ISIRI
6177
1st.edition
NOV. 2002

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران
Institute of Standards and Industrial Research of Iran

استاندارد ملی ایران
۶۱۷۷
چاپ اول
آبان ماه ۱۳۸۱

ترانسفورماتورهای قدرت -

قسمت هشتم: راهنمای کاربرد ترانسفورماتور قدرت

Power transformers -

Part 8: Application guide

نشانی مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران :کرج - شهر صنعتی، صندوق پستی ۱۶۳-۳۱۵۸۵

دفتر مرکزی : تهران - بالاتراز میدان ولی‌عصر، کوچهٔ شهید شهامتی، پلاک ۱۴

صندوق پستی ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵

تلفن مؤسسه در کرج : ۸-۲۸۰۶۰۳۱ - ۰۲۶۱

تلفن مؤسسه در تهران : ۹-۸۹۰۹۳۰۸

دورنگار : کرج ۲۸۰۸۱۱۴ - ۰۲۶۱ تهران ۸۸۰۲۲۷۶ - ۰۲۱

بخش فروش – تلفن : ۲۸۰۷۰۴۵ - ۰۲۶۱ دورنگار : ۲۸۰۷۰۴۵ - ۰۲۶۱

پیام نگار Standard @ isiri.or.ir

بها: ۱۶۰۰۰ ریال

Headquarter: Institute of Standards and Industrial Research of IRAN

P.O.Box 31585-163 Karaj - IRAN

Central office: NO.14, Shahid Shahamati St., Valiasr Ave. Tehran

P.O.Box: 14155-6139

Tel.(Karaj): 0098 261 2806031-8

Tel.(Tehran): 0098 21 8909308-9

Fax(Karaj): 0098 261 2808114

Fax(Tehran): 0098 21 8802276

Email: Standard @ isiri.or.ir

Price: 16000 Rls

بسمه تعالی

آشنایی با مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب قانون، تنها مرجع رسمی کشور است که عهده‌دار وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی(رسمی) می‌باشد.

تدوین استاندارد در رشته‌های مختلف توسط کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان مؤسسه، صاحبنظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط با موضوع صورت می‌گیرد. سعی بر این است که استانداردهای ملی، در جهت مطلوبیت‌ها و مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فنی و فن‌آوری حاصل از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع شامل: تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، بازرگانان، مراکز علمی و تخصصی و نهادها و سازمان‌های دولتی باشد.

پیش‌نویس استانداردهای ملی جهت نظرخواهی برای مراجع ذینفع و اعضای کمیسیون‌های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرات و پیشنهادها درکمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که توسط مؤسسات و سازمان‌های علاقمند و ذیصلاح و با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌شود نیز پس از طرح و بررسی درکمیته ملی مربوط و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی چاپ و منتشر می‌گردد. بدین‌ترتیب استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مفاد مندرج در استاندارد ملی شماره «۵» تدوین و درکمیته ملی مربوط که توسط مؤسسه تشکیل می‌گردد به تصویب رسیده باشد.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد می‌باشد که در تدوین استانداردهای ملی ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی استفاده می‌نماید.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون به منظور حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردها را با تصویب شورای عالی استاندارد اجباری نماید. مؤسسه می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید.

همچنین به منظور اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و گواهی‌کنندگان سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و کالیبره‌کنندگان وسایل سنجش، مؤسسه استاندارد اینگونه سازمان‌ها و مؤسسات را براساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران مورد ارزیابی قرار داده و در صورت احراز شرایط لازم، گواهی‌نامه تأیید صلاحیت به آنها اعطا نموده و بر عملکرد آنها نظارت می‌نماید. ترویج سیستم بین‌المللی یکاها، کالیبراسیون وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی از دیگر وظایف این مؤسسه می‌باشد.

کمیسیون استاندارد ترانسفورماتورهای قدرت

بخش هشتم-راهنمای کاربرد ترانسفورماتور قدرت

رئیس	**سمت یا نمایندگی**
اعتماد،مسعود (فوق لیسانس مهندس برق)	مشاور موسسه استاندارد وتحقیقات صنعتی ایران
اعضاء	
بانکیان،محمد اسماعیل (فوق لیسانس مهندسی برق)	شرکت توانیر
ثابت ،علی رضا (فوق لیسانس مهندسی برق	شرکت ایران ترانسفو
خاکزاد،سیما (لیسانس فیزیک)	شرکت الکتروتکنوتک
فاضلی، فائزه (لیسانس مهندسی برق)	شرکت آزمایشگاههای صنایع برق
دبیر	
دیانت شعار، نوشین (لیسانس مهندسی الکترونیک)	موسسه استاندارد وتحقیقات صنعتی ایران

ترانسفورماتور قدرت

بخش هشتم:راهنمای کاربرد ترانسفورماتورهای قدرت

فهرست **صفحه**

۱- کلیات ۱

۱-۱ هدف ودامنه کاربرد ۱

۱-۲ مراجع الزامی ۲

۲- ویژگیهای مشخصه ترکیب بندی های گوناگون سیم پیچهای سه فاز و طرحهای مدار آهن ربایی ۳

۲-۱ سیم پیچهای با اتصال D-Y و Z ۳

۲-۲ ویژگیهای مشخصه ترکیب بندیهای اتصالات سیم پیچها ٤

۲-۳ طرحهای مختلف مدار آهن ربایی ۷

۳- ویژگیهای مشخصه و کاربردی ترانسفورماتورهای با اتصال از نوع اتوترانسفورماتور ۱۱

۳-۱ تعریف اتوترانسفورماتور ۱۱

۳-۲ ضریب کاهش یا ضریب اتو ۱۲

۳-۳ امپدانس اتصال کوتاه و اثرات شار نشتی ۱۲

۳-۴ محدودیتهای شبکه، توازن در عایقبندی ۱۳

۳-۵ تنظیم ولتاژ در سیستم اتصال داخلی اتوترانسفورماتورها ۱۵

۴- مشخصه های ترتیب صفر – جریان بار (سیم) خنثی و شرایط عیب زمین، اشباع مغناطیسی و جریان هجومی ۱۷

۴-۱ معرفی مولفه های متقارن یک شبکه سه فاز ۱۷

۴-۲ ضرائب امپدانس برای مولفه های متقارن ۲۰

۴-۳ نمودار تک خطی معادل ترانسفورماتور برای پدیده های ترتیب صفر ۲۰

۴-۴ امپدانس آهن ربایی در شرایط نا متقارن-ولتاژ ترتیب صفر و شکل هندسی مدار آهن ربایی ۲٤

۴-۵ ترتیب صفر و سیم پیچهای مثلث ۲٦

۴-۶ سیم پیچهای ترتیب صفر و زیگزاگ ۲٦

۴-۷ مشخصات امپدانس ترتیب صفر اتصالات گوناگون ترانسفورماتورها ۲۷

۴-۸ بارگذاری پیوسته ترتیب صفر (جریان نقطه خنثی) ۳۲

۴-۹ مقاومت آهن ربایی مدار آهن ربایی و امپدانس آهن ربایی، اشباع در حال پایدار تحت شرایط غیر طبیعی ولتاژ فرکانس قدرت ۳٤

۴-۱۰ اشباع گذرا، جریان هجومی ۳۵

۴-۱۱ جریان القایی میدان آهن ربایی زمین و جریانهای سرباری ناشی از شبکه های d.c. ۳۷

۵- محاسبه جریانهای اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ، سه فاز ۳۸

۵-۱ کلیات ۳۸

۵-۲ نشانه گذاری شبکه ها و سیم پیچها ۳۹

۵-۳ پارامترهای ترانسفورماتور ٤۰

۵-۴ امپدانسهای شبکه های I و II ٤۱

۵-۵ خلاصه ای از حالتهای بررسی شده در این زیربند ٤۲

۶- کارکرد موازی ترانسفورماتورها در شبکه های سه فاز ۵۶
۶-۱ انطباق دهی اتصال سه فاز و روابط زاویه فاز ۵۸
۶-۲ اختلاف در نسبت تبدیل ، جریان گردان ۵۹
۶-۳ امپدانس های اتصال کوتاه نابرابر ۶۱
۶-۴ تغییر امپدانس اتصال کوتاه در سراسر ردیف انشعابها، اثر آرایش سیم‌پیچها ۶۳
۷- محاسبه افت ولتاژ در یک بار معین، تلفات بار ترانسفورماتور سه سیم پیچ ۶۷
۷-۱ معرفی : ضرورت محاسبه افت ولتاژ ۶۷
۷-۲ امپدانس اتصال کوتاه و نمودار معادل یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه ۶۸
۷-۳ تشریح بار ترانسفورماتور ۶۹
۷-۴ معادله های افت ولتاژ ۷۰
۷-۵ محاسبه افت ولتاژ به روال درصد نویسی ۷۳
۷-۶ نمودار معادل ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه، جزءهای امپدانس معادل شکل T در یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه ۷۴
۷-۷ اختصاص تلفات بار به سیم پیچهای جداگانه در ترانسفورماتورهای سه فاز ۷۶
۷-۸ نمونه های محاسبه افت ولتاژ و تلفات بار برای یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه ۸۲
۷-۹ نمونه محاسبه مجموعه تلفات بار و پخش تلفات به سیم پیچهای فردی در ترانسفورماتور سه سیم پیچه با اتصال نوع اتو ۸۹
۸- مشخصات مقادیر اسمی و مقادیر انشعاب ۹۱
۸-۱ مقدمه ۹۱
۸-۲ ویژگیهای استاندارد شده اندازه های اسمی و اندازه های انشعابها ، تاثیر بر پهنای ردیف انشعاب ۹۲
۸-۳ روش تعیین کمیت های اسمی و انشعاب ۹۳
۸-۴ جزئیات این رویه گام به گام ۹۸
۹- کاربردهای مبدل با ترانسفورماتورهای استاندارد ۱۱۰
۹-۱ تاثیر ولتاژ مزاحم ۱۱۱
۹-۲ تاثیر جریان مزاحم ، کلیات ۱۱۱
۹-۳ تلفات گردابی در سرتا سر سیم پیچ ۱۱۲
۹-۴ تلفات پراکندگی در بخشهای مکانیکی ۱۱۳
۹-۵ مجموع اضافه تلفات، امکان کاهش مقادیر اسمی ۱۱۳
۹-۶ نقاط داغ محلی ۱۱۴
۱۰- راهنمایی برای اندازه گیری تلفات در ترانسفورماتورهای قدرت ۱۱۴
۱۰-۱ نتایج آزمون، تضمین ها، رواداری ها، محدودیت های عدم قطعیت ۱۱۴
۱۰-۲ قابلیت پیگیری ، جنبه های کیفیت در تکنیک اندازه گیری ۱۱۵
۱۰-۳ منابع اصلی خطا در اندازه گیری تلفات بار در ترانسفورماتورهای قدرت ۱۱۸
۱۰-۴ خطای زاویه فاز در سیستم اندازه گیری تلفات معمولی – امکان تصحیح ۱۲۱
۱۰-۵ سیستم های اندازه گیری پیشرفته ۱۲۳
۱۰-۶ =اندازه گیری تلفات بی باری ۱۲۴
پیوست الف ۱۲۶

پیشگفتار

استاندارد ترانسفوماتورهای قدرت بخش هشتم-راهنمای کاربرد ترانسفورماتور قدرت که بوسیله کمیسیونهای فنی مربوطه تهیه وتدوین شده ودر یکصدو نودمین جلسه کمیته ملی استاندارد برق والکترونیک مورخ۸۰/۱۱/۲۷ مورد تصویب قرار گرفته است،اینک به استناد بند ۱ ماده قانون اصلاح قوانین ومقررات موسسه استاندارد وتحقیقات صنعتی ایران مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر میشود.

برای حفظ همگامی وهماهنگی با تحولات وپیشرفتهای ملی وجهانی در زمینه صنایع ،علوم وخدمات استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد وهرگونه پیشنهادی که برای اصلاح وتکمیل این استاندارد ارائه شود ، درهنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهند گرفت. بنابراین برای مراجعه به استانداردهای ملی باید همواره از آخرین تجدید نظر آنها استفاده کرد.

در تهیه وتدوین این استاندارد سعی شده است که ضمن توجه به شرایط موجود ونیازهای جامعه،در حد امکان این استاندارد ملی کشورهای صنعتی وپیشرفته هماهنگی ایجاد شود.

منبع وماخذی که برای تهیه این استاندارد به کار رفته به شرح زیر است:

Power Transformers-Application guide IEC60076-8 1997-10

ترانسفورماتورهای قدرت

بخش هشتم - راهنمای کاربرد ترانسفورماتورهای قدرت

۱ کلیات

۱-۱ هدف و دامنه کاربرد

این استاندارد در باب ترانسفورماتورهایی به کار برده می شود که در سری استاندارد ملی ۲۶۲۰ هستند.

منظور از این استاندارد تدارک اطلاعات برای کاربران درباب زیر است :

ویژگیهایی پایه ای بهره برداری معین اتصالات و طرحهای مدارهای آهن ربایی در ترانسفورماتورهای گوناگون، همراه با اشاره ویژه به پدیده ترتیب صفر[۱] ؛

بهره برداری موازی از ترانسفورماتورها، محاسبه افت و یا افزایش ولتاژ زیربار، و محاسبه تلفات بار در ترکیبهای گوناگون اتصال سه سیم پیچ ؛

روش اندازه گیری و دقت در محاسبه تلفات

برخی از این اطلاعات در باره طبیعت کلی و کاربردی همه ترانسفورماتورهای قدرت با هر اندازه، یکسان هستند. هر چند، در چندین بخش در باب مفاهیم و مسائلی بحث می شود که تنها برای تعیین ویژگی و بهره وری از ترانسفورماتورهای فشار قوی بزرگ مطرح می باشند.

این پیشنهادها الزامی نیستند و بهتنهایی مقررات کاربردی را شکل نمی دهند. اطلاعات در باب قابلیت بارگیری (بارپذیری) ترانسفورماتورهای قدرت در شماره استاندارد ملی... [۲] برای ترانسفورماتورهای روغنی و درشماره استاندارد ملی[۳] برای ترانسفورماتورهای خشک ارائه شده اند.

۱- *Zero sequence*

۲- تا تدوین استاندارد ملی به *IEC60354* رجوع شود .

۳- تا تدوین استاندارد ملی به IEC60905 رجوع شود .

۱-۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد به آنها ارجاع داده شده است . بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد محسوب می شود. در مورد مراجع دارای تاریخ چاپ و/یا تجدیدنظر، اصلاحیه ها و تجدیدنظرهای بعدی این مدارک مورد نظر نیست. معهذا بهتر است کاربران ذینفع این استاندارد، امکان کاربرد آخرین اصلاحیه ها و تجدیدنظرهای مدارک الزامی زیر را مورد بررسی قرار دهند . در مورد مراجع بدون تاریخ چاپ و/یا تجدیدنظر آن مدارک الزامی ارجاع داده شده موردنظر است .

استفاده از مراجع زیر برای کاربران این استاندارد الزامی است :

IEC 60050 (421) : ۱۹۹۰ واژگان فنی برق (IEV) – بخش ٤٢١: ترانسفورماتورهای قدرت و راکتورها

استانداردملی ایران به شماره ٢٦٢٠ : سال ۱۳۸۱، ترانسفورماتورهای قدرت – بخش ۱ – کلیات

استانداردملی ایران به شماره ٢٦٢٢ : سال ۱۳۸۱، ترانسفورماتورهای قدرت – بخش ۳ – سطوح عایقبندی و آزمونهای دی الکتریک

IEC 60289 : ۱۹۸۸، راکتورهای (واکنشگرها)

استاندارد ملی ایران به شماره ٥٤٩٤ : سال ۱۳۸۰، راهنمای بارگذاری بر ترانسفورماتورهای قدرت روغنی

IEC 60722 : ۱۹۸۲، راهنمای انجام آزمون های ضربه صاعقه و ضربه کلیدزنی در ترانسفورماتورهای قدرت و راکتورها

IEC 60905 : ۱۹۸۷، راهنمای بارگذاری بر ترانسفورماتورهای قدرت خشک

IEC 60909 : ۱۹۸۸، محاسبه جریان اتصال کوتاه در شبکه های سه فاز a.c. بخش ۱: ضریبهایی برای محاسبه جریانهای اتصال کوتاه در شبکه های سه فاز a.c. وابسته به استاندارد IEC 60909 (۱۹۸۸).

IEC 60909-2 : ۱۹۹۲، تجهیزات برقی – داده هایی در باب محاسبات جریان اتصال کوتاه در رابطه با استاندارد IEC 60909 (۱۹۹۸).

IEC 61378-1 : ۱۹۹۷، ترانسفورماتورهای مبدل بخش ۱: ترانسفورماتورهای با کاربردهای صنعتی

ISO 9001 : ۱۹۹٤، سیستم کیفیت – الگویی برای تضمین کیفیت در زمینه طراحی ، توسعه، تولید، نصب و بهره برداری.

۲ ویژگیهایی مشخصه ترکیب بندی های گوناگون سیم پیچهای سه فاز و طرحهای مدار آهن ربایی

این بخش یک شرح کلی از این موضوع می باشد. اطلاعات اضافی در بند ٤ که در باب ویژگیهایی ترتیب صفر است ارائه شده است.

۲-۱ سیم پیچهای با اتصال Y - D و Z

دو نوع اتصال اصلی در میان سیم پیچهای ترانسفورماتور وجود دارد: اتصال ستاره (اتصال – Y) و اتصال مثلث (اتصال – D) . در موارد ویژه ، به خصوص در ترانسفورماتورهای قدرت کوچک اتصال دیگری به نام زیگزاک یا Z نیز به کار برده می شود. در گذشته، چندین طرح دیگر نیز (مانند: ((مثلث ناقص)) ((مثلث کشیده)) ((اتصال T)) ((اتصال V)) و جز آن کاربرد داشته اند). یک چنین اتصالهایی تنها در ترانسفورماتورهای دارای کاربرد ویژه داده می شود، این گروه از دستگاه ها در شبکه های انتقال متداول جایی ندارند.

۲-۱-۱ مزایای سیم پیچ با اتصال ستاره Y

این نوع سیم پیچ:

- برای سیم پیچ فشار قوی اقتصادی تر است.
- نقطه خنثی در دسترس دارد.

- اجازه اتصال زمین مستقیم یا از راه یک امپدانس را می دهد.

- اجازه کاهش سطح عایقبندی نقطه خنثی (عایقبندی تنزل یافته [1]) را می دهد.

- اجازه می دهدکه انشعابها و کلید تغییر انشعاب در نزدیکی انتهای خنثی در هـر فـاز جـای داده شوند.

- اجازه می دهد که بارگذاری تکفاز با جریان (دو سیم) خنثـی انجـام گیـرد (بنـد ۲-۲ و ٤-۸ را ببینید).

۲-۱-۲ مزایای سیم پیچ با اتصال مثلث

این نوع سیم پیچ :

برای سیم پیچهای دارای جریان زیادتر و ولتاژ پایین تر مناسب تر است.

در ترکیب بندی با سیم پیچ دارای اتصال ستاره، امپدانس ترتیب صفر را در آن سـیم پیـچ کـاهش می دهد.

۲-۱-۳ مزایای سیم پیچ با اتصال Z

این نوع سیم پیچ:

اجازه می دهد که بارگذاری در (سیم) خنثی به طور طبیعی و با امپدانس کم ترتیـب صفـر انجـام گیرد.

هرگاه بار در میان فازها به طور یکسان بخش نشده باشد، ناهمبستگی (نانعادلی) ولتـاژ در شـبکه ها را کاهش می دهد.

۲-۲ ویژگیهای مشخصه ترکیب بندیهای اتصالات سیم پیچیها

نشانه گذاری اتصالات سیم پیچ در یک ترانسفورماتور کـامل روال قـراردادی متـداول منـدرج در استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰، بند ٦ را دنبال می کند.

۱- Graded insulatin

این زیربند خلاصه ای از رفتار جریان (سیم) خنثی در ترکیب بندیهای گوناگون سیم پیچ های مختلف می باشد.

هرگاه ((مولفه‌های ترتیب صفر)) جریان و ولتاژ وجود داشته باشد، به یک چنین شرایطی اشاره می شود. این مفهوم در بندهای ٤ و ٥ بیشتر بررسی شده است.

این موارد در باره مجموعه های سه بازی که از ترانسفورماتورهای تک فاز شکل گرفته اند و اتصالهای بیرونی دارند، نیز اعتبار دارد.

۱-۲-۲ YN yn و YN auto

جریان ترتیب صفر می تواند در میان سیم پیچها ، با توجه به موازنه آمپر دورها، هنگامی که با امپدانس کم اتصال کوتاه در ترانسفورماتور روبرو باشد، تبدیل شود. افزون بر آن، ترانسفورماتورهای شبکه با چنین اتصالاتی می توانند با سیم پیچ مثلث، متعادل ساز مجهز شوند. (بند ٤-٧-٢ و ٤-٨ را ببینید).

۲-۲-۲ YynوYN y

جریان ترتیب صفر در سیم پیچ دارای خنثی زمین شده که توازن آمپر دوری در سیم پیچ مخالف خود را ندارد. هرگاه یک جریان آهن رباساز را در هسته آهنی شکل می دهد و با امپدانس آهن ربایی ترتیب صفر، کنترل می شود. این امپدانس بسته به طرح مدار آهن ربایی (۲-۳ را ببینید) می تواند بزرگ یا بسیار بزرگ باشد. در این صورت می تواند بر تقارن ولتاژهای فاز – به – خنثی اثر گذارد و بدین روال می تواند محدودیتهایی رابرای جریان ترتیب صفر مجاز پدیدارشده توسط شار پراکنده گرمازا ایجاد کند.

۳-۲-۲ YNd، Dyn، YNyd (سیم پیچ سوم بارپذیر) یا YNy+d (سیم پیچ متعادل کننده مثلث، بارناپذیر)

جریان ترتیب صفر در سیم پیچ ستاره با خنثی زمین شده ، سبب می شود که یک جریان گردان جبران کننده در سیم پیچ مثلث جاری گردد. این امپدانس اندک است و تقریبا برابر با امپدانس اتصال کوتاه ترتیب مثبت در میان سیم پیچها است.

اگر دو سیم پیچ ستاره با خنثی های زمین شده وجود داشته باشند (شامل حالت ترانسفورماتور با خنثی مشترک) ، یک حالت بارگذاری سه سیم پیچ، برای جریان ترتیب صفر، وجود خواهد داشت . این موضوع در بند ٤-٣-٢ و ٤-٧-٢ و بند ٥ بررسی شده است.

۴-۲-۲ ZNy یا Yzn

جریان ترتیب صفر در سیم پیچ زیگزاگ یک تعادل آمپر دوری طبیعی میان دو نیمه از سیم پیچ برروی هر پایه ستون ایجاد می کند، و یک امپدانس اتصال کوتاه اندک را باعث می شود.

مجموعه های سه فاز شکل گرفته از سه دستگاه بزرگ تکفاز

با بهره گیری از سیم پیچهای سوم دارای اتصال مثلث.

در برخی از کشورها، ترانسفورماتورهای فشار قوی در شبکه های سراسری به طور متداول از مجموعه های سه دستگاه تکفاز شکل می گیرند. هزینه ساخت، جرم، و تلفات چنین مجموعه ای در مقایسه با یک ترانسفورماتور سه فاز بیشتر است. برتری چنین مجموعه ای در پائین بودن نسبی هزینه تدارک یک دستگاه یدکی چهارم به عنوان یک ذخیره راهبردی است. همچنین مزیت دیگر این است که بزرگی یک دستگاه سه فاز گاهی ممکن است از محدودیت جرم و وزن برای ترابری چنین دستگاه هایی فراتر رود.

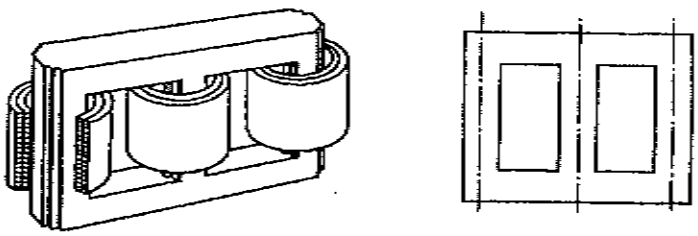
سه دستگاه ترانسفورماتور تکفاز در میان خود مدارهای آهن ربایی مستقلی را پدید می آورند، و بدین روال امپدانس آهن ربایی بزرگی در برابر مؤلفه ولتاژ ترتیب صفر وجود خواهد داشت.

گاهی ممکن است نیاز باشد که این مجموعه با یک سیم یا پیچ مثلث متعادل ساز مجهز شود، یا آن که ممکن است نیاز به یک توان کمکی با ولتاژ نسبتاً کمی باشد، که باید از یک سیم پیچ سوم

گرفته شود. در ایستگاه فشار قوی این کار را می توان با اتصال باس بار بیرونی از یک دستگاه بـه دستگاه دیگر امکان پذیر ساخت. اتصال بیرونی نشانگر یک خطر زایی اضافی عیب زمین یا اتصال کوتاه، در روند ترکیب بندی سیم پیچ سوم در یک مجموعه (Bank) می باشد.

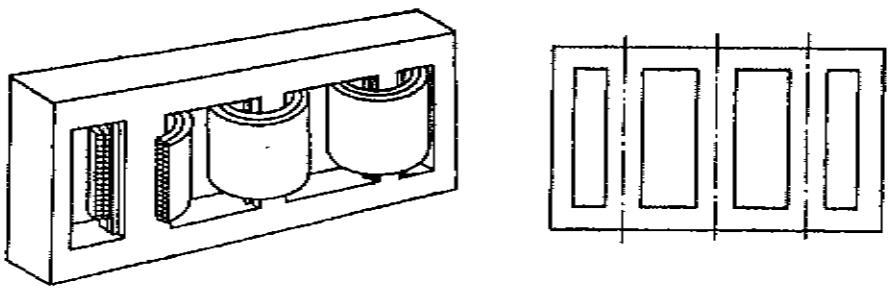
طرحهای مختلف مدار آهن ربایی

متداولترین طرح مدار آهن ربایی در ترانسفورماتورهای سه فاز شکل هسته ستونی دارای سه پایـه است (شکل ۱). این سه پایه یا ستون موازی و عمودی در بالا و پایین توسط یوغ هـای افقـی بـه یکدیگر وصل می شوند.



شکل ۱- مدار آهنربایی ستونی شکل با سه پایه

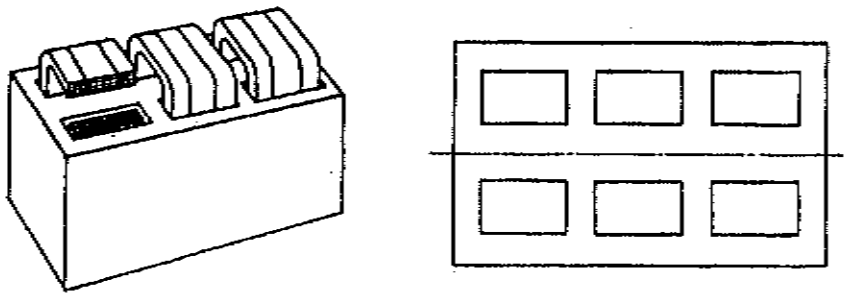
مدارهای پنج پایه ای و یا پنج ستونی (شکل ۲) دارای سه سـتون دربـرگیرنـده سـیم پیچـها و دو ستون کناری بدون سیم پیچ است که مقاطع کوچکتری دارند. یوغ های اتصال دهنده این پنج پایـه یا ستون نیز در مقایسه با ستونهای سیم پیچ دار، مقاطع کوچکتری دارند.



شکل ۲- مدار آهن ربایی ستونی شکل با پنج پایه

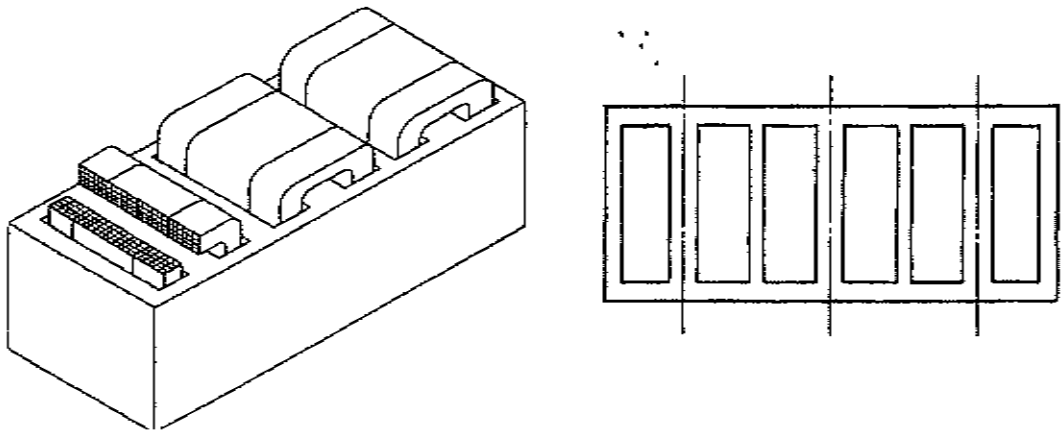
طرح سه فاز صدفی شکل (پوشان) متداول ، دارای چارچوبی با سه پایه افقی در برگیرنده سیم پیچهاست که همگی یک محور مرکزی دارند. (شکل ۳ را ببینید).

بازوهای هسته فولادی که از درون سیم پیچها می گذرد در اصل مقطع مستطیلی دارند و بخشهای پیوسته به آنها که بخشی از مدار آهن ربایی است، همانند یک صدف یا پوسته ای پوشان بخش مرکزی را دربر می گیرند.



شکل ۳- مدار آهن ربایی یک طرح صدفی شکل (پوشان) سه فاز متداول

در یک طرح جدید مدار آهن ربایی با طرح پوشان هسته دارای هفت پایه افقی است، که در آن پایه های سیم پیچ دار به روش دیگری چرخانده شده اند (شکل٤).



شکل ۴- مدار آهن ربایی پوشان یک ترانسفورماتور سه فاز دارای هفت پایه

اختلاف اساسی میان این طرحها که در اینجا بررسی می شود، به رفتار آنها بستگی دارد هنگامی که در معرض یک دسته از ولتاژهای سه فاز نامتقارن با برآیندی که صفر نمی باشد، قرار می گیرند، یعنی دارای مؤلفه ترتیب صفر می شوند.

این شرایط همچنین می تواند به روالی وصف شود که از یک جریان ترتیب صفر بدون موازنه آمپر دورها در هر یک از سیم پیچهای دیگر، آغاز می شود چنین جریانی به عنوان یک جریان آهن رباساز در مدار آهن ربایی آشکار می شود و توسط یک امپدانس آهن ربایی کنترل می گردد، که در دو سر آن یک افت ولتاژ ترتیب صفر گسترش می یابد.

رفتار انواع متداول مدارهای آهن ربایی به روال زیرین است:

۲-۳-۱ مدار آهن ربایی با سه پایه ستونی شکل

در ترانسفورماتور دارای سه پایه ستونی، مؤلفه های شار ترتیب مثبت و منفی در پایه های سیم پیچ دار (که در هر لحظه جمع آنها صفر می باشد) در یوغهای بالایی و پایینی حذف می شوند. ولی شار ترتیب صفر پس ماند مجبور است که راهی برای بازگشت خود از یک یوغ به یوغ دیگر و از بیرون سیم پیچ برقدار بیابد این شار نشتی با یک مقاومت مغناطیسی بزرگ مواجه می شود و برای یک مقدار معین از شار مغناطیسی(یک ولتاژ ترتیب صفر اعمالی فرضی) ، و به یک نیروی آهن ربایی چشمگیر (جریان آهن رباساز شدید) نیاز خواهد بود . با توجه به مدار الکتریکی، این پدیده نشانگر یک امپدانس (آهن ربایی) ترتیب صفر نسبتا اندک خواهد بود. این امپدانس بصورت غیرخطی با دامنه مؤلفه ترتیب صفر تغییر خواهد کرد.

برعکس، جریان ترتیب صفر جبران نشده یک جریان آهن ربایی کننده را شکل می دهد که توسط امپدانس آهن ربایی ترتیب صفر کنترل می شود. پیامد روند برهم نشتی نامتقارن[1] ولتاژهای فاز – به – خنثی ، مؤلفه ولتاژ ترتیب صفر می باشد.

۱- *Superposition*

مؤلفه شار نشتی – ترتیب صفر یوغ، جریانهای چرخان[1] و گردابی[2] را در سازه های گیره ای مخزن به راه می اندازد و باعث ایجاد تلفات پراکنده [3]اضافی در این قطعات می شود. این پدیده همچنین می تواند به افزایش تلفات گردابی در سیم پیچها شود که در اثر ناهنجاریهای شار پراکنده پدیدار می شوند. محدودیتهایی در اندازه (دامنه) هر جریان خنثی بلند مدت که بهنگام بهره برداری ازدستگاه مجازاست، وجود دارد. این محدودیتها دربند ٤-٨ بررسی خواهند شد.

۲-۳-۲ مدار آهن ربایی هسته های ستونی ۵ پایه و یا هسته های صدف شکل (پوشان)

در هسته های ستونی پنج پایه یا در هسته های پوشان، مسیرهای قابل دسترس برای بازگشت شار ترتیب صفر،از طریق بخشهای بدون سیم پیچ مدار مغناطیسی، وجود دارد (ستونهای کناری در هسته های ۵ پایه و بخشهای بیرونی چارچوب صدفی شکل، و در هسته های صدف شکل ۷ پایه ای دو پایه بدون سیم پیچ که در میان پایه های سیم پیچ دار هستند). شار ترتیب صفر با یک مقاومت آهن ربایی اندک [4] معادل با امپدانس آهن ربایی بسیار بالا روبرو می شود، همانند با آنچه که ولتاژ ترتیب مثبت نرمال روبرو می شود. این ویژگی تا رسیدن به یک حد اعمال می شود، تا جایی که بخشهای بدون سیم پیچ مدار آهن ربایی به اشباع یا سیراب شدگی برسد، در فراتر از آن، امپدانس فرو می افتد و در اثر افزایش شار تا بالاترین اندازه، جریان شکل ناهنجاری به خود می گیرد.

۱- *Circulating current*

۲- *Eddy current*

۳- *Stray losses*

٤- *Low magnetic Reluctance*

یک مجموعه از سه ترانسفورماتور تک فاز نیز به همین روال واکنش نشـان مـی دهـد، مدارهـای مغناطیسی جدا از یکدیگر و بصورت مستقل در هر ولتاژ کار عمل می کنند .

باتوجه به پدیده تشریح شده دربالا، به کارگیری چنیـن ترانسـفورماتورهایی و یـا مجموعـه ای از ترانسفورماتورهای تک فاز با سیم پیچ پایدار ساز دارای اتصال مثلث، رایج است.(به بند ٤ رجـوع شود).

۳ ویژگیهایی مشخصه و کاربردی ترانسفورماتورهای با اتصال از نوع اتوترانسفورماتورها

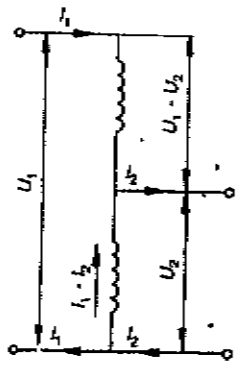
۳-۱ برپایه تعریف، اتوترانسفورماتور ، ترانسفورماتوری است که در آن دست کم دو سیم پیـچ دارای یک بخش مشترک هستند (بند ۳-۱-۲، IEC شماره استاندارد ملی ۲٦۲۰ را ببینید).

نمودار تک خطی یک اتوترانسـفورماتور در شـکل ۵ نشـان داده مـی شـود. طـرف فشـار بـالای ترانسفورماتور (که در شکل با U_1 و I_1 شناسانده می شود) شامل یک سیم پیچ مشترک است که با سیم پیچ دوم به طور سری قرار دارد. طرف فشار ضعیـف (U_2و I_2) تنـها شـامل یـک سـیم پیـچ مشترک است. شبکه های فشار بالا و فشار پایین با هم ارتباط الکتریکی دارند.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = S$$

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = \alpha$$

$$(U_1 - U_2) I_1 = U_2 (I_2 - I_1) = \alpha S$$



شکل ۵- نمودار تک خطی اتوترانسفورماتور

۳-۲ ضریب کاهش یا ضریب اتو [1]

همواره اندازه اتوترانسفورماتورها کوچکتر است و تلفات آنها در مقایسه با ترانسفورماتور دارای دو سیم پیچ جداگانه با گنجایش یکسان کمتر است. این صرفه جویی نسبی هرچه که نسبت تبدیل به یک نزدیکتر شود، بیشتر می گردد. دو سیم پیچی (سری و مشترک) بازگوگر مقادیر توان نامی یکسانند، و یا به سخن دیگر، آمپردورهای متعادلی دارند. رابطه های اشاره شده در شکل ۵ ضریب کاهش (∝) اتوترانسفورماتور را شرح می دهند. اگر S توان نامی سیم پیچهای اتوترانسفورماتور باشد، که برروی پلاک مشخصات یادداشت شده اند، آنگاه این ترانسفورماتور را می توان با توجه به بزرگی و جرم با یک ترانسفورماتور سیم پیچ جدای دارای توان نامی ∝xS یکسان دانست. این مقدار اغلب به عبارتهایی مانند توان نامی واقعی یا توان معادل در دو سیم پیچ، اشاره دارد.

مثال:

یک اتوترانسفورماتور ٤٢٠/٢٤٠ کیلوولتی، ۳۰۰ مگاولت آمپری قابل مقایسه با یک ترانسفورماتور سیم پیچ جدا دارای توان نامی زیر است:

((٤٢٠ − ٢٤٠) / ٤٢٠) x ۳۰۰ = ۱۲۹ MVA

افزون بر آن اگر ترانسفورماتور به یک سیم پیچ سوم دارای اتصال اتو با توان نامی ۱۰۰ مگاولت آمپر نیز مجهز شود (YN auto d ۳۰۰/۳۰۰/۱۰۰ MVA)، آنگاه گنجایش آن قابل مقایسه خواهد بود با گنجایش یک دستگاه سیم پیچ جدا برابر با:

(۱۲۹ + ۱۲۹ + ۱۰۰) / ۲ = ۱۷۹ MVA

امپدانس اتصال کوتاه و اثرات شار نشتی

امپدانس اتصال کوتاه یک ترانسفورماتور را می توان از دیدگاه فیزیکی برحسب توان واکنشی (رآکتیو) در یک میدان نشتی بیان کرد. این توان نیز خود به اندازه فیزیکی و شیوه نصب سیم

1- *Auto - factor*

پیچها (هندسه سیم پیچها) بستگی خواهد داشت. در یک اتوترانسفورماتور با ابعاد کـاهش یافتـه، توان راکتیو در میدان نشتی به طور طبیعی کوچکتر از یک ترانسفورماتور سیم پیـچ جـدا ی دارای همان توان نامی است. امپدانس آن به درصد بیان می شود که به طـور نسـبی کمتر خواهـد بـود. ضریب اتصال - اتو (α) نیز نمادی برای امپدانس به صورت درصد می باشد.

هرچند، ممکن است در جایی دیده شود که امپدانس درصدی یک اتوترانسفورماتور با یک مقـدار افزاینده تعیین شده است. (با نگاه به محدود کننده دامنه های جریان عیـب در سـوی ثانویـه) ، در این صورت این ترانسفورماتور از دیدگاه طراحی، دستگاه کوچکـی خواهـد بـود کـه دارای یـک میدان نشتی نسبتا بزرگی است. این ویژگی می تواند بعنوان تلفات اضافی بیشتری (تلـف جریـان گردابی در سیم پیچ و به همان روال تلف میدان پراکنده[1] در بخشهای مکانیکی دستگاه) بازتـاب کند و احتمالاً حتی اثرات سیرشوندگی (اشباع) در اثر شار نشتی گردنده در بخشـهای موجـود در مدار آهن ربایی را داشته باشد. چنین اثراتی قابلیت بارگیری (بارپذیری) دستگاه را در شرایط نامی محدود می سازد، ولی این شرایط در آزمونهای استاندارد آشکار نمی شوند.

در راهنمای بارگذاری ترانسفورماتور در استاندارد شماره ملـی [2]، آن گاه کـه ترانسـفورماتورهای بزرگ و متوسط را از هم جدا می سازد. این پدیده ها را درنظر گرفته می شود.

اتوترانسفورماتورها باید به جای ارقام نامی مندرج بر پلاک مشخصات، برطبق توان نامی معادلشان و امپدانس درصدی اشاره رده بندی شوند.

۳-۴ محدودیتهای شبکه، توازن در عایقبندی

اتصال مستقیم الکتریکی میان شبکه های (سه فاز) اولیـه و ثانویـه (یـک دسـتگاه ترانسـفورماتور) بدین معناست که آنها دارای یک نقطه خنثی مشترکند و این که اتصال سه فاز اتوترانسفورماتور به

۱- *Stray field*

۲- تا تدوین استاندارد ملی به *IEC60354* رجوع شود .

صورت ستاره می باشد. در عمل، شبکه ها معمولا به طور مؤثری زمین می شوند و نقطـه خنثـی اتوترانسفورماتور معمولا با سطح عایقبندی کاهش یافته ای معین می شود.

اگر نقطه خنثی ترانسفورماتور به طور مستقیم زمین شود، سطح عایقبندی لازم بسیار پایین خواهد بود (بند ۵-۵-۲، IEC شماره ۳-۶۰۰۷۶ را ببینید).

ممکن است به طور گزینه ای پیش بینی شود که همه نقاط خنثی چندین ترانسـفورماتور موجـود در یک ایستگاه به طور مستقیم زمین نخواهند شده این کار بدین خاطر است که دامنـه جریانـهای عیب زمین بالقوه را کاهش دهند. در هرحال، نقاط خنثی زمین نشده معمولا با یک برقگیر[۱] بـرای حفاظت در برابر ضربه های گذرا مجهز می شوند. ولتاژ نامی برقگیر تعیین شـده و سـطح عـایقی نقطه خنثی با توجه به ولتاژ فرکانسی قدرت (ولتاژ شبکه) نمایان شده در نقطه خنثی زمین نشـده، طی یک عیب زمین شبکه، مشخص خواهند شد.

در شبکه های با ولتاژ بسیار بالا همراه با خطهای هوایی بسیار بلنـد، امکـان موفقیـت در قطـع و وصل خودکار[۲] تک فاز می تواند با رآکتورهای زمین کننده قابل تنظیم و ویژه، بـهبود یـابد. ایـن عمل به یک عایق بندی نسبتاً زیاد نقطه خنثی ترانسفورماتور نیاز دارد که از طریق راکتـور تنظیـم کننده به زمین متصل است .گاهی سیم پیچ سری یک اتوترانسفورماتور، موجب ایجـاد مشـکل در طراحی عایقبندی در سیم پیچ می گردد. فرض می شود که ترمینال X ، یا ترمینال خـط در سـوی فشار پایین، به هنگام رخداد یک اضافه ولتاژ گذرا در ترمینال سوی فشار بـالا، در پتانسـیل کمـی باقی می ماند. از اینروی تنش مربوط به سطح عایقبندی ، در برابر ولتاژ ضربه از سوی فشار بـالا، فقط در سرتاسر سیم پیچ سری توزیع خواهد شد. این ویژگی موجب بروز یک اضافه ولتاژ سر به سر[۳]، در مقایسه با یک اضافه ولتاژ در طرف فشار ضعیف، میگردد کـه در سـرتا سـر سـیم پیـچ مشترک توزیع میشود .

۱- *Surge arrester*

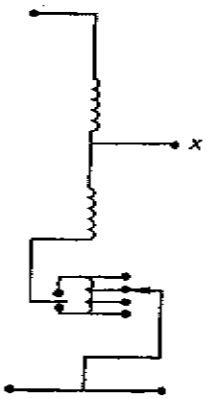
۲- *Reclosing*

۳- *turn-to-turn*

۳-۵ تنظیم ولتاژ در سیستم اتصال داخلی [1] اتوترانسفورماتورها

در یک اتوترانسفورماتور تغییر نسبت ولتاژ می تواند با روشهای گوناگونی انجام گیـرد. برخـی از این روشها در اصول مشخص شده در بند ۵-۱ ، اسـتاندارد ملـی شـماره ۲۶۲۰ دنبـال شـده انـد. روشهای دیگر دنبال نشده اند، زیرا شمار دورهای مؤثر در سیم پیچهای هر دو سو همزمان تغییـر می کنند.دورهای انشعاب چه در ترمینال خنثی و یا در اتصالگاه (نقطه مشترک) میان سیم پیچهای مشترک و سری جای بگیرند، چنین خواهند بود: (شکل ٦ را ببینید).

۳-۵-۱ دورهای انشعاب در نزدیکی نقطه خنثی



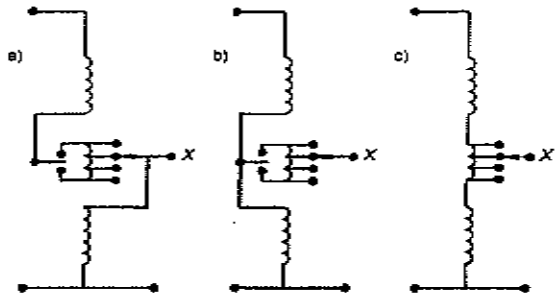
تنظیم در نزدیکی نقطه خنثی همزمان شمار دورهای را در هر دو سیم پیچ فشار بالا و پایین با هم افزایش یـا کاهش می دهد، در نتیجه نسبت تبدیل میان سیم پیچها تغییر می کند. این نوع تنظیم ناکافی است، زیرا بـرای رده معینی از تغییر در تبدیل ولتاژ نیاز به دورهای تنظیم کننده زیادی دارد. از اینروی ولت در هـر دور سـیم پیچ ترانسفورماتور در دو سر انشعاب ها به طور چشمگیری تغییر می کند (شار تغییرپذیر). این پدیده هرچـه نسبت تبدیل ترانسفورماتور به یک نزدیکتر شود، خود را برجسته تر می نمایـاند.(مقـدار کـوچک α) ایـن ویژگی باید با یک مدار آهنربایی با ابعاد بزرگتر جبران شود. این ویژگی موجب بروز ولتاژ نابرابر در هر پلـه نیز میگردد. برتری قابل مشاهده تنظیم در نقطه خنثی ، نزدیک بودن سیم پیچ های تنظیم و تنظیـم کننـده بـه نقطه خنثی می باشد که نیازمند سطح عایقی پائین به زمین میباشد .

شکل ۷- دورهای انشعاب در خنثی مشترک

۱- *System-interconnection*

۳-۵-۲ دورهای انشعاب در ترمینال X

اگر تجهیزات تنظیم ولتاژ در اتصالگاه اتو در یک اتوترانسفورماتور (در طرف ترمینال فشار پایین) قرار گیرد، این نیاز پیش می آید که سیم پیچ های انشعاب و کلید تغییر انشعاب با سطح عایقبندی برابر با سطح عایقبندی ترمینال X طراحی شوند. آنها به طور مستقیم در معرض موج ولتاژهای گذرای با پیشانی پرشیب [1] ناشی از صاعقه یا کلیدزنی هستند. شکل ۷ شماری از این آرایه های مختلف را نشان می دهد.



الف) تعداد دورها در سیم پیچ مشترک بدون تغییر می ماند. گزینش منطقی این خواهد بود که ولتاژ شبکه فشار پایین نسبتا ثابت بماند در حالی که ولتاژ شبکه فشار قوی تغییرپذیرتر باشد.

ب) این گزینه برخلاف گزینه الف می باشد. تعداد دورهای رویارو با ولتاژ شبکه فشار بالا (قوی) ثابت می ماند، در حالی که شمار مؤثر دورها در سوی فشار پایین تغییر می کنند.

پ) تعداد دورها در سوی فشار بالا ثابت است، ولی برای تعداد معینی از دورهای دوباره وصل شده، نسبت تبدیل بیش از حالت (ب) تغییر می کند. از سوی دیگر حالت (ب) اجازه بهره وری روش (±) یا افزایش و کاهش در سیم پیچ انشعاب را می دهد، این کار با بالا و پایین بردن آن به روالی که در شکل دیده می شود، انجام می گیرد.

شکل ۷- دورهای انشعاب در ترمینال فشار پایین

۱- Sreep front

٤ مشخصه های ترتیب صفر – جریان بار (سیم) خنثی و شرایط عیب زمین، اشباع مغناطیسی[1] و جریان هجومی [2]

در این بند ویژگیهای ترانسفورماتورهای سه فاز و مجموعه های ترانسفورماتورهای سه فاز شکل گرفته از سه دستگاه تکفاز با توجه به شرایط بهره برداری سه فاز نامتقارن به کوتاهی بررسی می شوند.

همواره با توجه به شکل هندسی مدار آهن ربایی و ترکیب بندی اتصال های سه فاز سیم پیچ ها، تفاوتهایی وجود خواهند داشت.

شرایط نامتقارن شامل ناهنجاریهای گذرا و همچنین نامتقارنی در روند بهره برداری پیوسته است که موارد زیر را باعث می شوند :

- تلف موقتی در تقارن ولتاژهای سه فاز و در نتیجه،در آهن رباشوندگی متقارن

- عدم تقارن جریانهای بار بصورت پیوسته یا موقتی ، به ویژه جریان در (سیم) خنثی، که در پایداری ولتاژ، شار نشتی و آهن رباشوندگی هسته اثر می گذارند.

۴-۱ معرفی مؤلفه های متقارن یک شبکه سه فاز

شرح کوتاهی از روش تحلیلی متداول که با نام مؤلفه های متقارن نامیده می شوند، و اغلب در بررسی تحلیلی شبکه های برق به کار گرفته می شوند در بند ٤-۱-۱ ارائه می شود، برای دستیابی به آگاهی هایی بیشتر با این روش و کاربرد آن، به جزوه بررسی تحلیلی شبکه های برق رجوع کنید.

توضیح بیشتر در باره جنبه های کاربردی اتصال زمین شبکه توسط نقطه های خنثی ترانسفورماتور در بند ٤-۱-۲ داده شده است.

۴-۱-۱ اصول و واژه های تخصصی مؤلفه های متقارن ولتاژ و جریان

۱- *Magnetic saturation*

۲- *Inrush current*

همان طور که به طور متداول اعمال می شود، روش پیش فرض ولتاژها و جریانهای سنکرون و سینوسی شکل ، توسط المنت های جریان به شکل امپدانس ثابت یا مقدار قابلیت هدایت ظاهری (عکس مقاومت ظاهری) با حجم یکسان برای سه فازها ارتباط یافته است. این فرضیات دلالت بر این دارد که تمامی معادلات مدار خطی هستند و آن تبدیل متغیرها توسط جابه جایی خطی امکان پذیر است. یکی از این جابه جایی ها مربوط به مؤلفه های متقارن است.

در حالت غیر تقارن کلی، سه ولتاژ فازها به طور فردی یا جریان فاز دارای دامنه های نابرابر است و فاصله برابری نسبت به زمان ندارد (زاویه های الکتریکی ۱۲۰ درجه بصورت جدا ندارد) . مجموع مقادیر لحظه‌ای ممکن است صفر نباشد. تصویر فازی، یک ستاره نامتقارن است. مجموع برداری سه فاز، الزاماً به گونه یک مثلث بسته نیست (مجموع صفر نیست).

هرچند همیشه برای جایگزینی سه مقدار متغیر نامتقارن اصلی توسط یک ترکیب سه مؤلفه متقارن زیرا امکان وجود دارد:

- یک مؤلفه ترتیب مثبت دارای یک تقارن کامل، با قرار گرفتن مؤلفه معمولی ولتاژها و جریانهای سه فاز
- یک مؤلفه ترتیب منفی دارای یک تقارن کامل دیگر، لیکن با ترتیب فاز مخالف.
- یک مؤلفه ترتیب صفر دارای همان مقدار فازی در هر سه فاز بدون چرخش فاز.

هر یک از دو نخستین مؤلفه، در هر لحظه دارای جمع صفر است. سومین مؤلفه نشان دهنده باقی مانده، مجموع غیرصفر از تغییرات اصلی، با یک سوم ظاهری در هر فاز است.

نتیجه روش مؤلفه های متقارن برای محاسبه ولتاژها و جریان ها این است که سیستم اصلی معادلات جفت شده سه گانه با سه متغیر مجهول، توسط سه معادله تکفاز جداگانه با یک مجهول جایگزین شده، یعنی یک معادله برای هر مؤلفه ، هر معادله، کاربری امپدانس یا ضریب هدایت برای مؤلفه مربوط به خود را می سازد.

بنابراین، حل معادلات برای مؤلفه های متقارن جداگانه فاز به فاز، برای به دست آوردن ولتاژها با جریانهای فاز سیستم حقیقی، برهم نهش می شوند.

آلگوریتم ها برای جابه جایی مقادیر فاز اصلی به مؤلفه های متقارن و برگشت دوباره آن را می توان در کتابهای فنی اختصاصی پیدا کرد.

۲-۱-۴ جنبه های کاربردی

ویژگیهای مؤلفه ها دارای نتایج کاربردی زیر با توجه به جریان ها و ولتاژها است:

- جریان های سه خط در یک سیستم بدون هادی برگشت اتصال زمین یا خنثی دارای مقدار امپدانس صفر است. جابه جایی آنهادر مؤلفه های متقارن دارای مؤلفه های مثبت و منفی بوده، لیکن مؤلفه ترتیب صفر را ندارد. جریان های از یک سیستم به یک سیم پیچ بصورت مثلث، دارای این ویژگی است.

- چنانچه جریان خنثی به زمین یا توسط یک هادی خنثی (سیم چهارم) وجود داشته باشد، در آنصورت سیستم جریانهای فاز ممکن است دارای یک مؤلفه امپدانس صفر باشد. این یک شرط عادی در سیستم های توزیع چهار سیمه با بارهای تکفاز است که میان سیم فاز و سیم خنثی اعمال می شود میباشد. به طور عادی خطوط انتقال فشار قوی، جریان بار خنثی را حمل نمی کند. در این زمینه بار نامتقارن موجود است، که نسبتا دارای ویژگی بار میان دو فاز که نتیجه آن در مؤلفه امپدانس منفی است، لیکن مؤلفه امپدانس صفر نیست.

- مؤلفه امپدانس صفر بصورت موجود در فاز تعریف شده و با همان دامنه در هر سه فاز است. در نتیجه یک مؤلفه امپدانس صفر جریان، دقیقا برابر یک سوم جریان خنثی است.

- یک دسته از ولتاژهای خط به خط در یک سیم پیچ با اتصال مثلث دارای مقدار صفر است، زیرا در ارتباط بسته شده و در نتیجه فاقد هرگونه مؤلفه ولتاژ امپدانس صفر است. لیکن درون سیم پیچ

با اتصال مثلث، ممکن است جریان امپدانس صفر عبور کند، یک جریان اتصال کوتاه دور تـا دور اتصال مثلث دوران می کند که از سیم پیچ دیگر القاء شده است (به بند ٤-٥ رجوع شود).

٤-٢ ضرائب امپدانس برای مؤلفه های متقارن

ضرائب امپدانس (یا ضریب هدایت) المنت های گوناگون سیستم ، ممکن است از سه مؤلفه متفاوت باشند عملا، تجهیزاتی مانند ترانسفورماتورها و رآکتورها، ضرائبی برابر برای امپدانس مثبت و امپدانس منفی دارد. برای یک ترانسفورماتور ، آنها بصورت مقادیر اندازهٔگیری شده در طی آزمونهای جاری[1] ، گرفته شده است. هرچند ضرائب امپدانس صفر یک ترانسفورماتور، متفاوت است، این ضرائب ممکن است که در ترانسفورماتورهای دارای مقادیری برابر مقاومت سلفی ترتیب مثبت، هنوز دارای ویژگیهای نابرابر امپدانس صفر باشد که تابع نوع مدار آهن ربایی، اتصالات و محل متفاوت سیم پیچ، مسیر هدایت شار نشتی وغیره است.

در برخی از حالات، یک امپدانس ترتیب صفر بصورت غیرخطی خواهد بود . این امر با ارجاع به فیزیک ترانسفورماتور در بندهای زیر، شرح داده شده است. همچنین مقادیر تقریبی تخمین زده شده ای جهت راهنمایی کلی تدارک دیده شده است. چنانچه شفافیت بیشتر و درستی در باره یک ترانسفورماتور ویژه درخواست شده باشد، اندازه گیری ویژگیهای ترتیب صفر ، ممکن است بنابه درخواست توسط آزمون ویژه ای انجام گیرد (به بند ١٠-٧ استاندارد ملی شماره ٢٦٢٠رجوع شود).

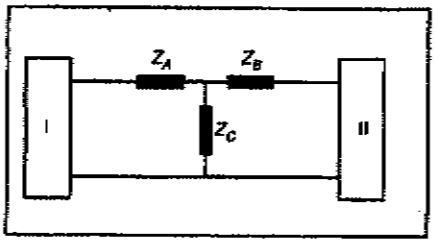
٤-٣ نمودار تک خطی معادل ترانسفورماتور برای پدیده های امپدانس صفر

اساس روش مؤلفه متقارن در بندهای ٤-١، ٤-١-١، ٤-١-٢ و ٤-٢ طرح ریزی شده است.

در آنجا مشخص شده است که تجزیه و تحلیل پدیده نامتقارن، خطی، سینوسی به شکل معادلات تکفازهمزمان، یکی برای هر مؤلفه، عمل گردیده است. برای ترتیب مثبت و منفی ، ترانسفورماتور در حالت عادی اش و بدون بار و امپدانس های اتصال کوتاه در نظر گرفته میشود، لیکن برای

١- Routine tests

امپدانس صفر گاهی نمودار متفاوت بوده و تابع طرح است. اطلاعات دقیق در باره ضرائب ترتیب صفر را می توان در این بند فرعی به دست آورد.



شکل ۸- نمودار ترتیب صفر برای ترانسفورماتور با دوسیم پیچ

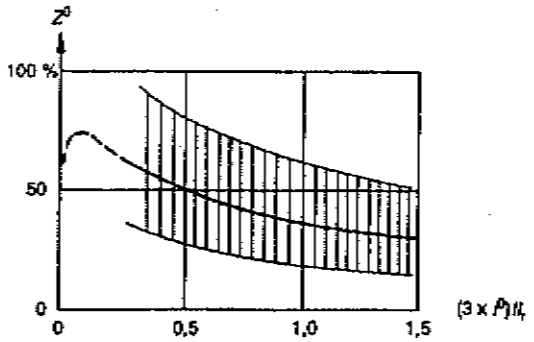
نمودار معادل یک ترانسفورماتور سه فاز با دو سیم پیچ برای ترتیب صفر، ترکیب شده است از امپدانسهای سری و یک شاخه موازی . در شکل ۸ جمع دو المنت امپدانس سری Z_A و Z_B برابر با امپدانس اتصال کوتاه معمولی برای جریان ترتیب مثبت است. تقسیم میان دو المنت اختیاری است و یا می توان آن را برابر صفر قرار داد.

Z_m یک امپدانس آهن ربایی است و ترتیب اندازه هر یک تابع طرح مدار آهن ربایی می باشد. یک هسته ترانسفورماتور دارای پنج ستون یا یک شکل پوشان سه فاز مدار آهن ربایی، امپدانس بالای آهن ربایی برای ولتاژ امپدانس صفر ارائه می کند (به بند ٤-٤ رجوع شود).

یک هسته ترانسفورماتور دارای سه ستون ، از سوی دیگر، دارای یک امپدانس آهن ربایی متعادل برای ولتاژ ترتیب صفر است و این امپدانس نسبت به جریان یا ولتاژغیرخطی است و از طرحی به طرح دیگر متفاوت است. شار نشتی یوغ (به بند ٤-٤ رجوع شود). شاری از جریانهای گردابی دراطراف تمامی مخزن القاء می کند. از این رو، تفاوتی میان ترانسفورماتورهای دارای مخزنهای کنگره ای (فانوسی) از ورق فولاد نازک و آنهایی که دارای مخزن از نوع ورق تخت بویلر است، وجود دارد. برای ترانسفورماتورهای با مخزن از ورق تخت بویلر،

امپدانس صفردر واحد [1]، معمولا از ترتیب ۰/۲۵ تا ۱میباشد ، هرگاه جریان خنثی *3XIO* برابر بـا جریان نامی سیم پیچ است. تغییر کلی امپدانس با جریان در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای یک ترانسفورماتور نو، سازنده یک اندازه گیری امپدانس ترتیـب صفـر را بنابـه درخواسـت انجام می دهد (به بند ۱۰-۱-۳ و ۱۰-۷ استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ رجوع شود).



شکل ۹- تغییر با جریان از امپدانس آهن ربایی ترتیب صفر یک ترانسفورماتور با سه ستون بدون یک سیم پیچ مثلث

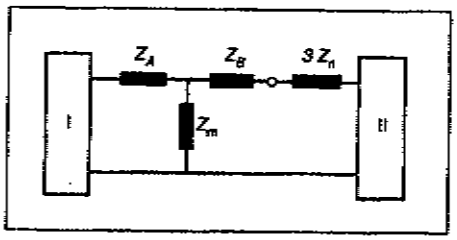
نتایج برای حالات ویژه اتصالات ترانسفورماتور در بند ٤-۳-۱ و ٤-۳-۲ شرح داده شده است.

۱-۳-۴ ترانسفورماتور نوع *YNyn* بدون سیم پیچ مثلث اضافی

هرگاه هر دو سیم پیچ خنثی به طور مؤثر به سیستم های اتصال زمین شده، متصل هستند، جریـان ترتیب صفر ممکن است میان سیستمها جابه جا شود که با امپدانس کمی در ترانسفورماتور مواجه میشود. در این حالت امپدانس های سیستم، بزرگتر از امپدانس سری ترانسفورماتور نیست. با یک هسته ترانسفورماتور دارای سه ستون امپدانس آهن ربایی متعادل، ناچیز نیست. این پدیـده بـاعث کاهش امپدانس موثر ترانسفورماتور تا حد تقریبا ۹۰ درصد تا ۹۵ درصد امپدانـس اتصـال کوتـاه مثبت می شود. با یک هسته ترانسفورماتور دارای پنج ستون یا ترانسفورماتور نـوع صدفـی شـکل (پوشان) اینگونه کاهشی وجود ندارد.

۱- *Per unit*

هرگاه سیستم سیم پیچ مخالف، جریان امپدانس صفر را قبول نکند، امپدانس ورودی هر یک از سیم پیچ ها، امپدانس آهن ربائی است، که تابع طرح مدار آهن ربایی مانند مورد مطرح شده در بالا می باشد. هرگاه سیستم سیم پیچ مخالف ، دارای خنثی زمین شده توسط یک المنت امپدانس Z_n باشد، این امر در نمودار امپدانس ترتیب صفر توسط یک امپدانس سری اضافی برابر با $3Z_n$ را نشان داده می شود (به شکل ۱۰ رجوع شود).

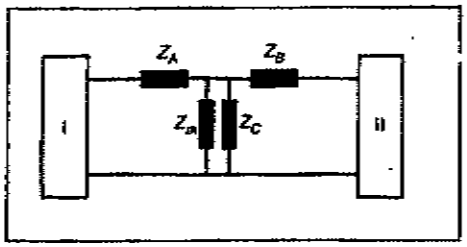


شکل ۱۰- ترانسفورماتور نوع $YNyn$ با امپدانس زمین خنثی شده – نمایش ترتیب صفر

۴-۳-۲ ترانسفورماتور نوع $ZNynd$ یا $ZNyn+d$

این نوع ترانسفورماتور ترکیبی از سه سیم پیچ است. این ترانسفورماتور دارای یک شکل ستاره از المنت های امپدانس سری، در ترکیبی با امپدانس آهن ربایی شده برای امپدانس ترتیب صفر است. در شکل ۱۱، Z_A+Z_C امپدانس اتصال کوتاه میان سیم پیچ A و سیم پیچ C که بصورت سیم پیچ مثلثی شکل سوم متصل شده است میباشد، که درون آن ممکن است یک جریان امپدانس ترتیب صفر عبور کند(به بند ٤-٥ رجوع شود). این امپدانس، امپدانس ورودی برای جریان ترتیب صفر از سیستم I به درون سیم پیچ A است.

شبیه آن، امپدانس برای جریان ترتیب صفر از سیستم H به درون سیم پیچ B ، Z_B+Z_C است.



شکل ۱۱- ترانسفورماتور نوع *YNynd* – نمایش ترتیب صفر

امپدانس آهن ربایی Z_m که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، معمولا در محاسبات برای این ترکیب سیم پیچ، چشم پوشی می شود. چنین پذیرفته شده است که امپدانس ترتیب صفر در نمودار تا اندازه ای از مقادیر اندازه گیری شده با جریان امپدانس ترتیب مثبت، متفاوت است. این تفاوت، تابع طرز قرار گرفتن سیم پیچها نسبت به یکدیگر است و معمولا بین ۱۰ درصد تا ۱۵ درصد باقی می ماند.

۴-۴ امپدانس آهن ربایی درشرایط نامتقارن ولتاژ ترتیب صفر وشکل هندسی مدار آهن ربایی

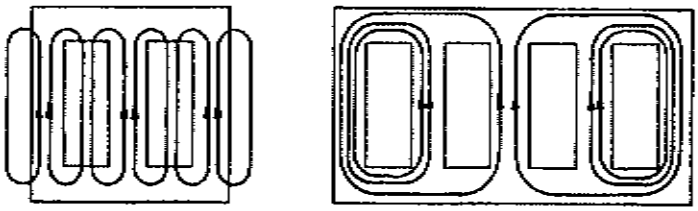
به دلائل گوناگون، تقارن ولتاژهای سه فاز در شبکه های انتقال تحت شرایط عادی بهره برداری بسیار خوب است و معمولا هیچ گونه انگیزه ای برای عملکرد ترانسفورماتور وجود ندارد.

در طی عیوب اتصال زمین نامتقارن در شبکه برق، سیستم ولتاژهای فاز به زمین ، شامل یک مؤلفه امپدانس ترتیب صفر است. درجه تقارن تابع روش اتصال زمین سیستم است. سیستم توسط یک ضریب عیب اتصال زمین که به طور مختصر، نسبت میان فاز به زمین ولتاژ متناوب روی یک فاز بدون عیب در طی یک اتصالی و ولتاژ متقارن فاز به زمین قبل از بروز عیب میباشد، توصیف شده است. با توجه به هماهنگی عایقی، این امر از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

اگر ساق های سه فاز یک ترانسفورماتور مربوط به یک سیستم باشند که در آنها ولتاژی القاء شده باشد، که شامل مؤلفه امپدانس ترتیب صفر است (یعنی مجموع برابر صفر نباشد) در آنصورت، واکنش تابع شکل هندسی مدار آهن ربایی و ارتباط سیم پیچها است.

در یک ترانسفورماتور از نوع هسته با سه ساق (به شکل ۱۲ رجوع شود). بخشهای شار نابرابر از سه ساق ترانسفورماتور در یوغ ها از بین نمی رود. شار باقی مانده، ترتیب صفر در عوض مسیر خود را از خارج هسته آهنی تکمیل می کند .

این امر ، مقاومت آهن ربایی بالا و یک امپدانس آهن ربایی کمی را برای ولتاژ ترتیب صفر، نشان می دهد، اطلاعات دقیق در این مورد در بند ٤-۳ داده شده است. پدیده شار قابل ملاحظه ای که مدار آهن ربایی را رها کرده و از خارج مدار مغناطیسی مسیر خود را تکمیل می کند ممکن است در طی شرایط گذرای کلید زنی رخ دهد.



شکل ۱۲- آهن ربایی شدن ترتیب صفر هسته های با سه ساق و پنج ساق

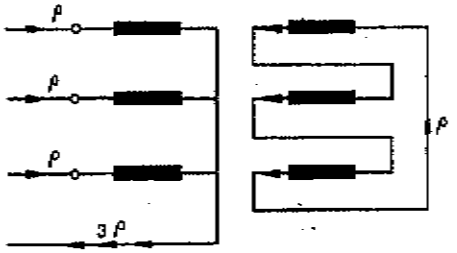
در یک ترانسفورماتور با هسته پنج ساق (به شکل ۱۲ رجوع شود) ساقهای بیرونی سیم پیچی نشده و مسیر برگشت با یک مقاومت آهن ربایی کم را نشان می دهند، یعنی در جایی که شار ترتیب صفر ممکن است بگذرد. امپدانس آهن ربایی مربوط به آن بالا است، همچنان برای شار ترتیب مثبت عادی، شبیه آن برای ترانسفورماتورهای سه فاز نوع صدفی (پوشان) اعمال می شود و البته برای یک مجموعه شامل سه واحد جداگانه تکفاز.

هرچند ولتاژ و جریان ترتیب صفر اعمال شده تحت تاثیر شرایط اتصال سه فاز سیم پیچها قرار می گیرند ، به بند زیر رجوع شود.

۴-۳ ترتیب صفر و سیم پیچهای مثلث

ولتاژهای فاز به فاز در سر سیم پیچ با اتصال مثلث ، به طور خودکار مجموع صفر دارند، زیرا اتصال بصورت مثلث بسته شده است. همچنین، یک سیم پیچ مثلث می تواند با توجه به ولتاژ ترتیب صفر یک مدار اتصال کوتاه ، در نظر گرفته شود .

جریان ترتیب صفر نمی تواند میان سه ترمینال سیم پیچ مثلث و یک سیستم بیرونی منتقل شود. لیکن یک جریان اتصال کوتاه ممکن است از سیم پیچ دیگر (اتصال YN) القاء شود (به شکل ۱۳ رجوع شود). اگر امپدانس ترتیب صفر ترانسفورماتور از سیم پیچ دیگر دیده شود ویژگی یک امپدانس اتصال کوتاه میان سیم پیچ دیگر و سیم پیچ مثلث را دارد. برای اطلاع دقیق تر به بند ۴-۳ رجوع شود.

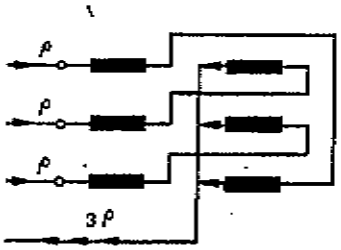


شکل ۱۳- جریان اتصال کوتاه ترتیب صفر القاء شده در یک سیم پیچ مثلث

۴-۴ سیم پیچهای ترتیب صفر و زیگزاک

در یک سیم پیچ با اتصال زیگزاک (به شکل ۱۴ رجوع شود) هر ساق ترانسفورماتور، بخشی از سیم پیچها را از دو فاز که دارای جهت های مخالف سیم پیچ است، حمل می کند. تعداد آمپر دور در یک مؤلفه جریان ترتیب صفر روی هر ساق بدون هیچ نتیجه مغناطیس کنندگی، حذف

میشود. جریان فقط با یک امپدانس اتصال کوتاه پائین روبرو میشود که همراه با نشست شار میان بخشی از سیم پیچهای روی ساق وجود دارد (به بند ٤-٧-٣ نیز رجوع شود).



شکل ۱۴- یک سیم پیچ با اتصال زیگزاگ به طور داخلی متعادل شده برای جریان ترتیب صفر

۴-۵ مشخصات امپدانس ترتیب صفر اتصالات گوناگون ترانسفورماتورها

بند فرعی پیشین، ویژگیهای ترتیب صفر مدارهای آهن ربایی ویژه و سیم پیچهای فردی مشخص در ترانسفورماتورها را توضیح داد ، این بند فرعی ،ویژگی های ترتیب صفر تمامی ترانسفورماتورهای دارای ترکیب های معمولی سیم پیچی را جمع بندی می کند .

جدول شماره ۱ مقادیر تقریبی امپدانس ترتیب صفر را برای ترکیب های دو و سه سیم پیچ نشان می دهد، هرگاه هریک از سیم پیچها از یک سیستم تحریک شده باشند. این جدول برای طراحی ها با سیم پیچهای هم محور معتبر است، در اینجا با شماره *(3) – (2) – (1)* شماره گذاری شده اند و شماره *(1)* به عنوان خارجی ترین سیم پیچ، شماره گذاری شده است. نمادهای سیم پیچ در ستون نخست به همان ترتیب نوشته شده است. اهمیت ندارد که کدام یک از آن سیم پیچ ها فشار قوی است.

بندهای فرعی زیر ، توضیح بیشتری را ارائه می دهد.

در جدول ۱ نماد YN نشان می دهد که سیم پیچ خنثی به طور مستقیم یا توسط یک امپدانس پائینی زمین شده است. نماد Y نشان می دهد که نقطه خنثی به سیم متصل نشده است.

هرجا که مقدار درصد داده شده، مربوط به امپدانس مرجع معمولی U^2/S است.

برخی اتصالات با علامت ستاره (*) نشانه گذاری شده است. در اینگونه حالات ، جریان ترتیب صفر در سیم پیچ تحریک شده،توسط جریان در هر سیم پیچ دیگر متعادل نشده است. بنابراین امپدانس ترتیب صفر، یک امپدانس مغناطیس کننده نسبتا بالا و یا بسیار پائین است که تابع مدار آهن ربایی است.

در تمامی حالات دیگر، توازن جریانی میان سیم پیچها وجود دارد و امپدانس ترتیب صفر برابر یا دست کم نزدیک به امپدانس اتصال کوتاه معمولی میان سیم پیچهای درگیر شده است.

این جدول فقط دخالت خود ترانسفورماتور را نشان می دهد. امپدانس های همراه سیستم ها بصورت ناچیز فرض شود .

این بدان معنی است که در نمایش نمودار ترتیب صفر، یک خروجی سیم پیچ YN طوری فرض می شود که گوئی تمام سه فاز آن به زمین اتصال کوتاه شده اند .

جدول ۱- امپدانس های ترتیب صفر، مقادیر نمونه

نماد سیم پیچ			امپدانس درصد						بند فرعی
			سیم پیچ تحریک شده، هسته با سه ساق			سیم پیچ تحریک شده هسته با پنج ساق (یا نوع پوشان)			
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
YN	Y	*	≈50	–		≈10⁴	–		4.3,4,4
Y	Yn	*	–	≈60		–	≈10⁴		4.3,4,4
YN	YN		a_1Z_{12}	a_1Z_{12}		Z_{12}	Z_{12}		4.7.1
YN	D		a_1Z_{12}	–		Z_{12}	–		4.7.2
D	YN		–	a_1Z_{12}		–			4.7.2
YN	Y	Y*	≈50	–	–	≈10⁴	–	–	4.3,4.4
Y	YN	Y*	–	≈60	–	–	≈10⁴	–	4.3,4.4
Y	Y	YN*	–	–	≈70	–	–	≈10⁴	4.3,4.4
YN	YN	Y	a_1Z_{12}	a_1Z_{12}	–	Z_{12}	Z_{12}	–	4.7.1
YN	Y	YN		–	a_3Z_{13}	Z_{13}	–	Z_{13}	4.7.1
Y	YN	YN	–		a_3Z_{23}	–	Z_{23}	Z_{13}	4.7.1
D	YN	YN	$a_1(z_1+z_1\|\|z_3)$	$a_2(z_2+z_1\|\|z_3)$	–	$Z_1+z_1\|\|z_3$	$Z_1+z_1\|\|z_3$	–	4.7.2
D	D	YN	$a_1(z_1+z_2\|\|z_3)$	–	–	$z_1+z_2\|\|z_3$	–	–	4.7.2
D	Y	YN		–	–	Z_{13}	–	–	4.7.2
YN	YN	D	–	$a_1(z_1+z_1\|\|z_3)$	$a_2(z_2+z_1\|\|z_3)$	–	$z_2+z_1\|\|z_3$	$z_3+z_1\|\|z_2$	4.7.2
Y	YN	D	–	a_1Z_{12}	–	–	Z_{12}	–	4.7.2
YN	Y	D	–	–	a_3Z_{13}	–	–	Z_{13}	4.7.2
D	YN	D	–	$a_1(z_1+z_1\|\|z_3)$	–	–	$z_1+z_1\|\|z_3$	–	4.7.2

یادآوری ها

۱- Z_{12} و Z_{13} و Z_{23} امپدانس هـای ترتیـب مثبـت اتصـال کوتـاه هسـتند.

۲- $Z_1 = (Z_{23} + Z_{13} - Z_{12}) / 2$ *همـانند* Z_2 و Z_3

۳- $Z_1 // Z_2 \quad Z_1Z_2 / (Z_1+Z_2)$ *همـانند* $Z_1 // Z_3$ ، $Z_2 // Z_3$

۴- a_1 و a_2 و a_3 *عوامل ضرب شونده معمولا در ردیـف* $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$

۵- *دیدگاه های ویـژه در بـاره مشـخصه هـای ترتیـب صفـر در بنـد ٤-۷-۱ ، ٤-۷-۲ و ٤-۷-۳ داده شده اسـت.*

٦-*اتصالاتی کـه بـا (*) نشـانه گذاری شـده، حـالاتی را نشـان مـی دهـد کـه امپدانـس ترتیب صفر، یک امپدانس آهن ربایی با انـدازه زیـاد یـا بسـیار زیـاد اسـت کـه تـابع طبیعت مدار آهن ربـایی اسـت.*

۴-۷-۱ *YNyn* یا *YNauto* بدون سیم پیچ مثلث

ترانسفورماتور، جریان ترتیب صفر را میان دو سیستم دریافت می کند و انتقال می دهند در حالیکه نقطه های خنثی به زمین وصل شده باشند.

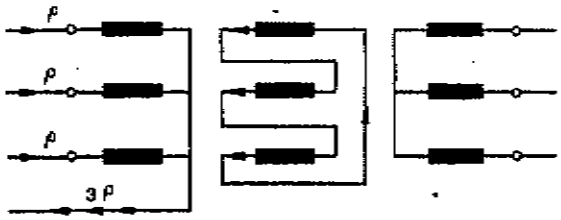
چنانچه نقطه خنثی یک ترانسفورماتور بصورت اتوترانسفورماتور، اتصال زمین نشده باشد، انتقـال جریان ترتیب صفر هنوز ممکن است ، لیکن با یک امپدانس متفاوت روبرو میشود .

هرگاه هیچ گونه انتقالی از جریان ترتیب صفر ورودی از یک سیستم بـه سیسـتم مخـالف ممکـن نباشد، در آنصورت ترانسفورماتور امپدانس آهن ربایی را به جریان ارائه مـی کنـد. ایـن امپدانـس آهنربایی در ترانسفورماتورهای از نوع هسته با پنج ساق و در ترانسـفورماتورهای نـوع پوشـان و همچنین در یک مجموعه سه تایی ترانسفورماتورهای تکفاز بسیار بالا است.

۴-۷-۲ سیم پیچهای *YNd* یا *Dyn* یا *YNynd+d* (سیم پیچ متعادل ساز) [1]

ترانسفورماتور، یک امپدانس پائین (از ویژگی امپدانس اتصال کوتاه) را نسبت بـه جریـان ترتیـب صفر از یک سیستم به یک سیم پیچ با اتصال *yn* که به طور مؤثر اتصال زمیـن شـده اسـت، ارائـه میدهد. یـک جریـان گردشی در سرتـاسر یک سیم پیچ مثلث، آمپـر دورهای جبـرانی را فـراهم می سازد (به شکل ۱۵ رجوع شود).

۱- *Equalizer winding*



شکل ۱۵- عملکرد یک سیم پیچ متعادل ساز

علت این پدیده این است که چرا سیم پیچ متعادل ساز اضافی با اتصال مثلث در یک ترانسفورماتور Y (یا مجموعه ای از ترانسفورماتورهای سه فاز بصورت تکفاز) باعث کاهش امپدانس ترتیب صفر سیستم متصل شده و به موجب آن ضریب خطای زمین میگردد (به بند ٤-٤ رجوع شود). یک نتیجه آن این است که جریان اتصال به زمین افزایش می یابد.

نکته مهم، اطمینان داشتن از مقاومت پایداری اتصال کوتاه یک سیم پیچ سوم با اتصال مثلث یا یک سیم پیچ متعادل ساز است که برای حداکثر جریان ترتیب صفر القاء شده در طی یک اتصال به زمین در یک سیستم متصل شده ، کافی باشد.

همچنین ، محدود کننده های جریان نصب شده در درون رآکتورها، ممکن است در سیم پیچ مثلث، به منظور پائین آوردن جریان اتصالی القاء شده به یک مقدار قابل تحمل متصل شده باشند.

۳-۷-۴ سیم پیچ Yzn یا ZNy

ترانسفورماتور امپدانس پائینی (از مشخصات امپدانس اتصال کوتاه) را نسبت به جریان ترتیب صفر از طرف Z ، ارائه می کند. تراز آمپر دور به طور ذاتی برای جریان ترتیب صفر، درون خود سیم پیچ Z وجود دارد.

این علت آن است که چرا یک ترانسفورماتور دارای سیم پیچ با اتصال Z N برای ایجاد یک نقطه خنثی برای اتصال یک امپدانس نقطه خنثی زمین به یک سیستم، هرگاه که سیم پیچ ترانسفورماتور اصلی بصورت سیم پیچ مثلث می باشد، به کار رفته است. ترانسفورماتور با اتصال Z به عنوان

یک ترانسفورماتور زمین یا یک بوبین نقطه خنثی تلقی می شود (به بخش ششم استاندارد ملی شماره ....[1] رجوع شود). همین کاربرد را می توان با ترکیب سیم پیچ *Nd Y* روی یک ترانسفورماتور اتصال زمین (بوبین زمین) بدست آورد .

چنانچه طرف *Y* نقطه خنثی اش متصل به زمین شده باشد *(YNzn)* ترانسفورماتور، امپدانس آهن مغناطیس کننده برای ترتیب صفر در همان طرف اتصال *Y* همانند آنچه در اتصال *Nyn Y* در بالاتوضیح داده شد، ارائه می کند. سیم پیچ *Z* که به طور ذاتی برای ترتیب صفر موازنه شده است، نمی تواند جبران آمپر دورها را برای جریان ترتیب صفر در سیم پیچ *Y* مخالف تامین کند.

۸-۴ بارگذاری پیوسته ترتیب صفر (جریان نقطه خنثی)

یک بار تکفاز روی یک ترانسفورماتور سه فاز، ممکن است میان فازها یا میان فاز و نقطه خنثی جا می گیرد.

در حالت نخست، سیستم جریان ها روی طرف اولیه و ثانویه، شامل مولفه های ترتیب مثبت و ترتیب منفی است، لیکن شامل ترتیب صفر نمی باشد، توزیع جریان های فاز روی طرف اولیه ترانسفورماتور، تابع اتصال سه فاز است. تبدیل نمودن بار تکفاز به یک بار سه فاز متقارن در طرف اولیه توسط یک نوع اتصال خاص ترانسفورماتور ، ممکن نیست. بارگذاری مجاز مربوط به جریان نامی سیم پیچهای مربوط به خود است.

اگر بار از میان فاز و خنثی ترانسفورماتور گرفته شود، ممکن است محدودیت های دیگری غیر از آن توسط جریان نامی سیم پیچ ایجاد شوند. بند فرعی ۸-۱ از استانداردملی شماره ۲۶۲۰ مقرر می دارد که ترمینال خنثی همیشه برای جریان تشخیص داده شده اتصال به زمین و برای جریان بار دائم نقطه خنثی چنانچه مشخص شود، برآورد میگردد (این یک شرط عادی برای ترانسفورماتورهای توزیع است).

این امر در پیوست الف استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ خواسته شده که درخواست در این باره باید شامل اطلاعات زیر باشد:

- روش موردنظر عملکرد سیستم که در آن سیم پیچ‌های ترانسفورماتور ممکن است به آن متصل شود، به ویژه هرگاه یک سیم پیچ متعادل ساز، مشخص شده است.
- هرگونه بار نامتعادل پیش بینی شده.

در خط با آنچه در بند فرعی پیشین شرح داده شده است، یک خنثی در سیم پیچ ثانویه ممکن است به طور کلی در حالت های زیر به طور دائم زیر بار باشد، بسته به اتصالات سیم پیچ، طرح مدار آهن ربایی و سیستم اتصال زمین:

- یک ترانسفورماتور نوع *Dyn* نقطه خنثی ممکن است با جریان نامی سیم پیچ زیر بار باشد.
- یک ترانسفورماتور نوع *YNyn* با هر دو نقطه خنثی اتصال زمین شده، ممکن است با جریان نامی توسط نقطه خنثی اش، زیر بار باشد. مشروط بر اینکه سیستم اتصال زمین این اجازه را بدهد (با توجه به عدم تقارن ولتاژ).
- یک سیم پیچ با اتصال *Z* (زیگزاک) نقطه خنثی ممکن است با جریان نامی، زیر بار باشد.
- یک ترانسفورماتور با اتصال *Yyn+d* (یک ترانسفورماتور دارای یک سیم پیچ متعادل ساز) ممکن است ترمینال خنثی ثانویه اش با جریانی تا جریان نامی، بارگذاری شده باشد، مشروط بر اینکه سیم پیچ با اتصال مثلث دارای توان نامی برابر دست کم یک سوم توان نامی سیم پیچ ثانویه باشد. (جریان گردان جاری شده در هر فاز سیم پیچ سوم ، جریان ترتیب صفر را در سیم پیچ ثانویه متعادل می کند، که طبق تعریف یک سوم جریان در خنثی است).
- در یک ترانسفورماتور *Yynd* که دارای سیم پیچ سوم بار پذیر است، این سیم پیچ سوم با همان شیوه ای عمل خواهد کرد که یک سیم پیچ متعادل ساز عمل می کند (بند پیشین را به بینید). هر جریان گردان در سیم پیچ مثلث با جریان بار بیرونی همان سیم پیچ ترکیب

می شود. (جریان کل را می توان با قرار دادن ترانسفورماتورهای جریان در هـر شـاخه سیم پیچ با اتصال مثلث در درون ترانسفورماتور اندازه گیری کرد).

- یک ترانسفورماتور Yyn بدون هرگونه سیم پیچ اضافی با اتصال مثلث نمـی توانـد بـه خوبـی ولتاژهای سه فاز متقارنی را فراهم آورد.(این در حالیست که نقطه خنثی در اولیه زمین نشـده باشد)
- یک ترانسفورماتور توزیع با هسته ستونی شـکل سـه پایـه، دارای اتصـال Yyn در کـل بـرای بارگذاری روی سیمهای خنثی و فاز مناسب نیست. نامتقارنی ولتاژ ناخوشایند خواهد شد، اگر (سیم) خنثی بیش از ده درصد جریان نامی سیم پیچ را از خود بگذراند. از این روی اتصالهای ترکیبی Dyn یا Yzn برای ترانسفورماتورهای توزیع که یک شبکه فشار ضعیف چهار سیمه را برقدار می کنند، مناسب تر هستند.
- یک ترانسفورماتور با اندازه متوسط و ولتاژ متوسط دارای این اتصال می تواند نزدیـک بـه ۲۵ درصد جریان نامی را طی ۲ ساعت از یک پیچک فرونشان جرقه[1] به همراه بار متقارن کـامل بگذراند. بدون آن که خطر گرمازایی پیش آید. هرچند چنین مقرراتی باید به ویژه مورد تـایید قرار گیرند.

۹-۴ مقاومت آهن ربایی مدار آهن ربایی و امپدانس آهن ربایی، اشـباع در حـالت پـایدار تحـت شرایط غیر طبیعی ولتاژ فرکانس قدرت

نمودار تک خطی معادل یک ترانسفورماتور قدرت دارای یک المنـت مـوازی اسـت کـه نشـانگر جریـان تحریک مدار آهن ربایی می باشد. در بهره برداری عادی، این جریان بسیار ناچیز است و بـرای نمونـه در محاسبات افت ولتاژ، که الگوی مدار معادل را توجیه و تایید می کند از آن چشم پوشی می شود. (بنـد۷ را ببینید). به سخن دیگر، اندوکتانس آهن ربایی بسیار بالاست. با توجه بـه ویـژگیهای آهـن ربـا شـوندگی مقاومت آهن ربایی که این شار آهن ربایی با آن روبرو می شود بسیار کم است، بدین معنا که مسـیر شـار اصلی به آسانی آهن ربایی می شود.

۱- *arc- suppression coil*

اگر ولتاژ با فرکانس شبکه که در دو سر سیم پیچها در هر یک از پایه ستونهای ترانسفورماتور اعمال می شود، به طور غیرعادی زیاد باشد، مواد ساختمان هسته طیّ بخشی از هر یک از نیم نوسانها، سیراب (اشباع) می شود. در شرایط سیراب شوندگی، مقاومت آهن ربایی افزایش چشمگیری می یابد. در این حالت یک جریان پیک (قله) آهن ربا کننده که با شدت روبه افزایش می باشد، از منبع تغذیه برداشت می شود (کشیده می شود).

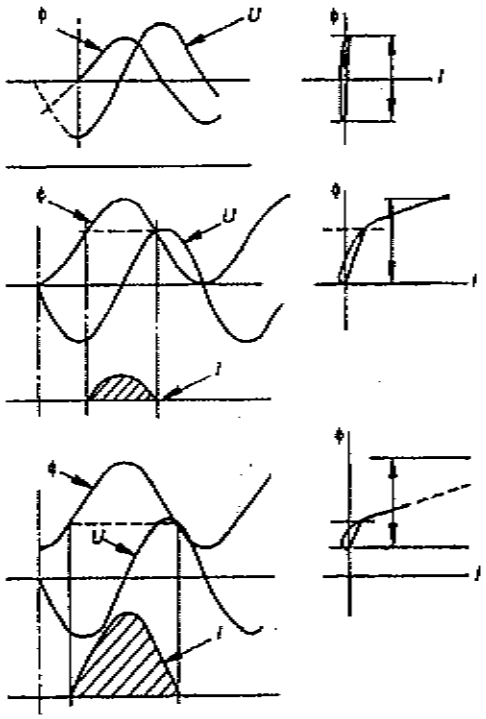
در پدیده سیراب شوندگی هسته، شار چشمگیری نیز بیرون از هسته فولادی ، در میان هسته و سیم پیچ وجود خواهد داشت. این شار می تواند جریانهای گردابی پردامنه ای را در بخشهای فلزی بیرون از سیم پیچ ها پدید آورد که می تواند سبب گرمازایی های موضعی و بروز جرقه در سرهای کنتاکت گونه (لبه های تیز) ناخواسته ، شود.

پدیده ای که می تواند با عث سیراب شوندگی موضعی در یک ترانسفورماتور شود، وجود شار نشتی آهن ربایی بیش از حد است که در اثر جریان اضافه بار بسیار سنگین رخ می دهد. شار نشتی از میان سیم پیچها می گذرد و قسمتی از آن راه بازگشت را از طریق مدار آهن ربایی پیدا می کنند . افزون بر آن، احتمال دارد که در این شرایط ، ولتاژ بهره برداری نیز ناهنجار (غیرعادی) شود. پیامد ترکیبی این موارد می تواند منجر به شرایط سیراب شوندگی (اشباع) غیرقابل پیش بینی در بخشهایی از هسته شود.

۱۰-۴ اشباع گذرا، جریان هجومی

هنگامی که یک ترانسفورماتور به طور ناگهانی با ولتاژ کامل شبکه برقدار می شود، پدیده سیراب شوندگی اتفاقی می تواند رخ دهد، که به روال معمول به آن به عنوان جریان هجومی اشاره می شود. (شکل ۱۶ را ببینید). در حالت پایدار، انتگرال ولتاژ – زمان یک نیم نوسان کامل از یک ولتاژ یک سویه در میان دو نقطه صفر، اعمالی در دو سر یک سیم پیچ، بستگی به نوسان شار با چگالی پر، از یک راستا به چگالی پر آن در راستای دیگر دارد.

هرچند پس از برقدار کردن ، بی درنگ یک شرایط گذرای ، ناهنجار گونه ای رخ می دهد. بسته به راستای آهن ربایی پس ماند موجود در مدار آهن ربایی و نقطه موج که در آن ولتاژ اعمال شده است. چگالی شار گذرا می تواند به حد سیراب شوندگی در هسته فولادی برسد و حتی مجبور به افزایش تا فراتر از آن مقدار گردد، پیش از آنکه جهت موج ولتاژ تغییر کند. دامنه جریان آهن رباساز گذرا می تواند به هر یک از مقادیر اوج (پیک) یا به بیشترین میزانی که فراتر از جریان نامی باشد، برسد و حتی به جریان عیب کامل اتصال کوتاه در ترانسفورماتور نیز نزدیک شود.



شکل ۱۷- جریانهای هجومی گذرا

از تشریح این پدیده، روشن می شود که جریان هجومی یک رویداد اتفاقی است که در روند برقدار کردن، هر از چند گاهی با دامنه کامل خود گسترش می یابد. جریان هجومی از یک شبکه با دامنه های مختلف و در فازهای متفاوت بروز می کند. هرگاه یک سیم پیچ با اتصال مثلث یا یک سیم پیچ با اتصال ستاره همراه با (سیم) خنثی به خوبی زمین شده، برقدار شوند. این پدیده به

هر ستون به طور جداگانه مربوط می شود. در حالی که در یک سیم پیچ ستاره بدون اتصال جریان (در سیم) خنثی، ترکیبی از سیم پیچهای دو ستون به طور سری درگیر آن می شوند. هرگاه جریان هجومی شدیدی رخ دهد، همواره توازن [1] پیدا می کند و با دامنه ای بالا و تنها از یک قطب آشکار می شود. از اینروی این جریان هجومی دارای مولفه ای .d .c است که در کمتر از ۱ ثانیه میرا میشود. زمان میرایی برای ترانسفورماتورهایی که از مواد هسته ای کم تلفات ساخته می شوند بلندتر می شود که در ترانسفورماتورهای بزرگ بلندتر هم میشود. این مؤلفه .d .c و وجود موج همساز (هارمونیک) بالای جریان در مدارهای رله های حفاظت از اهمیت برخوردارند. این مؤلفه همچنین می تواند سبب اثرات سیراب شوندگی در یک ترانسفورماتور از قبل برقدار شده ای شود که همراه ترانسفورماتور برقدار شده دیگر به طور موازی اتصال داده شده باشد. این پدیده با یک صدای تالاپ بلندی همراه است که چند ثانیه یا حتی چند دقیقه نیز به درازا می کشد ، پیش از آنکه شرایط پرتلاطم ترانسفورماتور به روند عادی بازگردد. مقدار بیش از اندازه بزرگ جریا ن هجومی ، که نسبت به جریان نامی با افزایش یک ضریب بیان می شود، بستگی به چگالی شار انتخابی برای روند بهره برداری در هنگام طراحی ترانسفورماتور دارد. انتخاب مقادیر بزرگتر درگیر توانمندی مواد کنونی هسته در مقایسه با مواد پیشین است. پیکربندی سیم پیچها نیز مهمند، برای نمونه کدامیک از سیم پیچهای بیرونی یا درونی در یک زوج سیم پیچ هم مرکز برقدار می شوند. سیم پیچ بیرونی دارای اندوکتانس فاصله های هوایی بیشتری در هسته است و جریان هجومی کمتری را از شبکه می کشد.

۱۱-۴ جریان القایی میدان آهن ربایی زمین و جریانهای سرباری ناشی از شبکه های .d .c

یک شبکه فشاری قوی .a .c که از طریق نقطه خنثی ترانسفورماتور به طور مؤثر زمین شده باشد، مسیر کم مقاومتی را برای جریان .d .c یا شبه .d .c جاری در پوسته زمین فراهم می آورد.

۱- *offset*

جریانهای القایی میدانهای آهن ربایی زمین بیشتر در مناطق معتدل زمین که دارای خـاک شـنی بـا مقاومت ویژه بالا هستند، بروز می کنند. این پدیده به صورت پالسهای متغیر و کند (چندین دقیقه) با دامنه ای نزدیک به دهها آمپر در (سیم یا نقطه) خنثی ترانسفورماتور پدیدار می شود.

جریانهای مزاحم، جریانهای برگشت زمین از شبکه های حمل ونقل $d.c.$ ، و دستگاههای حفاظت کاتودیک و غیره هستند. آنها می توانند در خنثی یک ترانسفورماتور تا میزان چند آمپر نیز برسند. هرگاه یک ترانسفورماتور در معرض این جریان $d.c.$ در (سیم یا نقطه) خنثی باشد، این پدیده می تواند، منجر به یک آهن ربا شوندگی انحرافی ، مدار آهن ربایی شود. جریان آهن ربایی به شـدت نامتقارن می شود تا جایی که جریا ن $d.c.$ اثر گذارد را جبران سـازد. ایـن جریـان $d.c.$ همچنیـن هارمونیک بالایی دارد. این جریانها پیامدهای چندی را به دنبال دارند:

- سطح صدای ترانسفورماتور به طور چشمگیری افزایش می یابد.
- هارمونیکهای جریان می توانند سبب درست کار نکردن دستگاه حفاظت و قطـع نادرسـت آن شوند.
- هارمونیکها حتی می توانند سبب گرمازایی شدید شارهای پراکنده شوند.

شدت این پدیده به توانایی جریان $d.c.$ برای آهنربایی کردن و همچنین طراحـی هسـته بسـتگی دارد.

۵ محاسبه جریانهای اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ، سه فاز (ترانسفورماتورهای سیم پیچ جدا و ترانسفورماتورهای با اتصال اتو) با خنثی های زمین شده.

۵-۱ کلیات

محاسبات جریان اتصال کوتاه در شبکه های $a.c.$ سه فاز استانداردهای ملی شماره ...[1] و ...[2] و ...[3] تشریح شده اند. بند ۵ رابطه هایی را برای محاسبه جریانهای جاری شده در سیم پیچهای مختلف و ترمینالهای ترانسفورماتور هنگام رخداد یک عیب در شبکه به صورتهای گوناگون، در دسترس می گذارد.

اتصال ترانسفورماتور بصورت *YNyn* یا *YNauto d* (یا *YNyn+d* یا *YNauto+d* اگر سیم پیچ سوم یک سیم پیچ پایدار ساز بار ناپذیر باشد) می باشد.

۵-۱ نشانه گذاری شبکه ها و سیم پیچها

سه سیم پیچ و شبکه های وابسته به هر یک از ارقام رومی نشان داده می شوند.

I ، نشان سرسیمهایی سیم پیچ ویا شبکه فشار قوی است.

II ، نشان سرسیمهایی سیم پیچ و یا شبکه فشار متوسط است.

III ، نشان سیم پیچ سوم یا سیم پیچ پایدارساز است.

سیم پیچهای *I* و *II* اتصال ستاره زمین شده هستند .

به سه ترمینال خط برای هر سیم پیچ با حروف بزرگ *A* ، *B* و *C* اشاره می شود. یک سیم پیچ فاز در اتصال ستاره با همان نشانه های ترمینال فاز مشخص می شود یک سیم پیچ فاز در سیم پیچ سوم با اتصال مثلث با حروف *AB* ، *BC* و *CA* مشخص می شوند.

مؤلفه های (ترتیبهای) متقارن ولتاژ، جریان یا امپدانس یا نشانه های + ، - ، *0* در بالا نویس هر حرف مشخص می شوند، برای نمونه:

امپدانس ترتیب مثبت شبکه *I* Z^{+}_{SI}

ولتاژ ترتیب صفر شبکه *II* U^{o}_{II}

عامل جابه جایی فاز در سه فاز به صورت یک عدد مبهم برابر است با:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

۱- تا تدوین این استاندارد ملی به IEC60909 رجوع شود.

۲- تا تدوین این استاندارد ملی به IEC60909-1 رجوع شود.

۳- تا تدوین این استاندارد ملی به IEC60909-2 رجوع شود.

۴-۵ پارامترهای ترانسفورماتور

توان مبنا برای نشانه گذاری های درصدی

S_r (توان اسمی سیم پیچهای اصلی I و II)

ولتاژهای مبنا برای سیم پیچها:

U_I ، U_{II} ، U_{III} (ولتاژهای اسمی سیم پیچها)

جریانهای مبنا برای سیم پیچها:

I_I ، I_{II} ، I_{III} (جریانهای اسمی سیم پیچها)

$$Z_{x(I)} = \frac{U_I^2}{S_r} \qquad Z_{x(II)} = \frac{U_{II}^2}{S_r}$$

از اینروی امپدانس مبنای سیم پیچها، چنین اند.

پای نوشتهای درون پرانتزها، شبکه ولتاژی را نشان می دهند که امپدانس نسبت به ولتاژ آن شبکه است.

تعریف نسبت به واحد[1] یا مقادیر درصدی امپدانس

$$Z_{I,II} = \frac{Z_{I,II(I)}}{Z_{r(I)}} = Z_{I,II(I)} \times \frac{S_r}{U_I^2} = \frac{Z_{I,II(II)}}{Z_{r(II)}} \times \frac{S_r}{U_{II}^2}$$

در اینجا $Z_{I,II(I)}$ برابر است با امپدانس میان سیم پیچهای I و II نسبت به ولتاژ I برحسب اهم در هرفاز.

$Z_{I,II(II)}$ برابر است با امپدانس میان سیم پیچهای I و II نسبت به ولتاژ II برحسب اهم در هرفاز.

$Z_{I,II}$ برابر است با امپدانس نسبت به واحد (یا درصد) میان سیم پیچهای I و II

این عبارت بستگی به توان اسمی S_r دارد و به ولتاژ هر یک از دو سو بستگی ندارد.

۱- *Per unit*

همه عبارتهای نسبت به واحد یا درصد ولتاژها، جریان ها و یا امپدانسها، با حروف کوچک به جای حروف بزرگ شناسایی می شوند.

تبدیل یک مجموعه سه سیم پیچ به یک شبکه معادل ستاره و محاسبه امپدانسهای شاخه ای که به شکل نسبت به واحد بیان شود به روال زیر می باشد:

$$Z_I = \frac{1}{2}(Z_{I,II} + Z_{I,III} - Z_{II,III})$$

$$Z_{II} = \frac{1}{2}(Z_{II,III} + Z_{I,II} - Z_{I,III})$$

$$Z_{III} = \frac{1}{2}(Z_{I,III} + Z_{II,III} - Z_{I,II})$$

مولفه های (ترتیبهای) متقارن امپدانسها به روال زیرند:

بنابه تعریف امپدانسهای ترتیب مثبت با امپدانسهای قراردادی ترانسفورماتور برای جریان سه فاز متقارن یکسان اند.

امپدانسهای ترتیب منفی ترانسفورماتور برابرند با امپدانسهای ترتیب مثبت.

امپدانس اتصال کوتاه ترتیب صفر در میان دو سیم پیچ اصلی با امپدانس قراردادی ترانسفورماتور تفاوت جزیی دارد. این اختلاف به ترتیب از ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد امپدانس قراردادی است، و کمابیش بستگی به شکل بندیهای سیم پیچ ها دارد. هرچند، اگر امپدانس ترتیب صفر اضافی در اثر افزودن رآکتورهای درونی روی سیم پیچ مثلث، به هنگام ساخت اضافه شود، امپدانس ترتیب صفر بسیار بیشتر خواهد شد.

۴-۵ امپدانسهای شبکه های I و II

امپدانس شبکه با پانوشت S یاد می شود برای اینکه از امپدانسهای اتصال کوتاه ترانسفورماتور متمایز شوند. این امپدانسها، امپدانسهای اتصال کوتاه هستند. اگر از سوی ترانسفورماتور به آنها نگاه کنیم.

فرض بر این است که امپدانسهای ترتیب مثبت و منفی یکسانند ولی امپدانس هـای ترتیـب صفـر بزرگتر است .

$$Z_{SI}^{+} = S_{SI}^{-}$$
$$Z_{SI}^{0} = kZ_{SI}^{+}$$

در اینجا ۳ ≤ k ≤ ۱ می باشد (با زمین مؤثر).

امپدانس شبکه سوم در هیچ یک از محاسبات ارائه شده در زیر دخالتی ندارد.

خنثی های سیم پیچ های ترانسفورماتور I و II یا خنثی های مشترک اتصال – اتو، بدون هرگونـه امپدانس اضافی به زمین ایستگاه وصل می شوند که در غیر این صورت به امپدانس ترتیـب صفـر اضافه می شد.

۵-۵ خلاصه ای از حالتهای بررسی شده در این زیر بند.

حالت ۱: عیب زمین تک فاز برروی شبکه II (شکل ۱۷ آ)

حالت ۲: عیب زمین تک فاز برروی شبکه I (شکل ۱۸ آ)

حالت ۳: عیب زمین دو فاز برروی شبکه II (شکل ۱۹ آ)

حالت ٤: عیب زمین دو فاز برروی شبکه I (شکل ۲۰ آ)

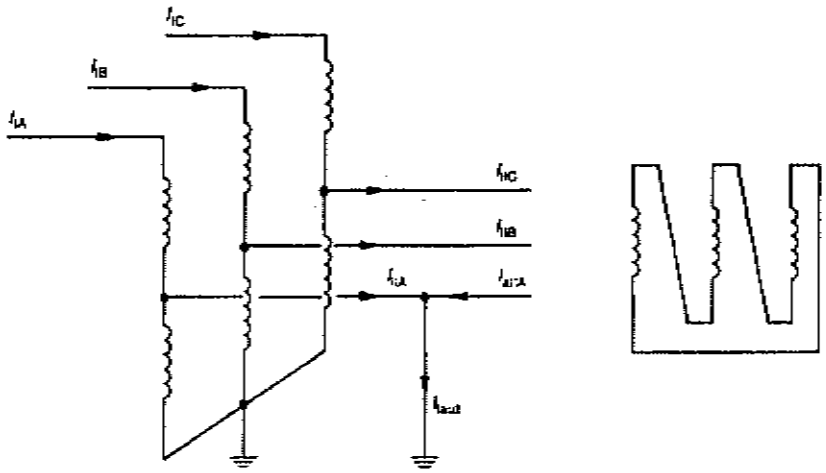
حالت ۵: اتصال کوتاه سه فاز روی ترمینال I

حالت ٦: اتصال کوتاه سه فاز روی ترمینال II

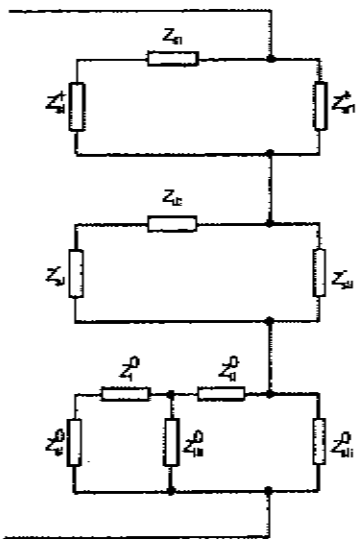
حالت ۷: اتصال کوتاه سه فاز روی ترمینال III

در حالتهای ۱ تا ٤ شکلهای (۱۷ ب تا ۲۰ ب) افزوده شده اند تا جریانهای جاری شده در نمـودار سه فاز ترانسفورماتور همراه با خطهای اتصالی به آن ها نشان داده شوند. ایـن شـکلها ، اتصـالات اتوترانسفورماتور را نشان می دهند ولی روال محاسبه برای اتصالات با سیم پیچهای جداگانه نـیز معتبر است.

شکلهای اضافی (۱۷ ب تا ۲۰ ب) همچنین یک شبکه امپدانسی تک خطی معادل را نشان می دهد که در ارتباط با محاسبه جریان اتصال کوتاه با روش مولفه های متقارن می باشد. این شبکه امپدانسی به ترتیب سه بلوک برای المانهای امپدانسی ترتیب مثبت، منفی و صفر را دربردارد.



شکل ۱۷ الف - حالت ۱ ، عیب زمین تکفاز روی سیستم *II*



$$Z^{+} = \frac{(Z_{I,I} + Z_{g}^{+})Z_{s\,II}^{+}}{Z_{I,I} + Z_{sI}^{+} + Z_{s\,II}^{+}}$$

$$Z^{-} = \frac{(Z_{I,I} + Z_{g}^{-})Z_{s\,II}^{-}}{Z_{I,I} + Z_{sI}^{-} + Z_{s\,II}^{-}}$$

$$Z^{0} = \frac{(Z_{I\,I}^{0} + Z')Z_{s\,II}^{0}}{Z_{I\,I}^{0} + Z' + Z_{s\,I\,I}^{0}}$$

$$Z' = \frac{(Z_{I}^{0} + Z_{g}^{0})Z_{II}^{0}}{Z_{I}^{0} + Z_{g}^{0} + Z_{II}^{0}}$$

شکل ۱۷ ب - حالت ۱ ، نمودار مدار سه فاز و شبکه امپدانسی مؤلفه های متقارن

شکل ۱۷ - حالت ۱

همه امپدانسها نسبت به سیستم II محاسبه می شوند.

در این حالت، پیوست الف، حالت ۱ را به بینید.

$$I_{II}^{+} = I_{II}^{-} = I_{II}^{0} = I = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{U_{II}}{2} \qquad (۱)$$

(۲) در اینجا $Z = Z^{-} + Z + Z^{0} = 2Z^{+} + Z^{0}$ (زیرا $Z^{-} = Z$)

(۳) جریان در عیب برابر است با $$۳I_{II}^{\cdot} = \frac{\sqrt{۳} \times U_{II}}{Z}$$

جریانهای شاخه ای:

از فاز A شبکه II (فاز عیب دار):

$$I_{sIIA} = I_{sII}^{+} + I_{sII}^{-} + I_{sII}^{\cdot} = ۲I_{sII}^{+} + I_{sII}^{\cdot} = ۲\frac{Z^{+}}{Z_{sII}^{+}} \times I + \frac{Z^{o}}{Z_{sII}^{\cdot}} \times I \qquad (٤)$$

سیم پیچ ترانسفورماتور II ، فاز A :

$$I_{IIA} = ۲(I^{\cdot} - I_{sII}^{+}) \div I^{\cdot} - I_{sII}^{\cdot} = ۳I - I_{sIIA} \qquad (٥)$$

فاز B (فاز بدون عیب):

$$I_{IIB} = I_{sII}^{+} - I_{sII}^{\cdot} \qquad (٦)$$

جریانهای مولفه ای در سیم پیچ I :

$$I_{I}^{+} = I_{I}^{-} = \frac{U_{II}}{U_{I}} \times I_{II}^{+} = \frac{U_{II}}{U_{I}}(I - I_{sII}^{+}) = \frac{U_{II}}{U_{I}} \times I(1 - \frac{Z^{+}}{Z_{sII}^{+}}) \qquad (٧)$$

$$I_{I}^{0} = \frac{Z_{III}^{0}}{Z_{I}^{0} + Z_{sI}^{0} + Z_{III}^{0}} \times \frac{U_{II}}{U_{I}} \times I_{II}^{0} \qquad (٨)$$

در اینجا:

$$I_{II}^{0} = (I - I_{sII}^{0}) = I(1 - \frac{Z^{0}}{Z_{sII}^{0}})$$

سیم پیچ I ، فاز A :

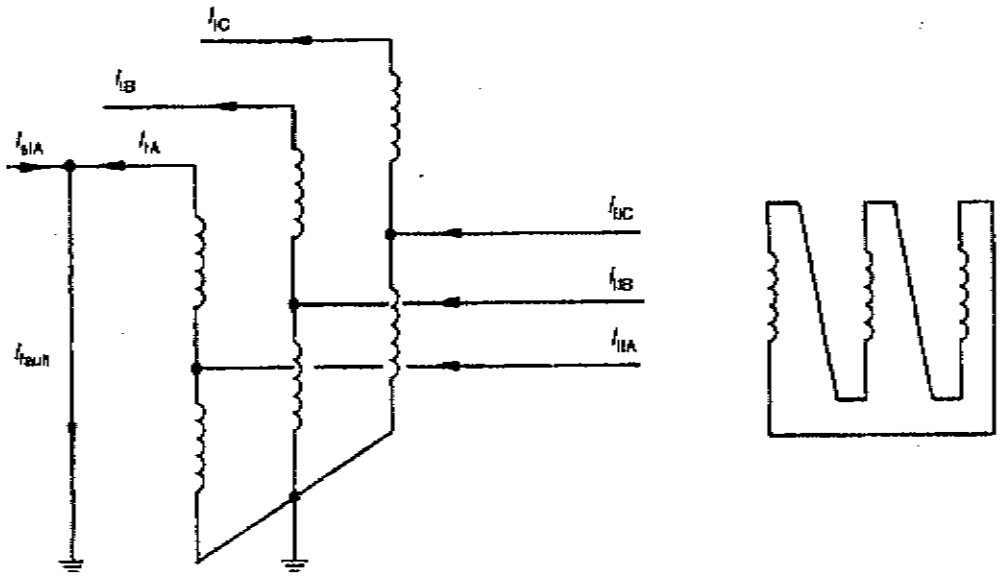
$$I_{IA} = 2I_{I}^{+} + I_{I}^{0} \qquad (٩)$$

در فاز دیگر:

$$I_{IB} = I_I^0 - I_I^+ \qquad (۱۰)$$

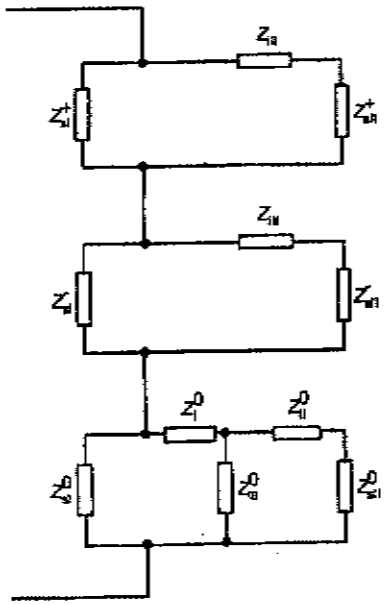
محاسبه جریان در سیم پیچ مثلث:

$$I_{III} = \frac{U_{II}}{U_{III} \times \sqrt{3}} \times \frac{Z_I^0 + Z_{SI}^0}{Z_I^0 + Z_{SI}^0 + Z_{III}^0} \times I(1 - \frac{Z^0}{Z_{SII}^0}) \qquad (۱۱)$$



یادآوری : این حالت با حالت ۱ مربوط است. همه کمیت هایی را که می تـوان از حـالت ۱ بـه دست آورد، تنها با جابه جاسازی (جایگشت) I و II.

شکل ۱۸ الف – حالت ۲ – عیب زمین تکفاز روی سیستم I



$$Z^{+} = \frac{(Z_{l,II} + Z^{+}_{sII})Z^{+}_{sI}}{Z_{l,II} + Z^{+}_{sI} + Z^{+}_{sII}}$$

$$Z^{-} = \frac{(Z_{l,II} + Z^{-}_{sII})Z^{-}_{sI}}{Z_{l,II} + Z^{-}_{sI} + Z^{-}_{sII}}$$

$$Z^{0} = \frac{(Z^{0}_{l} + Z')Z^{0}_{sI}}{Z^{0}_{l} + Z' + Z^{0}_{sI}}$$

$$\text{with } Z' = \frac{(Z^{0}_{II} + Z^{0}_{sII})Z^{0}_{lII}}{Z^{0}_{II} + Z^{0}_{sII} + Z^{0}_{lII}}$$

شکل ۱۸ ب – حالت ۲ – نمودار مدار سه فاز و سیستم امپدانسی مولفه های متقارن

همه امپدانسها برای سیستم I در نظر گرفته شده اند .

در این حالت پیوست الف، حالت ۱ را ببینید.

$$I_l^{+} = I_l^{-} = I_l^{0} = I = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{U_1}{Z} \qquad (۱۲)$$

(۱۳) در اینجا: $Z = Z^{+} + Z^{-} + Z^{0} = 2Z^{+} + Z^{0}$ $(Z^{+} = Z^{-}$ زیرا$)$

جریان در عیب برابر است با:

$$3I_l^{0} = \frac{\sqrt{3} \times U_L}{Z} \qquad (۱٤)$$

جریانهای شاخه ای:

از فاز A شبکه I (فاز عیب دار):

$$I_{SIA} = I_{SI}^{-} + I_{SI}^{-} + I_{SI}^{0} = 2I_{SI} + I_{SI}^{0} = 2\frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}} \times I + \frac{Z^{0}}{Z_{SI}^{0}} \times I \qquad (۱۵)$$

سیم پیچ ترانسفورماتور I ، فاز A :

$$I_{IA} = 3I - I_{SIA} = 2(I^{+} - I_{SI}^{+}) + I^{0} - I_{SI}^{0} \qquad (۱۶)$$

فاز B (فاز عیب دار) :

$$I_{IB} = I_{SI}^{+} - I_{SI}^{0} \qquad (۱۷)$$

جریانهای مؤلفه ای در سیم پیچ II :

$$I_{II}^{+} = I_{II}^{-} = \frac{U_I}{U_{II}} \times I_I^{+} = \frac{U_I}{U_{II}} \times I(1 - \frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}}) \qquad (۱۸)$$

$$I_{II}^{0} = \frac{Z_{III}^{0}}{Z_{II}^{0} + Z_{SII}^{0} + Z_{III}^{0}} \times \frac{U_I}{U_{II}} \times I(1 - \frac{Z^{0}}{Z_{SI}^{0}}) \qquad (۱۹)$$

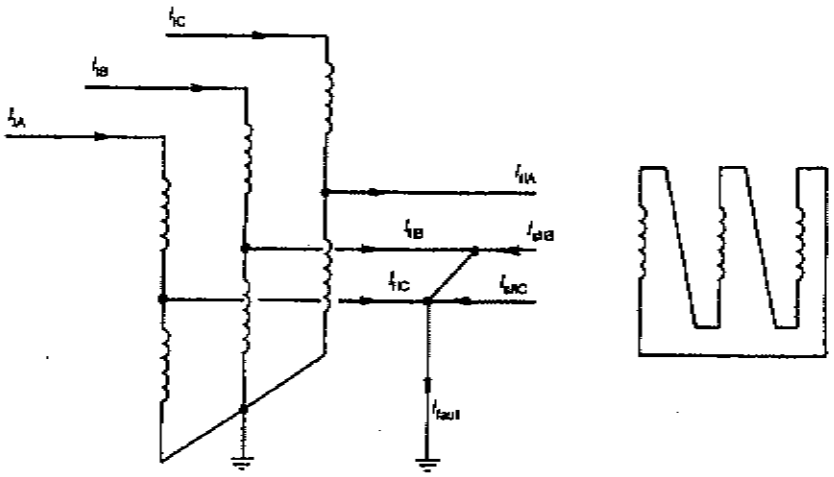
جریانهای فاز:

$$I_{IIA} = 2I_{II}^{+} + I_{II}^{0} \qquad (۲۰)$$

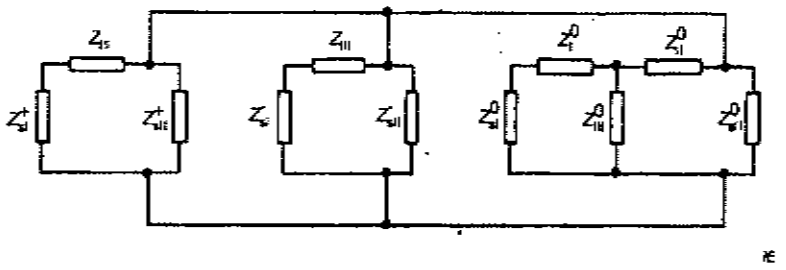
$$I_{IIB} = I_{II}^{0} - I_{II}^{-} \qquad (۲۱)$$

گردش جریان در سیم پیچ مثلث:

$$I_{III} = \frac{U_I}{U_{III} \times \sqrt{3}} \times \frac{Z^0_{II} + Z^0_{SII}}{Z^0_{II} + Z^0_{SII} + Z^0_{III}} \times I(1 - \frac{Z^0}{Z^0_{SI}}) \qquad (۲۲)$$



شکل ۱۹ الف – حالت ۳ – عیب زمین دو فاز در سیستم II



$$Z^+ = \frac{(Z_{III} + Z^+_{SI})Z^+_{SII}}{Z_{III} + Z^+_{SI} + Z^+_{SII}} \qquad Z^- = \frac{(Z_{III} + Z^-_{SI})Z^-_{SII}}{Z_{III} + Z^-_{SI} + Z^-_{SII}}$$

$$Z^0 = \frac{(Z^0_{II} + Z')Z^0_{SII}}{Z^0_{II} + Z' + Z^0_{SII}} \qquad \text{with } Z' = \frac{(Z^0_I + Z^0_{SI})Z^0_{III}}{Z^0_I + Z^0_{SI} + Z^0_{III}}$$

شکل ۱۹ ب – حالت ۳ – نمودار مداری سه فاز و سیستم امپدانسی مؤلفه های متقارن

همه امپدانسها برای سیستم *II* در نظر گرفته شده اند .

در این حالت (پیوست الف، حالت ۲ را ببینید)، مؤلفه های ولتاژ چنین اند:

$$V_{II}^{+} = V_{II}^{-} = V_{II}^{0} = \frac{V_{II}}{3} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} \times \frac{Z}{Z^{+}} \qquad (۲۳)$$

(۲٤) در اینجا (زیرا $Z^{+} = Z^{-}$)

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z^{+}} + \frac{1}{Z^{-}} + \frac{1}{Z^{0}} = \frac{Z^{+} + 2Z^{0}}{Z^{+} \times Z^{0}}$$

(۲۵) سپس :

$$\frac{V_{II}}{3} = \frac{Z^{0}}{Z^{+} + 2Z^{0}} \times \frac{U_{II}}{\sqrt{3}}$$

جریانهای مؤلفه ای عیب :

$$I^{+} \times Z^{+} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} - V_{II}^{+} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} (1 - \frac{Z^{0}}{Z^{+} + 2Z^{0}}$$

$$\left.\begin{aligned} I^{+} &= \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} \times \frac{Z^{+} + Z^{0}}{Z^{+}(Z^{+} + 2Z^{0})} \\ I^{-} &= \frac{V_{II}^{-}}{Z^{-}} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} \times \frac{-Z^{0}}{Z^{+}(Z^{+} + 2Z^{0})} \\ I^{0} &= \frac{V_{II}^{0}}{Z^{0}} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3}} \times \frac{-1}{Z^{+} + 2Z^{0}} \end{aligned}\right\} \qquad (۲٦)$$

جریان های مؤلفه در سیستم *II* :

$$\left.\begin{aligned} I_{SII}^{+} &= I^{-} \times \frac{Z^{+}}{Z_{SII}^{+}} \\ I_{SII} &= I^{-} \times \frac{Z^{-}}{Z_{SII}} = I^{-} \frac{Z^{+}}{Z_{SII}^{+}} \\ I_{SII}^{0} &= I^{0} \times \frac{Z^{0}}{Z_{SII}^{0}} \end{aligned}\right\} \qquad (۲۷)$$

جریان های فاز در سیستم II :

$$\left.\begin{aligned} I_{SIIA} &= I^{+}_{SII} + I^{-}_{SII} + I^{0}_{SII} \\ I_{SIIB} &= \alpha^2 I^{+}_{SII} + \alpha I^{-}_{SII} + I^{0}_{SII} \\ I_{SIIC} &= \alpha I^{+}_{SII} + \alpha^2 I^{-}_{SII} + I^{0}_{SII} \end{aligned}\right\} \qquad (۲۸)$$

مؤلفه های جریان در سیم پیچ ترانسفورماتور II :

$$\left.\begin{aligned} I^{+}_{II} &= I^{+} - I^{+}_{SII} = I^{+}(1 - \frac{Z^{+}}{Z^{+}_{SII}}) \\ I^{-}_{II} &= I^{-} - I^{-}_{SII} = I^{-}(1 - \frac{Z^{-}}{Z_{SII}}) = I^{-}(1 - \frac{Z^{+}}{Z^{+}_{SII}}) \\ I^{0}_{II} &= I^{0} - I^{0}_{SII} = I^{0}(1 - \frac{Z^{0}}{Z^{0}_{SII}}) \end{aligned}\right\} \qquad (۲۹)$$

جریانهای فاز های سیم پیچ II :

$$\left.\begin{aligned} I_{IIA} &= I^{+}_{II} + I^{-}_{II} + I^{0}_{II} \\ I_{IIB} &= \alpha^2 I^{+}_{II} + \alpha I^{-}_{II} + I^{0}_{II} \\ I_{IIC} &= \alpha I^{+}_{II} + \alpha^2 I^{-}_{II} + I^{0}_{II} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۰)$$

جریانهای مؤلفه ای در خط و سیم پیچ I :

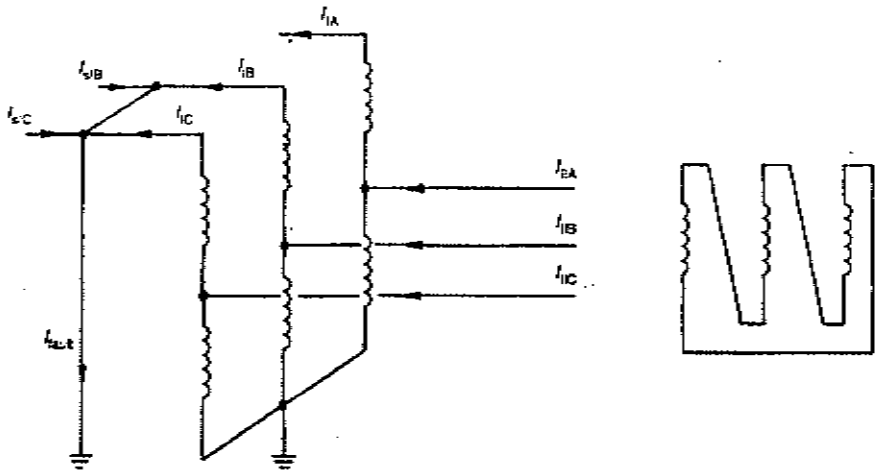
$$\left.\begin{aligned} I^{+}_{I} &= \frac{U_{II}}{U_{I}} \times I^{+}_{II} \\ I^{-}_{I} &= \frac{U_{II}}{U_{I}} \times I^{-}_{II} \\ I^{0}_{I} &= \frac{U_{II}}{U_{I}} \times \frac{Z^{0}_{III}}{Z^{0}_{III} + Z^{0}_{I} + Z^{0}_{SII}} \times I^{0}_{II} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۱)$$

جریانهای فاز :

$$\left.\begin{aligned} I_{IA} &= I_I^+ + I_I^- + I_I^0 \\ I_{IB} &= \alpha^2 I_I^+ + \alpha I_I^- + I_I^0 \\ I_{IC} &= \alpha I_I^+ + \alpha^2 I_I^- + I_I^0 \end{aligned}\right\} \qquad (۳۲)$$

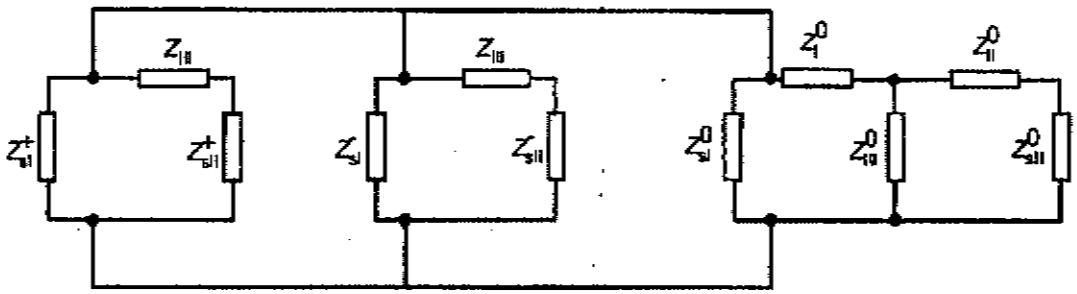
گردش جریان در سیم پیچ مثلث :

$$I_{III} = \frac{U_{II}}{U_{III} \times \sqrt{3}} \times \frac{Z_I^0 + Z_{SI}^0}{Z_I^0 + Z_{SI}^0 + Z_{III}^0} \times I_{II}^0 \qquad (۳۳)$$



یادآوری : *این حالت با حالت ۳ پیوستگی دارد. همه کمیت های به دست آمده ازحالت ۳ را می توان با تغییر پای نوشت I با II برای این حالت به کار برد.*

شکل ۲۰ الف – حالت ۴ – عیب زمین دو فاز روی سیستم I



$$Z^{+} = \frac{(Z_{I,II} + Z^{+}_{sII})Z^{+}_{sI}}{Z_{I,II} + Z^{+}_{sII} + Z^{+}_{sI}} \qquad Z^{-} = \frac{(Z_{I,II} + Z^{-}_{sII})Z^{-}_{sI}}{Z_{I,II} + Z^{-}_{sI} + Z^{-}_{sII}}$$

$$Z^{0} = \frac{(Z^{0}_{I} + Z')Z^{0}_{sI}}{Z^{0}_{I} + Z' + Z^{0}_{sI}} \qquad Z' = \frac{(Z^{0}_{II} + Z^{0}_{sII})Z^{0}_{III}}{Z^{0}_{II} + Z^{0}_{sII} + Z^{0}_{III}}$$

شکل ۲۰ ب - حالت ٤ - نمودار مدار سه فاز و شبکه امپدانس مؤلفه ای متقارن

شکل ۲۰ - حالت ٤

همه امپدانسها نسبت به شبکه *I* هستند.

در این حالت، مؤلفه های ولتاژ برابر است با :

$$V_I^{+} = V_I^{-} = V_I^{0} = \frac{V_I}{3} = \frac{U_I}{\sqrt{3}} \times \frac{Z}{Z^{+}} \qquad (۳٤)$$

(۳۵) در اینجا : (زیرا $Z^{-} = Z^{+}$)

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z^{+}} + \frac{1}{Z^{-}} + \frac{1}{Z^{0}} = \frac{Z^{+} + 2Z^{0}}{Z^{+} \times Z^{0}}$$

(۳٦) سپس :

$$\frac{V_I}{3} = \frac{Z^{0}}{Z^{+} + 2Z^{0}} \times \frac{U_I}{\sqrt{3}}$$

مؤلفه های جریان عیب :

$$I^{+} \times Z^{+} = \frac{U_f}{\sqrt{3}} - V_f^{+} = \frac{U_f}{\sqrt{3}}(1 - \frac{Z^0}{Z^{+} + 2Z^0}$$

$$\left.\begin{aligned} I^{+} &= \frac{U_f}{\sqrt{3}} \times \frac{Z^{+} + Z^0}{Z^{+}(Z^{+} + 2Z^0)} \\ I^{-} &= \frac{V_f^{-}}{Z^{-}} = \frac{U_f}{\sqrt{3}} \times \frac{-Z^0}{Z^{+}(Z^{+} + 2Z^0)} \\ I^0 &= \frac{V_f^0}{Z^0} = \frac{U_f}{\sqrt{3}} \times \frac{-1}{Z^{+} + 2Z^0} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۷)$$

جریانهای مؤلفه ای در سیستم I :

$$\left.\begin{aligned} I_{SI}^{+} &= I^{+} \times \frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}} \\ I_{SI} &= I^{-} \times \frac{Z^{-}}{Z_{SI}} = I^{-} \frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}} \\ I_{SI}^{0} &= I^0 \times \frac{Z^0}{Z_{SI}^0} \end{aligned}\right\} \qquad (۳۸)$$

جریانهای فازی در سیستم I :

$$\left.\begin{aligned} I_{SIA} &= I_{SI}^{+} + I_{SI}^{-} + I_{SI}^0 \\ I_{SIB} &= \alpha^2 I_{SI}^{+} + \alpha I_{SI}^{-} + I_{SI}^0 \\ I_{SIC} &= \alpha I_{SI}^{+} + \alpha^2 I_{SI}^{-} + I_{SI}^0 \end{aligned}\right\} \qquad (۳۹)$$

جریانهای مؤلفه ای در سیم پیچ ترانسفورماتور I :

$$\left.\begin{aligned} I_I^{+} &= I^{+} - I_{SI}^{+} = I^{+}(1 - \frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}}) \\ I_I^{-} &= I^{-} - I_{SI}^{-} = I^{-}(1 - \frac{Z^{-}}{Z_{SI}}) = I^{-}(1 - \frac{Z^{+}}{Z_{SI}^{+}}) \\ I_I^0 &= I^0 - I_{SI}^0 = I^0(1 - \frac{Z^0}{Z_{SI}^0}) \end{aligned}\right\} \qquad (۴۰)$$

جریانهای فاز در سیم پیچ I :

$$\left.\begin{aligned} I_{IA} &= I_I^+ + I_I^- + I_I^0 \\ I_{IB} &= \alpha^2 I_I^+ + \alpha I_I^- + I_I^0 \\ I_{IC} &= \alpha I_I^+ + \alpha^2 I_I^- + I_I^0 \end{aligned}\right\} \qquad (٤١)$$

جریانهای مؤلفه ای در خط و سیم پیچ II :

$$\left.\begin{aligned} I_{II}^+ &= \frac{U_I}{U_{II}} \times I_I \\ I_{II}^- &= \frac{U_I}{U_{II}} \times I_I^- \\ I_{II}^0 &= \frac{U_I}{U_{II}} \times \frac{Z_{III}^0}{Z_{III}^0 + Z_{II}^0 + Z_{SII}^0} \times I_I^0 \end{aligned}\right\} \qquad (٤٢)$$

جریانهای فاز :

$$\left.\begin{aligned} I_{IIA} &= I_{II}^+ + I_{II}^- + I_{II}^0 \\ I_{IIB} &= \alpha^2 I_{II}^+ + \alpha I_{II}^- + I_{II}^0 \\ I_{IIC} &= \alpha I_{II}^+ + \alpha^2 I_{II}^- + I_{II}^0 \end{aligned}\right\} \qquad (٤٣)$$

گردش جریان در سیم پیچ مثلث :

$$I_{III} = \frac{U_I}{U_{III} \times \sqrt{3}} \times \frac{Z_{II}^0 + Z_{SII}^0}{Z_{II}^0 + Z_{SII}^0 + Z_{III}^0} \times I_I^0 \qquad (٤٤)$$

حالت ۵ : اتصال کوتاه سه فاز بر روی ترمینال II

این حالت تنها ترتیب مثبت را دربردارد.

جریان عیب در هر فاز روی شبکه II برابر است با:

$$I_{II} = \frac{U_{II}}{\sqrt{3} \times Z^{+}} \qquad (٤٥)$$

با داشتن $Z^{-} = Z^{+}_{sI} + Z_{(I,II)}$ امپدانسها نسبت به شبکه II خواهند بود.

جریان در هر فاز سیم پیچ I برابر است با:

$$I_{I} = I_{II} \times \frac{U_{II}}{U_{I}} \qquad (٤٦)$$

هیچ گونه جریان گردشی در سیم پیچ III وجود ندارد.

حالت ۶ : اتصال کوتاه سه فاز در ترمینال I .

این حالت تنها ترتیب مثبت را دربردارد.

جریان عیب هر فاز :

$$I_{I} = \frac{U_{I}}{\sqrt{3} \times Z^{+}} \qquad (٤٧)$$

با داشتن $Z^{-} = Z^{+}_{sII} + Z_{(I,II)}$ امپدانسها نسبت به شبکه I خواهند بود.

جریان در هر فاز سیم پیچ ۱۱ برابر است با :

$$I_{II} = I_{I} \times \frac{U_{I}}{U_{II}} \qquad (٤٨)$$

در این حالت هیچ گونه جریان گردشی در سیم پیچ III وجود ندارد.

حالت ۷ : اتصال کوتاه سه فاز روی هر سیم پیچ III

این حالت تنها ترتیب مثبت را دربردارد.

$$Z^{+} = Z^{+}_{III} + \frac{(Z^{+}_{SI} + Z^{+}_{I})(Z^{+}_{SII} + Z^{+}_{II})}{Z^{+}_{SI} + Z^{+}_{I} + Z^{+}_{SI} + Z^{+}_{II}} \qquad (٤٩)$$

امپدانسها همه برمبنای سیم پیچ III هستند.

جریان اتصال کوتاه – جریان خط :

(۵۰)

$$I_{III} = \frac{U_{III}}{\sqrt{3} \times Z^{+}}$$

جریان اتصال کوتاه در هر فاز سیم پیچ :

(۵۱)

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{III}$$

سهم عیب از شبکه I و II

(۵۲)

(۵۳)

$$I_{I(III)} = I_{III} \times \frac{Z^{+}_{SII} + Z^{+}_{II}}{Z^{+}_{SI} + Z^{+}_{I} + Z^{+}_{SII} + Z^{+}_{II}}$$

$$I_{II(III)} = I_{III} - I_{I(III)}$$

جریانها در سیم پیچهای I و II برابرند با :

(۵۴)

$$I_{I} = I_{I(III)} \times \frac{U_{III}}{U_{I}}$$

(۵۵)

$$I_{II} = I_{II(III)} \times \frac{U_{III}}{U_{II}}$$

۶ کارکرد موازی ترانسفورماتور ها در شبکه های سه فاز

در این بند، کارکرد موازی به معنای اتصال مستقیم ترمینال _ به _ ترمینال ترانسفورماتورها در یک تاسیسات ایستگاهی می باشد. تنها ترانسفورماتورهای دو سیم پیچ پیچه موردنظر می باشند. این روال منطقی همچنین در باب مجموعه های سه فاز شکل گرفته از سه ترانسفورماتور تک فاز نیز کاربرد دارد.

کارکرد موفقیت آمیز، ترانسفورماتورها مستلزم آنست که :

- با توجه به شماره گذاری ساعتی ، زاویه فازهای مربوط یکسان باشند. (ترکیب بندهایی اضافی در زیر یادآوری می شوند) ؛
- نسبت تبدیل آنها با مقدار کمی خطا یکسان باشد و ردیف انشعابهایشان همانند باشند.
- امپدانس اتصال کوتاه نسبی و امپدانس درصدی یکسان با اندکی خطا داشته باشند. بدین معنا که تعییر امپدانس نسبی در سراسر ردیف انشعاب ها باید برای هر دو ترانسفورماتور همانند باشد.

این سه شرط در زیربندهای زیرین بیشتر تشریح می شوند :

اگر قصد براین باشد که یک ترانسفورماتور را با یک ترانسفورماتور موجود معین موازی ببندند، گنجاندن اطلاعات ترانسفورماتور موجود در اسناد مناقصه این ترانسفورماتور از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در این رابطه به چند نکته ظریف اشاره می شود :

- موازی بستن دو ترانسفورماتور با گنجایش های نامی بسیار متفاوت (با بیش از نسبت ۲ :۱) توصیه نمی شود. امپدانس نسبی طبیعی برای طرحهای بهینه با توجه به ابعاد ترانسفورماتور تغییر می کند.
- ترانسفورماتورهایی که با توجه به مفاهیم طراحی مختلف ساخته شده اند، به احتمال بسیار دارای سطوح امپدانس مختلف اند و در سراسر ردیف انشعابهای آنها تغییرات متفاوتی دنبال می شود. (بند ٦-٤ را ببینید).
- پیامد ناهمخوانیهایی کوچک موجود در میان داده های ترانسفورماتور ها را نباید فراتر از اندازه برآورد کرد. برای نمونه ، نیازی نیست که ولتاژهای انشعابها برروی دو ترانسفورماتور دقیقاً یکسان باشند. گام ها یا پله های انشعاب معمولا کوچکند و به انشعابهای منظور شده

اجازه کارکرد قابل قبول را می دهند. با این وجود توجه بیشتر باید در جایی اعمال شود که گامهای (پله های) انشعاب بزرگ باشند (بند ٦-٢ و ٦-٣ را ببینید).

نسبت تبدیل تضمینی و معین و پارامترهای (فراسنج های) امپدانسی همواره از حد خطای مجاز در جدول ١ و بند ٩ استاندارد ملی شماره ٢٦٢٠ پیروی می کنند.

احتمال سختگیری در باب حد خطای مجاز به ویژه در حالتهایی با موردهای ویژه برای کارکرد موازی ترانسفورماتورها در جدول ١، یادآوری ٢ استاندارد ملی شماره ٢٦٢٠ ارائه شده است.

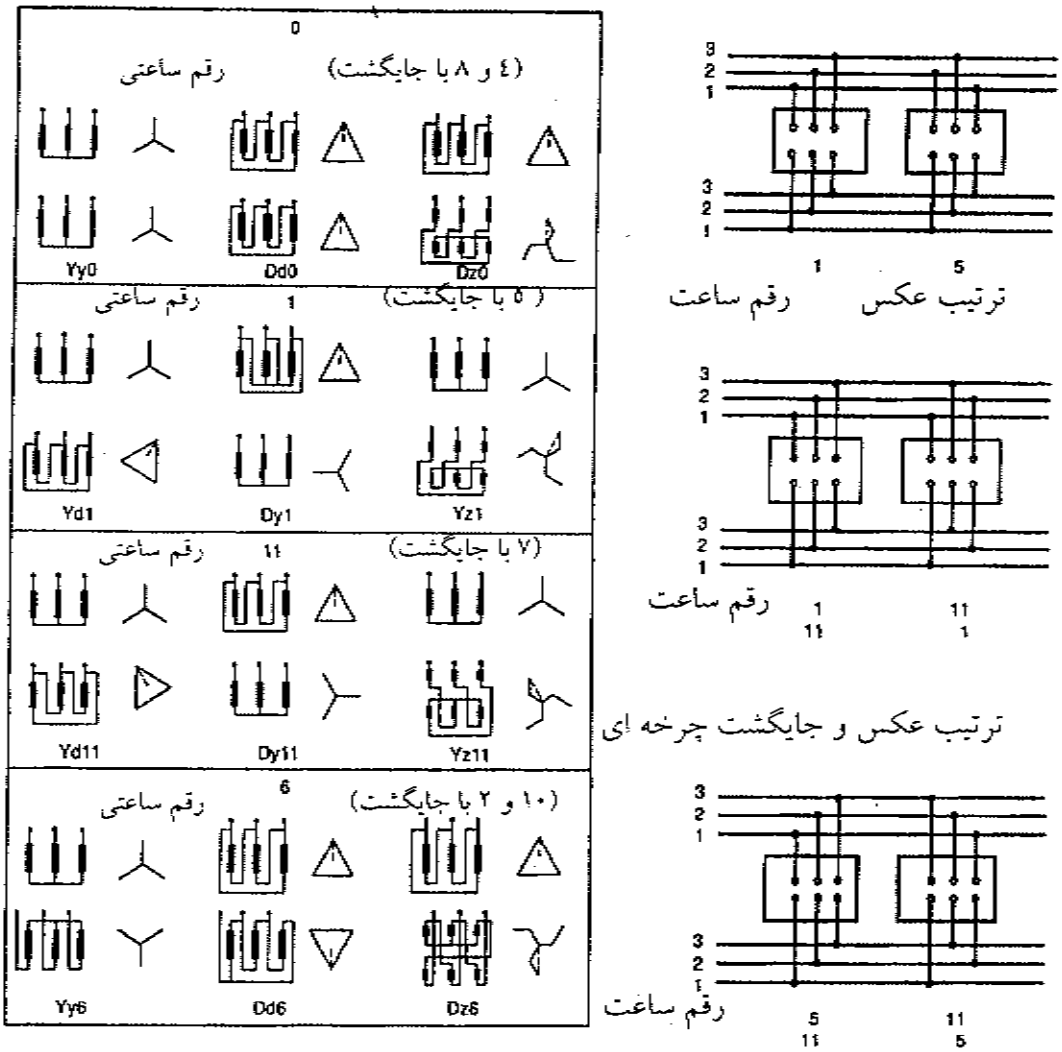
در عمل، ناهمخوانی در بارگیری نسبی نزدیک به ١٠ درصد، در میان دو ترانسفورماتور با طراحیهای نایکسان، منطقی شمرده می شود.

٦-١ انطباق دهی اتصال های سه فاز و روابط زاویه فاز

اتصالهای متداول در ترانسفورماتورهای سه فاز که در شکل ٢١ ارائه شده اند از پیوست (ت) استاندارد ملی شماره ٢٦٢٠ گرفته شده است. در هر بلوک ، یک یا دو رقم ساعتی با روش جابه جایی (جایگشت) آنها نشان داده می شود. برای نمونه : یعنی این که اگر ترمینالهای ثانویه یک ترانسفورماتور دارای ارقام ساعتی ١ باشد به آسانی و با روش جایگشت رقم گذاری می شود. (*II* می شود *I* ، *III* می شود *II* و *I* می شود *III*)، در این صورت تغییر در جابه جایی فازها ١٢٠ درجه الکتریکی می شود یعنی به رقم ٥ ساعت می رسد. در نتیجه، ترانسفورماتورها در ارتباط با ارقام ساعتی با اختلاف ٤ یا ٨ رقم را می توان به طور موازی بست واین کار پس از جایگشت چرخه ای اتصالات به خط در هر دو سوی ترانسفورماتور می تواند انجام گیرد. حتی احتمال ترکیب ترانسفورماتورهای دارای ارقام ساعتی ١ یا ٥ با ترانسفورماتورهای دارای ارقام ساعتی ١١ تا ٧ با عکس نمودن ترتیب فاز در هر دو سوی ترانسفورماتور وجود دارد.

اتصالات موازی *Dyn* و *Yzn* توصیه نمی شوند زیرا ویژگیهای امپدانس ترتیب صفر آنها متفاوت است.

جایگشت چرخه ای



شکل ۲۱ – اتصالات مشترک یک ترانسفورماتور سه فاز و برخی احتمالات در موازی بستن آنها

۲-۷ اختلاف در نسبت تبدیل ، جریان گردان

۳-٦ اگر دو ترانسفورماتور که دارای اختلاف اندکی در نسبت تبدیل هایشان هستند به طور موازی بسته شوند. این ویژگی سبب افزایش امکان جاری شدن یک جریان گردان در میان ترانسفورماتورها خواهد شد. دامنه تقریبی این جریان به روشهای زیرین ارزیابی می شود.

دو ترانسفورماتور (الف) و (ب) با توان اسمی S_a و S_b و امپدانسهای اتصال کوتاه نسبی Z_a و Z_b بدون بار از یک سو به طورموازی برقدار می شوند. اختلاف میان ولتاژ القایی بی باری U_a و U_b در سوی دیگر ترانسفورماتورها به صورت کسر P ولتاژ میانگین بیان می شود، که فرض مـی شود تقریبا برابر با ولتاژ نامی U_r است ؛

$$P = (U_a - U_b) / \frac{U_a + U_b}{2} = \frac{U_a - U_b}{U_r} \qquad (٥٦)$$

ایـن اختـلاف ولتـاژ بـاعث بـه گردش درآوردن یـک جریـان از مسـیر جمسـع امپدانسـهای دو ترانسفورماتور موازی می شود. همان طور که ولتاژ در اصل القایی هستند، جریان گردان نیز القایی است.

جریان گردان I_c ، و توان واکنشی (راکتیو) مربوط به آن Q_c ، به صورت کسری از جریان نـامی I_r و توان اسمی S_r ترانسفورماتورهای مربوط ، تقریبا برابر خواهد بود با :

$$\frac{I_c}{I_{ra}} = \frac{Q_c}{S_{ra}} = \frac{P}{Z_a + \frac{S_{ra}}{S_{rb}} \times Z_b} : \frac{I_c}{I_{rb}} = \frac{Q_c}{S_{rb}} = \frac{(-P)}{Z_b + \frac{S_{rb}}{S_{ra}} \times Z_a} \qquad (٥٧)$$

اگر هر دو ترانسفورماتور دارای توان اسمی یکسان و امپدانس اتصال کوتاه نسبی برابر باشند، ایـن عبارتها به صورت زیر ساده می شوند.

$$\pm \frac{P}{2Z} \qquad (٥٨)$$

مثال :

هرگاه $P = ٠/٠١$ ولتاژ اسـمی ، و $Z = ٠/١$ نسـبت بـه واحـد *(P.U.)* باشـد، جریـان گردان ١/٢٠ جریان اسمی خواهد شد. این جریان القایی بصورت بـرداری بـا جریـان بـار ترکیـب مـی شـود. اختلاف عددی میان جریانهای منتجه در دو ترانسفورماتور مادامیکه ضریب بار به طور نسبی بـالا

باشد، بسیار کوچک خواهد بود. این شرایط در حقیقت از آنچه که پنداشته می شود، دشواری زایی کمتری دارد.

این بررسی تحلیلی حدود اندازه جریان را هنگامی نشان می دهد که کلیدهای تنظیم ولتاژ در دو ترانسفورماتور موازی بسته شده ، طی یک عمل تغییر انشعاب بصورت یک دنباله رو[1] آن، تنظیم شده باشند.

در شرایط معین، انشعاب های تنظیم شده حتی می توانند برای آن که بخش راکتیو جریان گردان ناشی از مقادیر امپدانس اتصال کوتاه متفاوت را جبران کنند، آگاهانه مورد استفاده قرار گیرند. (زیر بندهای زیرین را ببینید).

٦-٤ امپدانس های اتصال کوتاه نابرابر

هرگاه دو ترانسفورماتور دارای امپدانس اتصال کوتاه برابر باشند، بدین معنا است که آنها افت ولتاژ یکسانی را برای بارگذاری نسبت به واحد یکسان نشان می دهند (برابر باجریان بار نسبت به جریان اسمی، یا معادل توان بار نسبت به توان اسمی) . اگر دو ترانسفورماتور موازی بسته شده باشند، بار نسبت به مقادیر توان اسمی نسبی اشان میان آنها تقسیم می شود. هرگاه ترانسفورماتورهایی با مقادیر امپدانس اتصال کوتاه نابرابر به یکدیگر موازی بسته شده باشند. ترانسفورماتور دارای امپدانس کوچکتر نسبت به ترانسفورماتور دارای امپدانس بزرگتر درصد بالاتری از بار را جذب خواهد کرد، بدین ترتیب افت ولتاژ مطلق در هر دو ترانسفورماتور یکسان خواهند بود. این روند می تواند سبب افزایش تقریبی تلف توان ترکیبی در آنها شود ولی بالاتر از آن، می تواند قابلیت بارگیری (بارپذیری) این تاسیسات را محدود سازد.

این ناتعادلی در بارگیری به روال زیرین برآورد می شود:

١- Leader – follower

همان طور که در زیر بند پیشین آمد، اگر دو ترانسفورماتور (الف) و (ب) ، توان نامی S_{ra} و S_{rb} و امپدانسهای نسبی Z_a و Z_b درنظر بگیریم و ترانسفورماتورهای دارای نسبت تبدیل یکسان باشند، بار تقسیم شده برابر است با S.

این دو دستگاه به ترتیب بارهای S_a و S_b را جذب می کند:

$$\frac{S_a}{S_{ra}} = \frac{S}{S_{ra} + \frac{Z_a}{Z_b} \times S_{rb}} : \frac{S_b}{S_{rb}} = \frac{S}{S_{rb} + \frac{Z_b}{Z_a} \times S_{ra}} \qquad (۵۹)$$

مثال :

ترانسفورماتور

الف) $S_{ra} = ۱۰\ MVA$ ، $Z_a = ۱۰\ \%$

ب) $S_{rb} = ۲۰\ MVA$ ، $Z_b = ۱۲\ \%$

بار ترکیبی برابر است با $S = ۲۷\ MVA$ یا ۹۰ درصد جمع ارقام توان نامی ترانسفورماتورهاست.

به هر صورت بارگیری واقعی برابر خواهد بود با :

$$\frac{S_a}{S_{ra}} 1,10; \frac{S_b}{S_{rb}} = 0,84$$

$$S_a = 10 \times 1,01 \approx 10 MVA; S_b = 20 \times 0,84 \approx 17 MVA$$

ترانسفورماتور الف) بصورت کامل باردار شده است ، در حالی که ترانسفورماتور ب) تا ۸٤ درصد توان نامی اش بارگیری شده است.

از دیدگاه نظری قابلیت بارگیری (بارپذیری) این ترکیب در مقایسه با آنچه که امکان داشت انجام شود، حتی اگر بار به طور آرمانی میان آنها تقسیم می شد. نزدیک به ۱۰ درصد کاهش نشان میدهد. با این وجود، این روند هرگاه مساله مربوط به موازی بستن ترانسفورماتورهای موجود باشد، قابل قبول است .مطابق استاندارد ملی شماره۲٦۲۰حدخطای مجاز راکتانس اتصال

کوتاه معین برای یک ترانسفورماتور جدید در انشعاب اصلی آن برابر با ۷/۵ تا ۱۰ درصد مقدار اعلام شده است، در انشعابهای دیگر، این خطای مجاز بالاتر می شود.

اثرگذاری بر تلف بار ترکیبی ناشی از ناهمخوانی میان دو ترانسفورماتور موازی در عمل قابل چشم پوشی است. گاهی احتمال جبران بخشی از اثر مقادیر امپدانس اتصال کوتاه نایکسان ، با کلیدهای تنظیم ولتاژ که آگاهانه تنظیم شده باشند، وجود دارد. با این وجود، این روند جبرانی تنها بر مؤلفه راکتیو (واکنشی) جریان بار مؤثر می افتد و از اینروی تنها هنگامی مؤثر است که ضریب بار نسبتا ناچیز باشد.

۶-۴ تغییر امپدانس اتصال کوتاه در سراسر ردیف انشعابها، اثر آرایش [1] سیم پیچ ها

زیربندهای ۵-۵ استاندارد ملی شماره ... روشهای گوناگون تعیین امپدانس را در یک مناقصه با استعلام برای یک ترانسفورماتور با کلید تنظیم ولتاژ بررسی می نمایند. در یک یادآوری اشاره شده است که مشخصه کامل تغییر امپدانس در سراسر ردیف انشعابها چگونگی آرایه سیم پیچها را در یک روش کاملا باز دارنده دیکته می کند.

خطای مجاز مقادیر امپدانس برای هر انشعاب جداگانه در استانداردملی شماره ۲۶۲۰ بررسی شده است. (بند ۹ و جدول ۱). همچنین یک روش گزینه ای تعیین انشعابها با انجام مرزبندیهایی گرداگرد یک رده مجاز، وجود دارد که می تواند آزادی رفتار بیشتری را در یک حالت عملی اجازه دهد (پیوست پ – استانداردملی شماره ۲۶۲۰ را ببینید).

شکل ۲۲- نمونه ای از الگوی تغییر امپدانس سری در یک ترانسفورماتور دارای یک سیم پیچ انشعاب جداگانه سری با سیم پیچی اصلی فشار قوی را نشان می دهد. سیم پیچ انشعاب می تواند یا در سوی سیم پیچ فشار پایین به عنوان سیم پیچ اصلی جای داده شود. (شکل ۲۲ الف) و یا در سوی دیگر آن (شکل ۲۲ ب.)

۱- *Arrangement*

شکل ۲۲ برای ترانسفورماتور ستونی ایستاده با سیم پیچهای هم مرکز و ترانسفورماتور صدفی شکل با سیم پیچهایی که برروی بازوی محوری خوابیده سوار شده اند، نیز معتبر است. برای نمونه، دو ترانسفورماتور ستونی ایستاده – هسته عمودی شکل – با آرایه سیم پیچ زیرین را با ترانسفورماتورهای دارای ستونهای بدون سیم پیچ بیرونی درنظر می گیریم.

- سیم پیچ های اصلی فشار بالا و فشار پایین – سیم پیچ انشعاب ، شکل ۲۲ (الف) را ببینید.
- سیم پیچ انشعاب – سیم پیچهای اصلی فشار بالا وفشار پایین، شکل ۲۲ (ب) را ببینید.

هر دو آرایش امروزه کاربرددارند و چه بسا سازندگان یکی از این دو روش را به عنوان راه حل توجیحی در رده معینی از ولتاژ و توان نامی ، استاندارد کرده باشند. ولی این دو گزینه دارای تغییر امپدانس متضاد است و گرایش دارند آنرا در سراسر ردیف انشعابها رواج دهند.

تغییر در دورهای فعال سیم پیچ انشعابها سبب تغییر در الگوی شار نشتی وتراوایی یا رخنه پذیری[1] شار نشتی مربوط به آن می شود، این ویژگی ، هرگاه سیم پیچ انشعاب نزدیک به سیم پیچ اصلی فشار بالا باشد (شکل ۲۲ ب)، و هرگاه دورهای تنظیم کننده در جمع با سیم پیچ اصلی زیاد شود، افزایش می یابد و هرگاه دوره های تنظیم کننده در راستای کاهش دورهای سیم پیچ تنظیم جلو برده شود، کاهش می یابد. هرگاه سیم پیچ انشعاب نزدیک به سیم پیچ اصلی فشار بالا نباشد (شکل ۲۲ ب)، اثر تغییر دور بر اثر تراوایی یا رخنه پذیری شار نشتی دقیقا عکس می شود. به علاوه بر آن تغییر تراوایی نشتی برای آرایه شکل ۲۲ (الف) بسیار کوچک است ولی برای آرایه شکل ۲۲ (ب) بسیار مهم می شود. درصد امپدانس اتصال کوتاه (و تغییراتش) تنها تراوایی نشتی (و تغیراتش) را بازتاب می دهد و باید مستقل از جایگاه نصب درنظر گرفته شود، با این فرض که توان اسمی به عنوان یک مرجع ثابت می ماند. همچنین تغییر امپدانس اتصال کوتاه مطلق (به اهم)

---

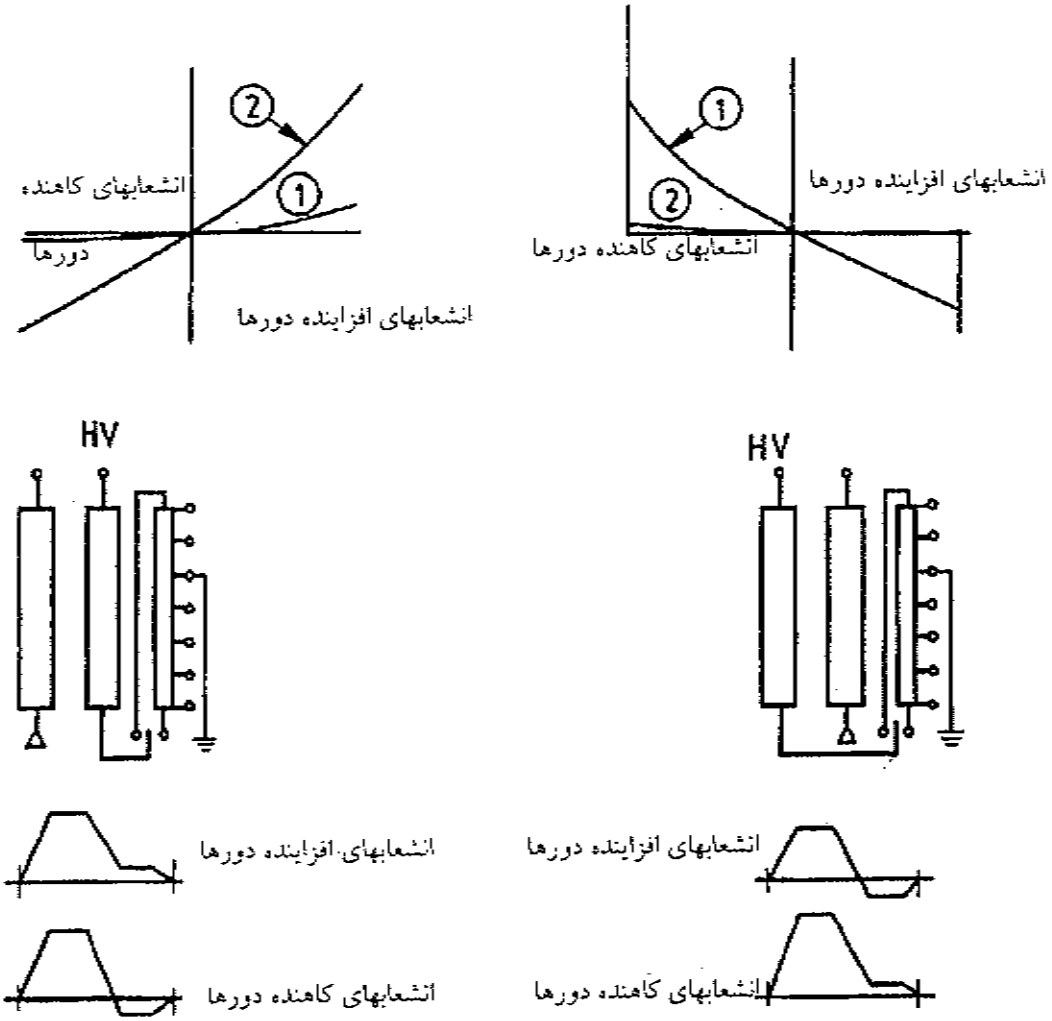
۱ – *Permeance*

دیده شده از سوی سیم پیچ با دور ثابت *(LV)* ، تنها تغییر تراوایی (رخنه پذیـــری) شـار نشـتی را بازتاب می دهد.

نکات بالا در نمودار منحنی های شکـل های ۲۲ (الف) و ۲۲ (ب) نمـایش داده شـده انـد. تغیـیر اندکی در آرایه شکل ۲۲ (الف) و یک تغییر قابل اشاره در آرایه شکل ۲۲ (ب) وجود دارد.

تغییر اتصال کوتاه مطلق (به اهم) دیده شده از سوی سیم پیـچ تغییـر پذیـر *(HV)* ، هـم تغیـیر در رخنه پذیری شار نشتی و هم مقطع دورهای فعال را باز می تاباند، چون این تغییر ناشی از مقـدار مبنای متناسب با مقطع دورهای فعال می باشد. در آرایه شکل ۲۲ (الف) ، تغیـیر مقطـع دورهـای فعال گرایش یکسانی با تغییر در رخنه پذیری شار نشتی دارد و از اینروی تغییر کل روبه افزایـش می گذارد.با آرایه شکل ۲۲ (ب) این روند عکس مـی شـود، تغیـیر دورهـای فعـال دارای گردش وارونی با تغییر در رخنه پذیری شار نشتی دارد و از اینروی تغیـیر کـل روبـه کـم دامنـه ترشـدن می گذارد. این موارد با نمودار های منحنی شکلهای ۲۲ (الف) و ۲۲ (ب) نمایش داده شده اند.

این موارد بسیار با اهمیت اند به ویژه در روند بررسیهای تحلیلی همه جانبه ی یک جریـان عیـب اتصال کوتاه سراسری که بستگی به انشعابهای واقعی ترانسفورماتور دارد.



انشعابهای افزاینده دورها — انشعاب های افزایش دورها

انشعابهای کاهنده دورها — انشعاب های کاهش دورها

① تغییر امپدانس برحسب اهم از سوی سیم پیچ بدون انشعاب (فشار پایین)

② تغییر امپدانس برحسب اهم از سوی سیم پیچ انشعاب دار (فشار بالا)

شکل ۲۲ – تغییر امپدانس در سراسر ردیف انشعابها وابسته به جایگیری سیم پیچ تنظیم ولتاژ

۷ محاسبه افت ولتاژ در یک بار معین ، تلفات بار ترانسفورماتور سه سیم پیچ

۷-۱ معرفی : ضرورت محاسبه افت ولتاژ

تعریفهای *IEC* در باره توان اسمی و ولتاژ اسمی یک ترانسفورماتور اشاره ضمنی دارند که توان اسمی همواره برابر با توان ورودی است و همچنین ولتاژ اعمالی به سرهای ترمینالهای ورودی برای توان اکتیو (کنشی) (ترمینالهای اولیه) در اصل نباید از ولتاژ اسمی فراتر رود برای یادآوری بند ٤-١ استاندارد ملی ایران شماره ۲٦۲۰ رجوع شود). از اینروی بیشترین ولتاژ خروجی در زیر بار برابر است با ولتاژ اسمی (یا ولتاژ انشعاب) منهای افت ولتاژ. توان خروجی در جریان اسمی و ولتاژ ورودی اسمی، در اصل برابر است با توان اسمی منهای توان مصرفی در ترانسفورماتور (تلف توان اکتیو و توان راکتیو).

در آمریکای شمال، مقادیر اسمی *MVA* برپایه حفظ ولتاژ اسمیس ثانویه با اثرگذاری بر سیم پیچ اولیه تعیین می شود و بدین روال افت ولتاژ در دو سوی ترانسفورماتور در جریان اسمی ثانویه و در یک ضریب بار پس فاز ٪ ۸۰ یا بیشتر جبران می شود.

با بهره گیری از این روش، اختلاف عملی در محاسبه افت ولتاژ بسیار جزیی می شود، معادله (٦۷) این مغایرت را نشان می دهد.

تعیین ولتاژ اسمی یا ولتاژ انشعاب نظیر آن برای مواجه شدن با یک ولتاژ خروجی معین در یک بار معین ضروری است، از اینروی این کار درگیر محاسبات افت ولتاژ می شود. با استفاده از ارقام شناخته شده یا برآورد شده ، امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور برآورد می شود. این زیربند شامل مباحثی است که با تعاریف *IEC* در باب تعیین مقادیر نامی و تلفات ترانسفورماتور مطابقت دارد .

۲-۷ امپدانس اتصال کوتاه و نمودار معادل یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه

افت ولتاژ یک ترانسفورماتور به صورت عددی، اختلاف میان ولتاژ یک سیم پیچ به هنگام بی باری با ولتاژ در سرهای بیرونی آن (ترمینالها) در یک بار معین تعیین می شود. بند ۳-۷-۲ استانداردهای ملی ایران به شماره های ۲۶۲۰و ...[۱]تعریف ۰۳-۰۷ را ببینید. به جز در موارد بیان شده، ولتاژ دوسر سیم پیچ دیگر (اولیه) به عنوان ولتاژ اسمی (یا ولتاژ انشعاب، همان طور که در یک حالت ممکن است باشد) درنظر گرفته می شود.

مدار معادل قراردادی یک ترانسفورماتور، دربردارنده یک امپدانس سری خطی (برای یک ترانسفورماتورچند سیم پیچه، یک شبکه امپدانس) است که افت ولتاژ در دوسر آن ظاهر می شود. امپدانس سری بوسیله امپدانس اتصال کوتاه شناخته می شود، این امپدانس طی آزمون جاری[۲]ترانسفورماتور اندازه گیری می شود. روند اندازه گیری اتصال کوتاه و تلف بار را در بند ۱۰-٤ استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ ببینید. افت ولتاژ مستقل از ولتاژ واقعی است، به طوری که از جریان آهن ربا کننده وابسته به ولتاژ در محاسبات افت ولتاژ چشم پوشی می شود.

این آزمون اجازه می دهد که امپدانس سری با یک مقاومت که نشانگر تلف بار است و یک راکتانس به طور جدا از هم نشان داده شود.

$$Z = R + jX$$

به طور قراردادی، امپدانس به شکل نسبی بیان می شود، چنانکه تنها کسری از امپدانس مبنای Z_{ref} ترانسفورماتور می باشد و به صورت درصد بیان می شود. این امپدانس نسبی به روال زیر نوشته می شود.

$$Z = 100\frac{Z}{|Z_{ref}|} \quad \text{به طوریکه} \quad Z = r + jx$$

و Z_{ref} به نوبه خود برابر است با

$$Z_{ref} = \frac{U_{ref}^2}{S_{ref}}$$

۱-تا تدوین استاندارد ملی به IEC60050رجوع شود.

۲- *Routine tests*

U_{ref} برابر است با ولتاژ سیم پیچ که Z و Z_{ref} به آن نسبت داده می شود (مگر در مواردی که چیز دیگری معین شده باشد. این ولتاژ همان ولتاژ اسمی سیم پیچ است ولی ، اگر یک انشعاب ویژه دیگری به جز انشعاب اصلی به آن نسبت داده شده باشد،ولتاژ مبنا می تواند به جای ولتاژ انشعاب گرفته شود). S_{ref} برابر است با مقدار مبنای توان برای هر دو سیم پیچ درگیر. این توان معمولا توان اسمی یکی از زوج سیم پیچها می باشد که همواره باید توجه داشت که از درک نادرست آن پرهیز گردد.

در یک ترانسفورماتور سه فاز ، Z و Z_{ref} امپدانسهای نسبت به فازند (معادل اتصال ستاره) : استاندارد ملی ایران به شماره ۲۶۲۰ را ببینید. برطبق استاندارد ملی شماره ... مقدار درصدی یا نسبی امپدانس از پیش یک و یکسان فرض می شود، بدون توجه به اینکه کدام یک از دو سیم پیچ درگیر، برقدار می شود و کدامیک در زیر آزمون اتصال کوتاه قرار می گیرد.

۳-۷ تشریح بار ترانسفورماتور

بار ترانسفورماتور به عنوان یک توان ظاهری با مقدار اختیاری S (بار یک ترانسفورماتور با توان اسمی آن شناخته نمی شود)، و زاویه فاز ϕ ، و یا مقادیر جداگانه بار اکتیو (کنشی) و راکتیو (واکنشی) P و Q ،بیان می شود. همراه این داده ها، ولتاژ ترمینال U_2 ، در سوی ثانویه ترانسفورماتور که انرژی تحویل داده می شود، نیز ارائه می گردد.

نوشتن روابط با روشهای شناخته شده برای اعداد مختلط ، به شکل قطبی (مقدار مطلق S / و شناسه یا نماد LS یا ϕ) و یا با مقادیر حقیقی و موهومی P و JQ به روال زیر دنبال می شود :

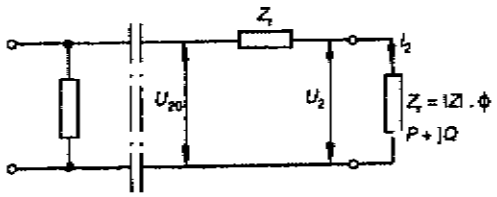
$$S = |S| \phi = P + jQ = |S|(\cos\phi + j \sin\phi) \qquad (۶۰)$$

این بار می تواند بعنوان یک امپدانس بار Z_L (اهم در هر فاز) به روال زیر نیز نوشته شود :

$$Z_L = \left|\frac{U_2^2}{S}\right|(\cos\phi + j\sin\phi) \qquad (۶۱)$$

همچنین بار می تواند به صورت یک جریان بار I_2 همراه با زاویه فاز ϕ بار نیز توصیف شود : (زاویه فاز میان ولتاژ U_2 و جریان I_2 در ترمینال است).

$$L u_2 = L i_2 + \phi \qquad (٦٢)$$



شکل ۲۳- نمودار تک خطی معادل – ترانسفورماتور با امپدانس سری Z_T بار گذاری شده توسط امپدانس Z_L

در این نمودار تک خطی که نمایانگر ، یک بارگیری متقارن سه فاز می باشد، U_{20} و U_2 باید با $\frac{U_2}{\sqrt{3}}, \frac{U_{20}}{\sqrt{3}}$(برای اتصال ستاره معادل) جایگزین شوند. هرچند، این کار تغییری را در مطالب زیرین ایجاد نمی کند.

۴-۷ معادله های افت ولتاژ

ترانسفورماتور در بی باری دارای ولتاژ ثانویه U_{20} است. هنگامی که بار به آن وصل می شود، ولتاژ در سرهای بیرونی (ترمینال ها) ثانویه تا میزان U_2 تغییر می کند.

با به کارگیری نمادهای امپدانسی ، رابطه میان U_2 , U_{20} چنین خواهد شد (شکل ۲۳ را ببینید).

$$\frac{U_2}{U_{20}} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_T} \qquad (٦٣)$$

افت ولتاژ به صورت یک اختلاف عددی به روال زیر تعریف می شود:

$$\Delta U_2 = |U_{20}| - |U_2| \qquad (٦٤)$$

با توجه به معادله (٦٣) خواهیم داشت:

$$\Delta U_2 = |U_{2-}| \times \left(\left| \frac{Z_L + Z_T}{Z_L} \right| - 1 \right); \Delta U_2 = |U_{20}| \times \left(1 - \left| \frac{Z_L}{Z_L + Z_T} \right| \right) \qquad (٦٥)$$

با جای دادن مؤلفه های امپدانس ترانسفورماتور در عبارت امپدانس بار برطبق معادله (٦١):

$$\left(\frac{Z_L + Z_T}{Z_L} \right) = \left(1 + \frac{Z_T}{Z_L} \right) = \left(1 + \left| \frac{S}{U_2^2} \right| (R_T + jX_T)(\cos\phi - j\sin\phi) \right)$$

$$= \left(1 + \left| \frac{S}{U_2^2} \right| (X_T \sin\phi + R_T \cos\phi) + j \left| \frac{S}{U_2^2} \right| (X_T \cos\phi - R_T \sin\phi) \right) = (1 + A + jB) \qquad (٦٦)$$

مقادیر قدر مطلق های مدولی عبارت بالا و عکس آنها چنین هستند:

$$\left.\begin{aligned} ((1+A)^2 + B^2)^{\frac{1}{2}} &= 1 + A + \frac{B^2}{2} + \ldots\ldots \\ ((1+A)^2 + B^2)^{-\frac{1}{2}} &= 1 - A + A^2 - \frac{B^2}{2} + \ldots\ldots \end{aligned}\right\} \qquad (٦٧)$$

از اینروی افت ولتاژ برابر خواهد شد با:[٢]

$$\Delta U_2 = |U_2| \left(A + \frac{B^2}{2} + \ldots\ldots \right); \Delta U_2 = |U_{20}| \left(A - A^2 + \frac{B^2}{2} + \ldots\ldots \right) \qquad (٦٨)$$

این افت ولتاژ برابراست با محاسبه اختلاف ازروی نخستین ارقام ترتیبی وعبارتهای درون کمانه ها به نوبه خود با محاسبه اختلاف از روی دومین ارقام ترتیبی به دست آمده الدو بسته به آنکه

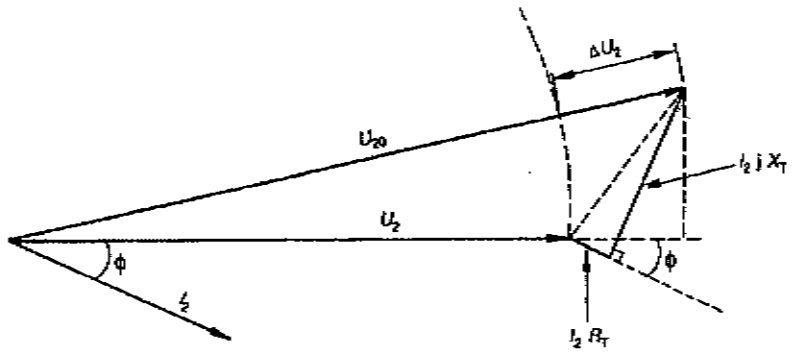
١- توجه : مقادیر قدر مطلق عددهای مختلط هستند که از جمع مربعهای هر پاره این اعداد و جذرگیری مثبت از ریشه دوم جمع آنها به دست میآیند .)

آیا محاسبه برپایه ولتاژ ترمینال U_2 است و یا ولتاژ بی باری معادل U_{20} انجام گرفته است.

این عملیات معمولا" قابل صرفنظر شدن هستند(مثال عددی در زیر بند جاری را ببینید.)

نخستین جمله ، A ، در این بسط (سری) در یک تحلیل هندسی به عنوان تصویر بردار فازی افت ولتاژ I_2Z_T بر روی بردار فازی U_2 می باشد. (شکل ۲٤ را ببینید).

افت ولتاژ عددی ΔU_2 ، به روالی که تعریف شده است، معمولا به طور قابل ملاحظه ای کمتر از مقدار مطلق $/I_2Z_T/$ یا افت ولتاژ برداری ، I_2Z_T است و همچنین نمایانگر اختلاف زاویه فاز میان U_{20} و U_2 می باشد. مقدار مطلق افت ولتاژ برداری مستقل از زاویه فاز بار $\emptyset$ است.



شکل ۲۴- نمودار فازی نمایش دهنده افت ولتاژ برداری و افت ولتاژ عددی

برای همه ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ، قسمت راکتیو امپدانس سری بسیار بزرگتر از تست مقاومت است. X_2 نوعا برابر است با ٥٪ تا ۲۰٪ و R_T کمتر از ۱٪ می باشد.

اگر زاویه فاز منفی باشد (بارگیری خازنی یا بخشی از بارگیری خازنی باشد)، افت ولتاژ می تواند منفی شود. سپس ولتاژ ثانویه هنگامی که این بار وصل می شود به فراتر از مقدار آن در بی باری می رسد.

۵-۷ محاسبه افت ولتاژ به روال درصد نویسی

امپدانس ترانسفورماتور با درصد بیان می شود ومقدار آن برپایه مقادیر اسمی توان وولتاژ Sr و Ur می باشد(بند ٦-٢ را ببینید).

$$z_r = r_r + jx_r = \frac{Z_T}{Z_r} \times 100 = \frac{S_r}{U_r^2} \times Z_r \times 100$$

با این فرض که ولتاژ مبنای U_2 (ولتاژ اسمی یا ولتاژ انشعاب) حداقل تقریباً برابر بـا ولتـاژ ثانویـه واقعی U_2 است.

پس نسبت تبدیل ولتاژ با معادله (٦٥) بیان می شود و می توان آن را چنین بازنویسی نمود :

$$\left(\frac{Z_L + Z_T}{Z_L}\right) = \left(1 + \left|\frac{S}{S_r}\right|\left(\frac{x_T}{100}\sin\phi + \frac{r_T}{100}\cos\phi\right) + j\left|\frac{S}{S_r}\right|\left(\frac{x_T}{100}\cos\phi + \frac{r_T}{100}\sin\phi\right)\right) \qquad (٦٩)$$

نسبت تبدیل S/S_r برابر با نسبت بارگیری واقعی در توان اسـمی اسـت و همچنیـن ایـن نسـبت تبدیل برابر با نسبت تبدیل واقعی جریان بار در جریان اسمی است.

مثال عددی ویژه زیرین، مقادیر نسبی جمله های مختلف را نشان می دهد.

مثال :

۵۰ درصد بارگیری یعنی S/S_r = ۰/۵ ، X = ۱۵٪ ، r = ۰/۷٪ ، $COS\,\phi$ = ۱۸ القایی.

اگر $COS\phi$ = ۰/۸ و $Sin\,\phi$ = ۰/٦ باشد، عبارت نسبت تبدیل ولتاژ به شرح زیر می باشد.

۱+۰/۵۰ (۰/۱۵×۰/٦+۰/۰۰۷×۰/۸)÷ J ۰/۵۰ (۰/۱۵×۰/۸-۰/۰۰۷×۰/٦)

=۱+۰/۰٤۸+ j۰/۰۵۸

افت ولتاژ درصدی چنین می شود:

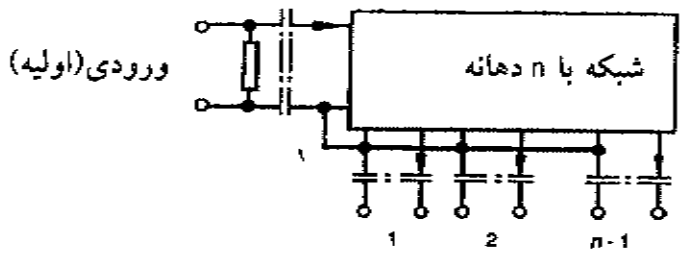
$$\frac{U_{20}}{U_2} - 1 = (|1/048 + j0/058| - 1) = 0/050 \text{ یا } 5\%$$

مشاهده می شود که تقریب نخستین افت ولتاژ با درنظر گرفتن جمله A به تنهایی، ٤/٨٪ را در مقابل ٥٪ را به دست می دهد، تقریبی که برای مقاصد عملی رضایت بخش است و مناسبتر از دقت جامعی است که در اندازه گیریها در هنگام بهره برداری انجام می گیرد.

۷-۶ نمودار معادل ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه ، جزء های امپدانس معادل Y شکل در یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه

نمودار تک خطی معادل یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه که با تعریفها و آزمونهای استاندارد ملی شماره .... سازگاری دارد. در شکل ۲۳ نشان داده شده است، در یک نمودار بسط یافته همانند با یک ترانسفورماتور چند سیم پیچه در شکل ۲۵ نشان داده می شود. این شکل زوج ترمینالهای اولیه را که از آنها توان اکتیو (کنشی) به ترانسفورماتور و مجموعه ای از ترمینالهای سیم پیچهای خروجی، ثانویه و ثالثیه ....وارد میشود را نشان می دهد. این نمودار در بردارنده جزء عکس مقاومت ظاهری[1] آهن ربایی جای گرفته در ترمینالهای ورودی است. ترانسفورماتورهای آرمانی نسبت تبدیل دورهای بی بار در میان سیم پیچهای مختلف را باز می نماید که به یک شبکه خطی از امپدانسهای سری اتصال دارند که در یک ترانسفورماتور n سیم پیچه دربردارنده $\frac{n(n-1)}{2}$ جزء مستقل می باشد.

۱- Admittance

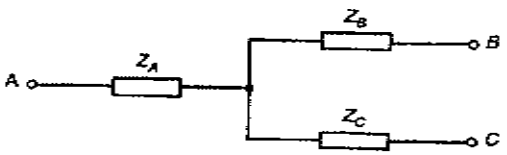


سیم پیچهای خروجی

شکل ۲۵- نمودارتک خطی معادل ترانسفورماتور چند سیم پیچه

این نمودار معادل با مجموعه ای از معادلات افت ولتاژ خطی منطبق است. برای نمونه جزءهای امپدانسی جداگانه، در اصل می توانند از مجموعه از اندازه گیریهای مستقل امپدانسهای اتصال کوتاه برای همه ترکیبهای دو سیم پیچه ، ارزیابی شوند.

در ترانسفورماتور سه سیم پیچه، امپدانس سری شبکه دارای سه جزء است. از تئوری مداری دریافته می شود که چگونه یک پیکربندی سه گانه (مثلثی) از این امپدانسهای سه تایی همواره می توانند به یک اتصال ستاره تبدیل شوند و برعکس . این ترکیب T شکل برای تحلیل های سیستم مناسب است مثلا" برای محاسبه پخش توان در سیم پیچی ترانسفورماتور سه فاز مناسب است این سه جزءTشکل از پارامترهای (فراسنجهای) ترکیبهای دو سیم پیچه که در شکل ۲۶ نشان داده می شود، ارزیابی می گردد.



$$Z_A = \frac{Z_{A,B} - Z_{B,C} + Z_{C,A}}{2}$$

$$Z_B = \frac{Z_{B,C} - Z_{C,A} + Z_{A,B}}{2}$$

$$Z_C = \frac{Z_{C,A} - Z_{A,B} + Z_{B,C}}{2}$$

$$Z_{A,B} = Z_A + Z_B$$
$$Z_{B,C} = Z_B + Z_C$$
$$Z_{C,A} = Z_C + Z_A$$

شکل ۲۶- امپدانسهای ترانسفورماتور سه سیم پیچه

این اجزای ستاره ای ترکیبهای جبری کمیت های فیزیکی هستند. احتمال دارد (محال نیست) که یکی از اجزا بتواند با راکتانس منفی پدیدار شود. به طور خاص این حالت در ارتباط با آن است که یک سیم پیچ به طور فیزیکی در میان دو سیم پیچ دیگر جای داده شود.

جداسازی مقاومتها به صورت جزء های ستاره ای اشاره ضمنی دارد که تلفات بار اندازه گیری شده برای ترکیبهای مختلف دو سیم پیچه به سیم پیچهای جداگانه اختصاص دارد. این رویه به طور قراردادی پذیرفتنی است، ولی دو ترانسفورماتورهای بزرگ جایی که تلفات جریان گردابی در سیم پیچها و تلفات شار سرگردان در بخشهای دیگر به طور چشمگیری از اهمیت برخوردار می شود. در وقت اندازه گیری ابهام پدید می آید. این مؤلفه های تلفات به راحتی در غالب روابط خطی اشاره شده نمی گنجند.

۷-۷ اختصاص تلفات بار به سیم پیچهای جداگانه در ترانسفورماتورهای سه فاز

۷-۷-۱ حالت کلی

در زیربند پیشین گفته شد که چگونه امپدانسهای سری در ترانسفورماتور سه فاز دارای ترکیبهای دو سیم پیچه، اندازه گیری می شوند و سپس به هر یک از سه سیم پیچهای جداگانه یک تبدیل خطی اختصاص می یابند تا یک پیکربندی ستاره را شکل دهند. باید یادآوری کرد که این تنها یک ترفند ریاضی است. از دیدگاه فیزیکی هرگز چنین موردی به عنوان امپدانس سری یک سیم پیچ جداگانه وجود ندارد،چون این امپدانسها تنها در میان سیم پیچها وجود دارند.

رویه مربوط به تلف بار ترانسفورماتور سه سیم پیچه برای ترکیب بارگیری معین اعمال می شود. در این متن به سیم پیچها با حرف H (فشار بالا) ، X (فشار متوسط یا میانی)، T (فشار پایین سیم پیچی سوم) اشاره می شود. شکلهای تلف بار با یکدیگر و با امپدانس سری برای سه احتمال ترکیب بندیهای دو سیم پیچه تعیین می شوند.

$P_{HX}; P_{HT}; P_{XT}$

این اندازه گیریها می تواند با جریانهای در سیم پیچها درنظر گرفته شده باشند که مربوط به مقادیر مختلف توان مبنا باشند، زیرا سیم پیچ سوم معمولا دارای یک مقدار مشخص شده کمتر از توان اسمی است، برای تبدیل زیرین مناسب خواهد بود که مقادیر اندازه گیری ها به یک پایه عمومی از توان مبنا، S'، متناسب با توان دوم جریان آورده شود.

$P'_{HX}; P'_{HT}; P'_{XT}$

جریانهای مبنا در سیم پیچهای مربوطه برابرند با:

$I'_H; I'_X; I'_T$

تلفات به سیم پیچهای جداگانه با تبدیل های زیرین اختصاص می یابد.

$$\left.\begin{aligned} P'_H &= \frac{1}{2}(P'_{HX} + P'_{HT} - P'_{XT}) \\ P'_X &= \frac{1}{2}(P'_{HX} - P'_{HT} + P'_{XT}) \\ P'_T &= \frac{1}{2}(-P'_{HX} + P'_{HT} + P'_{XT}) \end{aligned}\right\} \qquad (۷۰)$$

برای یک ترکیب بار فرضی، با جریانهای واقعی در سیم پیچها برابر با I_T ، I_X ، I_H ، تلفات منتجه در هر سیم پیچ دوباره متناسب است با مربع جریان (یا توان) به دست آمده از ارقام مبنای بالا،تلف بار منتجه(Pk) برای کل ترانسفورماتور برابر است با جمع ارقام تلف اختصاصی سیم پیچ تک.

$$P_K = \left(\frac{I_H}{I'_H}\right)^2 \times P'_H + \left(\frac{I_H}{I'_X}\right)^2 \times P'_X + \left(\frac{I_T}{I'_T}\right)^2 \times P'_T \qquad (۷۱)$$

برحسب توان ظاهری در سیم پیچها چنین نوشته می شود:

$$P_K = \left(\frac{S_H}{S'}\right)^2 \times P'_H + \left(\frac{S_X}{S'}\right)^2 \times P'_X + \left(\frac{S_T}{S'}\right)^2 \times P'_T \qquad (۷۲)$$

یادآوری می شود که در رابطه بالا ارقام برحسب جریان واقعی و ولتاژ بی بـاری مرتبـط بـا سـیم پیچهای با بار خروجی است نه ولتاژهای واقعی در ترمینالها که با آن افت ولتاژ ترانسـفورماتور را محاسبه می کنند.

الگوریتم برای محاسبه ترکیب تلفات سه سیم پیچ، برای ترانسفورماتورهای تکفاز و سه فاز معتـبر است و نه فقط برای ترانسفورماتورها ی با سیم پیچ جداگانه ، بلکه نیز برای یـک ترانسـفورماتور سه سیم پیچه ، در جایی که دو سیم پیچ با اتصال اتو متصل است.

۲-۷-۷ حالت سیم پیچ با اتصال اتو

اختصاص تلفات بار به سیم پیچهای جداگانه فیزیکی، برای محاسبه تقریبی افزایش درجه حرارت سیم پیچهای جداگانه تحت یک مجموعه بار مشخص، برای یک سیم پیچ اتو بسیار پیچیده است. این امر از این رو است که سیم پیچهای فیزیکی با جفت اتصال سـیم پیـچ اتـو بـا سـیم پیچـهای استاندارد ، یکسان نیست. بایستی سری هـای سـیم پیـچ S و سـیم پیـچ مشـترک C ،بخشـهای جداگانه از دیدگاه فیزیکی جفت سیم پیچی اتورا به جای سیم پیچهای فشار قوی و فشار متوسـط مد نظر قرار داد..

تعریف ضریب کاهش اتصال اتو مجددا به خاطر آورده می شود (به بند ۳-۱ و ۳-۲ رجوع شود).

$$\alpha = \frac{U_H - U_X}{U_H} = \frac{I_X - I_H}{I_X}$$

این نسبت میان توان ظاهری سیم پیچهای فـیزیکی S یـا C و مقـدار تـوان میـان سـیم پیچـهای رسمی[۱] H و X است.

با توجه به حالت دو سیم پیچه، هرگاه توان مرجع S' میـان سـیم پیچـهای H و X منتقـل شـده است. سیم پیچه سری دارای ولتاژ $U_H - U_X = \alpha U_H$ مادامی که جریانش I'_H است.

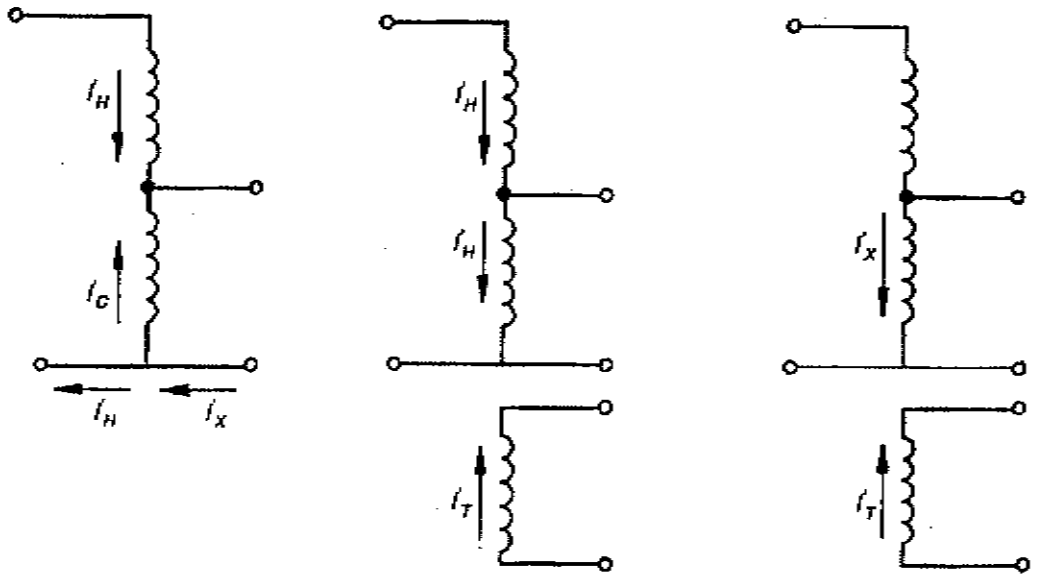
۱- Formal winding

ولتاژ دو سر سیم پیچ معمولی U_X است و جریان مرجعش برابر است با:

$$I'_C = I'_X - I'_H = \alpha I'_X$$

توان مرجع معادل برای سیم پیچهای فیزیکی با اتصال اتو ' S نیست، بلکه ' αS .است.

مجموعه تلفات هر سه گروه سیم پیچ دوتایی که تمامی آنها نسبت به مقدار مرجع توان ' S میباشنددر شکل ۲۷ نشان داده شده است. جریان واقعی در سیم پیچ C در هر سه حالت متفاوت



X,T	H,T	H,X
$I_C = I'_X = \frac{1}{\alpha} I'_C$	$I_C = I'_H = (1-\alpha) I'_X = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) I'_C$	$I_C = I'_C = \alpha I'_X$

است.

شکل ۲۷- سه ترکیب آزمون دو سیم پیچه با رجوع به توان ' S

از موارد بالا روشن است که تلفات دو سیم پیچه ممکن است توسط به سیم پیچهای مربوط اختصاص داده شده باشند.

$$\left.\begin{aligned} P'_{HX} &= P'_S + P'_C \\ P'_{HT} &= P'_S + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)^2 P'_C + P'_T \\ P'_{XT} &= \left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 P'_C + P'_T \end{aligned}\right\} \qquad (۷۳)$$

برگردان رابطه های بالا برابر است با

$$\left.\begin{aligned} P'_S &= \frac{1}{2}(2-\alpha)P'_{HX} + \alpha P'_{HT} - \alpha P'_{XT}) \\ P'_C &= \frac{1}{2}(\alpha P'_{HX} - \alpha P'_{HT} + \alpha P'_{XT}) \\ P'_T &= \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{\alpha}P'_{HX} + \frac{1}{\alpha}P'_{HT} + \frac{2\alpha-1}{\alpha}P'_{XT}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (۷۴)$$

سپس تلفات بار برای هر سیم پیچ در طی یک حالت بار مشخص، توسط جریانهای I_H ، I_X ، I_T به شرح زیر نوشته می شود:

$$P_S = P'_S = \left(\frac{I_H}{I'_H}\right)^2 ; P_C = P'_C = \left(\frac{I_C}{I'_C}\right)^2 ; P_T = P'_T = \left(\frac{I_T}{I'_T}\right)^2 ; \qquad (۷۵)$$

برای ارزیابی تلفات در سیم پیچ معمولی، محاسبه جریان در آن سیم پیچ ضروری است:

$$|I_C| = |\bar{I}_X - \bar{I}_H|$$

I_X ، I_H معمولا در طی یک حالت بارگذاری سه فاز با یک بار مستقل روی سیم پیچ سوم همفاز نیستند.

لیکن حالت بارگذاری معمولاً بعنوان مقدار توان ضاهری روی ترمینالهای سیم پیچ H وX وT شرح داده شده است.

عبارت های زیر به کار می روند :

$$P_S = P_S'\left(\frac{S_H}{S'}\right)^2; P_C = P_C'\left(\frac{S_C}{\alpha S'}\right)^2; P_T = P_T'\left(\frac{S_T}{S'}\right)^2; \qquad (۷۶)$$

به هر حال در اینجا نیاز به بیان S_C در حالت کلی داریم. در معادلات زیر، مقادیر جریان و توان برداری هستند، در حالیکه تعداد دورها یا معادل ولتاژهای بی باری، ثابت های مقیاسی هستند.

مجموع توان برابر صفر است : $\bar{S}_H + \bar{S}_X + \bar{S}_T = 0$ (۷۷)

به کارگیری معادل ولتاژهای بی بار :

$$\bar{I}_H U_H + \bar{I}_X U_X + \bar{I}_T U_T = 0 \qquad (۷۸)$$

همچنین تعادل آمپر دور برقرار است:

$$\bar{I}_H n_S + \bar{I}_C n_C + \bar{I}_T n_T = 0 \qquad (۷۹)$$

لیکن تعداد دورها نسبت به ولتاژهای اسمی یا ولتاژهای انشعاب، متناسب است.

از این رو :

$$\bar{I}_H (U_H - U_X) + \bar{I}_C U_X + \bar{I}_T U_T = 0; U_H - U_X = \alpha U_H \qquad (۸۰)$$

شکل ۲۸- نمودارهای فازی برای توان در ترمینالهای مربوطه و در سیم پیچهای فیزیکی

به کارگیری فرضیه کسینوس برای مثلث ها :

$$(I_X U_X)^2 = (I_H U_H)^2 + (I_T U_T)^2 - 2 I_H U_H I_T U_T \cos\phi \qquad (۸۱)$$
$$(I_C U_X)^2 = \alpha^2 (I_H U_H)^2 + (I_T U_T)^2 - 2\alpha I_H U_H I_T U_T \cos\phi$$

با حذف تابع زاویه میان معادله ها :

$$S_c^2 = (1- \alpha)\,(S_T^2 - \alpha S_H^2) + \alpha S_X^2 \qquad (۸۳)$$

این ارتباط فقط شامل مقادیر مطلق توانها است. نسبت های فاز به طور تلویحی در عبارت نتیجه گیری شده است.

بنابراین تلفات اختصاصی در سیم پیچ C به شرح زیر است:

$$P_C = P'_C \frac{(1-\alpha)(S_T^2 - \alpha S_H^2) + \alpha S_X^2}{\alpha^2 (S)^2} \qquad (۸۳)$$

اگر $|S_T|^2 + |S_X|^2 = |S_H|^2$ باشد، عبارت بالا بصورت زیر ساده می شود:

$$P_C = P'_C \left(\frac{S_H - \frac{1}{\alpha} S_T}{S'} \right) \qquad (۸٤)$$

۷- ۸نمونه های محاسبه افت ولتاژ و تلفات بار برای یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه

این مثال، گام به گام نشان می دهد که چه محاسباتی را ممکن است در یک راه ساده و با تقریب های مناسب، انجام داد.

حالت بار برای یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه ، با سیم پیچ جداگانه، دارای توان نامی زیر برای سه سیم پیچ را بررسی نمائید :

- سیم پیچ طرف اولیه	*(I)*	۸۰ مگا ولت آمپر
- سیم پیچ طرف ثانویه	*(II)*	۸۰ مگا ولت آمپر
- سیم پیچ سوم	*(III)*	۱۵ مگاولت آمپر

این ترانسفورماتور بشرح زیر بارگذاری شده است.

ولتاژ ورودی به سیم پیچ اولیه، به فرض اینکه برابر با ولتاژ اسمی آن سیم پیچ است. سیم پیچ ثانویه ۷۵ مگاولت آمپر با ضریب توانی برابر ۰/۸ تحویل می دهد. سیم پیچ سوم با یک مجموعه

خازن ثابت ، بارگذاری می شود که توان نامی آن ۱۵ مگاولت آمپر در ولتاژی برابر با ولتاژ اسمی سیم پیچ سوم است.

محاسبه افت ولتاژ توسط ترانسفورماتور برحسب پیدا کردن ولتاژهای خروجی روی ترمینالهای *(I)* و *(III)* مورد نیاز است. چون در هنگام تنظیم مسئله جریانهای بار داده نشده است، در اینجا بایستی محاسبه شود.

بار روی سیم پیچ ثانویه، بدون ارجاع به ولتاژ بهره برداری واقعی ، مشخص شده است. از این رو، جریان بار و در نتیجه افت ولتاژ باید فرض شود که به طور معکوس متناسب با ولتاژ ترمینال است.

از سوی دیگر، بار سیم پیچ سوم، فرض بر این است که به یک مجموعه خازن با امپدانس ثابت متصل است. برای این بار، افزایش جریان نسبت به ولتاژ ترمینال و توان راکتیو تولید شده توسط مجموعه خازنی ، با مجذور ولتاژ افزایش می یابد.

گزارش آزمون ترانسفورماتور، حاوی مقادیر زیر از درصد امپدانس های اتصال کوتاه دو سیم پیچه است و همگی مربوط به ۸۰ مگاولت آمپر و تلفات بار مربوط به مقادیر گوناگون اسمی است. جدول شماره ۲ بر این ارقام تلفات را برحسب درصد برپایه معمولی ۸۰ مگاولت آمپر بیان کرده است.

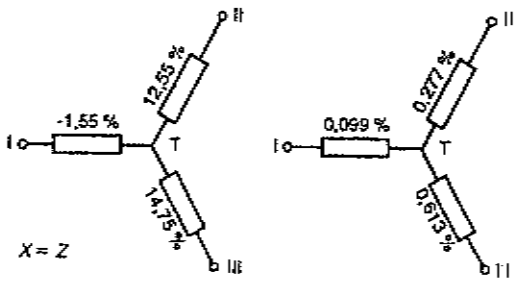
جدول شماره ۲- مشخصات برای محاسبه

ترکیب	امپدانس ٪	تلفات بار مرجع [۱]	تلفات بار/۸۰ مگاولت آمپر ٪
(I) و *(II)*	۱۱/۰	۳۰۰ کیلوولت / ۸۰ مگاولت آمپر	۰/۳۷۵
(I) و *(III)*	۱۳/۲	۲۰ کیلوولت / ۱۵ مگاولت آمپر	۰/۷۱۱
(II) و *(III)*	۲۷/۳	۲۵کیلوولت / ۱۵ مگاولت آمپر	۰/۸۸۹

پارامترهای دو سیم پیچه، به شکل معادل ستاره، تبدیل شده است. مقادیر برای مجموع امپدانس اتصال کوتاه و برای مقاومت تلفات به طور جداگانه، در شکل ۲۹ نوشته شده است.

به یاد داشته باشید، به هر حال این امر یک نمایش کاملا ریاضی از ترانسفورماتور بعنوان یک جعبه سیاه [۱] میباشد.

این امر بازتاب رفتار ترانسفورماتور به عنوان قابل اندازه گیری روی ترمینال هایش است، لیکن الگوی یک شرح فیزیکی واحد برحسب سیم پیچهای گوناگونش و غیره نیست. اتصال T فرضی است. یکی از المنت های مقاومت ظاهری ، منفی در می آیند (که در واقع نشان می دهد که سیم پیچ به ترمینال *(I)* میان آن دو دیگر سیم پیچ در ترانسفورماتور متصل شده است).



شکل ۲۹- امپدانس های اتصال کوتاه معادل ستاره و مؤلفه های تلفات بار معادل ستاره

در زیر ، یک روش با تقریب های متوالی به کار می رود. این امر برای محاسبه دستی به درد می خورد و اهمیت نسبی پارامترهای گوناگون را به نمایش می گذارد.

۱- black box

نخستین تقریب : فرض کنید که ولتاژ اسمی روی ترمینال های خروجی و افت ولتاژ و نتیجه توان ورودی به ترانسفورماتور را محاسبه می نمائیم.

دومین تقریب : ولتاژهای خروجی را با نخستین تقریب شکل های افت ولتاژ تصحیح کنید و برطبق آن پارامترهای بار را اصلاح کنید (جریانهای بارگذاری ، تابع ولتاژ حقیقی، به طور تلویحی هستند). توان بار تصحیح شده و مقادیر افت ولتاژ را به دست آورید.

برای این محاسبات تقریبی، امپدانس اتصال کوتاه بصورت اکثرا" راکتیو مورد توجه قرار خواهد گرفت یعنی $Z=X$. از تلفات با مقایسه با توان بار حقیقی، چشم پوشی می شود.

برای هر شاخه ای از شبکه معادل امپدانس ستاره رابطه های زیر به کار می رود، مقادیر در واحد *P.u.)* در پرانتزها مشخص شده اند:

$$[i]=\left(\frac{S}{S_r}\right)\left(\frac{U_r}{U}\right)$$

مصرف توان سلفی (راکتیو) $[X]\,[i]^2$

تلفات توان $[r]\,[i]^2$

افت ولتاژ عددی $Sin\,\phi\,[X]\,[i]$

$$=\left(\frac{Q}{S}\right)[x]\left\{\left(\frac{S}{S_r}\right)\left(\frac{U_r}{U}\right)=[x]\left\{\left(\frac{Q}{S_r}\right)\left(\frac{U_r}{U}\right)\right.\right.$$

به یاد داشته باشید که در این معادله ها، توان بار سلفی Q برای بارگذاری سلفی، مثبت است (شاخه *II*) و برای بارگذاری خازنی، منفی است (شاخه *III*). مقاومت سلفی اتصال کوتاه در هر واحد *[X]* برای شاخه *[I]* منفی بوده و برای شاخه های *II* ، *III* مثبت است (به شکل ۲۹ رجوع شود).

نخستین تقریب :

شاخه (II)

توان ظاهری ۷۵ مگاولت آمپر = ۰/۹۳۷۵ در هر واحد

بار حقیقی(اکتیو) ۰/۸ x۷۵ = ۶۰ مگاوات

بار سلفی (رآکتیو) ۰/۶ x ۷۵ = ٤۵ مگاولت آمپر (راکتیو)

جریان در هر واحد ۰/۹۳۷۵

افت ولتاژ ۰/۹۳۷۵ x ۰/۱۲۵۵ x ۰/۶ = ۰/۰۷۱ در هر واحد

مصرف سلفی $(۰/۹۳۷۵)^۲$ x ۰/۱۲۵۵ = ۰/۱۱ در هر واحد

۸۰ x ۰/۱۱ = ۸/۸ مگاولت آمپر (رآکتیو)

شاخه *(III)* :

توان ظاهری ۱۵ مگاولت آمپرراکتیو (خازنی) = ۰/۱۸۷۵- در هر واحد

جریان در هر واحد ۰/۱۸۷۵-

افت ولتاژ ۰/۱۸۷۵- x ۰/۱٤۷۵ = ۰/۰۲۸ — در هر واحد

مصرف سلفی(راکتیو) $(۰/۱۸۷۵ -)^۲$ x ۰/۱٤۷۵ = ۰/۰۰۵ در هر واحد

= ۸۰ x ۰/۰۰۵ = ۰/٤ مگاولت آمپر (راکتیو)

محل برخورد T، مجموع توان جاری

به شاخه *(II)* ۶۰ مگاوات و (۸/۸ + ٤۵) مگاولت آمپر (راکتیو)

به شاخه *(III)* (۰/٤ + ۱۵ -) مگاولت آمپر (راکتیو)

مجموع، از شاخه *(I)* ۶۰ مگاوات و ۳۹/۲ مگاولت آمپر (راکتیو) معادل ۷۱/۷ مگاولت آمپر

جریان در هر واحد در شاخه *(I)* ۰/۸۹۶

شاخه *(I)*

$Sin\ \phi$ ۰/۵٤۷ = 39.2 / 71.1

افت ولتاژ ۰/۸۹٦ × (– ۰/۰۱۵۵) × ۰/۵٤۷ = (– ۰/۰۰۸) در هر واحد

مصرف راکتیو ۸۰ × (۰/۸۹٦)^{۲} × ۰/۰۱۵۵– = ۱ – مگاولت آمپر (راکتیو)

ولتاژهای منتجه

محل برخورد T ۰/۰۰۸ + ۱/۰۰۰ = ۱/۰۰۸ در هر واحد

ترمینال *(II)* ۱/۰۰۸ – ۰/۰۷۱ = ۰/۹۳۷ در هر واحد

ترمینال *(III)* ۱/۰۰۸ + ۰/۰۲۸ = ۱/۰۳٦ در هر واحد

دومین تقریب :

ولتاژهای ترمینال طبق نخستین تقریب به جای ولتاژ های اسمی (۱/۰۰۰ در هر واحد) معرفی شده است:

شاخه *(II)*

[i] = ۰/۹۳۷۵ / ۰/۹۳۷ = ۱/۰۰۱

مصرف توان رآکتیو و افت ولتاژ با روش حسابی تغییر می یابد به

– مصرف رآکتیو ۸۰ × (۱/۰۰۱)^{۲} × ۰/۱۲۵۵ = ۱۰/۱ مگاولت آمپر (رآکتیو)

– افت ولتاژ، شاخه *(II)* ۱/۰۰۱ × ۰/۱۲۵۵ × ۰/٦ = ۰/۰۷۵ در هر واحد

افزایش ولتاژ سیم پیچ سوم، هرگاه مجموعه خازنها متصل است (افت ولتاژ منفی)، مجموعه خازنها دارای امپدانس ثابت شده است. افزایش جریان بار ، نسبت به ولتاژ صورت میگیردو توان رآکتیو تولید شده توسط مجذور ولتاژافزایش میابد.

مقادیر جدید به شرح زیر است :

شاخه *(III)*

جریان در هر واحد ۱/۰۳٦ × ۰/۱۸۷۵ – = – ۰/۱۹٤

بارگذاری خازنی ۱۵ × (۱/۰۳٦)^{۲} = ۱٦/۱ مگاولت آمپر (راکتیو)

مصرف رآکتیو ۸۰ × (۰/۱۹٤-)^{۲} × ۰/۱٤۷۵ = ۰/٤ مگاولت آمپر (رآکتیو)

افت ولتاژ ۰/۱۹٤ - × ۰/۱٤۷۵ = ۰/۰۲۹ - در هر واحد

محل برخورد T ، مجموع توان جاری

جمع توان آرکتیو ۰/٤ + ۱٦/۱ - ۱۰/۱ + ٤۵ = ۳۹/٤ مگاولت آمپر (رآکتیو)

جمع از شاخه *(I)* ۳۹/٤ مگاولت آمپرراکتیو و ٦۰ مگاوات = ۷۱/۸ مگاولت آمپر

جریان در هر واحد در شاخه *(I)* ۰/۸۹۷

شاخه *(I)*

$Sin\ \phi$ $0.547 = 39.4 / 71.8$

افت ولتاژ ۰/۸۹٦ × (۰/۰۱۵۵ -) × ۰/٥٤۷ = ۰/۰۰۸ - در هر واحد

مصرف رآکتیو ۸۰ × (۰/۸۹۷)^{۲} × ۰/۰۱۵۵ - = ۱ - مگاولت آمپر (رآکتیو)

دومین تقریب ولتاژها به شرح زیر است :

- ترمینال *(II)* ۱/۰۰۸ - ۰/۰۷۵ = ۰/۹۳۳ در هر واحد

- ترمینال *(III)* ۱/۰۰۸ + ۰/۰۲۹ = ۱/۰۳۷ در هر واحد

چنانچه تکرار دیگری باید انجام گیرد، تغییر باید فقط از مرتبه ۰/۰۰۱ باشد. در این سطح دقت عددی، تقریب ها در مدل اصلی ترانسفورماتور و در روش محاسبه، دیگر ناچیز نخواهد بود.

برای مقایسه ، یک محاسبه رایانه ای با نرم افزار استاندارد (عدد مختلط جبری) داده شده است:

در هر واحد $U_{(III)}$ = ۱/۰٤ : در هر واحد $U_{(II)}$ = ۰/۹۳

مجموع تلفات بار، با بکارگیری جریان شاخه تخمین زده شده که با دست محاسبه شده :

- شاخه *(I)* ۰/۰۷۹ ٪ = (۰/۸۹۷)^{۲} * ۰/۰۹۹

- شاخه *(II)* ۰/۲۷۷ ٪ = (۱/۰۰۱)^{۲} * ۰/۲۷۷

- شاخه *(III)* ٪ ۰/۰۲۳ = (۰/۱۹۵)^{۲} × ۰/٦۱۳

مجموع تلفات بالا برابر است با ۰/۳۷۹ درصد = ۳۰۳ کیلووات (تقریبا" ۳۰۰ کیلووات.)

۹-۷ نمونه محاسبه مجموعه تلفات بار و پخش تلفات به سیم پیچ‌های فردی در یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه با اتصال نوع اتو

یک ترانسفورماتور مشخص شده با ۱۲۰ / ۳۵۰ / ۳۵۰ مگاولت آمپر، نوع سیم پیچ Y Nauto d سیستم خنک شوندگی *ONAF* . ولتاژهای اسمی ۳۸۰ با تنظیم ۳۳ / ۱۳۲ کیلوولتدر نظر بگیرید. با خنک شوندگی *ONAN* (بادبزن ها کار نمی کنند)، یک آزمون گردش دمای مشخص شده با ۵۰ درصد توان اسمی روی تمامی ترمینالها : ٦۰/ ۱۷۵ / ۱۷۵ مگاولت آمپر و با سیم پیچ ۳۸۰ کیلوولت انشعاب گرفته متصل به حداقل انشعاب ، ۳۳۰ کیلوولت. چه مقدار از مجموعه تلفات بار را باید برای آزمون گردش دما اعمال کرد و چه بخشی از تلفات در سیم پیچ‌های فردی ترانسفورماتور است؟

اندازه گیری های دو سیم پیچه، نتایج زیر را داده است که نسبت به دمای مرجع دوباره محاسبه شده است :

H,X	*330 / 132K V*	*350 MVA ,*	*1118 kW*	
H,T	*330/33KV*	*120 MVA*	*255kW*	*(350 MVA → 2169 kW)*
X,T	*330 / 33 KV*	*120 MVA ,*	*233kW*	

در ستون آخر در بالا، دو نتیجه آزمون شامل سیم پیچ سوم نیز (به طور غیر واقع بینانه) نسبت به مقدار توان مرجع معمولی S' = ۳۵۰ MVA ، دوباره محاسبه شده اند.

ضریب اتصال اتو (α) ، برابر است با ۰/٦۰۰ = ۳۳۰ / (۱۳۲ − ۳۳۰)

طبق معادله های (۷٤) تلفات مرجع پخش شده برای سه سیم پیچ فیزیکی به شرح زیر است :

$$P'_S = \frac{1}{2}(1.4\times1118 + 0.6\times2169 - 0.6\times1982) = 838.7kW$$

$$P'_C = \frac{1}{2}(0.6\times1118 - 0.6\times2169 + 0.6\times1982) = 279.3kW$$

$$P'_T = \frac{1}{12}(-1118 + 2169 + 0.2\times1982) = 1206.2kW$$

مقدار توانی که باید به سیم پیچ C ، سیم پیچ معمولی اعمال شود، به شرح زیر است :

$$S_C^2 = (1-\alpha)(S_T^2 - \alpha S_H^2) + \alpha S_X^2$$

نسبت $\left(\frac{S_c}{\alpha S'}\right)^2$ از لحاظ رقمی $\frac{0.4(60^2 - 0.6\times175^2) + 0.6\times175^2}{0.6^2\times350^2} = 0.2827$

تلفات اختصاص یافته در سه سیم پیچ فیزیکی و تلفات بار مجموعه سه سیم پیچ به شرح زیر است:

$$P = P_S + P_C + P_T = \left(\frac{175}{350}\right)^2 \times 838.7 + 0/2827\times279.3 + \left(\frac{60}{350}\right)^2 \times 1206.2$$

$$= 209.7 + 79 \quad + 35.4 = 324.1kW$$

مقایسه :

محاسبه صریح تلفات بار مجموعه سه سیم پیچ طبق معادلات (۷۰) به شرح زیر است:

$$P'_H = \frac{1}{2}(1118 + 2169 - 1982) = 652.5kW$$

$$P'_X = \frac{1}{2}(1118 - 2169 + 1982) = 465.5kW$$

$$P'_T = \frac{1}{12}(-1118 + 2169 + 1982) = 1516.5kW$$

مجموعه تلفات :

$0.25\times622.5+0.25\times465.5+0.0294\times1516.5=163.1+116.4+44.6=324.1kW$,

یعنی همان جمع کل، لیکن بدون تقسیم جزء واقعی میان سیم پیچهای فیزیکی (سری ها، معمولی، سیم پیچ سوم).

۸ مشخصات مقادیر مقادیر اسمی و مقادیر انشعاب

۸-۱ مقدمه

این بند فرعی، رابطه میان شرایط بهره وری برای یک ترانسفورماتور و پارامترهای مشخص شده و تضمین شده که به مقادیر اسمی (یا مقادیر انشعاب) نامیده شده است را توضیح می دهد: توان اسمی، ولتاژ اسمی، جریان اسمی، برای تعاریف به استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰رجوع شود.

اصولا مقادیر اسمی (با توجه به انشعاب اصلی یک ترانسفورماتور) و مقادیر انشعاب (شبیه به پارامترها برای انشعاب های دیگر) مرجعی برای تضمین ها و آزمونهای مربوط به توان ظاهری ولتاژ و جریان به طور جداگانه است. این مقادیر نبایستی با توان بازدهی در بهره وری و مقادیر مربوط به ولتاژ و جریان اشتباه گرفته شود.

برعکس ، این یک رویه منطقی نسبتا پیچیده، برای تعیین مقادیر عددی کمیت های نامی و انشعاب از راه درست است که کافی به نظر می رسند ولی این ارقام به طور غیرضروری از الزامهای مجموعه ای از حالتهای بارگیری در یک بهره برداری واقعی بالاتر نیستند. یادآوری می شود که زمینه گسترده ای از ترکیبهای متغیرهای بهره برداری وجود دارد، در حالی که کمیت های معینی تنها مجموعه ای از داده های پایه ای انتخابی را می نمایانند. درهر صورت این مجموعه نیز باید در ارتباط با ردیفی از شرایط بهره برداری مجاز باشد.

یک روش سیستماتیک پیشنهادی ، برای این رشته از بررسیهای تحلیلی ، در زیر مطرح و با مثالهای عملی تشریح می گردد.

۸-۲ ویژگیهای استاندارد شده تعیین اندازه های اسمی و اندازه های انشعابها، تاثیر بر پهنای ردیف انشعاب

در اینجا منظور این نیست که یک بررسی تحلیلی کامل را برای هر حالت ویژه، که یک ترانسفورماتور با تنظیم کننده باید مشخص وخریداری گردد، این روند در تقابل با اصول استاندارد کردن درست ترانسفورماتور است. در استانداردهای ملی ، روال کار این است که جدولهایی از مقادیر پیشنهادی اسمی پیشنهاد می شود. این جدولها یک رشته از مقادیر ترجیحی توان اسمی با گام ۱:۱/۲۵ یا بزرگتر را (بند ٤-۳ استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰ را ببینید)، همراه با ولتاژهای اسمی و ردیف های پذیرفته شده انشعاب برای سطوح ولتاژ متعارف را در رده های ولتاژهای مختلف در شبکه های در حال برقرسانی، فهرست می کنند. هدف از استاندارد کردن این داده ها ، آسان کردن جابه جایی یک ترانسفورماتور به جایگاهی دیگر است، به ویژه هنگامی که خواسته باشند آن را با یک ترانسفورماتور دیگر موازی ببندند، مسائلی که در ارتباط با موازی بستن ترانسفورماتورها وجود دارد به طور جداگانه در بند ٦ بررسی شده اند.

شبکه های توزیع و انتقالی که به خوبی سازماندهی شده اند، طوری طراحی و بهره برداری میشوند، که تغییرات واقعی ولتاژ بهره برداری آنها در بارگیرهای سبک و یا سنگین بسیار کوچک است.

این ویژگی با ساختار مناسب سطوح ولتاژ پائین و بالای ترانسفورماتور و مدیریت درست جریان توان راکتیو (واکنشی) به دست آمده است.

از اینروی ردیف انشعابهای ضروری برای کنترل نسبت تبدیل در شرایط متعارف بهره برداری به طور کلی نسبتا محدود می شود.

هرچند روش معقولانه آن است که شرایط ناهنجار و نامتعارف نیز ، هنگامیکه تجهیزات معینی از شبکه (خط ها، ترانسفورماتورها) آماده به کار نباشند، مورد توجه قرار بگیرند درشرایط اضطراری از این دست ، و یا در روند پشتیبانی از شبکه نیاز به ردیف گسترده تری از تغییر نسبت تبدیل ولتاژ در ترانسفورماتور وجود خواهد داشت.

ممکن است حتی بخشهای مختلف شبکه یا شبکه های مجاور، دارای ولتاژ یکسان که در همان ولتاژ استاندارد کار است،در عمل، در سطوح ولتاژی بهره برداری می شوند که با هم تفاوت اندکی دارند، در این روند برای امکانپذیر ساختن جابجایی ترانسفورماتورها، ممکن است به ردیف انشعابهایی با دامنه ای گسترده تر نیاز شود.

هرچند، ردیف انشعابهای با دامنه گسترده تر در یک ترانسفورماتور نه تنها نمایانگر افزایش هزینه است و رقم تلفات را هم بالا می برد، بلکه همچنین به دشواریهای طراحی را بیشتر می کند، برای نمونه، به علت نوسانهای ولتاژ گذرا در دو سر سیم پیچ تنظیم کننده، خطر بروز عیب به هنگام کار بالا می رود. در این حالت ضرورت دارد که سطح عایقبندی را افزایش داد و گاهی نیز به دستگاههای تنظیم ولتاژ گرانتری نیاز پیدا می شود.

با توجه به این زمینه های مغایر با هم، آشکار است که ارائه یک پیشنهاد کلی و فراگیر در باب پهنای (گستره) ردیف انشعاب ها به عنوان رقم استاندارد را نمی توان مطرح ساخت. مثالی که روش بررسی تحلیلی را توضیح می دهد ، به درستی حالتی عملی است که بیشتر نشانگر دیدگاههای صنعتی در یک کشور است و نه یک پیشنهاد کلی.

۸-۳ روش تعیین کمیت های اسمی و انشعاب

۸-۳-۱ فرضهای کلی

ترانسفورماتور دارای دو سیم پیچ است. یکی از این دو سیم پیچ انشعاب دار مـی باشـد یـادآوری می شود که در این متن یک سیم پیچ به عنوان مجموعه ای از همه دورهای آن در ارتباط با یکـی از ولتاژهای ترانسفورماتور دارد (تعریـف ۳-۳-۱ را در اسـتاندارد ملـی شـماره ۲۶۲۰ ببینیـد). از اینروی یک سیم پیچ می تواند شامل چندین استوانه جداگانه تودرتو و یا چندین دیسک باشد. اگر سیم پیچ انشعاب دار باشد، بدین معناست که این سیم پیچ برای اینکه شماره دورهای مؤثـر آن را بتوان تغییر داد، باید قابلیت اتصال دوباره داشته باشد.

در متن استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ یک انشعاب، یک تصور کلی است بدین معنا که یک حالت از اتصال سیم پیچ را می نمایاند. انشعاب همراه با شمار دورهای مؤثر و معین و ولتاژ انشعاب معیـن تعریف می شود. ولتاژ انشعاب معنای یکسانی برای هر انشعاب ویژه دارد، به همان روالی که ولتاژ اسمی همان ولتاژ انشعاب اصلی است.

این که چگونه یک سیم پیچ انشعاب دار را به طور فیزیکی طراحـی مـی کننـد، در ایـن بخـش از بررسیها جایی ندارد.ممکن است که بخش انشعاب دار سیم پیچ به عنـوان یـک بخـش فـیزیکی جداگانه به عنوان یک سیم پیچ تنظیم کننده قرار بگیردو به بخش اصلی سیم پیچ متصل می شود. این اتصال می تواند دائمی و یا توسط یک کلید تغییر انشعاب تغییرپذیر باشد. اصطلاح هایی مانند ((خطی)) [۱] ((منها)) ، بعلاوه،[۲] ((نادقیق، دقیق)) [۳] به حالتهای گوناگون در رابطه با آرایش سیم پیچهای تنظیم کننده ، اشاره دارند.

افزون بر دو سیم پیچ اصلی ، اگر ترانسفورماتور دارای سیم پیچ پایدار سـاز و یـا یـک سـیم پیـچ کمکی دارای توان نامی اندک باشد، در این بحث مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

در یک ترانسفورماتور چند سیم پیچه حقیقی که توان در دو سـر ((یـا چنـد زوج از سـیم پیچـها همزمان جاری می باشد، بیرون از دیدگاه این بحث قرار می گیرد.

۱- *linear*

۲- *pluse-minus*

۳- *coarse-fine*

راستایی که توان اکتیو (کنشی) در درون دو سیم پیچ جاری می گردد، باید شناخته شده باشد، اگر جهت جریان وارون پذیر باشد، هر دو حالت را باید جداگانه بررسی کرد.

پیش از آنکه این بررسی بتواند کامل شود، باید روشن شود که کدام سیم پیچ انشعاب دار است. به طور کلی این نکته به جای آن که شرایط نصب را درنظر بگیرد بیشتر، توسط ملاحظات فنی و استاندارد طراحی سازنده، تعیین می گردد (بند ٦-٤ را ببینید). این بررسی و پیکاوی در گام نخست همه حالتهای بارگیری مختلف را درنظر می گیرد که هر یک نمایانگر مرزها یا حدود مشخص شده ردیف انشعابها است. هر حالت ، با مقادیر توان بار اکتیو (کنشی) و راکتیو (واکنشی) یا توان ظاهری و ضریب توان تعریف می شوند. همچنین ردیفی از مقادیر ولتاژ کار در سرهای بیرونی (ترمینالهای) هر دو سیم پیچ وجود دارد که انجام بارگیری را امکان پذیر می سازند.

مقادیر ولتاژ ثانویه در همه شرایط بارگیری باید با ولتاژهای معادل بی باری که افت ولتاژ در ترانسفورماتور به آن افزوده می شود، جایگزین شوند.

در این رویه، که با جزییات بیشتر در بخش دیگری از این استاندارد بازگو شده است، ضروری است مقدار امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور را بدانیم یا فرض کنیم.

در ساده ترین حالت، این ویژگیها در روند یک حالت کم باربابی بار و یک حالت پربار ، تعریف می شوند.

در حالتهای پیچیده تر مانند ترانسفورماتورهای بزرگ سفارشی شده که در معرض شرایط گوناگون بارگیری هستند، سفارش می شود که با سازنده درباره مشخصات ترانسفورماتور، بر پایه حالتهای شناخته شده بارگیری گفتگو شود و این کار پیش از تصویب مقادیر نامی در مشخصات مناقصه باشد. بدین خاطر که مشخصات تثبیت شده دائمی از ترانسفورماتور می تواند چگونگی

آرایش سیم پیچ را به روالی قفل کند که منجر به دشواریهای فنی نا لازم یـا طراحـی غیراقتصـادی شود.

۸-۳-۲ خلاصه ای جامع از رویه کار

- برای هر حالت بارگیری، جریان بار با توجه به توان خروجی تعیین شده و ولتاژ ثانویه تعییـن شده محاسبه می شود، بیشترین مقدار طی هر یک از حالتهای بارگیری یادداشت می شود.
- میزان افت ولتاژ در ترانسفورماتور ، در حالتهای بارگیری تعییـن شـده، در گام نخسـت بـاید برآورد شود. بدین منظور که ولتاژ کار در ترمینالهای خروجی را بتـوان بـه ولتـاژ بـی بـاری ، برگرداند.
- بیشترین و کمترین مقادیر معادل ولتاژ بی باری برای هـر دو سـوی ترانسـفورماتور طـی هـر حالت بارگیری یادداشت می شود (شکل ۳۰ الف را ببینید).
- بیشترین و کمترین مقادیر نسبت تبدیل ولتاژ برای هر حالت بارگیری محاسبه مـی شـود و در حد فراتر از متعارف این نسبتهای تبدیل یادداشت می شود، این کار لزوما نمی تواند ترکیبهای قطری از ولتاژهایی باشد که در جمع فراتر از حد متعارف هستند. زیرا ولتاژهای اولیه و ثانویه کاملا"در راستاهای مخالف میان بار سنگین و بار سبک ، تغییـر نمـی کننـد (شـکل ۳۰ ب را ببینید).
- با بهره گیری از اطلاعات نسبت دورها، جریان ورودی به سیم پیچ اولیـه محاسـبه مـی شـود. بیشترین مقدار به دست آمده یادداشت می شود.

در این مرحله، شش پارامتر (فراسنج) مورد نیاز زیرین تعیین شده اند. آنها طراحی الکتریکی ترانسفورماتور را شکل می دهند.

- بیشترین ولتاژ اولیه
- بیشترین ولتاژ ثانویه

- بیشترین نسبت تبدیل ولتاژ
- کمترین نسبت تبدیل ولتاژ
- بیشترین جریان اولیه
- بیشترین جریان ثانویه

برای ادامه کار ، اینک باید دانست که کدام سیم پیچ انشعاب دار می باشد.

- ولتاژ اسمی سیم پیچ بدون انشعاب با توجه به بیشترین ولتاژ در همان طرف از ترانسفورماتور محاسبه می شود (شکل ۳۰ پ را ببینید).
- آن گاه ردیف ولتاژ انشعابی در سوی سیم پیچ انشعاب دار را می توان از ولتاژ مربوطه و پارامترهای (فراسنجهای) نسبت تبدیل که در آینده با جزییات بیشتری نشان داده خواهد شد، تعیین کرد (شکلهای ۳۰ ث و ۳۰ د را ببینید). این روند اغلب منجر به مشخصه ای از انشعابها می شود که با اصل تغییر ولتاژ ترکیبی سازگار می باشد (بند ۵-۲ استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ و نکات بیشتری که در زیر مطرح شده است را ببینید).
- بیشترین مقدار جریان بار برای سیم پیچ بدون انشعاب ، همراه با ولتاژ اسمی اش در اصل توان نامی ترانسفورماتور را تعریف می کند.

مگردر مواردی که تعیین شده باشند، همه انشعابها باید انشعابهای با توان پر (کامل) باشند (بند ۵-۲ و ۵-۳ استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ را ببینید). هرچند برای اینکه از بیش از اندازه بزرگ شدن ابعاد ترانسفورماتور پرهیز شود، انحراف از این قاعده اصلی می تواند سودمند باشد. از اینروی افزایش ولتاژهای انشعاب در سیم پیچ انشعاب دار می تواند در راستای انتهای ردیف انشعابهای با علامت مثبت (تغییر ولتاژ ترکیبی) ازنظر شکل هندسی ناقص (ناهنجار)[1] شود. به همین سان افزایش جریانهای انشعاب در راستای انتهای ردیف انشعابهای با علامت منها با اعمال یک انشعاب با بیشترین جریان ازنظر شکل هندسی ناقص (ناهنجار) شود .

۱- *truncated*

این روال بدین معنا است که مقادیر توان انشعاب برای انشعابهای دو انتها در مقایسه با مقدار آن در میانه ردیف انشعابها که توان نامی پر ترانسفورماتور می باشد، کاهش نشان می دهد.

- انشعاب اصلی ترجیحاً از میانه ردیف انشعابها انتخاب می شود. آن گاه ولتاژ و جریان انشعاب در این سیم پیچ انشعاب همان کمیت های اسمی هستند.
- مجموعه کاملی از این پارامترها (فراسنجها) سرانجام در یک جدول مشخصات گردآوری می شوند.

این گامهای گوناگون در مثالی عملی در زیربندهای آتی با جزییات بیشتر مطرح می شوند.

۸-٤ جزییات این رویه ، گام به گام

همراه با تشریح این روش به شکل کلی آن، یک مثال عملی نیز ارائه می شود.

مثال :

ولتاژ از ۱۱۵ کیلوولت به ۲۰ کیلوولت تبدیل می شود. ردیفهای ولتاژ اولیه از ۱۰۷ کیلوولت تا بیشترین مقدار مجاز U_m شبکه برابر با ۱۲۳ کیلوولت می باشد. ضروری است که ولتاژ ثانویه در بی باری، ۲۰ کیلوولت باشد، و سپس برای جبران افت ولتاژ در ترانسفورماتور در جریان بارپر که ۱۰۰۰ آمپر مشخص شده است، تا ۲۲ کیلوولت بالا برده شود (ولتاژ واقعی کار در ثانویه را سپس ۲۱ کیلوولت می گیرند، اگر افت ولتاژ در ترانسفورماتور ۱ کیلوولت باشد) برای راحتی از همان آغاز فرض براین است که سیم پیچ فشار بالا سیم پیچ اولیه است، که توان اکتیو (کنشی) را از شبکه دریافت می دارد. این سیم پیچ همچنین سیم پیچ انشعاب دار است. و سیم پیچ فشار پایین سیم پیچ بدون انشعاب خواهد بود. در ادامه، مبنای کار هنگامی بر پایه ((اولیه)) و ((ثانویه)) مطرح خواهد شد که این دیدگاه مهم باشد و هنگامی بر پایه ((انشعاب دار)) و ((بدون انشعاب)) خواهد بود، اگر به این مورد اهمیت داده شود.

از اینروی، آسان خواهد بود اگر بررسی تحلیل زیرین بر پایه همان قواعد صورت پذیرد حتی اگر ترانسفورماتور افزاینده ویا آنکه سیم پیچ فشار پایین سیم پیچ فشار پایین سیم پیچ انشعاب دار باشد.

۸-۴-۱ محاسبه افت ولتاژ و ولتاژ معادل بی باری

(در این باره به جزییات پرداخته نمی شود، بلکه تنها برای تکمیل روال کار به آن اشاره می شود).

بارگیری در سوی ثانویه برابر است با $(\phi\ ,\ S)$ در ولتاژ U_2 اعمالی در ترمینالهای ثانویه ترانسفورماتور جریان بار مربوط به آن به آسانی محاسبه می شود. این بار همچنین امپدانس برابر با Z_L را ارائه می دهد.

$$Z_L = \frac{U_2^2}{S} = \left|\frac{U_2^2}{S}\right|(COS\phi + jSin\phi)$$

در اینجا S به مگاولت آمپر، U_2 به کیلوولت و Z_L به اهم می باشند، این رابطه برای بارهای تک فاز و هم بارهای سه فاز اعتبار دارد.

امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور می تواند در قیاس با دستگاههای موجود و همانند، برآورد شود. مقدار آن برای این منظور از اهمیت بالایی برخوردار نیست. معمولا این امپدانس به طور درصدی برآورد می شود. مقدار آن به اهم و از راه ضرب آن در امپدانس مبنای سوی ثانویه ترانسفورماتور به دست می آید.

$$Z_T = R_T + jX_T = \left|\frac{U_2^2}{S_{ref}}\right|\left(\frac{r_T}{100} + j\frac{X_T}{100}\right)$$

محاسبه افت ولتاژ و ولتاژ بی باری مربوطه به این امپدانس در بند ۷ این استاندارد شرح داده شده است.

۸-۴-۲ ردیف تغییر در نسبت ولتاژ

هر یک از حالتهای بارگیری شرحی از ولتاژهای اعمالی از سوی اولیه و ثانویه، یا ردیفی از ولتاژها را نیز دربردارد که بار با این ولتاژهااز شبکه گرفته می شود. ولتاژهـای سـوی ثانویـه برطبـق بنـد ۸-٤-۱ به ولتاژ معادل بی باری برگردانده می شود. سپس مقادیر نسبت دورهای مربـوط بـه آن را می توان به دست آورد.

بالاترین و پایین ترین نسبت تبدیلها یادداشت می شود. این موارد لزومـا U_{1max}/U_{20min} و U_{1max}/U_{20min} به روالی که شکل ۳۰ ب نشان می دهد، نیستند.

$$n_{\max}=\left(\frac{U_1}{U_{20}}\right)\max.;n_{\min}=\left(\frac{U_1}{U_{20}}\right)\min.$$

نسبت های نهایی، پهنای نسبی ردیف انشعابهای موردنیاز را نشان می دهند. اگر این پـهنا از حـد معمول بزرگتر دربیاید، می توان سفارش کرد که دوبـاره بـه عقـب بـرگشـته و بـه طـوری دقیـق فرضهای نخستین حالتهای بارگذاری و یا بارگیری مربوط را آزمایش کـرد. در پایـان ایـن رونـد، ردیف ها را می توان با توجه به برخی از علائم استاندارد موجود حک و اصلاح نمود.

مثال (ادامه)

ترکیبهای ولتاژ در دو انتها به روال زیر است :

$n_{\max}=123.20=6.15$و$n_{\min}=107.22=4.864$

هیچگونه نشانه هایی از محدودیت برای ترکیبهای انتهایی (در دو انتها) وجود ندارد.

۸-۴-۳ ولتاژ اسمی سیم پیچ بدون انشعاب

فرض می شود که سیم پیچ فشار بالای اولیه انشعاب دار و سیم پیچ فشار پایین ثانویه سیم پیچ بدون انشعاب باشد. بدون توجه به اینکه این روال اعمال بشود یا نه، در اصل رویه زیرین می تواند دنبال شود.

ولتاژ اسمی سیم پیچ بدون انشعاب U_2، در اصل بالاترین ولتاژ شناخته شده برای هر یک از شرایط بارگیری در آن سیم پیچ است (ولتاژ اعمالی اگر اولیه باشد، و ولتاژ القایی معادل اگر ثانویه باشد) (شکل ۳۰ پ را ببینید).

استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ بیان می کند که یک ترانسفورماتور باید توانایی کار پیوسته با ۵ درصد اضافه ولتاژ داشته باشد. این بدین معنا نیست که در روند خدمات عادی و به طور پیوسته همواره در این حد از ولتاژ بهره برداری شود. این ویژگی برای حالتهای نادری مطرح می شود که یک چنین شرایط بهره برداری محدود و در دوره های زمانی کوتاهی رخ می دهد، برای نمونه در شرایط اضطراری و یا شرایط بارگیری با باری فراتر از حد قله. اگر حالت بار زیاد که در این بررسی تحلیلی به کار برده شده است مطابق با این مشخصه باشد، مقتضی آن است که رقم ولتاژ نامی را تا حدود این خطای مجاز پایین آورده و گرد نمود. در آمریکای شمالی ، مقادیر اسمی ولتاژ چنین تعیین می شوند.

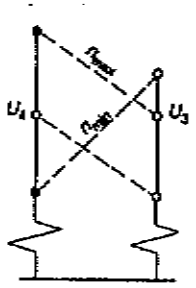
الف) ترانسفورماتور توانایی تحویل خروجی نامی MVA در یک ضریب توان پس فاز ٪۸۰ یا بیشتر در ٪۱۰۵ ولتاژ اسمی ثانویه بدون فراروی از افزایش دماهای ضمانت شده را دارد ؛

ب) ترانسفورماتور توانایی دارد که در بی باری با ولتاژ اولیه موردنیاز برای شرایط الف) یا ٪۱۱۰ ولتاژ اسمی ، هرکدام که بزرگتر باشند، بدون فراروی از افزایش دماهای ضمانت شده ، بهره برداری شود.

مثال (ادامه)

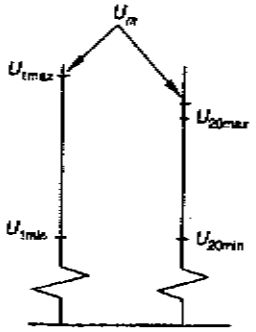
در مثال ما ، ولتاژ نامی ثانویه (سیم پیچ بدون انشعاب) برابر است با ۲۲ کیلووات.

۱- *Peak*



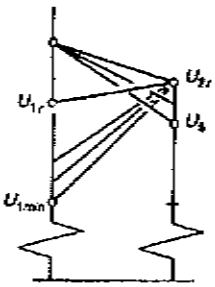
یادآوری - *حدود نسبت تبدیل : حالت اضطراری بار بالا کمترین ولتاژ اولیه را با بیشترین ولتاژ ثانویه (معادل بی باری) ترکیب می کند. این راه کمترین مقدار نسبت تبدیل را تعیین می کند. ترکیب U_{1max} و U_{20min} می تواند ناواقعی باشد. سپس بیشترین نسبت تبدیل به جای آن به صورت U_3 / U_{1max} و یا U_4 / U_{20min} بیان می شود. (U_3 و U_4 هیچ جنبه ویژه ای ندارند).*

شکل ب - ۳۰



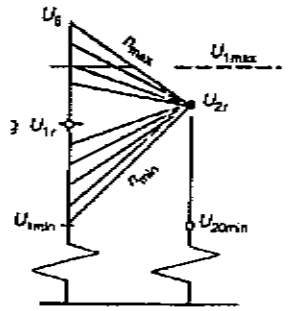
یادآوری - *ردیفهای ولتاژ کسار در هر دو سوی ترانسفورماتور (با مقیاسهای متفاوت)*

شکل ۳۰ - الف



یاداوری - *بالاترین ولتاژ انشعاب U_S، طبق شکل ۳۰ پ ، ناواقعی است، حتی می تواند فراتر از بیشترین ولتاژ تجهیزات، U_m، برسد و قابل اعمال در سوی اولیه باشد. بنابراین، ردیف ولتاژهای انشعاب سوی اولیه در U_{1max} از شکل ۳۰ الف، به شکل ناهنجار در می آید. بالاترین انشعاب در راستای مثبت به جای آن با مقادیر کاهش یافته U_{20} ترکیب می شود (U_6 ، به روالی که در شکل ۳۰ ت دیده می شود). این یک تغییر ولتاژ ترکیبی (CbVV) می باشد. (شکل ۳۱ را نیز ببینید).*

شکل ۳۰ - ت



یاداوری - *U_{20max} ولتاژ اسمی U_{2r} خواهد بود زیرا سیم پیچ ثانویه بدون انشعاب است. در شار ثابت تغییر ولتاژ، ردیف ولتاژهای انشعاب در سوی اولیه توسط نسبت های تبدیل ضرب در ولتاژ اسمی ثانویه تعیین می شود. ولتاژ اسمی اولیه (انشعاب اصلی) در وسط جای داده می شود.*

شکل ۳۰ - پ

شکل ۳۰- تعیین ردیف انشعاب

۸-۴-۴ ردیف ولتاژهای انشعاب در سیم پیچ انشعاب دار

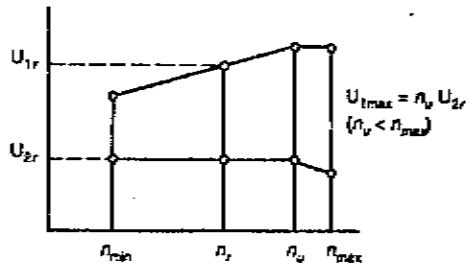
پایین ترین ولتاژ مورد نیاز انشعاب برابر است با $U_{1min} = U_{min} \times U_{2r}$ (شکل ۳۰ پ را ببینید).

بالاترین ولتاژ انشعاب می تواند $U_{1max} = U_{max} \times U_{2r}$ باشد.

این در حالتی است که اصل تغییر ولتاژ، شار ثابت $(CFVV)$ دنبال شود، ولی لزومی نیست که همواره چنین باشد. مثال شکل ۳۰ پ حالتی را نشان می دهد که $CFVV$ منجر به یک ولتاژ بالاتر از بیشترین (ماکزیمم) مقدار آن بطور غیر واقعی می شود. حتی می تواند به بالاتر از بالاترین ولتاژ تجهیزات U_m برسد، که به شبکه اعمال می گردد. (از دید فنی، هیچگونه حدی برحسب سیراب شوندگی هسته وجود ندارد ولی اضافه ولتاژ در شبکه از نقطه نظر هماهنگی در عایقبندی مجاز نیست). پس بیشترین نسبت تبدیل نمی تواند با ولتاژ اسمی کامل در سیم پیچ بدون انشعاب ترکیب شود. انشعابهای در بالاترین ردیف با علامت مثبت تنها با ولتاژ ثانویه کاهش یافته به کار گرفته می شوند. در نتیجه، ولتاژهای انشعاب سیم پیچی ثانویه کمتر از ولتاژ نامی در انشعابهای جای گرفته در بالاترین ردیف با علامت مثبت یادداشت می شود، در حالی که ولتاژهای انشعاب اولیه در بیشترین سطح ولتاژ اعمالی ثابت نگه داشته می شود (شکل ۳۰ ت را ببینید).

این بدین معنا است که ترانسفورماتور برطبق اصل تغییر ولتاژ ترکیبی (C_bVV) مشخص می شود (بند ۵-۲ استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ را ببینید). نقطه عطف یا تغییر کامل (شکل ۳۱ را ببینید). نقطه ((انشعاب با بیشترین ولتاژ)) نامیده می شود. انشعاب های فراسوی آن نقطه ، انشعابهای با توان انشعابی کاهش یافته هستند.

بیشترین ولتاژ سیم پیچ انشعاب دار، با شکل ناهنجار، با نسبت تبدیل ولتاژ n_u برحسب ولتاژ اسمی سیم پیچ بدون انشعاب بیان می شود.



شکل ۳۱- تغییرات ولتاژ ترکیبی *(C_6VV)*

مثال (ادامه)

پایین ترین ولتاژ انشعاب سیم پیچ اولیه برابرست با $k\ V$ ۱۰۷ = ۲۲ × ٤/۸٦٤

بالاترین ولتاژ انشعاب خواهد شد : $k\ V$ ۱۳۵/۳= ۲۲ × ٦/۱۵۰

ولی این رقم مجاز نیست : ما باید بیشترین ولتاژ انشعاب را به میزان $k\ V$ ۱۲۳ معرفی کنیم.

یادآوری – ***هرچند، ولتاژ های در حالت بی باری بیش از ۱۲۳ کیلو ولت، بسته به ردیف انشعابها ، قابل قبول هستند .***

نسبت تبدیل مربوط $n_ü$ برابر است با : $\frac{123}{22} = 5.591$

در این مرحله این امکان وجود دارد که ولتاژ اسمی سیم پیچ اولیه را در وسط ردیف نسبت ولتاژ از ٤/۸٦٤ تا ٦/۱۵۰ تثبیت کنیم که می شود ۵/۵۰۷ ، سپس داریم : kV ۱۲۱/۱۵ = ۲۲ × ۵/۵۰۷

۵-۴-۸ جریان نامی و توان نامی

پیش از پیشروی ، باید یادآوری کرد که جریان اسمی و توان اسمی به صورت پیوسته در نظر گرفته می شوند . توان نامی پیوسته به عنوان مبنای کلی برای امپدانس و تلفات به کار برده میشوند (بند٤-۱ و٤-۲ ، استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰ را ببینید). این روند همچنین به حدود افزایش دما در

یک روند پایا مربوط است. از سوی دیگر، بارگیری واقعی معمولا در طول روز و در سرتاسر سال تغییر می کند. بارگیری موقت و فراتر از توان اسمی احتمال پذیر است و می تواند بر ردیف تنظیم ولتاژ مورد نیاز ترانسفورماتور اثر گذارد.

این مسئله که چگونه یک بار تغییرپذیر ازنظر زمانی را به یک بار معادل یکنواخت برمی گردانند در استاندارد ملی ایران به شماره ...[1] برای ترانسفورماتورهای روغنی و در استاندارد ملی ایران به شماره ...[2] برای ترانسفورماتورهای خشک تشریح شده است.

یک بار یکنواخت مورد نیاز نمایانگر یک مقدار معینی از جریان بار است. هرگاه ولتاژ کار پایین بیاید جریان بار بزرگتر می شود و ترانسفورماتور باید برپایه طراحی شود، بالاترین مقداری که در یک سیم پیچ بدون انشعاب برای هر حالت بارگیری پدیدار می شود برابر است با جریان اسمی این سیم پیچ (در این مثال ، این جریان برابر است با جریان سیم پیچ ثانویه با فشار پایین).

این جریان اسمی، همراه با ولتاژ اسمی، مقدار توان اسمی، S_r ، را تعیین می کنند.

مقدار محاسبه شده به طور مناسبی در این مرحله گرد می شود.

مثال (ادامه)

جریان بار ثانویه از سرآغاز ، بدون توجه به ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ۱۰۰۰ آمپر تعیین شده بود. این رقم بی درنگ به عنوان جریان اسمی سیم پیچی (بدون انشعاب) ثانویه درنظر گرفته می شود.

جریان اسمی سیم پیچ انشعاب دار اولیه از نسبت تبدیل در انشعاب اصلی محاسبه می شود :

$۱۰۰۰ \div ۵/۵۰۷ = ۱۸۱/۶\ A$

ولی این رقم جریانی نیست که برای ابعادیابی سیم پیچ اولیه به کار رود، بالاترین جریان انشعاب در کمترین ولتاژ انشعاب پدیدار می شود. در ترکیبی از $۱۰۷/۲۲\ k\ V$: و نسبت تبدیل ٤/٨٦٤ .

۱- تا تدوین استاندارد ملی به استاندارد IEC60354 رجوع شود.

۲- تا تدوین استاندارد ملی به استاندارد IEC60905 رجوع شود.

از اینروی : I_{1max} ۱۰۰۰÷ ٤/٨٦٤ = ۲۰۵/٦ A

۸-٤-٦ انشعاب انتخابی یا بیشترین جریان ، انشعابهای با توان کاهش یافته

در اصل ؛ توان اسمی دست کم در یک بخش قابل توجه از ردیف انشعابها اعمال می شود، این روند بدین معنا است که جریانهای انشعاب عکس ولتاژهای انشعاب تغییر می کنند. در راستای انتهای کم ولتاژتر ردیف انشعابها، گاهی این روال مقادیر جریان انشعاب بیشتری را نتیجه می دهد، که نمایانگر یک ابعادیابی ناخواسته و فراتر از اندازه ای در کل سیم پیچی است. سپس این ویژگی می تواند به تغییر شکل هندسی تغییرات در نقطه ای معینی منجر شود، که انشعاب با بیشترین جریان نامیده می شود. از آن به بعد، مقادیرجریان انشعاب درسیم پیچ انشعاب دار ثابت نگه داشته می شود و مقادیر مربوط در سیم پیچ انشعاب دار به طور تناسب اندک اندک کوچکتر می شود.

این انشعابهای دارای توان انشعاب کاهش یافته هستند (شکل ۳۲ را ببینید).

نسبت تبدیل ولتاژ انشعاب در این نقطه برابر است با : n

$$U_{1i} = n_i \times U_{2r} \; (n_{min} < ni < n_u < n_{max})$$

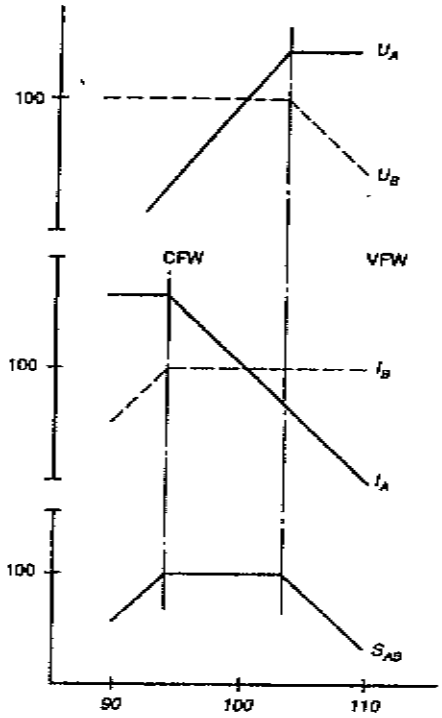
انشعابهای بالا دست انشعاب با بیشترین ولتاژ در جایی که چگالی شار در هنگام بهره برداری کاهش پیدا می کند. نیز انشعابهای با توان کاهش یافته هستند.

مثال (ادامه)

این ترانسفورماتور برطبق اصل تغییر ولتاژ ترکیبی معین می شود. بالاترین انشعابهای در راستای مثبت دارای ولتاژهای اولین انشعاب با شکل ناقص در ۱۳۲ کیلوولت هستند، و از اینروی ولتاژهای انشعاب ثانویه برای انشعابهای بالاتر از نقطه عطف یا تغییر کامل ، کاهش می یابند.

این انشعابها، انشعابهای با توان کاهش یافته خواهند بود، زیراجریان انشعاب این سیم پیچ در ۱۰۰۰ آمپر ثابت می ماند.

انتخاب انشعاب با بیشترین جریان و بهره گیری از آن در ردیف انشعابهای روبه علامت منها (محدود سازی جریانهای انشعاب سیم پیچ اولیه) در این مثال کاربردی ندارد.



یادآوریها :

۱- حرف A به سیم پیچ انشعابدار اشاره دارد. حرف B به سیم پیچ بدون انشعاب اشاره دارد.

۲- نقطه عطف یا تغییر کامل از CFVV (با شار ثابت) به VFVV (با شار متغیر) در ردیف انشعابهای دارای علامت مثبت نشان داده شده اند. این نقطه یک U_A ثابت در انشعاب با بیشترین ولتاژ را شکل می دهد، که برای انشعابهای بالاتر از نقطه عطف ، افزایش نمی یابد.

۳- نقطه شکست اختیاری دیگر ، در انشعاب با بیشترین جریان، در ردیف انشعابهای با علامت منفی نشان داده شده است.

(I_A ثابت است و برای انشعابهای زیر انشعاب با بیشترین جریان ، افزایش نمی یابد).

شکل ۳۲-نمایشی از تغییر ولتاژ ترکیبی *(C_bVV)* در انشعاب با بیشترین جریان

(در ردیف با علامت منها)

۸-٤-۷ تکمیل جدول کمیتهای انشعاب ها، گزینش انشعاب اصلی

در این مرحله، کمترین و بیشترین نسبت تبدیل ولتاژ برقرار شده است. در میان این دو مقدار دو نسبت تبدیل وجود دارند، که در آن نقطه های عطف (با تغییر کامل) ولتاژ انشعاب و جریان انشعاب در سیم پیچ انشعاب جای می گیرند.

در سراسر ردیف انشعابهای میان نقاط عطف، توان اسمی اعمال می شود.

بیرون از این ردیف، توان انشعاب در راستای هر دو انتها کاهش می یابند.

انشعاب اصلی در این گستره انشعابها و در مرکز ردیف اعمال توان کامل جای می گیرد و ترجیح دارد که درست در میانه (وسط) ردیف کامل انشعابها باشد.

بدین روال ولتاژ انشعاب و جریان انشعاب سیم پیچ انشعاب دار در انشعاب اصلی تا مقدار کمیت های نامی برای سیم پیچ انشعاب دار افزایش می یابند.

مثال (ادامه)

مشخصات انشعاب اصلی سیم پیچ اولیه در میانه (وسط) ردیف کامل انشعابها به طور تقریبی در نسبتهای ۵/۵۰۷ : ۱۲۱/۱۵ kV برقرار شده است.

استخوان بندی جدول انشعابها اینک کامل شده است. باقی می ماند که آن را تنظیم و تکمیل کنند و با شماره های گامهای استاندارد که برروی کلید یا دستگاه تنظیم ولتاژ برای برخی مجموعه های استاندارد درصدهای انشعاب موجود است، پرکنند. جمع بندی جریان ها و ولتاژها در ترانسفورماتور تنظیم شده $CbVV$ مطابق جدول شماره ٤ میباشد .

جدول ۴- تغییر ترکیبی ولتاژ : کمیت های انشعاب

انشعاب	نسبت تبدیل	ولتاژ انشعاب		جریان انشعاب	
در راستای علامت مثبت	n_{max} . . n_u	U_{1max} . . U_{1max}	$< U_{2r}$ . . U_{2r}	$<I_{1r}$ . . I_{1r}	I_{2r} . . I_{2r}
اصلی	n_r	U_{1r}	U_{2r}	I_{1r}	I_{2r}
در راستای علامت منها	n_1 . . n_{min}	$< U_{1r}$ . . U_{1min}	U_{2r} . . U_{2r}	I_{1max} . . I_{1max}	I_{2r} . . I_{2r}

مثال (ادامه)

در ترانسفورماتور این مثال، مقادیر منتجه گرد شده مناسب برای هـر اسـتعلام یـا منـاقصـه چنیـن می باشند:

- توان : ۳۸ MVA
- نسبت ولتاژ : kV ۲٪ ۱/۵ ❄ ۸± ۱۲۱
- تنظیم : ولتاژ ماکزیمم ۱۲۳ کیلوولت $C_b\ VV$

پارامترهای (فراسنجهای) یک تراسنفورماتور واقعی که در این زیربنـد درنظـر گرفتـه شـده اسـت می توانند به همان سان که در جدول ۵ دیده می شود، جدول بندی گردند. این جـدول همچنیـن نتایج نهایی احتمال را نشان می دهد که برپایـه آنـها یـک ترانسـفورماتور را مـی تـوان مشـخص ساخت. بدین معنا که،با یک تغییر ناچیز در ولتاژ انشعاب اصلی و به کارگیری یک کلید تنظیم ۱۶ پله و ۱۷ موقعیتی، بدان رسید.

جدول شماره ۵- پارامترهای ترانسفورماتور

نسبت / ضریب انشعاب	ولتاژ کیلوولت		جریان آمپر		توان	ملاحظات
٪	فشارقوی	فشارضعیف	فشارقوی	فشارضعیف	(MVA)	
۶/۱۵۰ ÷ ۱۱۱/۵	۱۲۳	۲۰	۱۶۲/۶	۱۰۰۰	۳۴/۶	
۵/۵۹۱ ÷ ۱۰۱/۵	۱۲۳	۲۲	۱۷۸/۹	۱۰۰۰	۳۸/۱	مداکثرولتاژانشعاب
۵/۵۰۷ ÷ ۱۰۰	۱۲۱/۱۵	۲۲	۱۸۱/۶	۱۰۰۰	۳۸/۱	انشعاب اصلی
۴/۸۶۴ ÷ ۸۸/۵	۱۰۷	۲۲	۲۰۵/۶	۱۰۰۰	۳۸/۱	

۹ کاربردهای مبدل با ترانسفورماتور های استاندارد

بند ۱ از استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ تعیین می کند که ترانسفورماتور برای مبدلهای ایستایی، نوع ویژه ای بوده و از مقوله کلی ترانسفورماتورهای قدرت که در استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰به طور کامل قابل اجرا است، برکنار است. (به استاندارد ملی ایران به شماره ...[1] رجوع شود).

این بند، ملاحظاتی را نشان می دهد که در صورت به کارگیری ترانسفورماتور قدرت اندازه متوسط، با بروشور استاندارد باید برای کاربرد مبدل به کار برده شوند. دو موضوع باید مورد توجه قرار گیرد:

- تاثیر ولتاژ مزاحم
- تاثیر جریان فراهم

۱- *تا تدوین استاندارد ملی به استاندارد IEC61378-1 رجوع شود.*

۹-۱ تاثیر ولتاژ مزاحم

یک ترانسفورماتورکه، یک مبدل را از شبکه عمومی برق که دارای ولتاژ مزاحم ناچیز است، تغذیه می کند (با توجه به تاثیر روی تلفات هسته و گرمایش هسته).

یک ترانسفورماتور با برقدار شدن اولیه اش از یک مدار مبدل ممکن است دارای یک ولتاژ با شکل موج کاملا پیچیده باشد که لحظه به لحظه تغییر می کند. در یک وضعیت کلی، شکل موج شار در هسته که انتگرال تابع ولتاژ اعمال شده میباشد ، کمتر از شکل موج ولتاژ، دچار اعوجاج میشود . پارامتر ولتاژ اصلی که مقدار دامنه چگالی شار را تعیین می کند، مقدار میانگین ولتاژ بوده و نه مقدار مؤثر. شکل موج واقعی ولتاژ باید در استعلام برای این گونه اجرا، ارائه شود.

کاهش مقادیر نامی ترانسفورماتور با توجه به ولتاژ، معمولا لازم نیست.

بسیاری از مدارهای مبدل با فرکانسی غیر از فرکانس سیستم تغذیه و گاهی حتی با فرکانس متغیر کار می کند. البته این موضوع باید در استعلام ذکر شود.

یک مسئله ویژه، ممکن است نامتقارن بودن شکل موج اعمال شده از مبدل، توسط کنترل ناقص حرارت دهنده باشد این امر ممکن است باعث به اشباع رسیدن شود، یعنی به دلیل یک مؤلفه جریان مستقیم *(d.c.)* .

۹-۲ تاثیر جریان مزاحم ، کلیات

یک شکل موج جریان مزاحم، باعث افزایش اضافه تلفات در ترانسفورماتور توسط تلفات گردابی در سیم پیچها و تلفات پراکنده در بخشهای مکانیکی فلزی است. هر دو گونه تلفات مربوط به توان دوم از زمان مشتق شده شار نشتی است و به ترتیب مناسب با جریان سیم پیچ است. اثر دیگر جریان فراهم ، افزایش میزان صدا از ترانسفورماتور، شامل بیشترین صدا از فرکانس های بالا است.

۱- *r.m.s (Route mean square)*

افزایش اضافه تلفات، باعث بیشتر شدن افزایش دمای میانگین است. این امر ممکن است به خودی خود قابل اعتراض باشد، لیکن احتمال خطری نیز از آسیب رسیدن در اثر افزایش دمای محل نقاط گرم است. این موضوع در بندهای فرعی زیر، بحث می شود.

۳-۹ تلفات گردابی در سرتاسر سیم پیچ

محاسبه تلفات گردابی در سیم پیچ، معمولا به کمک طیف موج همساز (هارمونیک) انجام میگیرد که ترجیحا باید در استعلام ارائه شود.

برای سیم پیچهایی که از هادیهای گرد یا راست گوشه ساخته شده، تلفات گردابی معینی از هارمونیک ها با مجذور فرکانس، افزایش می یابد. سهمی از موج همساز jام، دارای یک مقدار مؤثر I_j آمپر است که ممکن است بصورت زیر نوشته شود:

$$P_{ej} = \text{مقدار ثابت} \times (j \times I_j)^2$$

بنابراین مجموع تلفات گردابی (P_e) در سیم پیچ از طیف تمامی جریان، ممکن است بصورت مضربی از تلفات گردابی برای فرکانس توان اصلی ذکر گردد (P_{e1}) که با محاسبه مرسوم بدست می آید. مقادیر نوعی P_e / P_{e1} در محدوده ۲ تا ۳ است، چنانچه بار مبدل توسط جریان مستقیم $(d.c.)$ نسبتا خوب مسطح شده، باشد.

جریانهای مبدل سه فاز در اصل فقط شامل هارمونیک های معینی هستند. هارمونیک های بالاتر کاهش می یابد، زیرا در حین عبور از راکتانس یکسوساز شکل موج هموار میگردد (برای کسب اطلاعات بیشتر به کتابهایی در مورد مدارهای مبدل رجوع شود).

فرضیه و برآورد در رابطه بالا، فقط مربوط به سیم پیچهائی با هادیهای گرد یا راست گوشه است. سیم پیچهای ترانسفورماتور با پهنای کامل ورق نازک (فویل) یک جریان متمرکز به طرف لبه سیم پیچهای فویل را ارائه می کند و از این رو فرضیه پیچیده تر میگردد. چنانچه این گونه

ترانسفورماتورها برای بارگیری مبدل اعمال شود، باید تاییدیه این نکته که طرح مناسب اســت، از سازنده درخواست گردد.

۹-۴ تلفات پراکندگی در بخشهای مکانیکی

پیشگوئی این گونه تلفات مشکلتر از پیش گویی تلفات، گردابی است. ایـن تلفـات در مـواد فـرو مغناطیسی رخ می دهد (هسته فولادی یا ساختمان فولادی) و نفوذ آن بصـورت پدیـده غـیرخطی اســت کـه در تحلیـل هـای قبلـی نمـی گنجـد. تلفـات پراکنــدگی در بخشــهای مکــانیکی در ترانسفورماتورهای مبدل ویژه وبزرگ بسیار مهم اســت، لیکـن چنانچـه یـک ترانسـفور معمولـی کوچک برای بار مبدل به کار می رود، معمولا نقش عمده ای را به عهده ندارد.

۹-۵ مجموع اضافه تلفات ، امکان کاهش مقادیر اسمی

مجموع اضافه تلفات (تلفات گردابی در سـیم پیچـها بـه اضافـه تلفـات پراکنـدگی در بخشـهای مکانیکی) در جریان اسمی سینوسی را ممکن است پس از آزمون جــای اتصـال کوتـاه بـا انـدازه گیری تلفات در چندین فرکانس تعیین کرد. این روال تعیین می کند که آن بخشــی از تلفـات کـه تابع مجذور فرکانس و آن بخشی از تلفات تابع فرکانس نسبت به توان بالای واحد است. تناسـب میان هر دو، تابع طرح است.

مجموع اضافه تلفات که برای یک شکل موج مبدل انتظار می رود، ممکن است به طور نوعـی در محدوده ۱/۵ تا ۲ برابر تلفات مربوط با جریان سینوسی در طی آزمون جاری ترانسفورماتور تعیین شده باشد.

از لحاظ افزایش دمای میانگین، ممکن است محدودیت جریان دائم قابل مجاز در بهره وری کمـی پایین تر از جریان نامی، توصیه گردد، به طوری که جمع تلفات (I^2R) به علاوه اضافــه تلفـات، بالاتر از بار در مبدل از جریان نامی سینوسی نشود.

۹-٦ نقاط داغ محلی

شدت تلفات گردابی از نقطه به نقطه سیم پیچ که تابع تجمع محلی و جهت میدان پراکنده آهن ربایی است متفاوت می باشد. تجمع در بخشهای نزدیک به کانال میانی سیم پیچ اولیه و ثانویه منتهی می شود که نوعاً سه برابر مقدار میانگین است. هنوز تجمعهای بیشتری ممکن است به طور مکانی غالب باشد.

افزایش دمای میانگین یک سیم پیچ ترانسفورماتور بالاتر از میانگین ماده خنک کنندگی اطراف (روغن یا هوا) تاثیر مستقیمی روی عمر سیستم عایق بندی اش دارد. این اختلاف دما (شیب سیم پیچ) مناسب با (تلفات) ۰/۸ سیم پیچ در یک ترانسفورماتور خود خنک کننده است. تشخیص داده شده است که دماهای نقطه داغ محلی ممکن است بیشتر از ۱۵ درجه سلسیوس تا ۳۰ درجه سلسیوس ، داغ تر از دماهای میانگین سیم پیچ در نوع ترانسفورماتورهایی که با روغن پرشده و نوع خشک است، در شرایط بارگیری نامی سینوسی، باشد. معمولا شیب های میانگین سیم پیچ در شرایط بارگیری سینوسی اندازه گیری می شوند.

تلفات گردابی و پراکندگی در یک ترانسفورماتور می تواند هنگامی که تغذیه بارهای هارمونیک صورت میگیرد افزایش یابد هنگامیکه از یک مبدل استفاده میشود. این امر می تواند نتیجه افزایش دماهای نقطه داغ مکانی و در نتیجه کم شدن عمر یک ترانسفورماتور ، باشد.

بسیار مهم است که از موج همساز مورد انتظار در بار مبدل، هنگامی که مشخصات یک ترانسفورماتور را برای این منظور تعیین می کنیم، مشخص شود .

۱۰ راهنمایی برای اندازه گیری تلفات در ترانسفورماتورهای قدرت

۱۰-۱ نتایج آزمون، تضمین ها، رواداری ها، محدودیت های عدم قطعیت

بندهای فرعی در بخشهای گوناگون استاندارد IEC ٦٠٠٧٦ شامل قواعدی هستند که چگونه اندازه گیریهای اصلی باید ارزشیابی وتصحیح شوند، در صورتی که آزمون در شرایط دیگری غیر از شرایط مرجع انجام شود یا تعداد آزمونها از مقدار هدف مشخص شده، متفاوت باشد.

بند ۹ از استاندارد ملی ایران به شماره ۲٦۲۰ شامل انحراف مجاز از حدود مورد نظر(خطای مجاز) پارامترهای تضمین شده ترانسفورماتور می باشد که در آزمون بررسی شده است.

هرگاه نتیجه آزمون بصورت مقدار عددی بیان شده باشد (و نه فقط بصورت داوری در باره ایستادگی درروش یک آزمون) نه تنها این یک عدد دقیق نیست، بلکه دچار عدم قطعیت میباشد. این که این عدد تا چه مقدار دچار عدم قطعیت میباشد، تابع کیفیت نصب تجهیزات آزمون است، به ویژه سیستم اندازه گیری اش، و به مهارت کارکنان و پیچیدگی اندازه گیری ارائه شده توسط موضوع آزمون ، بستگی دارد.

نتیجه آزمون ارائه شده شامل بیشترین برآورد صحیح ممکنه و براساس اندازه گیریهای انجام شده، میباشد. این مقدار باید همان طور که هست، پذیرفته شود. حاشیه عدم قطعیت نباید در قبول تضمین با حد خطای مجاز مثبت یا حدود خطای مجاز برای اجرای داده های موضوع آزمون مورد داوری قرار گیرد.

هرچند یک شرط برای قبول تمامی آزمون این است که خود آزمونها باید مقررات معین کیفیت را برآورده سازد. اظهاریه محدودیتها یا عدم قطعیت در دسترس میباشند و این اظهاریه ها باید توسط مدارک مستند، پشتیبانی شوند (به استاندارد ISO ۹۰۰۱ رجوع شود).

۲-۱۰ قابلیت پیگیری، جنبه های کیفیت در تکنیک اندازه گیری

قابل پیگیری بودن اندازه گیری ها به این معناست که زنجیره ای از کالیبراسیون ها و مقایسه ها انجام شده است، که توسط آن بتوان اعتبار اندازه گیری جداگانه را نسبت به استانداردهای ملی وبین المللی از واحدهای نگاهداری شده در مؤسسه های شناخته شده اوزان و مقیاس، ردیابی نمود. مدارک قابل پیگیری بودن آزمونها و تجهیزات باید شامل موارد زیر باشد .

الف) اطلاعات گواهی شده در باره خطاها (خطاهای دامنه و خطاهای زاویه فاز) از مؤلفه های سیستم اندازه گیری (ترانسدیوسرها برای ولتاژ، جریان و توان، تقسیم کننده های ولتاژ و مقاومت های موازی، وسائل اندازه گیری ثبات یا نشان دهنده ها و غیره).

این امر ممکن است شامل :

- گواهی ها از سازندگان هر کدام از قطعات
- گواهی کالیبراسیون ها که توسط آزمایشگاه های دقیق و مستقل انجام شده است.
- گواهی های کالیبراسیون که توسط ابزار دقیق اندازه گیری و گروه متخصص صورت گرفته و بدین منظور تهیه شده است.
- مقایسه های مستقیم وسایل نصب شده در اتاق آزمون با یک سیستم کامل دقیق اندازه گیری (کالیبراسیون کل سیستم) بند فرعی ۱۰-۳ و ۱۰-٤ زیر، اهمیت ویژه خطاهای زاویه فاز برای اندازه گیری تلفات بار نسبت به ضرب توان بسیار پائین ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده را نشان می دهد. خطاهای زاویه فاز در ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان معمولی قابل وصل مجدد، تابع ابزار ترکیبی امپدانس زیربار است و با ولتاژ واقعی یا مقدار جریان سرتاسر هر محدوده اندازه گیری تغییر میکند. این امر برای جور کردن خطاهای سیستماتیک نامشخص (که ممکن است برای مواردی تصحیح شده باشد) و خطاهای اتفاقی که در حالت ویژه نمی توان آنها را حذف کرد، دشوار است.

ب) اطلاعات درباره کیفیت منبع توان آزمون: موج همساز (هارمونیک) ولتاژ، پایداری ولتاژ و فرکانس بندهای آزمون در استاندارد ملی شماره ... شامل محدودیت های معینی از شکل موج ولتاژ به طور کلی و به ویژه برای آزمون ترانسفورماتورها در حالت بی باری است. این مقررات منتج به مقرراتی مربوط به منبع آزمون، امپدانس درونی اش و اتصال ها می گردد. این امر باید

معلوم و به حساب آورده شود. چنانچه بازرسی شکل موج به طور مستقیم در طی آزمونهای مستقل انجام نشود، اطلاعات سیستماتیک از مطالعات ویژه باید در دسترس باشد.

پ) اطلاعات در باره محیط آزمون برحسب مزاحمت الکتریکی (میدانهای الکترومغناطیسی، اتصال زمین ، حفاظت).

این امر بایستی برپایه رسیدگی و مراقبت صدای اتفاقی باقی مانده و سیگنالهای مخلوط وارد شده در سیستم اندازه گیری توسط ظرفیت های خازنی پراکنده یا توسط القاء آهن ربایی یا افت ولتاژ در اتصالات یا غلاف های پوششی کابل که ممکن است گردش جریان به زمین را هدایت کند صورت پذیرد. این رسیدگی بایستی با اجرای یک آزمون بدل با آزمون واقعی توان مورد بحث قرار گیرد، لیکن با ورودیهای سیگنال باز کننده یا اتصال کوتاه به سیستم اندازه گیری، حرکت یا پیچیدن اطراف مؤلفه ها و به کارگیری غلاف اضافی یا اتصال زمین در وضعیتی سیستماتیک یا هوشمندانه، صورت پذیرد .

ت) تحلیل خطاهای سیستماتیک و اندازه گیری عدم قطعیت برای نوع ویژه آزمون تحت بررسی، براساس ردیف های (الف) تا (پ) گفته شده در بالا. این تحلیل بساید حاوی یک روش تحلیل منطقی، درنظر گرفتن عمل متقابل و ترکیب منابع گوناگون خطای سیستماتیک و اتفاقی عدم قطعیت، باشد.

این تحلیل باید میان عدم قطعیت اتفاقی و خطای سیستماتیک فرق بگذارد و وضعیتی را بسازد که چگونه خطاهای مستقل گوناگون، با هم جمع شده اند، ترکیب یک چهارم از خطاهای گوناگون (ریشه دوم مجموع) یا جمع خطی (حداکثر خطای ممکن).

این تحلیل باید دارای جزئیات زیر باشد :

- حدود ظرفیت های اندازه گیری سیستم آزمون
- تنظیم ابزار اندازه گیری های به کار رفته برای اندازه گیری

- یک نمونه از ارزشیابی داده های آزمون با روش تصحیح به کار رفته مربوط به تنظیم ابزار اندازه گیری

ث) بخش آزمون باید دارای روال عادی برای نگهداری دایم کیفیت اندازه گیری باشد .این امر باید توسط کنترل منظم و کالیبراسیون جاری برای مؤلفه ها و تمامی سیستم باشد. این مقوله ممکن است شامل مقایسه هر دو عملکرد هر دو آزمایشگاه [1] بین سیستم های مربوطه باشد و کنترل پایداری و دوره ای کالیبراسیون مجدد مولفه ها همان طور که در بند الف نشان داده شده است، را صورت می دهد .

۱۰-۳ منابع اصلی خطا در اندازه گیری تلفات بار در ترانسفورماتورهای قدرت

روش تعیین تلفات بار در بند ۱۰-٤ استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰ بصورت زیر داده شده است :

" امپدانس اتصال کوتاه و تلفات بار در هر جفت سیم پیچ باید در فرکانس اسمی همراه با اعمال ولتاژ تقریبا سینوسی به ترمینالهای آن سیم پیچ ، اندازه گیری شود، در حالیکه ترمینالهای سیم پیچ دیگر با یکدیگر اتصال کوتاه شده باشند، با این فرض که مدار سیم پیچهای دیگر باز بمانند."

تلفات بار بصورت بخش مقاومتی امپدانس سری مدار معادل ترانسفورماتور، نمایش داده میشود. امپدانس سری بصورت خطی مورد توجه قرار می گیرد. این بدان معناست که تلفات بار با مجذور جریان تغییر میکند. اندازه گیری جریان آزمون، یک خطای اضافی جهت تعیین کردن تلفات است. تغییرات تلفات بار در اثر دما نیز قابل ملاحظه است. پیوست (ث) از استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰ توضیح می دهد که چگونه با تلفات I^2R و اضافه تلفات باید عمل کرد، هرگاه تلفات بار مجددا برای دمای مرجع سیم پیچ محاسبه شده باشد. بنابراین خطاها در اندازه گیری قبلی مقاومت و در ارزیابی دمای سیم پیچ در طی اندازه گیری تلفات، در خطای مقدار تلفات ارزیابی شده و در دمای مرجع، سهیم است. در بند ۱۰-٤ استاندارد ملی شماره ۲٦۲۰ هشدارها داده شده است.

۱- *in- house*

امپدانس های سری ترانسفورماتور ، عمدتا سلفی است. ضریب توان امپدانس با افزایش مقدار توان اسمی، کاهش می یابد.

یک مثال نوعی :

الف) ترانسفورماتور با توان ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر : تلفات بار ۱ درصد توان اسمی، امپدانس اتصال کوتاه ٦ درصد امپدانس مرجع – ضریب توان امپدانس سری، ۰/۱٦۷

ب) ترانسفورماتور با توان ۱۰۰ مگاولت آمپر : تلفات بار ۰/٤ درصد ، امپدانس اتصال کوتاه ۱۵ درصد ، ضریب توان برابر با ۰/۰۲۷

در طی آزمون، ولتاژ ، جریان و توان حقیقی با به کارگیری سیستمهایی که شامل ترانسدیوسرها برای تطابق مقادیر بالای ولتاژ و جریان نسبت به ابزارهای اندازه گیری هستند، اندازه گیری شده است. سیستمهای معمولی شامل ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوع سلفی برای ولتاژ و جریان برای تغذیه ابزارهای نشاندهنده از نوع الکترومکانیکی می باشند. سیستمهای اندازه گیری با طرحهای تازه تر، از ترانسفورماتورهای جریان دو مرحله ای یا شار صفر[۲]، تقسیم کننده های ولتاژ خازنی، تقویت کننده های مسدود کننده، وات مترهای چند برابر کننده دیجیتالی و غیره ، استفاده میکنند. انواع گوناگون سیستمهای اندازه گیری، ویژگیهای گوناگونی با توجه به اندازه گیری خطا ارائه می دهند، لیکن برخی مشاهدات از شواهد معمولا معتبر است. تلفاتی که باید اندازه گیری شود، بر طبق تعریف برابر است با : $P = U \times I \times Cos\ \phi$.

خطای مرکب نسبی توسط لگاریتم گیری طبیعی از هر دو عامل به دست می آید و سپس از آن دیفرانسیل میگیرند :

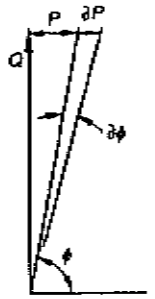
$$\frac{\partial P}{P} = \frac{\partial U}{U} + \frac{\partial I}{I} - \frac{Sin\phi}{COS\phi} \times \partial\phi$$

۱- *two – stage*

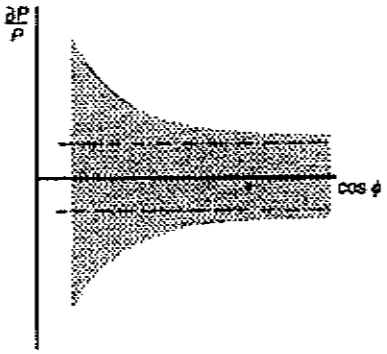
۲- *zero – flux*

زاویه فاز ϕ میان فازهای ولتاژ U و جریان I نزدیک $\pi/2$ (۹۰ درجه سلفی) است. ضریب توان $Cos\ \phi$ یک رقم کوچکی است. ضریب را در جلو ϕ مجددا می نویسیم :

$$-\frac{\sin\phi}{\cos\phi} = -\frac{\left(1-\cos^2\phi\right)^{\frac{1}{2}}}{\cos\phi} \approx -\frac{1}{\cos\phi}$$



شکل ۳۳ الف – نمودار فازی نشان دهنده خطای اندازه گیری



شکل ۳۳ ب – خطای نسبی بصورت تابعی از ضریب توان

شکل ۳۳- خطای نسبی اندازه گیری

این رقم ، یک عدد بسیار بزرگ‌تر از واحد است که برآورد یک خطای نسبی معین زاویه فاز (برحسب رادیان) منتج به یک خطای نسبی بسیار بزرگتر دربرآورد تلفات می شود، درحالیکه خطاهای نسبی در دامنه های ولتاژ و جریان بدون اهمیت زیادی در این امر دخیل هستند . در شکل ۳۳ – الف سعی براین است که این امر را به طور نموداری نشان دهد. بنابراین عدم قطعیت برآوردهای تلفات بصورت یک تابع ضریب توان امپدانس ترانسفورماتور دارای شکل کلی نشان داده شده در شکل ۳۳ – ب است .

بنابراین مسئله اصلی برای اندازه گیری تلفات بـار در تراسـنفورماتورهای قـدرت ایـن اسـت کـه چگونه باید جابجائی فاز در سیستم اندازه گیری کامل یا در مولفه های مستقل آن را کاهش داد تـا تصحیح گردد .

۴-۱۰ خطای زاویه فاز در سیستم اندازه گیری تلفات معمولی- امکان تصحیح

سیستم اندازه گیری معمولی شامل نوع آهن ربایی ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان و یک واتمتر الکترودینامیکی میباشد. تراسنفورماتورهای اندازه گیری دارای خطای زاویه فاز به ترتیب δ_v و δ_i (برحسب رادیان) میباشند. ضریب القایی (اندوکتانس) سیم پیچ واتمتر، تـاخیر فـازی میـان ولتـاژ اعمالی از ترانسفورماتور ولتاژ و جریان در سیم پیچ ابزار اندازه گیـری، بوجـود مـی آورد. مقـدار عددی از این جابه جایی کوچک فاز (مجددا برحسب رادیان) برابر با $\omega L/R$ است، کـه در آن L ضریب القایی سیم پیچ ولتاژ و R برابر تمامی مقاومتهای سری در ابـزار انـدازه گیـری و جعبـه های مقاومت بیرونی ممکنه، می باشد. این جابه جایی فاز واتمتر با δ_w نشان داده می شود.

چنانچه زاویه فاز اصلی میان ولتاژ و جریان در موضوع تست برابر ϕ باشد، زاویه فـاز واقعـی در واتمتر برابر خواهد بود با :

$$\phi' = \phi + \delta_v - \delta_i - \delta_w = \phi + \delta\phi$$

اگر کل خطای زاویه فاز $\delta\phi$ مثبت باشد، بنابراین ضریب توان برآورده شـده $(Cos\ \phi')$ کمـتر از مقدار صحیح آن یعنی $Cos\ \phi$ است. تصحیح تلفات اندازه گیری شده دارای علامت مثبت خواهـد بود:

$$P = P'\left(\frac{1}{1-\frac{\delta\phi}{COS\phi}}\right) = P'\left(1+\frac{\delta\phi}{COS\phi}\right)$$

معمولا خطاهای زاویه فاز با ضرائب فرعی درجه الکتریکی بیان می شود :

$$1 \text{ دقیقه} = \frac{\pi}{180 \times 60} = 0{,}291 \times 10^{-3} \text{ رادیان}$$

مثال :

ترانسفورماتوری دارای $Cos\ \phi = 0.03$ است، کل خطای زاویه فاز برابر ۳ دقیقه ، بنـابراین نتیجـه آن در خطای نسبی تقریبا برابر ۳ درصد در تلفات اندازه گیری شده است :

$$\frac{3 \times 0{,}291}{0{,}03} \times 10^{-3} = 2{,}91 \times 10^{-2} = 3\%$$

خطاهای زاویه فاز که توسط ترانسفورماتور ولتاژ و جریان باعث مـی گردد، در عمـل تشـخیص درست آن دشوار است. یک گواهی کالیبراسیون از یک آزمایشـگاه خـوب از نـوع انـدازه گیـری ترانسفورماتور معمولا تهیه می گردد، لیکن نمی تواند به طور رضـایت بخشـی، پارامترهـای قـابل تغییر مدار را (حدود اندازه گیری، مقدار در محدوده اندازه گیری، بار مجـاز ابـزار انـدازه گیـری) بپوشاند. درجه معمولی دقت در گواهی کالیبراسیون نـیز بـه طـور معمـول نسـبتا محـدود اسـت. تصحیح های در دسترس : برای شناخت خطاهای سیستماتیک شناخته شده نیز اعمـال مـی گردد. لیکن هنوز خطاهای سیستماتیک شناخته نشده وجود دارد که نمی توان آنها را تصحیح کرد.

دشواریهای دیگر از این واقعیت برخاسته می شود که هرگاه ابزارهای نوع آنالوگ به کار مـی رود، اغلب کج بودن واتمتر فقط بخش کوچکی از درجه بندی خواهد بـود، حتـی چنانچـه یـک ابـزار اندازه گیری با ضریب توان کوچک به کار رود. بنابراین عدم قطعیت نسبی اتفاقی قرائت به انـدازه ای بزرگ است که ممکن است خطاهای سیستماتیک شناخته شـده، از ایـنرو اعتبـار یـک مقـدار تصحیح شده (باحذف خطاهای سیستماتیک شناخته شده) بهتر از قرائت ناصحیح نمیباشد.

جمع بندی تمامی این گفتار بدان معناست که هرگاه یک سیستم اندازه گیری معمولی نوع توضیح داده شده برای یک آزمون به کار رفته شود تعیین یک تصحیح قابل اعتماد بسیار دشوار است، بـه طوری که نتیجه را به بالاترین درجه دقت برساند. اندازه گیری نمی تواند به آسانی به سوی

استانداردها ردیابی شود، مگر اینکه یک کالیبراسیون مستقیم با تنظیم ویژه سیستم اندازه گیری بـر روی کل سیستم انجام شود که برای یک آزمون ویژه به کار رفته است. در غـیراینصورت، بـرآورد عدم قطعیت احتمالی باید کاملاً محافظه کارانه باشد، که براساس تمامی محدودیتـها بـرای مؤلفـه های مستقل سیستم و عدم قطعیت مشاهده قرائت های ابزار اندازه گیری باشد.

۵-۱۰ سیستم های اندازه گیری پیشرفته

یک سیستم اندازه گیری پیشرفته ، این گونه استنباط می شود کـه شـامل ترانسدیوسـر جریـان دو مرحله ای جریان شار صفر و معمولا نوع خازنی مدارهای تقسیم کننده ولتاژ، تقویت کننـده هـای مسدود کننده الکترونیکی و مدارهای جبران سازی خطای قـابل تنظیـم، ترانسدیوسـرهای قدرتـی الکترونیکی دیجیتالی میباشد .

این یک ویژگی چنین سیستمی است که مؤلفه های مستقل باید تنظیم شوند و در برابر استانداردها با دقت فراوان کالیبره شوند، به طوری که خطاهای سیستماتیک آن بـا مقایسـه بـا محـدوده عـدم قطعیت اتفاقی، ناچیز باشد. بارگیری ابزار اندازه گیری، به عنوان یک منبع از خطا به دلیل تقویـت کننده خروجی، حذف می شود.

خطای زاویه فاز منتجه برای تمـامی سیسـتم، ممکـن اسـت برابـر بـا ۱۰۰ میکرورادیـان تـا ۲۰۰ میکرورادیان (۰/۳ دقیقه تا ۰/٦ دقیقه) باشد. با این گونه سیستم ها، حداکثر خطایی برابر بـا ۳ ± درصد ممکن است برای تعیین تلفات با ضریب توانی برابر با ۰/۰۲ یا حتی کمتر برسد.

یک محاسبه کلی از عدم قطعیت از این است که یا برای تمامی محدوده داده آزمونه معتبر است یا برای تنظیم های مستقل محدوده مؤلفه ها است. کالیبراسیون باید توسط کنترل های معمولی ادامـه یابد، برای مثال در برابر سیستم قابل حمل دیگر که فقط برای این منظور به کار رفته است.

سطح توان کم سیگنال در داخل سیستم های اندازه گیری پیشرفته، این امر را بـه ویـژه مـهم مـی سازد که سیستم اندازه گیری با دقت فراوان در برابر اختلال از میدانهای الکترومغناطیسـی و غـیره در زمان نصب، کنترل شده است (به بند ۱۰-۲ پ رجوع شود).

۱۰-۶ اندازه گیری تلفات بی باری

اندازه گیری تلفات بی باری با اندازه گیری تلفات بار برای همان ترانسفورماتور تفـاوت دارد، کـه در آن ضریب توان به طور قابل ملاحظه ای بـالاتر اسـت و دیـگر اینکـه جریـان آزمـون بشـدت اعوجاج دارد.

تلفات بی باری در اصل، به ولتاژ سینوسی بدون اعوجاج در ترمینالهای تراسنفورماتور، ارجاع داده می شود.

بندهای فرعی ۱۰-۵ از استاندارد ملی شماره ۲۶۲۰ معیـاری بـرای شـکل مـوج رضـایت بخـش، براساس یک مقایسه میان قرائت های دو ولتمتر را ارائه مـی دهـد. بـه ترتیـب مقـدار حسـاسیت میانگین و مقدار مؤثر *(r.m.s)* را مشخص میکند .

این امر دلالت بر نیازمندیهای موردنظر نه فقط در شکل موج بی باری منبع تغذیه آزمون، بلکه نیز در امپدانس داخلی بعلت شکل موج جریان پیچیده واتصالاتش دارد.

جریان و توان بی باری به سرعت با ولتاژ اعمال شده، افزایش می یابد. از این رو انـدازه گیـری و تنظیم ولتاژ مهم است و تلویحا به عدم قطعیت تعیین تلفات کمک می کند.

به علاوه در استانداردملی شماره ۲۶۲۰ مشخص شده است که اتصالات یـک ترانسـفورماتور سـه فاز باید طوری ساخته شود که ولتاژهای اعمال شده به سرفازهای گوناگون سیم پیچ در حد امکان نزدیک به سینوسی باشد.

دشوارترین حالت، با توجه به نیازمندیهای توان آزمون (اعوجاج شکل موج ولتاژ) و اندازه گیـری توان ، معمولا هنگامی پدید می آید که روی ترانسفورماتورهای تکفاز بزرگ ، تحت آزمـون قـرار می گیرند.

بالاخره، تلفات بی باری اندازه گیری شده وابسته به تاریخچـه پیشـین مغنـاطیس کننـدگی اسـت. پسماند آهن ربایی در هسته، پس از اشباع در طی اندازه گیری مقاومت سیم پیچ با جریان مسـتقیم *(d.c.)* یا توسط ضربه های طولانی مدت یک جهته، ممکن است اثـری در نتـایج بـگذارد. گاهـی مغناطیس زدایی سیستماتیک از هسته ، پیش از اندازه گیری هـای بـی بـاری گاهـی نتـایج مـورد توجهی در پی داشته است.

پیوست الف

نسبت های اساسی برای اتصال تک فاز و دو فاز به زمین

(الزامی)

پیش از بروز عیب، یک سیستم متقارن ولتاژ بهره وری موجود است.

$$U = U^{+} \quad ; \quad U^{-} = U^{0} = 0$$

هرگاه عیب پدید آید، مؤلفه ولتاژ V^{0} ، V^{-} ، V^{+} می گردد.

امپدانس های اتصال کوتاه تمامی سیستم، به طوری که از عیب به دست می آید، Z^{0} ، Z^{-} ، Z^{+} هستند.

مؤلفه های جریان عیب همنهش I^{0} ، I^{-} ، I^{+} هستند.

رابطه های زیر اعمال می شود :

$$\left.\begin{aligned} U - V^{+} &= I^{+}Z^{+} \\ -V^{-} &= I^{-}Z^{-} \\ -V^{0} &= I^{0}Z^{0} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(الف ۱)}$$

بنابه تعریف، ولتاژها و جریانهای فاز عبارتند از :

$$\left.\begin{aligned} V_{A} &= V^{+} + V^{-} + V^{0} \\ V_{B} &= \alpha^{2}V^{+} + \alpha V^{-} + V^{0} \\ V_{C} &= \alpha V^{+} + \alpha^{2}V^{-} + V^{0} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(الف ۲)}$$

$$\left.\begin{aligned} I_{A} &= I^{+} + I^{-} + I^{0} \\ I_{B} &= \alpha^{2}I^{+} + \alpha I^{-} + I^{0} \\ I_{C} &= \alpha I^{+} + \alpha^{2}I^{-} + I^{0} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(الف ۳)}$$

حالت ۱- اتصال تکفاز به زمین روی فاز A

$$I_B = I_C = 0$$

(الف ٤)
$$-I^0 = \alpha^2 I^+ + \alpha I^- = \alpha I^+ + \alpha I^2 I^-$$

(الف ٥)
$$\therefore I^+ = I^- = I^0 = I$$

$$V_A = 0$$

(الف ٦)
$$\therefore V^+ + V^- + V^0 = 0$$

ترکیب معادلات (الف ٥) و (الف ٦) با جمع معادلات (الف ١) :

(الف ٧)
$$I^+ = I^- = I^0 = \frac{U}{Z^+ + Z^- + Z^0}$$

حالت ۲- اتصال به زمین روی فازهای B و C

(الف ٨)
$$\left.\begin{aligned} &V_B = V_C = 0 \\ &-V^0 = \alpha^2 V^+ + \alpha V^- = \alpha V^+ + \alpha^2 V^- \\ &\therefore V^+ = V^- = V^0 = V \end{aligned}\right\}$$

طبق رابطه (الف ١)

$$I^+ = \frac{U}{Z^+} - \frac{V}{Z^+}$$

$$I^- = -\frac{V}{Z^-}$$

$$I^0 = -\frac{V}{Z^0}$$

$$I_A = I^+ + I^- + I^0 = \frac{U}{Z^+} - V\left(\frac{1}{Z^+} + \frac{1}{Z^-} + \frac{1}{Z^0}\right) = 0$$

(الف ٩)
$$\left.\begin{aligned} &\therefore V = \frac{U}{Z^+} \times Z \\ &\text{و} \quad \frac{1}{Z} = \left(\frac{1}{Z^+} + \frac{1}{Z^-} + \frac{1}{Z^0}\right) \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} I^{+} &= \frac{U}{Z^{+}} - \frac{V}{Z^{+}} = \frac{U}{Z^{+}}\left(1 - \frac{Z}{Z^{+}}\right) = \frac{U}{Z^{+}} - \frac{U \times Z}{(Z^{+})^{2}} \\ I^{-} &= -\frac{U \times Z}{Z^{+} \times Z^{-}} \\ I^{0} &= -\frac{U \times Z}{Z^{+} \times Z^{0}} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(الف ۱۰)}$$