرایط خطا و شرایط نامطلوبی که به طور گذرا در هنگام بهره برداری پیش می آیند تفاوت قائل شوند .

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

۱-۱۱-۱ خطاهای ترانسفورماتور

خطاهای ترانسفورماتور را می توان به سه دسته تقسیم کرد :

الف) خطاهای داخلی ترانسفورماتور که شامل خطاهای سیم پیچی ، ترمینال ها ، هسته و بدنه می باشند .

ب) شرایط غیر عادی بهرابرداری که منجر به تحکیل اضافه ولتاژ و افزایش شار و یا اضافه بار روی ترانسفورماتور می شوند .

ج) خطاهای گذرای خارجی که ناشی از خود ترانسفورماتور نیستند ولی در صورت عدم رفع به موقع ، منجر به معیوب شدن ترانسفورماتور می شوند .

بر طبق گزارش منتشر شده از روی مقالات IEEE که طی آن خطاهای ترانسفورماتور در یک دوره ده ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته ، آمار خطا ها به ترتیب زیر است :

- خطاهای سیم پیچی (۵۱/۱٤ درصد)
- خطاهای تپ چنجر (۱۸/۷ درصد)
- خطاهای بوشینگ (۱۵/٤٤ درصد)
- خطاهای ترمینال ها (۷/۲۵ درصد)
- خطاهای هسته (۲/٦۷ درصد)
- خطاهای متفرقه (٤/۸۰ درصد)

پایان

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

مراجع

۱ –دکتر علی مطلبی

کتاب ترانسفورماتور یک فازه و سه فازه

نشر افروز

سال ۱۳۷۸

۲ –دکتر مسعو علی اکبر گلکار

طراحی و بهره برداری از سیستم های توزیع انرژی الکتریکی

نشر دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

سال ۱۳۷۹

WikiPower.ir