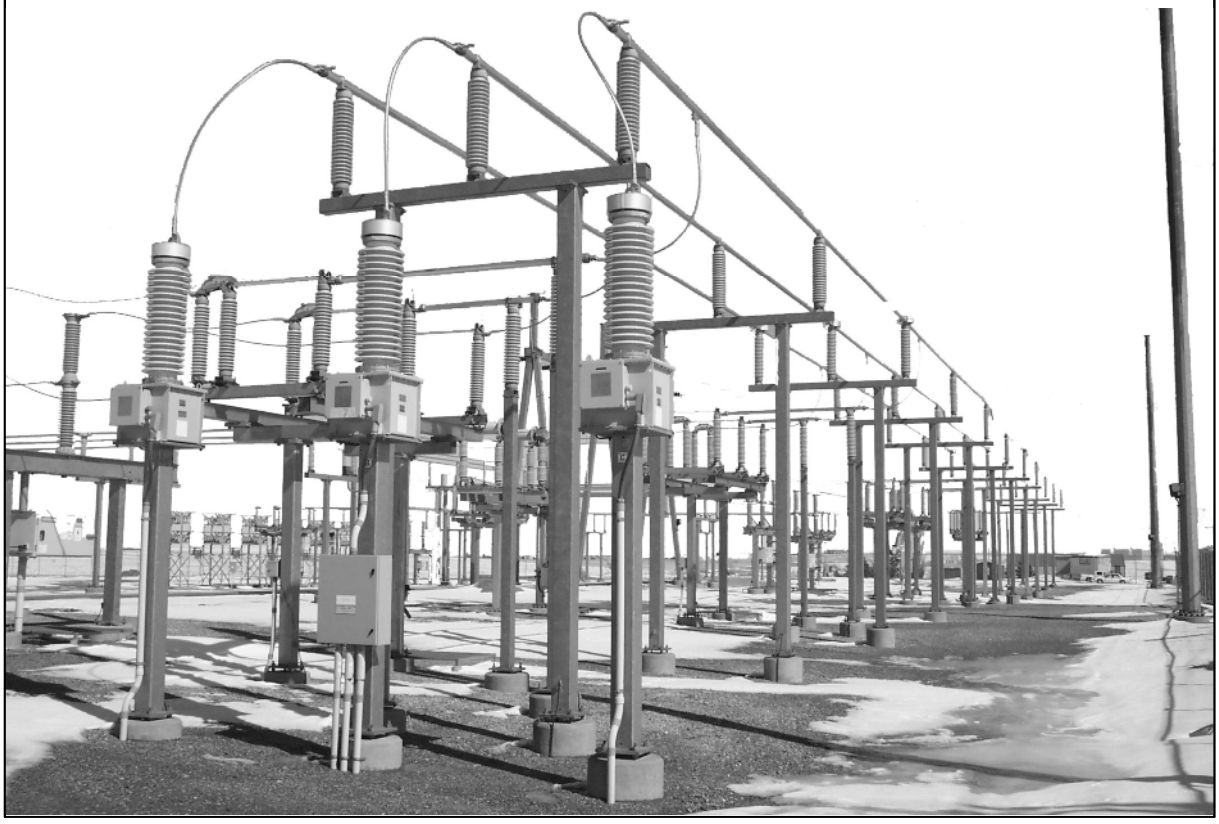
رله و حفاظت کارشناسی

حفاظت سیستمهای قدرت

دکتر زهرا مروج

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



به نام خدا

فهرست مطالب

فصل اول	**کلیدهای قدرت**
فصل دوم	**ترانسفورماتور های جریان و ولتاژ**
فصل سوم	**حفاظت اضافه جریان**
فصل چهارم	**حفاظت دیفرانسیل**
فصل پنجم	**حفاظت ترانسفورماتور**
فصل ششم	**حفاظت باسبار**
فصل هفتم	**حفاظت خطوط انتقال**
فصل هشتم	**حفاظت ژنراتور**

کلید های قدرت POWER CIRCUIT BREAKER

در یک پست فشار قوی کلید قدرت یکی از اساسی ترین اجزا می باشد.این کلید ها نقش اصلی در قطع و وصل نمودن و وارد وخارج کردن نیروگاه ها و مصرف کننده ها و خطوط انتقال در شبکه را به عهده دارند.به طور کلی مانور در شبکه برای تغییر در سیستم توزیع و انتقال انرژی توسط کلید های قدرت صورت می گیرد.در زمان وقوع عیب یا خطایی در شبکه کلید ها قسمت معیوب را به سرعت از مدار خارج نموده و از آسیب رسیدن به نیروگاه ها و وسایل و تجهیزات پست که هزینه های هنگفتی به دنبال دارد جلوگیری می کند.

عملکرد صحیح و به موقع کلید ها بسیار مهم است.کلید ها دستور قطع و یا وصل را از طریق سیستم های کنترل و یا سیستم های حفاظت(رله های حفاظتی)دریافت می نمایند.سیستم های کنترل بیشتر برای مانور در شبکه به کار می روند حال آن که سیستم های حفاظتی در موقع بروزعیب و یا خطا و به صورت اتوماتیک فرمان قطع را به کلید ها می دهند که در مورد سیستم های کنترل و حفاظت در بخش های دیگر مطالبی ارائه می شود.

کلید های قدرت در یک پست فشار قوی باید دارای مشخصات عمده ی زیر باشند:

_در حالت عادی که کلید بسته می باشد باید بتواند جریان نامی را به طور دائمی از خود عبور دهد .

_امکان انجام مانوررا در وارد و خارج کردن مدارها در شبکه به راحتی داشته باشد و جریان نامی را بدون اشکال قطع نماید.

_در حالتی که کلید باز می باشد بتواند اختلاف ولتاژ دو طرف کلید را به طور دائمی تحمل کند و در موقع باز شدن کلید نیز اضافه ولتاژ های موقتی را تحمل نماید.

_در موقع بروز اتصال کوتاه در شبکه پس از دریافت فرمان قطع در اسرع وقت و بدون اشکال بتواند جریان اتصال کوتاه را قطع و قسمت معیوب را از بخش های سالم ایزوله کند.

در موقع قطع و وصل جریان توسط کلید جرقه تولید می شود.در موقع وصل، شروع جرقه زمانی است که فاصله ی بین دو کنتاکت کلید برای تحمل ولتاژ کافی نباشد و در موقعی که کلید بسته شود و جرقه خاموش گردد که البته بسته شدن کلید ها ممکن است اضافه ولتاژهایی ایجاد کندکه منجر به خسارت دیدن کلید و یا

تجهیزات دیگر شود. به طور کلی به علت وجود شرایط مناسب تر در موقع وصل، قدرت وصل یک کلید در حدود ۲/۵برابر قدرت قطع آن می باشد. که این نکته باید در طراحی کلیدها مورد توجه قرار گیرد. وضعیت قطع جریان برای مدارهای اندوکتیو یا خازنی یا اهمی با هم متفاوتند .در زیر شرح مختصری در مورد قطع مدارهای مختلف ارائه می گردد.

معمولا جدا شدن کنتاکت های کلید پس از دریافت فرمان قطع در لحظه ای اتفاق می افتد که جریان صفر نمی باشد. لذا به محض جداشدن کنتاکت ها جرقه در دو سر کنتاکت ها به وجود می آید. در موقعی که جریان به صفر می رسد جرقه می تواند خاموش شود اما اگر فاصله ی بین دو کنتاکت به مقدار کافی برای تحمل ولتاژ دو سر آن نرسیده باشد مجدداً جرقه تولید می شود و جرقه تا رسیدن جریان به مقدار صفر در نیم سیکل بعدی ادامه خواهد داشت.همان گونه که می دانید در یک مدار سلفی جریان نسبت به ولتاژ به میزان ۹۰درجه تاخیر فاز دارد و موقعی که جریان به صفر می رسد ولتاژ به حد اکثر مقدار خود خواهد رسید که این موضوع احتمال برقراری مجدد جرقه در مدارهای سلفی را زیاد می نماید. در هر حال در این حالت بین دو کنتاکت باید فاصله به حد کافی برای تحمل حداکثر ولتاژ دو سر کنتاکت موجود باشد که این خود باعث طولانی شدن زمان جرقه خواهد شد.این موضوع در مدارهای اهمی چون بین جریان و ولتاژ اختلاف فاز وجود ندارد مطرح نیست و در زمانی که جریان صفر و جرقه خاموش می شود ولتاژ نیز صفر بوده لذا جرقه مجدداً برقرار نخواهد شد.

قطع مدارهای خازنی نیز در ابتدا جرقه تولید نموده و چون تاخیر ولتاژ نسبت به جریان در این مورد۹۰درجه است در موقع قطع جرقه (جریان صفر) ولتاژ نیز پیک بوده و این ولتاژ مستقیماً روی خازن قرار دارد و پس از قطع مدار روی آن باقی می ماند و از این لحظه ولتاژ بین دو سر کنتاکت لحظه به لحظه افزایش خواهد یافت به طوری که بعد از نیم سیکل به مقدار دو برابر ولتاژ پیک قبل از قطع کلید خواهد رسید.(این را ولتاژ برگشتRestrike Voltage می نامند).در نتیجه ی این ولتاژ زیاد ممکن است فاصله ی بین دو کنتاکت کافی نبوده و مجدداً جرقه برقرار شود.

شبکه ها در حالت عادی ترکیبی از مقاومت اهمی و اندوکتانس و کاپاسیتانس را داشته اما در موقع وقوع عیب چون مصرف کننده از مدار خارج می شود جریان تقریبن اندوکتیو بوده و قطع این جریان اهمیت می یابد. با توجه به مطالب فوق در طراحی کلیدها باید سعی شود تا حد ممکن جرقه ی حاصل دارای انرژی کمتری باشد ودر اسرع وقت خاموش شود.

تسریع در خاموش نمودن جرقه و کوچک نمودن آن باعث افزایش عمربهره برداری از کلیدها و همچنین کمتر آسیب دیدن تجهیزات دیگر می شود.

برای تسریع در خاموش نمودن جرقه می توان با ایجاد حوزه ی مغناطیسی طول قوس را افزایش داد و یا سعی در سریع خنک نمودن قوس (درجه حرارت قوس حدود ۱۰۰۰۰درجه سانتیگراد است)کرد.

در محفظهی کنتاکت ها می توان از روش ها ومواد مختلف برای ایجاد فاصله ی عایقی بین دو کنتاکت و نیز خاموش نمودن جرقه استفاده کرد.

مدار خاموش کننده می تواند جامد و یا مایع و یا گاز باشداز ایجاد خلا نیز می توان استفاده کرد.

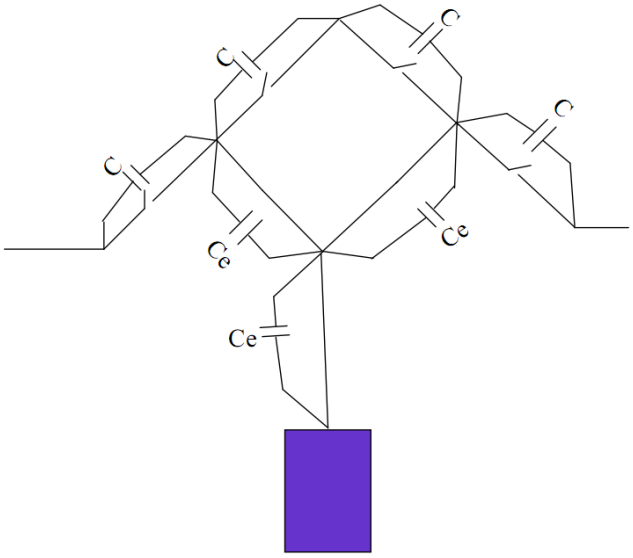
ماده ی جامد استفاده ی چندانی نداشته و مهم ترین خاموش کننده مایع روغن می باشد که سطح عایقی خیلی خوبی (حدود ۸۰کیلو ولت بر سانتی متر) دارد.روغن در موقع وقوع جرقه به دلیل وجود گرمای زیاد در اطراف قوس تجزیه و تبخیر شده و هیدروژن زیادی تولید می کند. هیدروژن تولید شده که هدایت حرارتی خیلی خوبی دارد به سرد شدن و تسریع در خاموش شدن جرقه کمک می کند.همچنین در روغن حامل های بار زیادی وجود ندارد لذا مقدار جرقه را کاهش می دهد. استفاده ازروغن در کلیدهای فشار قوی عمومیت دارد. یکی دیگر از خاموش کننده ها هوا (ازت)است که این روش قدیمی است و تا حال نیز استفاده می شود.هدایت حرارتی هوا در برابرهیدروژن چندان مناسب نیست.

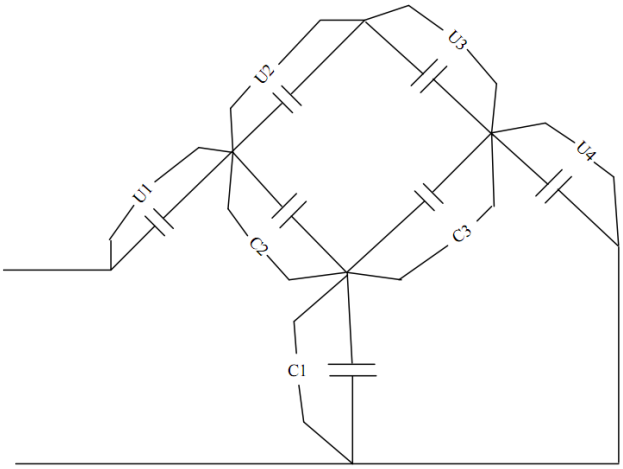
گاز سولفور هگزا فلورید (SF6) نسبت به دیگر گازها ارجح است و از نظر هدایت حرارتی و نیز خاصیت عایقی بسیار خوب است و امروزه در اکثر کلیدهای قدرت در ولتاژهای بالا و خیلی بالا استفاده می شود.

در ولتاژهای بالا باید سعی شود که در سریع ترین زمان فاصلهی کافی بین کنتاکت ها ایجاد شود اما چون فاصله ی مورد نیاز بیشتر از ولتاژهای پایین است به زمان بیشتری نیاز است.برای رفع این مشکل کلید های ولتاژ بالا را معمولاً با استفاده از چند جفت کنتاکت که به طور سری به هم متصل هستند طراحی می نمایند.

- به محض دریافت فرمان توسط کلید کلیهی جفت کنتاکتها همزمان شروع به بازشدن یا بسته شدن می نمایند.و مجموعاً فاصله ی مورد نیاز را تامین مینمایند، به منظور یکنواخت کردن ولتاژدر کلیه جفت کنتاکتها یک سری خازن یکنواخت کننده به صورت موازی با کنتاکت ها قرار می دهند.

شکل زیر این حالت را نشان می دهد:





ساختمان کلید ها را می توان به دو قسمت تقسیم نمود،یکی قسمت زنده که مربوط به کنتاکت ها است (Breaking Unit) و دیگری قسمت فرمان دهنده و یا مکانیزم عمل کننده که عمل قطع و یا وصل را انجام میدهد. (Operating Mechanism)

در زیر انواع کلیدها و سپس انواع مکانیزم های عمل کننده تشریح می شوند:

الف:انواع کلید ها:

انواع مهم کلیدها عبارتند از:

۱) کلید روغنی	Bulk Oil Type
۲) کلید حداقل(کم) روغن	Minimum Oil Volume
۳) کلید هوایی(دمنده)	Air Blast Type
۴) کلید گازی	SF6 Type
۵) کلید خلا	Vacuum Type
۶) کلید مغناطیسی	Magnetic Type

از کلید های فوق ، کلید های مغناطیسی به دلیل عدم توانایی در خاموش کردن جرقه برای ولتاژها و قدرتهای پایین استفاده می شود. کلید خلا نیز به دلیل وجود مشکلات عملی در ولتاژهای بالا استفاده نمی شود و فعلاً محدود به ولتاژهای پایین و متوسط (حدود ۱۰کیلو ولت) است. در زیر در مورد انواع کلیدها شرح مختصری ارائه می گردد:

1– کلید روغنی Bulk Oil Type

این کلید ساختمان بسیار ساده ای دارد و عبارت است ازیک محفظه(مخزن) فلزی که از روغن پرشده و کنتاکت ها درون روغن غوطه ور هستند. کنتاکت ها با هادی رابط که از داخل بوشینگ مخصوص روغن _هوا می گذرد، به بقیه ی تجهیزات پست متصل می شوند.(بوشینگ ها به عنوان فاصله ی عایقی بین زمین و فازها ویا فاز ها با یکدیگر استفاده می شوند و معمولاً در هنگام عبور و قطع یک قسمت زمین شده مانند تانک ترانسفورماتور و یا تانک کلیدها و یا عبور سیم هادی از دیوار و یا رابط بین دو قسمت برقدار یا عایق های متفاوت از بوشینگ استفاده می شوند).در سال های اخیر این کلید بسیار متداول است.روغن در این کلیدها نقش خاموش کنندهی جرقه و هم نقش عایق بین قسمت زنده(تحت تانسیون) و بدنه ی کلید (زمین شده) را دارد لذا هرچه ولتاژ بالا رود باید حجم مخزن روغن نیز بزرگ شود که در ولتاژ های زیاد وزن آن شدیداً سنگین خواهد شد و حمل و نقل آن را با مشکل روبرو می نماید. در این کلید ها برای خاموش شدن جرقه از مکانیزم خاصی استفاده نشده و معمولاً دو کنتاکت ثابت دارند که یک میلهی هادی (کنتاکت) متحرک آن ها را به هم وصل می کند و در هنگام قطع میله ی هادی به سرعت از دو کنتاکت ثابت دور می شود . خاموش شدن جرقه فقط با افزایش طول جرقه و ایجاد فاصله ی کافی امکان پذیر است .با توجه به پایین بودن تکنولوژی ساخت آن و حجم و وزن زیاد و در نتیجه مقرون به صرفه نبودن این کلید ها در حال حاضر ساخته نمی شوند اما

استفاده از تکنولوژی پیشرفته ی امروزی ، کلید های مشابهی که اکثراً عایق گازی دارند از نوع Tank Type در حال ساخت هستند که در این مورد بعداً توضیحاتی ارائه خواهد شد.

2– کلید حداقل(کم) روغن (Minimum)Small Oil Volume

با توجه به نیاز استفاده از کلید های با قدرت قطع و ولتاژ بالا در شبکه های امروزی معایب موجود در در طرح کلید های روغنی و با توجه به پیشرفت تکنولوژی پیشرفته تر تغییرات اساسی در طرح کلید های روغنی داده شده و در ساختمان کلیدهای حداقل روغن از روغن به عنوان ماده ی عایقی بین قسمت زنده(تحت تانسیون)و زمین استفاده نمی شود و روغن در این ماشین ها عمدتاً نقش خاموش کننده ی جرقه را به عهده دارد و لذا حجم روغن مورد نیاز به حداقل می رسد. قسمت برقدار(زنده)کلید معمولاً با استفاده از ایزولاتورهای جامد(پرسلین) از زمین ایزوله شده و قسمت برقدار در ارتفاع مناسب قرار دارد.کنتاکت ها در داخل یک محفظه استوانهای که قسمت خارجی آن پرسلین می باشد در داخل روغن قرار گرفته اند .

همان طور که در بالا ذکر شد روغن نقش خاموش کننده ی جرقه را دارد و از نظر عایقی نیز مادهی مناسبی در موقع باز بودن دو کنتاکت کلید است.

در موقع قطع کلید ، جرقه ایجاد می شود و در اثر جرقه حرارت زیادی تولید می شود که روغن اطراف قوس را تجزیه و تبخیر می نماید.

در اطراف جرقه ابتدا گازها که مقدار اعظم آن هیدروژن است قرار گرفته و در لایه های بعدی روغن داغ و مرطوب قرار می گیرد. به دلیل قابلیت هدایت حرارتی خوب هیدروژن و همچنین تبخیر و گرم شدن روغن ، درجه حرارت قوس کاهش یافته و وضعیت مناسبی رابرای خاموش کردن جرقه در هنگامی که جریان در حوالی نقطه ی صفر است ایجاد می کند. در موقع خاموش شدن جرقه باید فاصله ی کافی بین دو کنتاکت موجود باشد که این فاصله بستگی به زمان قطع جرقه و ماده ی عایقی بین دو کنتاکت دارد.گازهای تولید شده در جریان های زیاد دارای فشار زیاد است که از نظر عایقی مناسب است لذا به جلوگیری از از برقرارشدن مجدد جرقه کمک می کند. در ساخت این کلیدها سعی می شود که برای سرد نمودن جرقه ، روغن سرد را عمود بر مسیر جرقه حرکت داده و پس از گرم شدن و ایجاد گاز، گاز و روغن داغ از محل جرقه دور شوند.

در کلیدهای کم روغن یکی از کنتاکت ها متحرک ودیگری ثابت است. امکان ساخت این کلید برای کلیه ی ولتاژ ها میسر بوده و در حال حاضر از این نوع کلید تا ولتاژ ۱۰۰۰ کیلو ولت که بالاترین ولتاژ شبکه های موجود در دنیا است بدون هیچ اشکالی استفاده و بهره برداری می گردد.از نظر عملی تا ولتاژهای متوسط (در حدود ۶۳ کیلو ولت) یک جفت کنتاکت کافی بوده و در ولتاژهای بالاتر از تعداد جفت کنتاکت بیشتر استفاده می شود (هرچه ولتاژبالاتر رود تعدادکنتاکت ها نیز بیشتر می شود. برای مثال معمولاً در ولتاژ ۴۰۰ کیلو ولت تعداد ۵ و یا ۶ جفت کنتاکت و در ولتاژ های ۸۰۰ کیلو ولت تعداد ۸ جفت کنتاکت استفاده می شود.)

در طراحی کلیدهایی که دارای چند جفت کنتاکت می باشند معمولاً قطع و وصل هردو جفت کنتاکت با یک میله ی عمل کننده (میله ی متحرک قطع و وصل) صورت می گیرد.از نظر ظاهری ممکن است این کلیدها به شکل T یا Y ساخته شوند. قسمت عمودی مربوط به ایزولاتور عایق کننده نسبت به زمین و میله ی عمل

کننده مشترک بوده و در دو طرف آن و در قسمت بالا کنتاکت ها قرار دارند.(به شکل های ضمیمه رجوع شود.) ضمنن این نوع کلید ها معمولاً در مدت زمان حدود ۵۰ الی ۶۰ میلی ثانیه عمل قطع را انجام میدهند.

3– کلید هوایی Air Blast Type

برخلاف کلیدهای روغنی که خاموش کننده ی جرقه مایع می باشد در کلیدهای هوایی از هوای سرد فشرده شده استفاده می شود. کلیدهای هوایی با هوای آزاد ارتباط داشته وساختمان این کلید ها بدین گونه است که قسمت زنده(برقدار) معمولا در ارتفاع قرار گرفته است و در قسمت زیر و پایین کلید یک منبع ذخیره ی هوای فشرده قرار دارد که این منبع به قسمت کنتاکت ها در حالت عادی ارتباط نداشته اما در هنگام عمل کلید ، ارتباط برقرار شده و هوای سرد فشرده با فشار و مقدار ثابت و مستقل از جریان عبوری از کلید به سمت کنتاکت ها رانده می شود.

در طراحی کلید های هوایی معمولاً از دو کنتاکت یکی ثابت و دیگری متحرک استفاده می شود. موقع قطع ابتدا کنتاکت متحرک تا فاصله ی معینی حرکت می کند سپس متوقف می شود و هوای فشرده به صورت عمود بر محور جرقه با آن برخورد می کند ودر هنگام صفر شدن جریان آن را قطع می کند و همه ی گازهای یونیزه شده را از محفظه ی کلید خارج می نماید. پس از آن هوای فشرده قطع و کنتاکت متحرک تا نقطه ی نهایی حرکت می کند.

در این کلیدها باید توجه کرد که فاصله ی هوایی دو کنتاکت در هنگام قطع جرقه به گونه ای باشد که پس از قطع هوای فشرده دوباره جرقه برقرار نشود. با توجه به این که فاصله ی بین دو کنتاکت هواست و خاصیت عایقی هوا کمتر از روغن است. لذا فاصله ی بین دو کنتاکت در کلیدهای هوایی بیش از کلیدهای حداقل روغن است. بنابراین برای به حداقل رساندن زمان قطع کلید(کاهش زمان حرکت کنتاکت متحرک)از کنتاکت های بیشتری که به صورت سری به هم وصلند استفاده می شود. (Multi Breaking Unit). مشابه آن چه در مورد کلیدهای کم روغن اشاره شد هر دو جفت کنتاکت می توانند دارای یک میله ی عمل کننده باشند و از نظر ظاهری به صورت Tیا Yساخته شوند.در کلیدهای با بیش از یک کنتاکت باید از خازن های یکنواخت کننده که موازی با کنتاکت ها بسته می شوند استفاده نمود.استفاده از مقاومت موازی با کنتاکت که چند لحظه قبل از قطع و یا وصل کلید وارد مدار می شوند برای محدود نمودن اضافه ولتاژها و نیز کم کردن ولتاژ برگشت در کلید های با ولتاژ بالا متداول است. در یک پست فشار قوی که در آن از کلید های هوایی استفاده شده باشد باید یک سیستم مرکزی تهیه ی هوای فشرده برای همه ی کلید ها علاوه بر منبع هوای فشرده هر کلید به وجود آورد. این کلید ها هم اکنون نیز استفاده می شوند.اما رفته رفته کلیدهای نوع دیگر جایگزین این نوع کلید خواهند شد.

4- کلید SF6 (سولفور هگزافلورید):

در این نوع کلید از گاز سولفور هگزا فلورید (SF6) به عنوان ماده ی خاموش کننده ی جرقه و عایق کننده ی بین دو کنتاکت در حالت باز بودن کلید استفاده می شود.گاز SF6 مزایای بسیاری دارد که چند مورد آن عبارتند از:

_ از نظر سطح عایقی گاز SF6 بسیار خوب است.در فشار یک اتمسفر تقریباً ۳ برابر بیش از هوا تحمل الکتریکی دارد و در فشارهای بالاتر این تفاوت بیشتر می شود.

_ از نظر هدایت حرارتی بسیار خوب است و به خاموش شدن جرقه کمک می کند.

_ گاز SF6 الکترون های آزاد را جذب می کند و یون منفی بدون تحرک کرده که ایجاد جرقه را مشکل تر می کند.

_در اثر حرارت زیاد خاصیت خود را از دست نمی دهد.

_از نظر شیمیایی با ثبات است و میل ترکیبی آن بسیار کم است و در اثر جرقه های ایجاد شده در کلید تغییر ماهیت نمی دهد.

با توجه به خواص ذکر شده در بالا این گاز برای استفاده در کلیدهای قدرت مناسب می باشد.استفاده از این گاز در ساخت تجهیزات فشار قوی روز به روز افزایش پیدا می کند.

نحوه ی کارکرد این کلیدها بدین گونه است که در محفظه ی کنتاکت ها گاز SF6 تحت فشار وجود دارد همچنین درهنگام قطع کلید و ایجاد جرقه این گاز به طور عمود به طرف جرقه پاشیده می شود و در اطراف قوس حرکت می کند و در هنگام عبور جریان از لحظه ی صفر باعث قطع سریع جرقه می شود.

در تکنیک ساخت این کلیدها دو حالت وجود دارد، یکی کلیدهای با گاز SF6 در دو سطح مختلف فشاربالا وفشار پایین و دیگری گاز SF6 در یک سطح فشار .

یکی از موارد مهم در کلیدهای SF6 نشت گاز از محفظه ی کنتاکت ها است.با توجه به این که گاز در این نوع کلید نقش عایقی دارد و معمولا برای بالا بردن سطح عایقی آن فشار را به چندین اتمسفر می رسانند ممکن است به مرور زمان فشار گاز و در نتیجه تحمل عایقی آن کاهش می یابد که برای جلوگیری از آن باید فشار گاز را به طور مرتب تحت کنترل داشت و با تعبیه سوییچ کنترل کننده ی فشار ، مقدار فشاررا اندازه گیری کرد ودر صورتی که فشار کاهش یافت از آن با خبر شد و به کلید ، دوباره گاز تزریق کرد.

فاصله ی بین دو کنتاکت در حالت باز برای این کلیدها کمتر ازمقدار مورد نیاز برای دیگر کلید ها است. لذا زمان مورد نیاز برای قطع این کلیدها کمتر از دیگر کلیدها است. از این نوع ، کلید با زمان قطع ۳۵ میلی ثانیه تا کنون ساخته شده است و از نظر ولتاژ در ساخت آن محدودیتی وجود ندارد.فاصله ی زمانی بازدید و تعویض کنتاکت ها در کلید SF6 چند برابر کلید های نوع دیگر است و اکثر سازندگان اعلام می کنند که این کلیدها در هشت سال اول نیاز به تعمیر ندارد.

در ولتاژهای بالا نیز می توان از سری کردن چند کنتاکت (Multi Breaking Unit)استفاده نمود.در حالت کلی کلیدهای SF6 در مقایسه با سایر کلیدها ارزان ترند. تعمیرات آن ها راحت تر است . عملکردشان سریع تر است و جای کمتری اشغال می کنند. با توجه به این مزایا کاربرد این کلیدها رو به افزایش است و انواع دیگر کلیدها در آینده کمتر استفاده خواهند شد.

ب: مکانیزم عمل کننده (Operating Mechanism):

آن چه در بالا ذکر شد مربوط به قسمت قطع کننده Breaking Unit جریان است اما نمی توان از اهمیت مکانیزم عمل کنندهی کلید که عمل قطع کردن را به عهده دارد و مدت زمان قطع را مشخص می کند چشم پوشید. مکانیزم عمل کننده باید بتواند بلافاصله پس از دریافت فرمان قطع یا وصل در زمان خیلی کم عمل قطع یا وصل را انجام دهد که در این وضعیت نیروهای مکانیکی اهمیت دارند.

مکانیزم عمل کننده می تواند در یکی از حالات زیر باشد:

۱- عمل دستی
۲- عمل سلونوئید
۳- عمل با موتور
۴- مکانیزم فنر قابل شارژ با موتور
۵- سیستم پنوماتیک
۶- سیستم هیدرولیکی

از حالات فوق " عمل دستی" ساده ترین حالت است اما در پست های فشارقوی به کار نمی رود.در حالت سلونوئید از انرژی الکتریکی یک سیم پیچ استفاده می شود وآن را به انرژی مکانیکی برای قطع یا وصل کلید تبدیل می کند.این سیستم نیز بسیار ساده است اما در ولتاژهای بالا به دلیل نیاز به مصرف الکتریسیته ی زیاد و عمل آهسته ی آن استفاده نمی شود. استفاده از موتور(حالت ۳) نیز بدین ترتیب است که یک موتور جریان متناوب یا مستقیم با چند چرخ دنده میله ی متحرک کنتاکت ها را به حرکت درمی آورد. این سیستم مصرف چندانی ندارد اما مدت زمان عمل زیاد است.

مکانیزم فنر قابل شارژ با موتور:

در این حالت وصل یک کلید با رها شدن یک فنر شارژ شده با یک موتور صورت می گیرد. در این حالت زمان وصل یا قطع یک کلید مستقل از زمان لازم برای شارژ فنر است زیرا فنر از قبل با موتور شارژ شده است. زمان عمل تنها بستگی به آلاستیسیته ی فنر دارد که خیلی کم است.

در این حالت نیروی عمل کننده هنگام شروع عمل بسیار بالاست ولی در قسمت پایانی کم می شود که باعث کاهش نیروی وارده به کنتاکت ها می شود. زمان عمل با این مکانیزم در حدود ۴۰ میلی ثانیه است و این مکانیزم یکی از روش های متداول در حال حاضر است.

سیستم پنوماتیک:

در این سیستم انرژی مورد نیاز برای قطع و وصل از انرژی پتانسیل هوای فشرده تامین می شود.از مزایای این طرح آن است که زمان عمل بسیار کم است و امکان وصل دوباره ی سریع پس از قطع(Reclosing) وجود دارد. جز در لحظات اولیه در باقی زمان عمل نیروی تامین شده برای حرکت میله ی متحرککنتاکت ها

یکنواخت است و تغییر نمی کند. در حالتی که کلیدها هوایی (Air Blast Type) هستند می توان از سیستم ایجاد هوای فشرده ی مشترک استفاده نمود.

سیستم هیدرولیکی:

این سیستم از نظر عملکرد تقریبا مشابه حالت پنوماتیک است اما در این حالت برای مثال گاز ازت در دو فشار مختلف پشت روغن قرار می گیرد و با تغییرات فشار روغن پیستون عمل کننده را حرکت می دهد دو مکانیزم پنوماتیک و فنر شارژ شده زیاد استفاده می شوند و در اروپا سیستم فنر شارژ شده رایج تر است.

مشخصات الکتریکی کلیدها

این مشخصات که باید در طرح یک پست لحاظ شوند به شرح زیر هستند:

۱) ولتاژ نامی	Rated Voltage
۲) ولتاژ حداکثر نامی	Rated Highest Voltage
۳) فرکانس نامی	Rated Frequency
۴) جریان نامی	Rated Current
۵) مقدار قطع جریان اتصال کوتاه	Rated Short Circuit Breaking Current
۶) سطح عایقی	Insulation Level
۷)مقدار ولتاژ گذرا	Rated Transient Recovery Voltage
۸) مقدار وصل جریان اتصال کوتاه	Rated Short Circuit Making Current
۹) ترتیب زمانی قطع و وصل	Rated Operating Sequence
۱۰) مدت زمان قطع	Breaking Time
۱۱) مدت زمان وصل	Making Time

انتخاب قدرت و جریان قطع کلید در حالت اتصال کوتاه :

مقادیر جریان اتصال کوتاه استاندارد برای کلیدِ های قدرت عبارتند از:

۱۰۰ ، ۸۰ ، ۶۳ ، ۵۰، ۴۰، ۳۱/۵، ۲۵، ۲۰، ۱۲/۵،۱۶، ۱۰، ۸، ۶/۳ کیلو آمپر.

برای انتخاب قدرت و یا جریان قطع یک کلید ابتدا باید مقدار جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پشت کلید را محاسبه کرد سپس با مقادیر فوق مقایسه و یکی از مقادیر را که بالاتر ازمقدار جریان اتصال کوتاه محاسبه شده است را به عنوان جریان قطع کلید انتخاب کرد.

برای به دست آوردن قدرت قطع کلید از فرمول زیر استفاده می شود :

۱) جریان قطع × ولتاژ نامی شبکه ×۳ √ = قدرت قطع کلید

جریان اتصال کوتاه در این جا مطرح نمی شود.فقط می توان اشاره کرد که برای محاسبه دو روش وجود دارد یکی در نظر گرفتن راکتانس شبکه با مقدار واقعی خود و دیگری با درصد راکتانس (Per Unit) که محاسبه با درصد راحت تر است. در صورتی که مقادیر راکتانس در نقطه ی عیب در هنگام عیب به درصد و قدرت نامی قابل عبور در حالت عادی به مگا ولت آمپر محاسبه شده باشد قدرت اتصال کوتاه را به راحتی می توان با فرمول های زیر محاسبه کرد :

۲) امپدانس(راکتانس) سیستم به درصد نقطه ی عیب / قدرت نامی × ۱۰۰ = قدرت اتصال کوتاه

جریان اتصال کوتاه نیزاز رابطه ی بین قدرت و جریان (رابطه ی شماره ی ۱ بالا) به دست می آید.

لازم به توضیح است که قدرت وصل کلید را به دلیل مناسب تر بودن وضعیت وصل ۲/۵ برابر قدرت قطع در نظر می گیرند.

ترتیب زمانی قطع و وصل:

یک کلید قدرت باید بتواند در مواقع لزوم بدون وقفه حداقل یک بار وصل و قطع را انجام دهد. لذا به عنوان یکی از مشخصات کلید باید ترتیب زمانی قطع و وصل را مشخص نمود ، در استاندارد IEC دو حالت زیر وجود دارد:

1) O-T-CO-T'-CO T=0.3 sec
T'=3 min

2) Co-T''-CO T''=1.5 sec

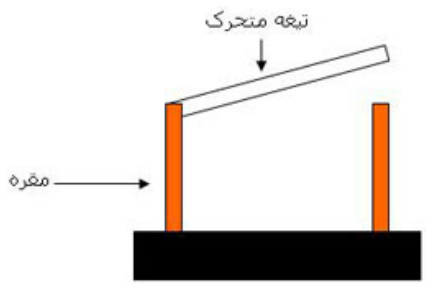
حرف C به معنی بسته شدن و حرف O به معنی باز شدن کلید است.

سکسیونر Disconnecting Switch

کلید های قدرت در یک پست فشار قوی قطع و وصل فیدرهای خروجی و ورودی و برقراری ارتباط بین قسمتهای مختلف را تحت هر شرایط ب ه عهده دارند . جهت ایجاد ایمنی در بهره برداری و تعمیرات و قطع فیزیکی یک قسمت از قسمت های دیگر از سکسیونر استفاده می شود. سکسیونر ها میتوانند کار قطع و وصل سیستم در حالتی که تقریبا شدت جریان صفر میباشد را انجام دهند بعبارت دیگر سکسیونرها میتوانند ولتاژ و جریان های کاپاسیتیو خیلی کم را قطع نمایند . علاوه بر مطالب فوق سکسیونرها میتوانند در انجام مانور سریعتر و بهتر نمودن ایزولاسیون در پست ها به کلید ها کمک نمایند. سکسیونردر حالت باز میتواند ولتاژ نامی را بطور دائم و اضافه ولتاژ های موقت را بطور موقت تحمل نماید (عایق بین دو کنتاکت سکسیونرها معمولا هوا میباشد).

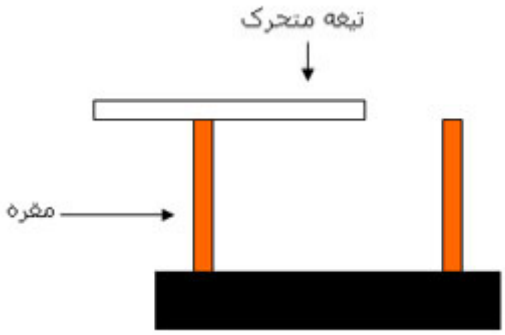
سکسیونرها از نظر شکل ظاهری انواع مختلفی داشته که مهمترین آنها عبارتند از :

1.سکسیونر تیغه ای یا کاردی "Blade Type"



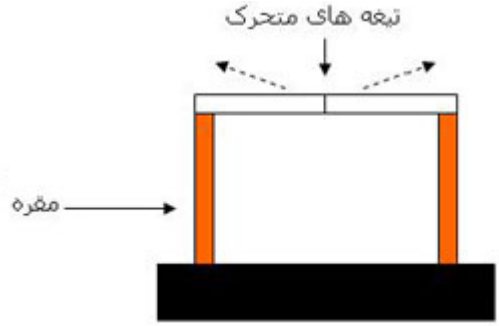
این نوع سکسیونر برای ولتاژهای پایین و متوسط (تا حد 63 کیلو ولت) مورد مصرف داشته و دارای یک کنتاکت ثابت و یک کنتاکت متحرک بوده و قطع مدار عمود بر سطح افقی و در امتداد مدار میباشد. قطع و وصل کلید ممکن است بطور دستی و یا با استفاده از موتور صورت پذیرد.

2.سکسیونرکشویی "Drawable Type"



سکسیونر کشویی معمولا جهت سوئیچ گیرهای ولتاژ پایین و یا متوسط که در ساختمان ها و در داخل کیوسک قرار گرفته اند مورد استفاده قرار میگیرند . میله متحرک این سکسیونرها بصورت کشویی بر روی مدار حرکت میکند. مزیت این سکسیونر عدم نیاز به اشغال فضا در حالت قطع میباشد

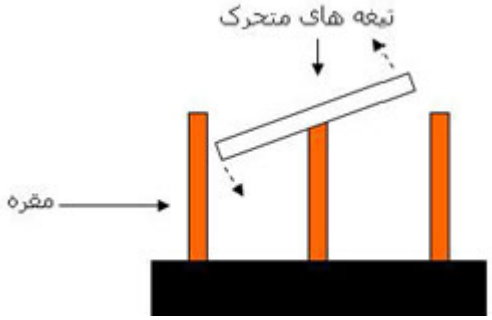
3. سکسیونرافقی از نوع دو پایه "Horizental Center Break"



در این سکسیونرها که در ولتاژهای متوسط و زیاد مورد استفاده قرار میگیرند هر دو کنتاکت متحرک بوده سکسیونر از وسط به دو قسمت تقسیم میشود. حرکت تیغه های این سکسیونر را اصطلاحا افقی مینامند (اگر این سکسیونر عمود بر زمین نصب شده باشد تیغه ها به صورت افقی حرکت میکنند)

علت شکستن مدار از وسط در این سکسیونر ها این است که از نظر حفظ فواصل مجاز عایقی با فاز های دیگر مناسب تر میگردد . بطور کلی از این نوع سکسیونرها در محل هائی که از نظر فواصل افقی بین فاز ها چندان محدودیتی وجود نداشته باشد و یا اینکه از نظر فواصل عمودی (در پست هایی که در دو ارتفاع مختلف قرار داشته باشند معمولا سعی می شود که از این سکسیونرها استفاده شود بطور مثال در پست های با طرح یک و نیم کلیدی و از نوع باس بار دور سیم ها خروجی و ارتباطی از بالای تجهیزات عبور مینماید و استفاده از سکسیونرهای افقی هزینه ایجاد پست را تا حدودی کم میکند) محدودیت باشد استفاده میگردد.

4. سکسیونر افقی دورانی سه پایه ای "Center Rotating Post"



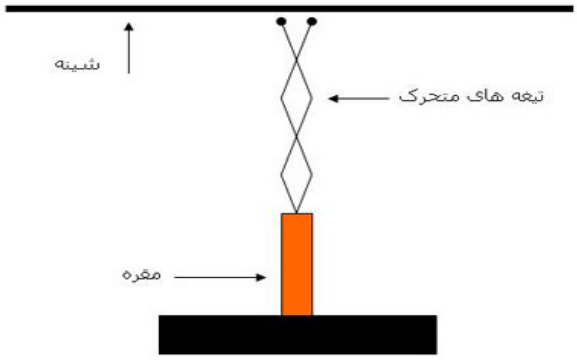
این سکسیونردارای سه پایه بوده که دو پایه کناری کنتاکت ها ثابت قرار گرفته و بر روی پایه میانی میله (لوله) هادی و رابط بین دو کنتاکت قرار گرفته است. این لوله (میله) میتواند دو کنتاکت ثابت را به یکدیگر متصل نماید .حرکت لوله هادی در این حالت به صورت دورانی و افقی میباشد . مورد استفاده این نوع سکسیونرها مشابه حالت قبلی میباشد.

5. سکسیونرعمودی "Vertical Type"

این سکسیونرها از نظر مسیر باز کردن مدار مانند سکسیونرهای تیغه ای بوده ولیکن ابن سکسیونرها طوری طراحی میشوند که بتوانند مناسب جهت جریان ها و ولتاژهای بالا باشند . این سکسیونر ها دارای دو پایه بوده که بر روی یکی از پایه ها , کنتاکت ثابت قرار گرفته و کنتاکت متحرک در انتهای یک لوله هادی که انتهای دیگر آن بر روی پایه ی دیگر قرار گرفته تشکیل شده است.

این سکسیونرها در پست هائی که از نظر فواصل افقی محدودیت وجود داشته باشد و یا اینکه از نظر عمودی محدودیت وجود نداشته باشد کاربرد دارد .استفاده از این سکسیونرها فاصله بین فاز ها را به حداقل میرساند.

6. سکسیونرقیچی "Pantograph Type"



این سکسیونرها دارای یک پایه بوده که در قسمت عمل کننده و بازوی سکسیونر (میله و یا لوله هادی) بر روی آن قرار گرفته و کنتاکت ثابت به باس بار متصل است .در حالتی که سکسیونر باز میباشد بازوی سکسیونر بعلت وجود چند مفصل بر روی پایه تا و جمع میشود و در حالت بسته بودن بازوی سکسیونر بطور کامل باز میشود . استفاده از این سکسیونر ها باعث ایجاد کاهش در ابعاد پست شده و خصوصا "در ولتاژ های بالاتر از 132 کیلو ولت بسیار مناسب میباشد ".

علت کاهش ایناست که این سکسیونر معمولا مستقیما زیر باس بار نصب میگردد .علاوه بر انواع سکسیونر های ذکر شده در بالا انواع دیگری نیز وجود دارد که به علت مشابهت آنها با انواع ذکر شده در بالا و متداول نبودن آنها از ذکر آنها خودداری شده است.

ساختمان کنتاکت ها در سکسیونر:

کنتاکت ها در سکسیونرها از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و بایستی از نظر الکتریکی در موقع بسته بودن سکسیون رتا حد امکان مقاومت الکتریکی آن پایین باشد.

کنتاکتها بایستی طوری طراحی شوند که در صورتیکه جریان نامی از سکسیونر عبور نماید درجه حرارت کنتاکت از 90 درجه افزایش پیدا ننماید (جهت محاسبه افزایش درجه حرارت کنتاکت ها بایستی درجه حرارت محیط را از آن کسر نمود.)

کنتاکت ها معمولا در اثر قطع و وصل ممکن است اکسید شوند لذا جنس کنتاکتها بایستی طوری انتخاب شوند که اولا از جنس سخت باشد و ثانیا دیراکسید شود .
به هر حال جهت پاک شدن اکسید از روی کنتاکتها بایستی طرح سکسیونر بطریقی باشد که در موقع وصل کنتاکت ها به یکدیگر ساییده شوند کنتاکتها از نظر مکانیکی نیز بایستی مقاومت کافی داشته باشند.

مکانیزم عمل کننده:

سکیونر ها از نظر مکانیزم عمل کننده ممکن است بصورت دستی و یا موتوری طراحی شوند . در پست هائی که چندان اهمیت نداشته باشند جهت کاهش هزینه میتوان از نوع دستی استفاده کرد جهت ولتاژ های بالاتر از 63 کیلو ولت معمولا سکسیونرها مجهز به موتور میباشند .معمولا در حالتی که مکانیزم دستی باشد بین سکسیونر و دیژنکتور فقط اینتر لاک "Interlock" مکانیکی و در حالتی که مکانیزم موتور میباشد بین سکسیونر و دیژنکتور از نوع اینتر لاک مکانیکی و الکتریکی تواما استفاده میشود . برای ولتاژ های پایین و متوسط مکانیزم عمل کننده برای هر سه فاز مشترک بوده ولیکن برای ولتاژ های بالا (نظیر 400کیلو ولت) معمولا هر یک از فازها مکانیزم جداگانه دارند . موتور های مورد استفاده ممکن است با جریان متناوب و یا مستقیم کار کند.

ولتاژ و جریان نامی و سطح ایزولاسیون سکسیونرها:

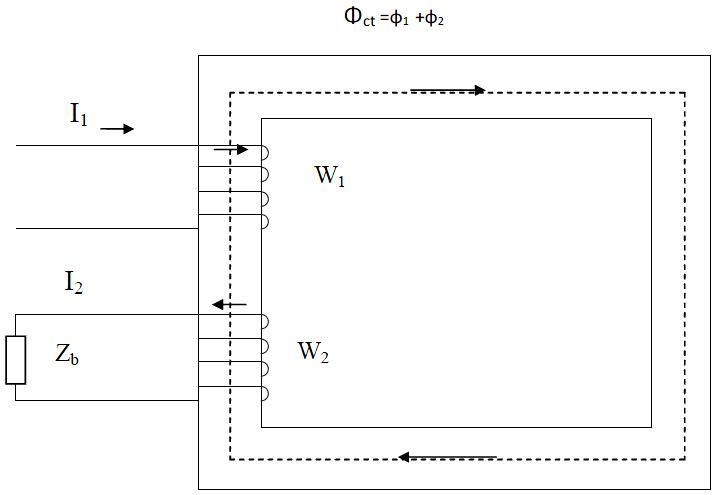
برای ولتاژ و جریان نامی سکسیونرها از استاندارد های موجود استفاده میشود. مقادیر ولتاژ و جریان ذکر شده در بخش عمومی قابل استفاده برای سکسیونر ها نیز میباشد. معمولا در صورتیکه از نظر اقتصادی چندان تفاوت وجود نداشته باشد مقدار جریان سکسیونر را یک سطح بالاتر از جریان نامی کلیدها در نظر میگیرند.
سطح ایزولاسیون سکسیونرها مشابه بقیه دستگاه ها بوده ولیکن لازم به توضیح است که تحمل ولتاژ بین دو سر باز کنتاکت ها بمقدار $U_n / \sqrt{3}$ بیشتر از تحمل عایقی فاز با زمین می باشد . در پست های فشار قوی سکسیونرها معمولا در دو طرف کلید های قدرت و در ابتدای هر فیدر و یا در محل های مناسب دیگر نصب میشود .محل و موقعیت و تعداد سکسیونرها بستگی به نوع پست و طرح آن دارد.

سکسیونر زمین : "Earthing Switch (Blade)"

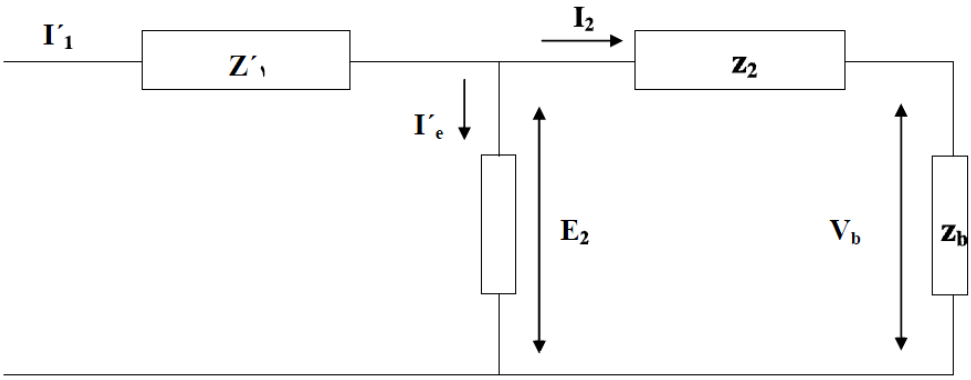
پس از قطع دوطرف یک خط توسط کلید ها و باز نمودن سکسیونر ها ی مربوطه جهت ایجاد ایمنی بمنظور کار کردن روی خط از سکسیونر های مربوطه جهت ایجاد ایمنی بمنظور کار کردن روی خط از سکسیونر های زمین استفاده میشود . سکسیونر زمین قسمت بی برق را به زمین متصل مینماید و معمولا این سکسیونر ها که متشکل از یک میله هادی میباشد بهمراه سکسیونرها میباشند و از نظر مکانیکی با یکدیگر اینترلاک "Interlock" دارند . سکسیونر زمین فقط موقعی میتواند بسته شود که سکسیونر خط باز باشد.
در بعضی از پست ها که دارای اهمیت باشد ممکن است مجهز به سکسیونر زمین باشد ولیکن در حالت عادی فقط سکسیونر های خط مجهز به سکسیونر زمین بوده و در بقیه قسمت های پست از سکسیونر زمین و قابل حمل "Portable Earthing Switch" استفاده میشود که در این حالت معمولا برای هر پست تعداد محدودی از این سکسیونر های زمین قابل حمل در نظر گرفته میشود.

ترانسفورماتور جریان (current transformer)

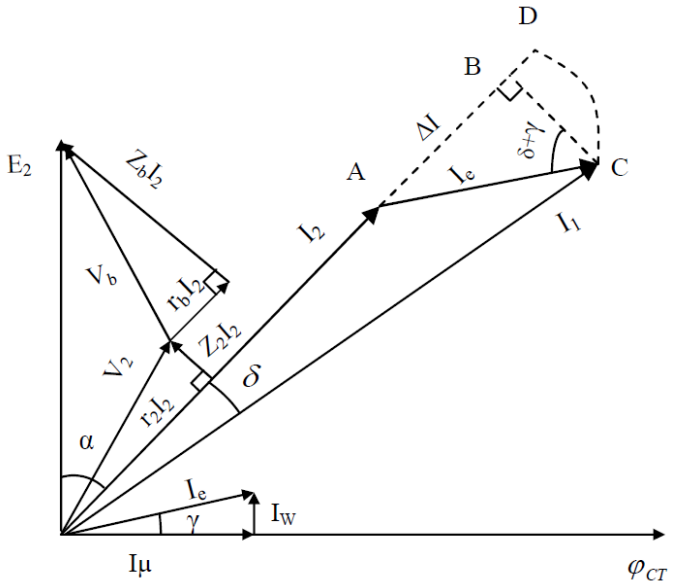
در شکلهای زیر شمای یک ترانسفورماتور جریان همراه با دیاگرام برداری و مدار معادل آن نشان داده شده است.



ترانسفورماتور جریان شکل1



مدار معادل ترانسفورماتور جریان شکل2



دیاگرام برداری ترانسفورماتور جریان شکل2

φ_{CT} فلوی ایجاد شده در هسته C.T

I_{μ} مقدار جریان تحریک ترانسفورماتور

I_W مقدار جریان جهت تلفات ترانسفورماتور

I_e جریان مغناطیس کننده

I_1 جریان اولیه C.T

I_2 جریان ثانویه C.T

δ خطای زاویه C.T (اختلاف فاز بین اولیه و ثانویهC.T)

در یک C.T ایده آل که هیچ گونه تلفات حرارتی وجود نداشته باشد :

$$(1) I_2 = \frac{I_1}{n_{CT}} \qquad , \mathrm{n}_{CT} = \frac{W_2}{W_1}$$

در ترانسفورماتورهای جریان ایده آل نه تنها اختلافی در اندازهی جریان ثانویه C.T نیست .بلکه جریان ثانویه و اولیه اختلاف زاویه نیز نخواهند داشت.

اما عملاً جریان مغناطیس کنندهC.T نیست و همیشه مقداری دارد؛ بنابراین داریم که :

$$I_2 = (-\mathrm{I}_1 + I_e)\frac{W_1}{W_2} = -\left(\frac{I_1}{n_{CT}} - \frac{I_e}{n_{CT}}\right) \qquad (2)$$

مشاهده میشود که در یک C.T یک به یک، مقدار ثانویه همیشه کمتر از یک خواهد بود و یا به عبارت دیگر I_2 همیشه کمتر از مقداری است که در فرمول(1) محاسبه شد.

در دیاگرام فوق فرض شده است که اولیه دارای تلفات نبوده و تلفات C.T ناشی از ثانویه آن باشد ، در اینصورت اگر:

$Z_b = r_b + Jx_b$ امپدانس مصرف کننده

$V_b = I_2(r_b + Jx_b)$ ولتاژ دو سر مصرف کننده

$Z_2 = r_2 + Jx_2$ امپدانس ثانویه C.T

$$E_2 = V_b + I_2(r_2 + Jx_2) = I_2(r_b + Jx_b) + I_2(r_2 + Jx_2)$$
$$E_2 = I_2(Z_2 + Z_b)$$

افت ولتاژ دو سر ثانویه C.T

همانطوریکه در دیاگرام برداری نشان داده شده E_2 نسبت به I_2 مقدار α اختلاف فاز داشته و نسبت به جریان پیش فاز است ، همچنین φ_{CT} به اندازه 90 درجه نسبت به E_2 تأخیر فاز دارد.

همانطورکه در دیاگرام نشان داده میشود مقدار I_2 از مقدار واقعی $\frac{I_1}{n_{CT}}$ به اندازه ΔI کمتر بوده و نسبت به جریان اولیه به اندازه δ نیز تأخیر فاز دارد ، زاویه δ بسیار کوچک بوده و چنانچه مقدار تقریبی ΔI را نیز برابر AB فرض کنیم در اینصورت :

$$\Delta I = AB = I_e Sin(\alpha + \gamma)$$

اما چون زاویه کوچک است مقدار کمان CD نیز تقریباً برابر BC بوده و برابر زاویه δ بر حسب رادیان خواهد بود.

بنابراین داریم :

$$BC \cong CD = \delta_{rad} = I_e Cos(\alpha + \gamma)$$

با توجه به مطالب بالا مشاهده میشود که با افزایش مقدار زاویه δ که بستگی به زاویه

000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

می گردد، به طوریکه در $\alpha + \gamma = 90$ جریان $\Delta I = I_e$ حداکثر مقدار خود را دارد و $\delta = 0$ میباشد.

مقدار خطای جریان بر حسب درصدی از جریان ثانویه C.T بیان میشود یعنی درصدی از I_2 که :

$$I_2 = \frac{I_1}{n_{CT}}$$

بنابراین داریم که :

$$f_i\% = \frac{\Delta I}{I_2} \times 100\% = \frac{I_2 - I_1^{'}}{I_2} \times 100$$

چنانچه درصدی از جریان اولیه بیان شود داریم که :

$$f_i\% = \frac{I_2 \times n_{CT} - I_1}{I_1} \times 100$$

n_{CT} نسبت تبدیل C.T است.

مقدار زاویه δ را نیز بر حسب درجه و دقیقه بیان می کنند.

$$\%\text{current error} = \left(\frac{K_n I_s - I_P}{I_P} \right) \times 100$$

جریان مغناطیس کننده C.T ها نقش بسیار مهمی در ایجاد خطا برای مقدار جریان C.T و یا زاویه آن دارد ، بنابراین در ساخت C.T ها سعی میشود خطا به حداقل ممکن رسانده شود و به همین دلیل باید جریان I_e و δ را توأماً حداقل کرد که با انتخاب جنس هسته سعی شده تا حد امکان از مقدار خطا کاهش یابد.

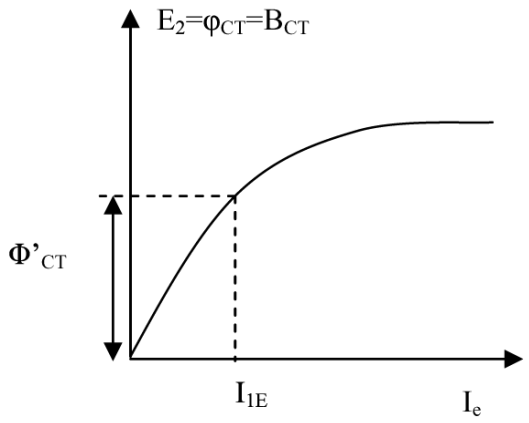
چگونگی کاهش خطا در C.T

همانطور که بیان شد جریان مغناطیس کننده C.T دارای دو مؤلفه I_W که جهت ایجاد هیسترزیس و خنثی کننده افت مغناطیسی C.T و I_μ میباشد که سبب ایجاد φ_{CT} شده ، اما در عمل $I_\mu >> I_W$ میباشد.

برای کاهش مقدار مؤلفه I_W باید هسته را از جنسی انتخاب نمود که افت کمتری داشته باشد. اما برای کاهش I_μ لازم است که مقدار φ_{CT} را کاهش داد ، و داریم که :

$$I_\mu = \frac{\varphi_{CT} . r_m}{W_1}$$

r_m مقاومت مغناطیسی سیم پیچها میباشد.



این موضوع در منحنی فوق به خوبی نشان داده شده . همانطوریکه مشاهده میشود در حالتی که $\varphi_{CT} = \varphi'_{CT}$ باشد به ازاء جریان مغناطیس کننده I_{1e} ترانس جریان اشباع میشود و به ازاء افزایش فلوی φ_{CT} مقدار I_e ناگهانی زیاد شده به طوریکه خطا قابل پیش بینی نیست، بنابراین همیشه مقدار E_2 و φ_{CT} و $B_{CT} = \frac{\varphi_{CT}}{Q}$ چگالی فلو محدود بوده و از حد معینی نمی تواند تجاوز کند ، بنابراین مقدار φ_{CT} باید در حدی باشد که E_2 لازم جهت خنثی نمودن افت ولتاژ ثانویه را تأمین کند و داریم که :

$$\varphi_{CT} = \frac{E_2}{4.44 W_2 f \, 10^{-8}}$$

$$E_2 = I_2\left(Z_2 + Z_b\right)$$

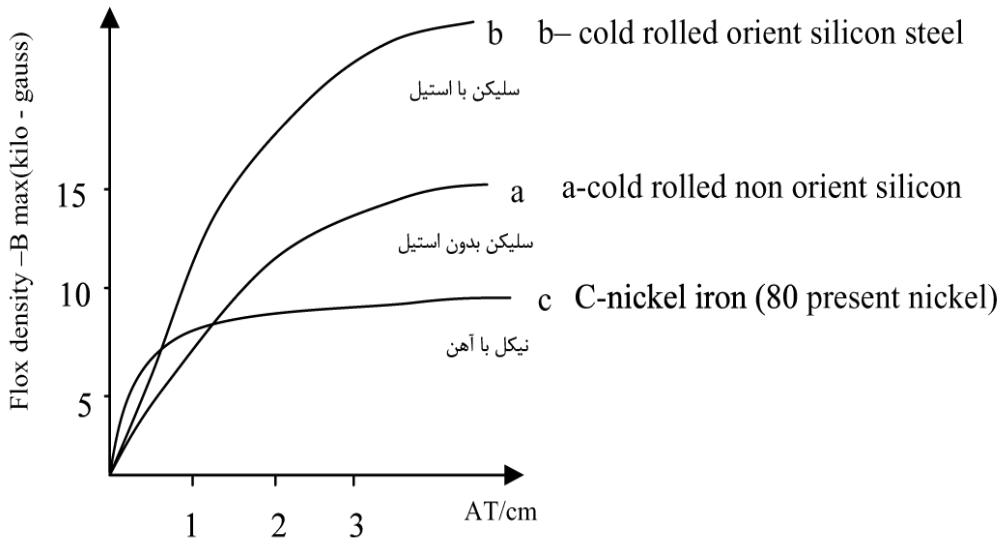
مشاهده میشود که جریان ثانویه I_2 برابر $\frac{I_1}{n_{CT}}$ میباشد ، بنابراین برای افزایش E_2 لازم است که یا I_1 افزایش یابد و یا اینکه Z_b زیاد شود که در اینحالت φ_{CT} زیاد میگردد ، بنابراین باید متوجه بود که مقدار Z_b از حد معینی تجاوز نکرده و ضمناً چنانچه I_2 نیز زیاد میشود میتوان با افزایش n_{CT} مقدار نسبت تبدیل را افزایش داد به طوریکه C.T بزودی اشباع نشود. زیرا در حالت اتصال کوتاه باید C.T به خوبی بتواند وظایف خود را انجام داده و اشباع نگردد.

روش دیگر کاهش مقدار جریان مغناطیس کننده I_e میباشد ، بنابراین باید r_m را کاهش داد. برای کاهش $r_m = \frac{e}{\mu Q}$ ، Q سطح عبور فلو در طول ℓ است ، بنابراین لازم است که فلوی φ_{CT} از سطح Q زیاد ، با طول ℓ کم عبور کند ، بنابراین آهن باید ضریب هدایت زیادی داشته باشد.

- **برای کاهش و به حداقل ممکن رساندن خطای یک C.T ، بایستی دارای یک منحنی مغناطیسی به صورت خط مستقیم باشد و این شرایط وقتی امکان پذیر است که شرایط زیر برقرار باشد:**
  1. هسته C.T از جنس به خصوصی طراحی و ساخته شود.
  2. مقدار Z_b متناسب انتخاب گردد ، یا به عبارت دیگر ظرفیت متناسب با C.T در نظر گرفته شود.
  3. جریان ثانویه I_2 را به حداقل ممکن کاهش دهیم.(با تغییر نسبت تبدیل)

تذکر 1 _ خطای C.T در هنگام اتصال کوتاه در پریودهای اول زیاد بوده و ممکن است C.T به زودی اشباع شود ، بنابراین در طراحی C.T برای رله های عمل کننده سریع این مسأله باید مدنظر باشد.

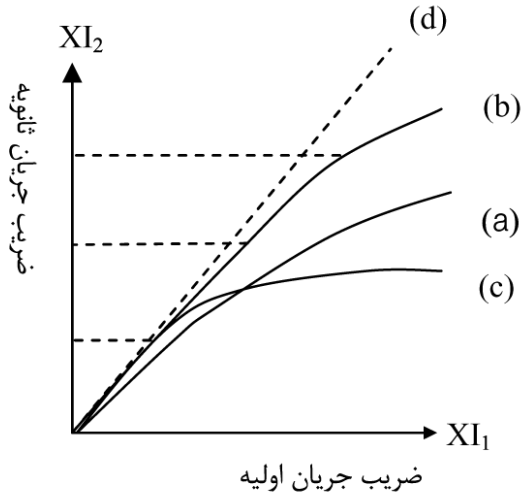
تذکر2_منحنی های زیر چگونگی منحنی مغناطیسی C.T را با توجه به جنس هسته نشان می دهد.



همانطوریکه در شکل بالا نشان داده می شود ، چنانچه جنس هسته را برای یک نوع C.T با یک نسبت تبدیل و مشخصات مختلف انتخاب میکنیم ، منحنی مغناطیسی هسته نیز تغییر خواهد کرد و همانطور که مشاهده می شود چنانچه جنس هسته از نوع آلیاژ نیکل و آهن باشد خیلی زود اشباع شده ولی اگر از جنس استیل یا سیلیکن و یا بدون سیلیکن انتخاب گردد منحنی مغناطیسی تغییر کرده و دیرتر اشباع می شود.

برای بررسی پارامتر 3 یعنی جریان ثانویه ی C.T نیز منحنی های زیر روشنگر این مطلب می باشد.

مشاهده میشود که تغییرات جریان ثانویه نسبت به جریان اولیه با توجه به جنس هسته متفاوت است. در یک C.T ایده آل عملاً منحنی باید به صورت خطی بوده و مانند خط چین (d) باشد ولی مشاهده می شود منحنی C تا 5 برابر جریان



اولیه دارای خطای معمولی است ولی پس از 5 برابر جریان اولیه جریان ثانویه آن کاملاً تغییر خواهد کرد.

در مورد منحنی a این حالت تا 10 برابر جریان اولیه صادق است و پس از 10 برابر عملاً خطا بسیار زیاد شده و امکان استفاده از C.T بسیار ناقص خواهد بود.

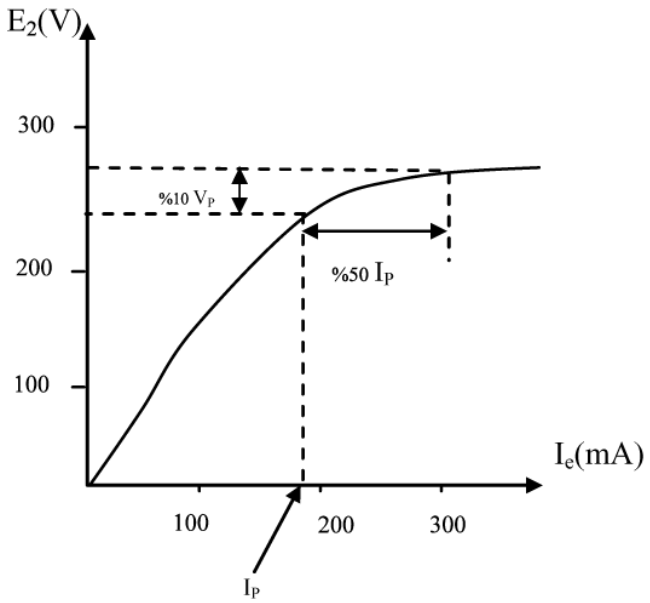
برای منحنی (b) تا حدود 15 برابر I_1 این مسأله صادق است.

تعریف نقطه اشباع در C.T

چنانچه ثانویه C.T را به منبع ولتاژی وصل نماییم و ولتاژ را به آرامی زیاد کنیم مشاهده می شود که پس از نقطهای عملاً با افزایش مقدار کمی ولتاژ، جریان تحریک ناگهان زیاد خواهد شد. این نقطه را نقطه شروع اشباع و یا

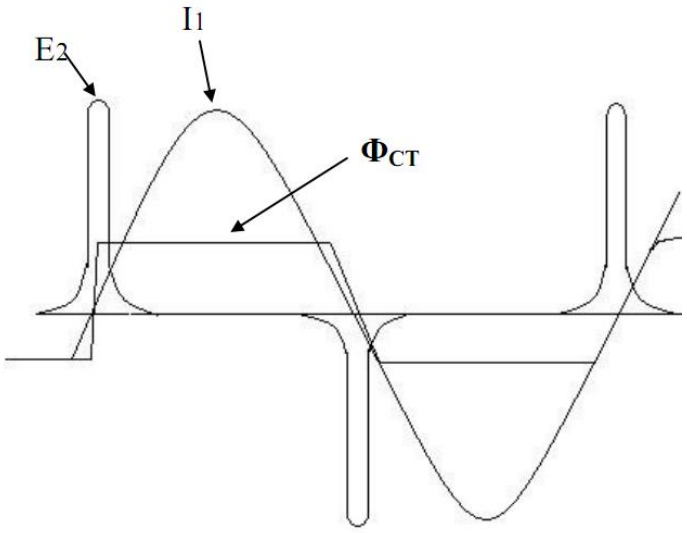
Knee Point ترانسفور ماتور جریان گویند.

در این نقطه یعنی نقطه K_P به ازای افزایش ولتاژ به اندازه 10٪ ولتاژ نقطه p یعنی V_P عملاً جریان تحریک به اندازه 50٪ جریان آن نقطه افزایش می یابد و این موضوع در شکل به خوبی نشان داده میشود.



ولتاژ ثانویه C.T وقتی که ثانویه آن باز باشد

همانطوریکه قبلاً بحث شد مقدار E_2 ایجاد شده در ثانویه C.T ناشی از عبور جریان ثانویه از مجموع امپدانسهای ثانویه می باشد و فلوی عبوری از هسته عملاً سبب به وجود آمدن ولتاژ فوق شده که ناشی از اختلاف آمپر دور اولیه و ثانویه میباشد ، در حالتی که ثانویه باز باشد در اینصورت هیچگونه آمپر دوری در ثانویه وجود ندارد، بنابراین آمپر دور اولیه سبب ایجاد نیروی تحریک شده و در هر نصف موج ترانس جریان را اشباع مینماید. شکل موج و فلوی ایجاد شده در C.T را شکل زیر به خوبی میتوان دید .



مشاهده میشود که جریان کم اولیه ولتاژ زیادی در ثانویه ایجاد میکند . این ولتاژ برای C.T های با ثانویه نسبت تبدیل کم و ثانویه 5A ممکن است چند ولتی بیش نباشد. اما چنانچه نسبت تبدیل بزرگ باشد مثلاً برای C.T با نسبت تبدیل $2000/1^{A}$ ممکن است ولتاژ ایجاد شده تا چندین (kv) کیلو ولت برسد.

در حالت اتصال کوتاه چون این ولتاژ خیلی زیاد است بنابراین نه تنها سبب از بین رفتن ایزولاسیون ترانسهای جریان میشود ، بلکه کلیه تجهیزاتی که سر راه ثانویه هستند مانند رله ها و مدارها را نیز از بین خواهد برد.

ضمناً چون مسیر جریان بسته نمیشود و چون C.T و رله ها بدون استفاده بوده ، به هیچ وجه نمی توانند سیستم را حفاظت نمایند .

کلاس دقت ترانس جریان

هر ترانسفورماتور جریان دارای مقداری خطا در اندازه جریان دارد و ضمناً جریان ثانویه نیز نسبت به جریان اولیه به مقدار δ تأخیر فاز دارد ، و مقدار خطا از رابطه زیر به دست میآید:

$$f_i\,\% = \frac{I_2 \times n_{CT} - \mathrm{I}_1}{\mathrm{I}_1} \times 100$$

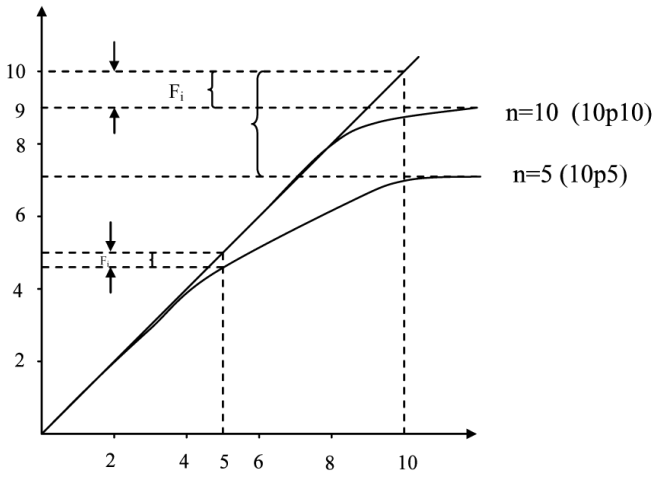
بنابراین اختلاف جریان و اختلاف زاویه یک خطای کلی برای C.T است که مقدار آن زمانی که از مدار اولیه C.T جریان 100٪ تا 120٪ جریان نامی عبور می کند ، مشخص کننده کلاس دقت مبدل است.

ترانسهای جریان به کار رفته برای وسائل اندازه گیری و یا رله های حفاظتی متفاوت بوده و لازم است که برای دستگاههای اندازه گیری زودتر اشباع شود. به هر جهت در جداول زیر کلاسها و مقدار خطای هر کلاس C.T مشخص شده است.

کلاس دقت C.T ها دو نوع اشت یا تنها با یک عدد مشخص میشود و یا به صورت aPn که P به معنی C.T برای حفاظت می باشد (Protection) و a مقدار خطا در C.T و n ضریب جریان اولیه C.T را مشخص می کند ، که در آن مقدار خطای a وجود دارد.

مثلاً در ترانسفورماتور جریان $5P10$ یعنی اینکه در 10 برابر جریان اولیه مقدار خطا مساوی $\pm 5\%$ است.

شکل زیر منحنی مغناطیسی دو C.T $10\mathrm{P}_5$,$10\mathrm{P}_{10}$ را نشان میدهد.



$$n = \frac{\mathrm{I_1\,max}}{\mathrm{I_1}rat}$$

همانطوریکه در شکل مقابل مشاهده میکنید در ترانس $10P5$ در 5 برابر جریان نامی خطای حاصل 10٪ اما در 10 برابر جریان نامی 30٪ میباشد. در C.T با کلاس $\mathbf{10P_{10}}$ مقدار خطا در 10 برابر جریان نامی برابر 10٪ است ، مشاهده میشود که C.T با n=10 نسبت به C.T با n=5 فعالتر بوده و بهتر میتواند مورد استفاده قرار بگیرد.

به همین دلیل برای سیستمهای حفاظتی اصولا $25 \geq \mathbf{n} \geq 5$ انتخاب میکنند ولی برای دستگاههای اندازه گیری مقدار n راکمتر 5 انتخاب میکنند $\mathbf{n} \leq 5$ است.

در جداول زیر کلاس و مقدار خطای هر ترانسفورماتور نشان داده شده است.

مطابق استانداردIEC شماره 185 عدد n برابر مقادیر زیر میتواند باشد:

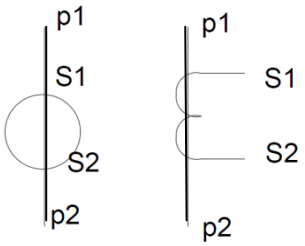
n= 5 , 15 , 20 , 30 برای حفاظت یکی از آنها را باید انتخاب کرد . که خطا بین 5 تا 30 درصد تغییر میکند.

جدول صفحه ی بعد مقدار خطا برای 5P و 10P را نشان میدهد.

مقدار خطا (f_i) در حد نهایی C.T ٪	مقدار تغییر فاز در جریان نامی اولیه (دقیقه)	مقدار خطا در جریان اولیه نامی C.T٪	کلاس دقت
5			
10	ـــــ		10P

البته این کلاس دقت وقتی صادق است که جریان به صورت سینوسی باشد.

نام گذاری ترمینالهای C.T



در نمودارها و نقشه ها C.T به صورت زیر نمایش داده می شود:

ورودی اولیه C.T را P_1 و ثانویه آنرا S_1 نامند و خروجی اولیه و ثانویه را به صورت P_2 و S_2 نشان می دهند.

ظرفیت ترانسفورماتور جریان (Burden)

چنانچه مقدار امپدانس ثانویه را Z_2+Z_b بنامیم در اینصورت $E_2=I_2(Z_2+Z_b)$ مقدار E_2 را افت ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور جریان می نامند و حاصلضرب $I_2\times E_2$ را ظرفیت C.T نامند و به VA بیان میکنند. برای انتخاب Z_b و ثانویه ترانس جریان محدودیت وجود دارد و همانطور که بیان شد مقدار $VA=I_2^2Z$ که $Z=Z_2+Z_b$ اما همانطوریکه بحث شد با تغییرات Z مقدار E_2 نیز تغییر کرده و جریان I_e تغییر خواهد کرد، چنانچه کلاس ترانس جریان به صورت aPn باشد و مقدار ظرفیت نامی آن P_1 بوده مقدار $I_2^2Z_2$ نیز برابر P_2 باشد ، اگر باری با ظرفیت P' به ثانویه C.T وصل شده باشد در اینصورت نقطه K_P تغییر مکان داده و کلاس ترانس جریان به aPn' تبدیل خواهد شد که n' از رابطه صفحه بعد به دست می آید:

$$n'(P' + P_2) = n(P_1 + P_2) \qquad P_1 = I_2^2 Z_b$$

$$n' = n\frac{P_1 + P}{P' + P_2} \qquad P_2 = I_2^2 Z_2$$

$$P' = \frac{n(P_1 + P_2) - n'P_2}{n'} \qquad P_1 = I_2^2 Z_b'$$

چنانچه از مقدار P_2 صرف نظر کنیم مقدار تقریبی P' به صورت زیر است :

$$P' = \frac{nP_1}{n'} \qquad \text{OR} \qquad n'P' = nP_1$$

Z_2 تقریباً مقاومت اهمی است و برابر R_2 در نظر گرفته می شود ، چنانچه در ترانسفورماتور جریان مقدار P_2 را ندانیم میتوان از رابطه زیر به دست آورد:

$$P_2 = \left(\frac{I_1 N \times W_1}{C}\right)^{1.15}$$

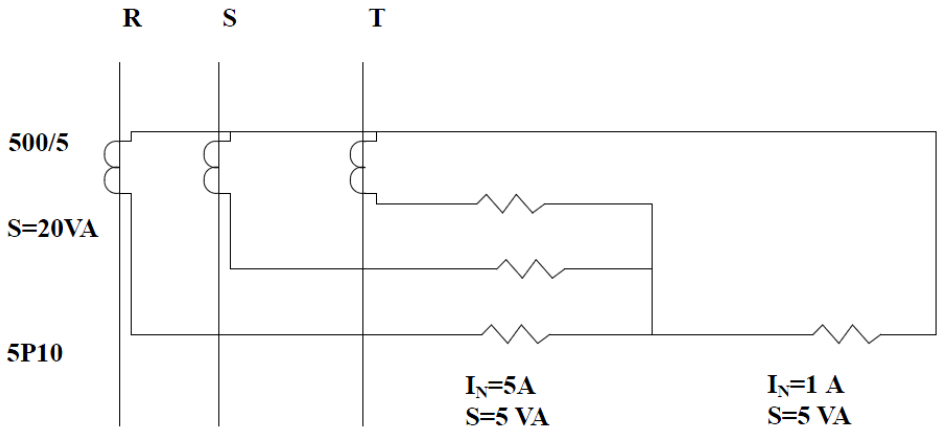
$I_1 N$ جریان نامی اولیه C.T

W_1 مقدار دور اولیه C.T

مقدار 350 تا C=200 اصولاً برای ترانسهای جریان معمولی C=200 و برای ترانسهای جریان مخصوص مقدار C برابر 350 است ولی بهترین روش اندازه گیری مقدار R_2 توسط پل است. حال برای روشن شدن مطلب به ذکر چند مثال می پردازیم.

مثال 1

اگر مدار به صورت زیر باشد مطلوبست محاسبه n' برای ترانسفورماتور جریان؛ طول کل سیم های ارتباطی بین رله ها



و C.T برابر 17 متر تک رشته و از نوع مسی با مقطع $1.5mm^2$ است.

سیم $Z=\frac{\ell}{xA}=\frac{17}{56\times1.5}=0.2\Omega$

x=56 برای سیم مسی

رله O/C $R=\frac{VA}{I_n^2}=\frac{5}{5^2}=0.2\Omega$

رله E/F $R=\frac{VA}{I_n^2}=\frac{5}{1^2}=5\Omega$

$$R=0.2+0.2+5=5.4\Omega$$
$$P'=5.4\times I_n^2=5.4\times5^2=135^{VA}$$
$$P_2=\left(\frac{I_1N\times W_1}{C}\right)^{1.15}=\left(\frac{500\times1}{200}\right)^{1.15}=2.86\,VA$$
$$n=10\quad,\quad P_n=20^{VA}\qquad n'=n\frac{P_n+P_2}{P'+P_2}=\frac{20+2.86}{135+2.86}\times10=1.65$$

مشاهده میشود که در جریان معادل I_n 1.65 میتواند رلههای فوق خوب کار کنند ولی چنانچه جریان از این حد تجاوز کند رله ها به خوبی عمل نخواهند کرد.

همانطورکه بیان شد ظرفیت ترانسفورماتور جریان عبارتست از حاصلضرب جریان نامی ثانویه ترانسفورماتور جریان در مقدار افت ولتاژ ناشی از گردش این جریان در مدار تغذیه شونده C.T که بر حسب VA بیان میشود.

طبق استاندارد IEC 185 مقدار ظرفیتهای ترانسفورماتور جریان تا 30VA را به صورت زیر استاندارد نمودهاند.

2.5 5 10 15 30 VA

از 30VA به بالا را اصولاً بر حسب نیاز انتخاب میکنند. برای اینکه مقدار خطا در ترانسفورماتورهای جریان مقدار محاسبه شده باقی بماند لازم است مقدار توان گرفته شده از ترانسفورماتور جریان معادل مقدار ظرفیت آن باشد و در این حالت باید مجموع مقاومتهای مدار خارجی سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور جریان حتی المقدور برابر مقاومت خارجی نامی ترانسفورماتور باشد تا از خراب شدن آن جلوگیری به عمل آید و در ضمن از خراب شدن دستگاههای اندازه گیری نیز جلوگیری شود.

با توجه به مطالب گفته شده در انتخاب ظرفیت C.T باید قدرت مصرف کلیه وسائلی که از ثانویه C.T تغذیه میکنند در نظر گرفته شود ، در زیر مصرف یک سری از وسایل اندازه گیری و رله ها برای جریان ثانویه 5 آمپر مشخص شده است.

نوع وسیله	قدرت به VA	نوع وسیله	قدرت به VA
آمپرمتر	3	رله ماکزیمم یا مینیمم جریان	0.2-0.4
آمپرمتر ثبات	5-10	رله حرارتی	0.9-3
وات متر	3	رله قدرت	1-5
وات متر ثبات	1.5-10	رله ارت فالت جهتی	2-6
Cosφ متر	5-15	رله جهتی	2-3
Cosφ متر ثبات	6-16	رله دیفرانسیل	0.1-0.4
رله اضافه جریان انیورس	3.4-4.8	رله دیستانس	2-20
رله اضافه جریان زمانی	8.5	رگولاتور ولتاژ	55-135

طول و سطح مقطع سیم برای جریان 5^{AinP}	قدرت مصرف VA	طول و سطح مقطع سیم برای جریان 5^{AinP}	قدرت مصرف VA
10 متر سیم دولا با سطح مقطع 2.5^{mm^2}	3.5	10 متر سیم دولا با سطح مقطع 6^{mm^2}	1.5
10 متر سیم دولا با سطح مقطع 4^{mm^2}	2.2	10 متر سیم دولا با سطح مقطع 10^{mm^2}	0.9

تذکر : میتوان گفت قدرت مصرفی کابلها را از رابطه $\mathbf{RI}_s^2$ نیز به دست آورد که R مقاومت سیم بر حسب Ω و $\mathbf{I}_s$ جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان میباشد.

مثال 1 :

اگر مدار ثانویه یک ترانسفورماتور جریان 200/5 آمپر با قدرت 30VA و ضریب اشباع n<5 به ادوات زیر بسته شود.

یک عدد آمپر متر با مصرف داخلی 1.5VA

یک عدد واتمتر با مصرف داخلی 3 VA

5 متر سیم با مقطع 2.5 میلیمتر مربع 1.8VA

جمع کل مصرف 6.3VA

از آنجا که توان ترانسفورماتور جریان در جریانهای زیاد تا n برابر جریان نامی که خطا از 10%- تجاوز نمیکند تقریباً برابر حاصلضرب $S_n.n$ میباشد ، پس توان این ترانسفورماتور در 5 برابر جریان نامی n=5 نیز $30\times50=150$ میرسد که باید در مدار ثانویه مصرف شود ، بنابراین طرف ثانویه باید آنقدر جریان بکشد که n برابر 6.3 مساوی 150 گردد پس $\mathbf{n}' = \frac{150}{6.3} = 23.8$ مشاهده میشود که در حالت اتصال کوتاه تا 23.8 برابر جریان از وسائل اندازه گیری عبور میکند و سبب سوختن آنها میگردد.

پس باید در ثانویه ترانسفورماتور مقاومت اضافه نمود که $\mathbf{n}'$ حداکثر به 10 برسد و یا اینکه قدرت ترانسفورماتور جریان را کمتر انتخاب نمود. مثلاً اگر قدرت آنرا به مقدار 15VA ، انتخاب کنیم ، باز مشاهده میشود که n'>10 است که باز قدرت را کمتر میکنیم.

$$\mathbf{n}' = \frac{5\times15^{VA}}{6.3} = 11.9$$

و اگر آنرا چنانچه به 10VA برسانیم داریم :

$$\mathbf{n}' = \frac{5\times10^{VA}}{6.3} = 8 \qquad n' = 10$$

بنابراین قدرت 10VA قدرت مناسبی است و باید 30VA انتخاب کرد.

مثال 2

ترانسفورماتور جریانی به مشخصات 100/5A و 30VA و n<5 . یک آمپرمتر با مصرف داخلی 2.5VA و یک واتمتر با مصرف داخلی سیم پیچ جریانی 3VA را تغذیه می کند ، سیم رابط به طول 25m مسی با مقطع 2.5_{mm}^{2} که در جریان نامی 5A توان آن 4.5VA میباشد.

توان کل مصرف ثانویه = 2.5+3+4.5=10VA

$$n' = \frac{30 \times 5}{10} = 15 \qquad n' > 5$$

چون در مثال گفته شده که n<5 است بنابراین باید قدرت را طوری انتخاب کنیم که n نزدیک به 5 باشد بنابراین 15VA را انتخاب می کنیم.

$$n' = \frac{15 \times 5}{10} = 7.5$$

البته مشاهده می شود که $n' = 7.5$ تقریباً مناسب است ولی بهترین حالت آن است که n را به 5 برسانیم و در این حالت باید قدرت 10VA انتخاب نماییم. و یا مقاومت به سمت ثانویه ترانسفورماتور اضافه کرد.

مثال 3

یک رله اضافه جریان با مصرف داخلی 8VA و یک رله دیفرانسیل با مصرف داخلی 1VA بر روی ترانسفورماتور جریانی به مشخصات 400/5A و 15VA و n>10 بسته شده است ، در صورتی که مصرف سیم های رابط 3VA باشد آیا انتخاب ترانسفورماتور صحیح میباشد؟در اینصورت داریم که :

توان کل مصرف ثانویه = 8+1+3=12VA

بنابراین ضریبی از جریان نامی که در آن خطای ترانسفورماتور جریان از 10%- تجاوز نکند برابر است با :

$$n' = \frac{15 \times 10}{10} = 12.5$$

بنابراین ترانسفورماتور جریان صحیح انتخاب شده است و جریان ثانویه تا 12.5 برابر جریان اولیه به طور خطی تغییر میکند و متناسب با جریان اولیه است و رله جریان زیاد چنانچه تا 12.5 برابر جریان I_n تنظیم شده باشد به درستی عمل میکند.

انتخاب نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان

جریان اولیه ترانسفورماتور جریان طبق IEC185 مطابق اعداد زیر می باشد ، اصولاً باید در انتخاب جریان اولیه یکی از اعداد زیر انتخاب شود

$$I_P = 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75 \ \text{AmP}$$

در صورتیکه نیاز به جریان اولیه بیشتری باشد باید ضریبی از اعداد بالا انتخاب شود.

جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان نیز طبق IEC185 مطابق اعداد (1,2,5)میباشد که یکی از اعداد فوق بر اساس نیاز انتخاب میشود. برای انتخاب نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان باید جریان اولیه را متناسب با جریان دستگاههای حفاظت شونده و یا دستگاههایی که لازم است بار آنها اندازه گیری شود انتخاب گردد. جریان ثانویه C.T را اصولاً مطابق فاصله دستگاههای اندازه گیری و حفاظت از C.T انتخاب میگردد. اگر فاصله کم باشد جریان ثانویه 5 و اگر ترانسفورماتور جریان از محل دستگاههای سنجش و یا حفاظتی دور باشد بهتر است از جریان ثانویه یک آمپر استفاده کرد. زیرا افت توان و ولتاژ در سیم های رابط کمتر خواهد شد.

مثال:

یک رله حفاظتی با مصرف داخلی 24VA در فاصله 100m از ترانسفورماتور جریان تغذیه می شود ، توان نامی ترانسفورماتور جریان 30VA است و مقطع سیم رابط (از ترانسفورماتور تا رله) 1.5mm^2 از مس می باشد ، مطلوبست تعیین نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان لازم چنانچه بار مصرفی از خط فوق 137A باشد.

الف _ انتخاب جریان اولیه :

چون جریان 137 نزدیک به 150 می باشد و عدد 150 نیز ضریبی از اعداد داده شده در استاندارد می باشد ، بنابراین جریان اولیه ترانسفورماتور فوق 150A می باشد.

ب _ انتخاب جریان ثانویه :

اگر جریان ثانویه را 5A انتخاب نماییم مقدار توان مصرفی سیم رابط برابر است با :

$$P = RI_n^2 = \frac{\ell}{xA} I_n^2 = \frac{100}{56 \times 1.5} \times 5^2 = 30^{VA}$$

مشاهده می شود این ترانسفورماتور جریان با این نسبت تبدیل فقط توان سیمهای رابط را میپوشاند و نمیتواند مفید باشد ، بنابراین باید جریان ثانویه را 1 انتخاب کنیم . خواهیم داشت :

$$P = \frac{\ell}{xA} I_n^2 = \frac{100}{56 \times 1.5} \times 1^2 = 1.2^{VA}$$ توان مصرفی سیمهای رابط

24+1.2=25.2VA توان کل مصرفی

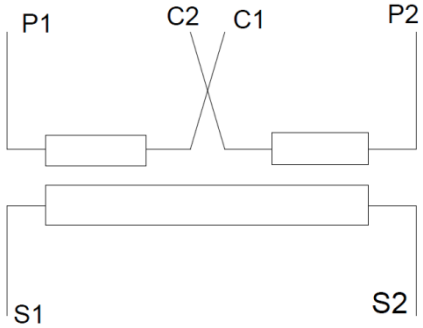
با توجه به اعداد بالا داریم که n>10 می باشد.

$$n' = \frac{30 \times 10}{25.2} = 11.9$$

مشاهده میشود که چنانچه رله جریان تا $11I_n$ تنظیم شود C.T فوق جوابگو خواهد بود . پس نسبت تبدیل C.T فوق 150/1 متناسب است.

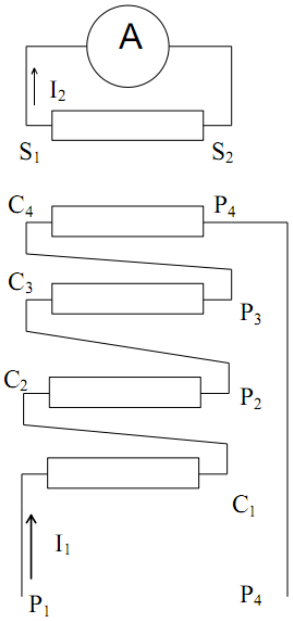
تذکر : اصولاً در شرایطی که لازم باشد می توان سیم پیچ اولیه و یا ثانویه را طوری انتخاب نمود تا چند نسبت تبدیل به دست آید.

مثال :

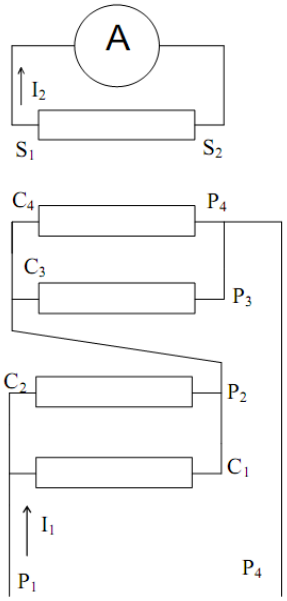


در شکل مقابل سیم پیچ اولیه از یک جفت سیم پیچی مجزا تشکیل شده است و نسبت تبدیل آن $\frac{2 \times 100}{5}$ است و اگر به حالت سری باشند نسبت تبدیل 100/5 خواهد شد.

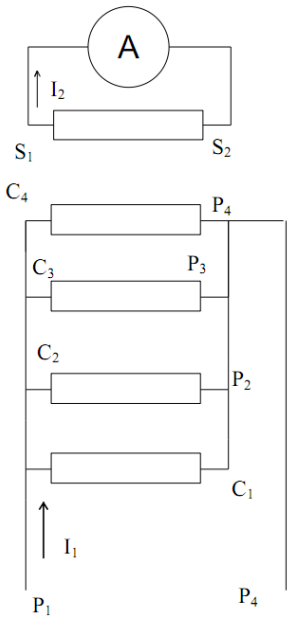
در شکلهای زیر حالتهای مختلف اتصال سیم پیچ های اولیه و نسبت تبدیل را نشان میدهد.



نسبت تبدیل $= \frac{I_1}{I_2}$



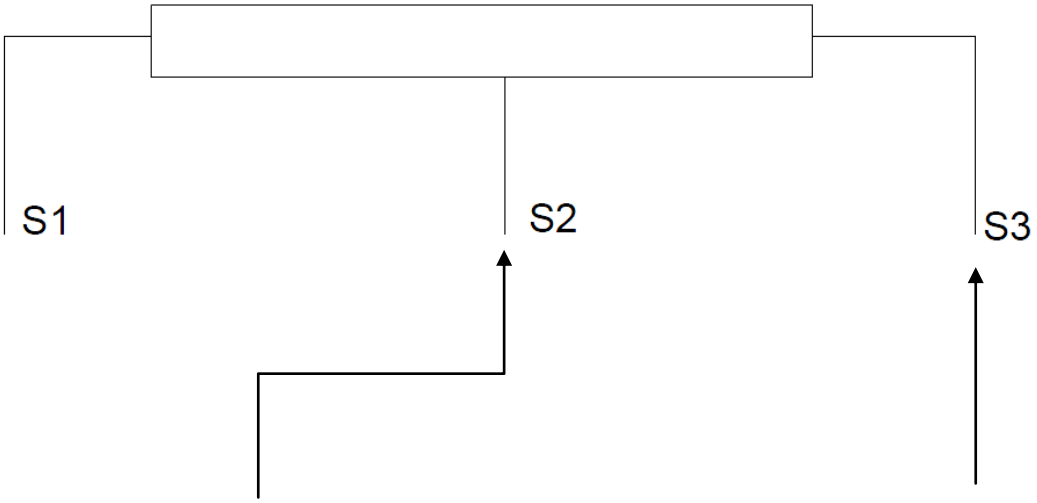
نسبت تبدیل $= \frac{2I_1}{I_2}$



نسبت تبدیل $= \frac{4I_1}{I_2}$

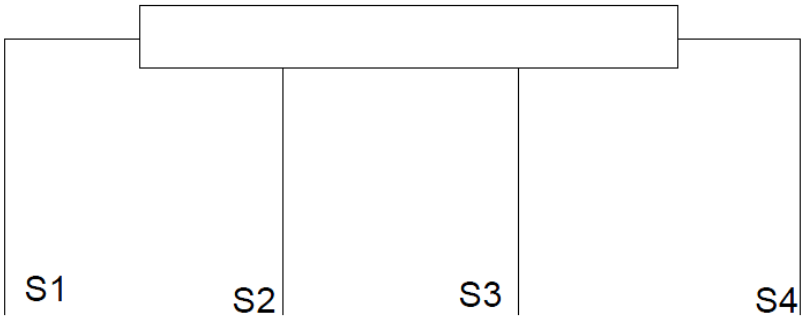
علاوه بر اینکه اولیه میتواند دارای تپ باشد برای ثانویه نیز میتوان سیم پیچ با تپ های مختلف انتخاب کرد درادامه چند نمونه را مشاهده خواهید نمود.

بدون تپ



برای بیشترین مقدار جریان ثانویه و کمترین مقدار جریان اولیه

برای کمترین مقدار جریان ثانویه و بیشترین مقدار جریان اولیه

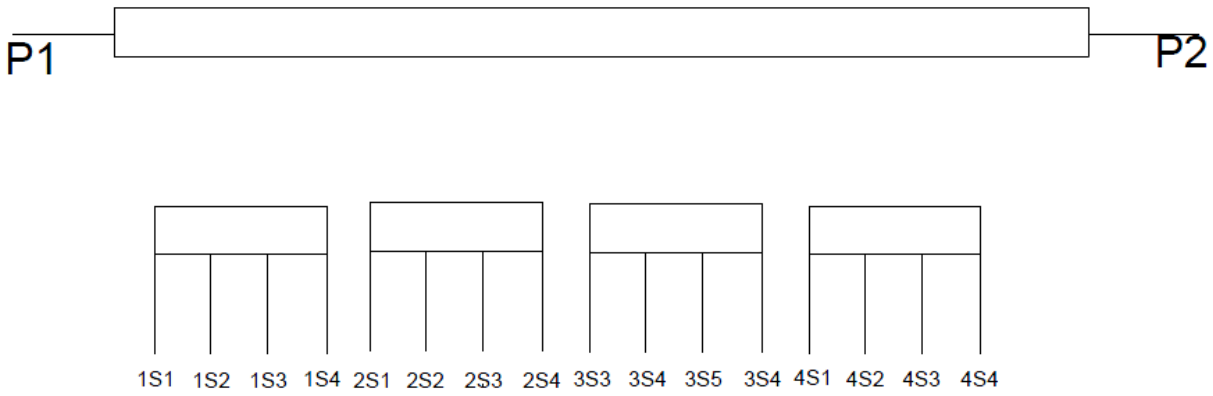


حداقل جریان ثانویه و یا حداکثر جریان اولیه $S_1 - S_2$

حداکثر جریان اولیه و یا حداقل جریان ثانویه $S_1 - S_4$

مثال

در زیر شکل یک ترانسفورماتور جریان با تپ های مختلف و دارای چهار سیم پیچ جداگانه (core)و جدول مشخصات آن داده شده است.



نوع سیم پیچ	مورد استفاده	کلاس	قدرتVA	نسبت تبدیل	نوع ترمینال
1	حفاظت	$10P_{10}$ $10P_{10}$ $5P_{10}$	5 30 60	50/1 150/1 250/1	$1S_1-1S_2$ $1S_1-1S_3$ $1S_1-1S_4$
2	حفاظت	$10P_{10}$ $10P_{10}$ $5P_{10}$	5 30 60	50/1 150/1 250/1	$2S_1-2S_2$ $2S_1-2S_3$ $2S_1-2S_4$
3	اندازه گیری	0.5 1.5 0.5M5	5 30 60	50/1 150/1 250/1	$3S_1-3S_2$ $3S_1-3S_3$ $3S_1-3S_4$

تعریف بعضی ازپارامتر های مشخصات فنی ترانسفورماتور جریان

الف-ولتاژ : عبارتست از حداکثر ولتاژ شبکه یا مداری که به وسیله C.T استفاده می شود.

ب- ولتاژ تست AC : عبارتست از ولتاژی که با فرکانس نامی شبکه به مدت یک دقیقه تحمل می کند.

ج- BIL : عبارتست از تحمل C.T در مقابل امواج ضربه ای و آن بالاترین ولتاژی است که بر اثر تخلیه بار ابرها روی آن اعمال شود و می تواند تحمل نماید.

د- جریان حرارتی دائم : عبارتست از جریانی که به طور دائم از اولیه ترانسفورماتور جریان عبور نماید و C.T بتواند آنرا تحمل کند ، اصولاً همان جریان نامی اولیه است و طبق استانداردها میتواند حداکثر تا $1.2\mathrm{I}_n$ برسد.

هـ - جریان حرارتی لحظه ای قابل تحمل I_{th} : عبارتست از حداکثر جریانی بر حسب KA که به مدت یک ثانیه از اولیه عبور کند و به آن آسیبی نرساند، به شرط اینکه ثانویه اتصال کوتاه باشد ، اما چنانچه زمان عبور از یک ثانیه تجاوز کرد مقدار جریان I_t از رابطه زیر به دست می آید :

$$\mathrm{I}_t = \frac{\mathrm{I}_{th}}{\sqrt{t}}$$

P_k قدرت اتصال کوتاه به MVA در محل نصب

$$\mathrm{I}_{th} = \frac{\mathrm{P}_k}{\nu_n \sqrt{3}}$$

ν_n ولتاژ شبکه بر حسب KV

ی- جریان دینامیک : عبارتست از پیک جریان در حالتی که ثانویه اتصال کوتاه است از طرف اولیه عبور نماید و هیچگونه آسیب حرارتی و یا دینامیکی بر C.T وارد نکند ، مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_{dyn} = 2.5 I_{th}$$

نکته قابل توجه اینکه اصولاً I_{th} را همان حداکثر جریان اتصال کوتاه در محل نصب C.T در نظر میگیرند.

در جدول زیر بعضی از مشخصات ترانسفورماتورهای جریان آورده شده است.

BIL(kv)	ولتاژ تست در یک دقیقه kv	حداکثر ولتاژ شبکه kv
325	140	72.5
380	150	100
450	185	123
550	230	145
650	230	145
650	275	170
900	395	245
1050	510	300
1175	570	362
1425	680	420
1550	740	525
_____	3	0.6
_____	6	1.2
_____	11	2.4
45	16	3.6
60	22	1.2
75	28	12
95	38	17.5
125	50	24
170	70	36
250	95	52

ولتاژ تست برای سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتورهای جریان 2KV به مدت 1 دقیقه می باشد.

و – کلاس دقت C.T :

همانطوری که بیان شد کلاس ترانسفورماتورهای جریان برای حفاظت به صورت aPn بیان می شود ، که برای حفاظت اصولاً حداکثر خطا برای مقدار جریان را 10٪ و مقدار خطای α را حداکثر 7 درجه مجاز می دانند.

مقدار n در حقیقت برابر است با نسبت حداکثر جریانی که از اولیه ترانسفورماتور جریان عبور نموده به جریان نامی C.T، در صورتیکه مقدار خطای C.T از a٪ تجاوز نکند.

$$n=\frac{I_{1max}}{I_{1rat}} .$$

در این رابطه I_{1max} حداکثر جریانی است که از اولیه عبور میکند و I_{1rat} جریان اولیه نامی C.T می باشد.

همانطوریکه بیان شد $n = f(Z_b)$ است، این رابطه آن گاه صحیح است که $\alpha+\gamma=90^\circ$ باشد.اما در عمل این زاویه کمتر از 90 درجه است و $\Delta I < \%a$ میباشد.

برای انتخاب مقدار n برای حالتی که C.T بتواند به خوبی کار خود را انجام دهد ، باید مسائل زیر را در نظر گرفت . فرض کنیم در نقطه ای جریان اتصال کوتاه I_{sc} باشد در این صورت برای اینکه حداکثر در این جریان مقدار خطا 10٪ و 7 درجه باشد میتوان N را از رابطه زیر به دست آورد:

$$n=\frac{k_a}{\alpha}.\frac{I_{sc}}{I_{1rat}}$$

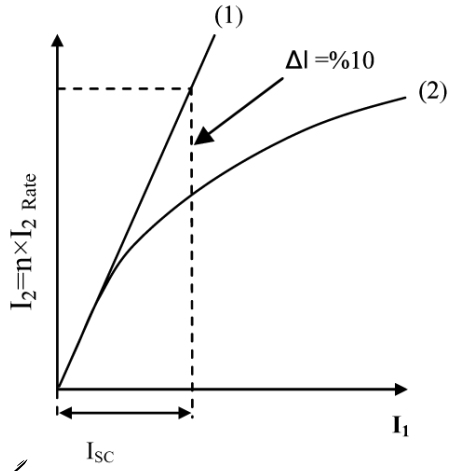
K_a بستگی به وضعیت و عمل C.T در حالت اتصال کوتاه در مقابل جریان های گذرا دارد که بین 1.2 تا2 است ولی برای C.T های حفاظتی در شرایطی که سریع اشباع شود $K_a = 1$ است و α=0.8 میباشد. α در حقیقت عبارتست از ضریب اصلاح مقدار واقعی جریان ثانویه C.T و مقداری که اسمی است که اصولاً این اعداد را سازنده در اختیار میگذارد.

البته بدیهی است که در جریان کمتر از I_{sc} و یا z کمتر از Z_b مقدار خطا کمتر خواهد شد.

و در شکل مقابل این وضعیت نشان داده شده است.

(1)منحنی C.T ایده آل

(2)منحنی C.T ساخته شده



تذکر _

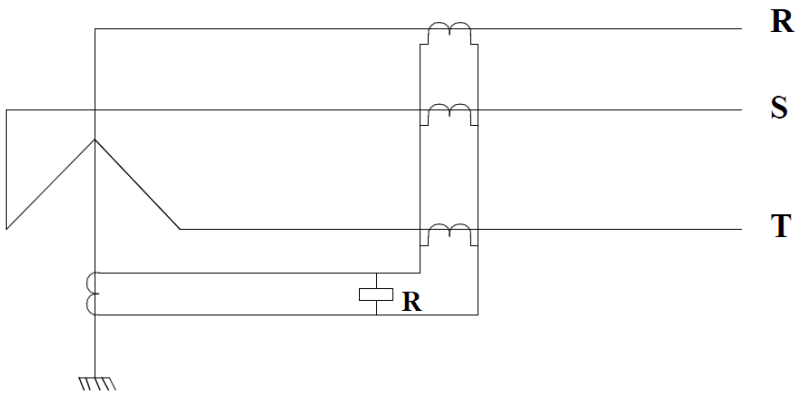
در بعضی استانداردها مانند استاندارد BS کلاس دقت را با حروف هم نشان میدهند ، مانند C.T با کلاس S که معادل5P و T که معادل 10P می باشد و C.T با کلاس X که برای رله های دیفرانسیل استفاده می شود.

ترانسفورماتور جریان با کلاس X

این نوع C.T برای مواقعی استفاده می شود که جهت دستگاه های حفاظتی نتوان از C.T های 5P و10P ، استفاده کرد. C.T با کلاس X راکتانس کمی دارد بنابراین مقدار تلفات فلوی آن کاهش یافته و باید مطابق شرایط زیر مشخص شود:

a) جریان اولیه نامی C.T
b) نسبت تبدیل (نباید خطا از 0.25٪ تجاوز نکند)
c) ولتاژی که در آن اشباع شروع میشود.(Knee Point)
d) مقدار جریان تحریک C.T در نقطه اشباع (Knee Point) و در نقاط دیگر منحنی مغناطیسی آن.
e) مقاومت اهمی مدار ثانویه C.T در $75^{\circ c}$ برای بدترین درجه حرارت محیط.

چنانچه به شکل زیر نگاه کنیم در این مدار رله R جهت حفاظت سیستم بالانس استفاده شده ، بنابراین C.Tهایی که استفاده شده نه تنها باید در جریانهای اولیه زیادی فعال باشد ، بلکه ثانویه آن نیز باید بتواند برای امپدانسهای مختلفی فعال باشد.

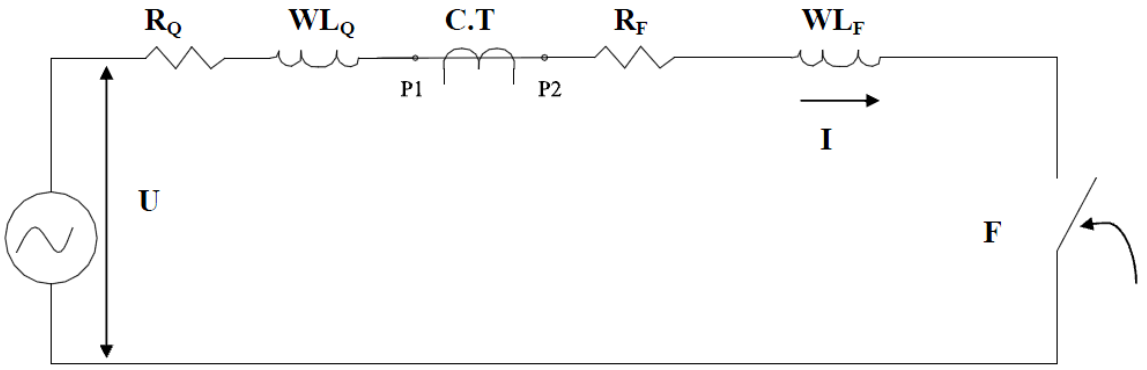


در مورد خصوصیات دقیق این C.T و چگونگی مشخصات آن دقیقاً صحبت خواهد شد ، اما آنچه مهم است ای است که هر مهندسی برای طراحی سیستم خود باید موارد بالا را مطرح کرده و با توجه به آن C.T لازم را انتخاب نمایند.

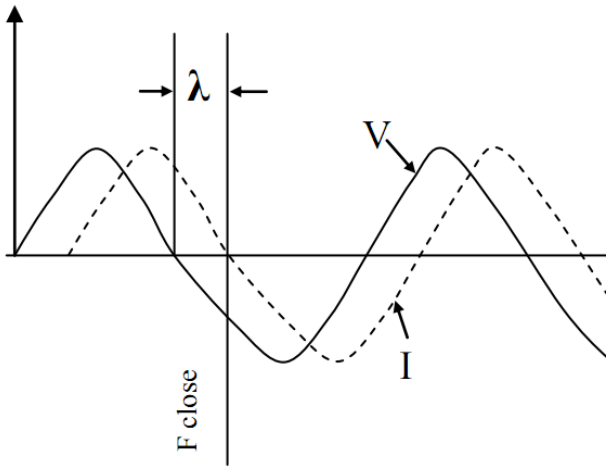
اثر جریانهای گذرا در C.T

برای بررسی جریانهای گذرا بهتر است ابتدا اتصال کوتاه و چگونگی تولید ولتاژهای گذرا را بررسی میکنیم. اتصال کوتاه مانند حالتی است که اولیه C.T به صورت سری در مداری است که دارای امپدانس R+JX می باشد.

حالت اتصال کوتاه در حقیقت مساوی است با بسته شدن کلید F که در اینحالت جریان در مدار برقرار میشود.



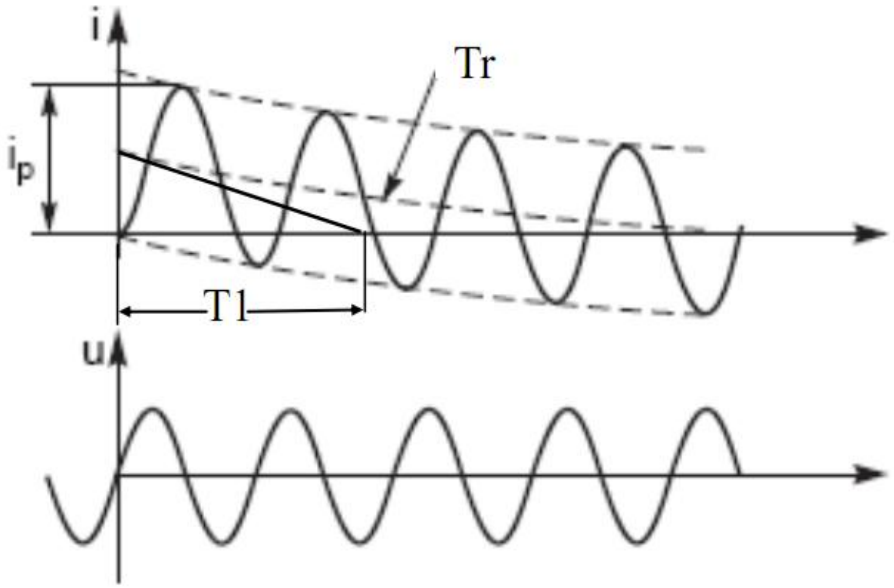
برای بررسی چگونگی ولتاژ در شبکه و یا جریان لازم است ابتدا اختلاف فاز بین U , I را بدانیم ، چنانچه اختلاف فاز به λ نشان داده شود در شکل به خوبی مشاهده میشود ، بنابراین برای حالتی که جریان و ولتاژ کاملاً سینوسی باشند داریم که :



$$tg\,\lambda = \frac{\omega(L_Q + L_F)}{R_Q + R_F} = \frac{\omega L_{tot}}{R_{tot}}$$

در این رابطه Z_Q امپدانس منبع تغذیه و Z_F امپدانس مدار مصرف میباشد. در لحظه $t = 0$ چون کلید F بسته می-شود ، بنابراین جریان میخواهد ناگهانی به مقدار ماکزیمم برسد ، اما در مداری که سلف وجود داشته باشد ، عملاً امکان پذیر نیست. زیرا سلف با افزایش ناگهانی جریان مخالفت کرده، بنابراین مقدار حداکثر جریان به طرف صفر میل میکند . به هر جهت موج سینوسی جریان تغییر فرم پیدا مینماید و این تغییر فرم ناشی از یک مؤلفه غیر متناوب میباشد که

همان مؤلفه T_r در شکل میباشد که به غلط مؤلفه DC گفته میشود که این مؤلفه، به مؤلفه سینوسی جریان افزوده خواهد شد.



مماس بر مؤلفه غیر پریودیک جریان محور زمان را در نقطه t_1 قطع میکند ،میدانید که مقدار T_1 برابر است با :

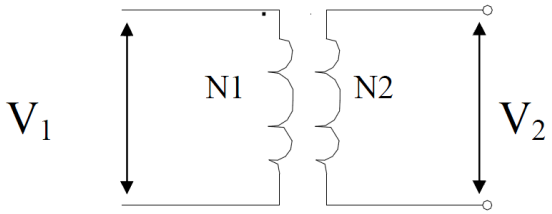
$T_1 = \frac{L_{tot}}{R_{tot}}$ که میتوان مقدار T_1 را با داشتن امپدانس منبع و ثابت زمانی بار محاسبه کرد. حداکثر برای ژنراتورهای بزرگ، حدود 350ms میباشد.

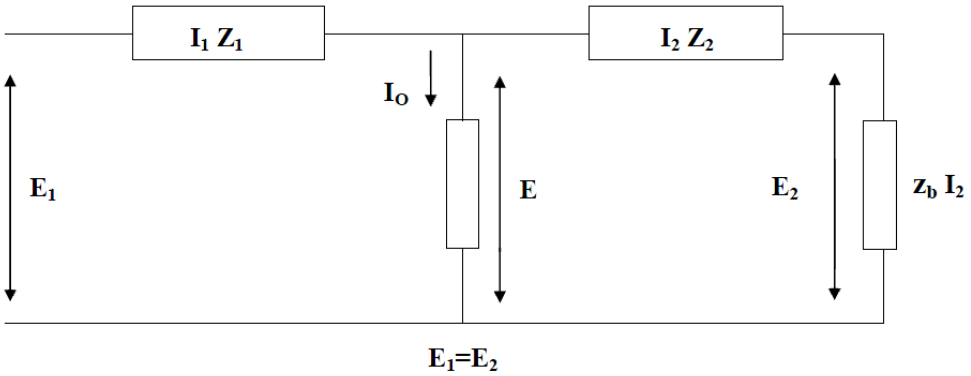
ترانسفورماتور ولتاژ

همانطور که میدانید ولتاژهای بالاتر از 600v را نمیتوان به صورت مستقیم به وسیله دستگاههای اندازهگیری ، اندازه گرفت. بنابراین لازم است که ولتاژ را کاهش داد تا بتوان ولتاژ را اندازه گرفت و یا اینکه در رله های حفاظتی استفاده کرد. ترانسفورماتور ولتاژ به همین منظور استفاده میشود.

ترانسفورماتور ولتاژ دو نوع می باشد.

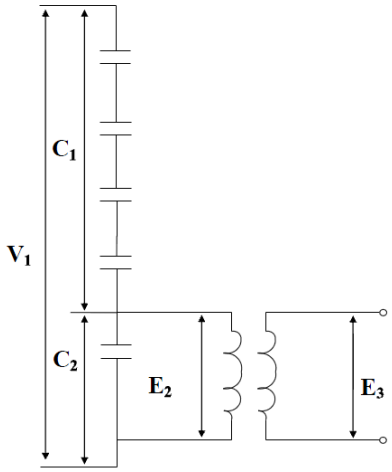
1_ **ترانسفورماتور ولتاژ از نوع مغناطیسی** : مطابق شکل زیر که دارای دو نوع سیم پیچ اولیه و ثانویه میباشد که برای ولتاژهای بالاتر از 600 ولت استفاده می شود .





2_ **ترانسفورماتور ولتاژ از نوع خازنی** : مطابق شکل زیر که دارای تعدادی خازن و دو سیم پیچ اولیه و ثانویه است که سیم پیچ اولیه به دو سر خازن C_2 اتصال یافته است و اصولاً طوری خازن C_1 را انتخاب میکنند که ولتاژ دو سر C_2 بین 10 تا 30kv گردد.

این نوع ترانسفورماتور ولتاژ برای ولتاژهای بالاتر از 132kv استفاده میشود ، ولی برای ولتاژهای کمتر 132kv نیز در صورتیکه PLC استفاده شده باشد از این ترانسفورماتور ولتاژ استفاده می کنند.



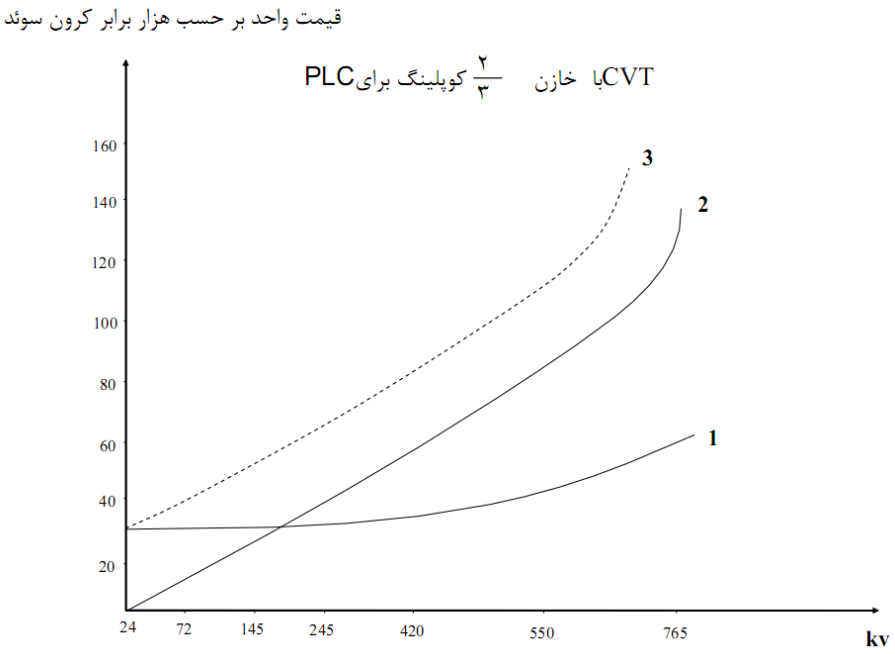
$V\ T$ =*Voltage* Transformer

P.T=Potantial Transformer

$C V\ T$ =*Capasitor Voltage* Transformer

در انتخاب V.T یا C.V.T تنها مسئله فنی مد نظر نیست بلکه مسئله اقتصادی نیز مطرح می باشد و باید دانست در یک شبکه کدام ارزانتر خواهد بود ، دیاگرام شکل زیر تفاوت قیمت بین V.T وC.V.T را دقیقاً مشخص می کند. با ازدیاد ولتاژ در صورتیکه V.T انتخاب شود لازم است ، که مسئله عایق بندی و تبادل حرارتی کاملاً رعایت شود و به همین دلیل قیمت بالا میرود ولی در C.V.T کافی است تعدادی خازن دیگر با خازنهای قبلی سری شود تا ولتاژ آن افزایش یابد.در بعضی از سیستمها که

وجود دارد ، از C.V.T استفاده میشود.



_ بررسی V.T:

اگر چه ترانسفورماتور جریان دارای مدار معادلی شبیه ترانسفورماتور قدرت است که اتصال کوتاه شده باشد ، اما ترانسفورماتور ولتاژ دارای مشخصه ای است نظیر ترانسفورماتور قدرت بدون بار ، که نسبت تبدیل آن مساوی است با :

$\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}$ ⟵ نسبت تبدیل

این رابطه وقتی صادق است که از افت ولتاژ در اولیه و ثانویه صرفنظر شود ؛ اما چنانچه از V.T بار گرفته شود مسلماً مقداری افت ولتاژ خواهیم داشت که ناشی از بار مصرفی است ، این افت در اولیه و یا ثانویه V.T ظاهر میگردد.

در این حالت ولتاژ ثانویه دارای افتی است که ناشی از افت ولتاژها

I_0 که دارای افت ولتاژی برابر I_0Z_0

I_1 که دارای افت ولتاژی برابر I_1Z_1

I_2 که دارای افت ولتاژی برابر I_2Z_2 میباشد بنابراین مقدار افت کلی V.T برابر است با :

$$\Delta E = I_0Z_0 + I_1Z_1 + I_2Z_2$$

پس نسبت تبدیل واقعی عبارتست از :

$$\frac{E_1-\Delta E}{E_1}$$

و مقدار خطا در نسبت تبدیل بر حسب درصد برابر است با :

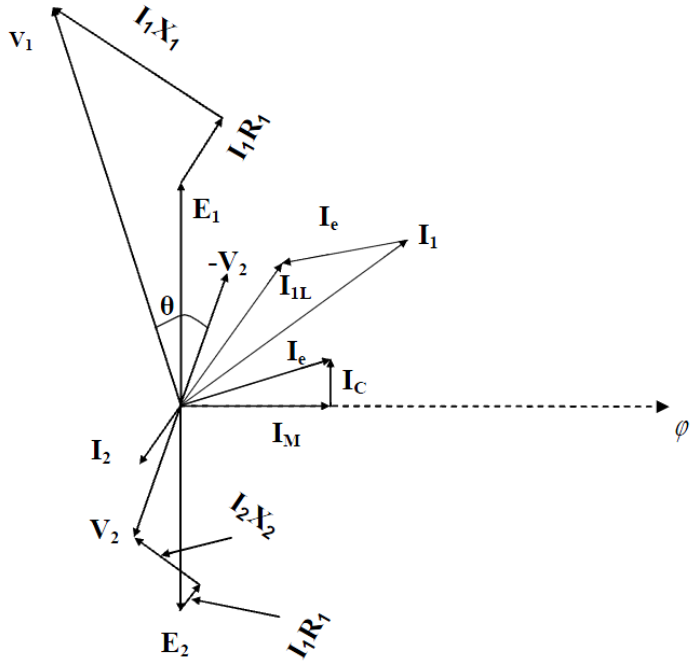
$$\frac{\frac{E_1}{E_2}-\frac{E_1-\Delta E}{E_2}}{\frac{E_1}{E_2}}.100\%=\frac{\Delta E}{E_1}.100\%$$

با توجه به مطالب گفته شده مقدار افت ولتاژ دارای یک مقدار ثابت IZ_1 است و یک مقدار تغییر افت ولتاژ روی Z_1 و Z_2 می باشد که مقدار آن بستگی به بار دارد.

البته می توان این مقدار را با اضافه نمودن تعدادی تپ از بین برد به طوریکه در بار کامل نسبت تبدیل نامی را داشته باشد ولی در حالت بی باری دارای ولتاژ ثانویه بالایی میباشد.

بنابراین برای رفع عیب ، نسبت تبدیل را طوری در نظر میگیرند که نسبت تبدیل درست در 60 تا 65٪ ظرفیت نامی V.T داشته باشد.

شکل زیر نمودار ولتاژ اولیه V_1 و ثانویه V_2 و برآیند بردارها را مشخص نموده:



V_1 ولتاژ داده شده به اولیه

E_1 ولتاژ اندازه گیری شده در اولیه

V_2 ولتاژ اندازه گیری شده در ثانویه

E_2 ولتاژ نامی ثانویه

ϕ فلوی مغناطیسی

I_e جریان تحریک

I_m جریان افت آهن

I_c جریان افت مس

θ خطا در تغییرات ولتاژ اولیه و ثانویه φ زاویه بین جریان و ولتاژ ثانویه

I_2R_2 افت ولتاژ درمقاومت ثانویه I_1R_1 افت ولتاژ درمقاومت اولیه

I_2X_2 افت ولتاژ در راکتانس ثانویه I_1X_1 افت ولتاژ در راکتانس اولیه

I_2 جریان ثانویه I_1 جریان اولیه I_1L جریان اولیه اندازه گیری شده

خطا در ترانسفورماتور ولتاژ

1_خطای ولتاژ:

همانطوریکه گفته شد در ولتاژ ثانویه مقداری افت هست که برابر است با :

$$\text{خطای ولتاژ} \quad \% = \frac{K_n \ V_2 - V_1}{V_1}.100$$

K_n نسبت تبدیل نامی ترانسفورماتور ولتاژ

V_1 ولتاژ اولیه V.T

V_2 ولتاژ ثانویه V.T

2_**خطای زاویه** یا تغییر زاویه ولتاژ ثانویه نسبت به ولتاژ اولیه که مطابق شکل صفحه قبل همان زاویه θ است.

مقدار خطای ولتاژ و زاویه برای 120٪ تا 80 ولتاژ نامی در 100٪ تا 25 قدرت نامی ترانسفورماتور ولتاژ صادق است.

کلاس ترانسفورماتور ولتاژ:

کلاس ترانسفورماتور ولتاژ در حقیقت بیان کننده مقدار خطا در ترانسفورماتور ولتاژ میباشد و طبق استاندارد IEC186 برابر است با :

$$\text{IEC186} \rightarrow 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3, 3P, 6P$$

در جدول زیر مشخصات V.T با کلاسهای مختلف بیان شده است.

کلاس	ظرفیت نامیVA%	تغییرات ولتاژ٪	حد خطای ولتاژ ٪	تغییرات θ بر حسب دقیقه و ٪	مورد استفاده
0.1	25_100	80_100	±0.1	5	آزمایشگاه
0.2	25_100	80_100	±0.2	10	اندازه گیری دقیق
0.5	25_100	80_100	±0.5	20	اندازه گیری استاندارد
1	25_100	80_100	±1	40	اندازه گیری زیاد
3	25_100	80_100	±3	-__	------
3P	25_100	5_VF	±3P	120	حفاظت
6P	25_100	5_VF	±6P	240	حفاظت

کلاس	0.9 تا 1.1 برابر ولتاژ اولیه و	0.25 تا 1 برابر ظرفیت PT
	خطای ولتاژ ٪	خطای زاویه بر حسب دقیقه
A	±0.5	±20
B	±1	±30
C	±2	±60

کلاس	در 0.25 تا 1 برابر ظرفیت نامی			
	0.5 تا 0.9 برابر ولتاژ نامی اولیه PT		1.1 تا VF برابر ولتاژ نامی اولیه	
	خطای ولتاژ ٪	خطای زاویه بر حسب دقیقه	خطای ولتاژ ٪	خطای زاویه بر حسب دقیقه
E	±3	±120	±3	±120
F	±5	±250	±10	±300

کلاسهای A و B وC وE وF مطابق استاندارد BS میباشد.

تذکر:

در جدول صفحه پیش V_F عبارتست از ضریب ولتاژ و آن عبارتست است از ضریبی که در ولتاژ نامی V.T ضرب میشود ، و آن مقدار ولتاژی است که چنانچه در سیستم سه فاز ، یک فاز زمین شود ازدیاد ولتاژ تا آن حد برای V.T قابل تحمل باشد. زمان تحمل ولتاژ مذکور برای سیستم کاملاً زمین شده و دارای حفاظت 30 ثانیه و در سیستم بدون حفاظت 8 ساعت است.

مقدار V_F برای سیستمهایی که مستقیم زمین نشده 1.9 و برای سیستمهایی که زمین شود 1.5 میباشد.

در حقیقت مقدار ضریب ولتاژ برابر است با حداکثر ولتاژ دو سر V.T در موقع اتصالی به مقدار ولتاژ اولیه نامی V.T .

جدول زیر مشخصات V.T با ضریب ولتاژهای مختلف را بیان میکند.

طریقه اتصال طرف اولیه V.T و سیستم زمین نمودن آن	زمان اعمال ولتاژ	ضریب ولتاژ
بین فازها و هر وسیله دیگر ، بین ستاره ترانسفورماتور قدرت و زمین	بطور دائم	1.2
بین فاز و زمین در حالتی که کاملاً نول سیستم زمین شده باشد	بطور دائم 30 ثانیه	1.2 1.5
بین فاز و زمین در حالتی که کاملاً نول سیستم زمین نشده باشد و در حالتی که اتصال زمین به صورت اتوماتیک قطع گردد.	بطور دائم 30 ثانیه	1.2 1.9
بین فاز و زمین در سیستمی که نول آن زمین نشده باشد و رله قطع کننده اتصال زمین هم نداشته باشد.	بطور دائم 8 ساعت	1.2 1.9

ظرفیت ترانسفورماتور ولتاژ :

ظرفیت یک V.T عبارتست از مجموع قدرت مصرفی کلیه وسائلی که از آن تغذیه میکند و طبق استاندارد IEC186 مقدار آن برابر یکی از اعداد زیر میباشد.

10,15,25,30,50,75,100,150,200,300,400,600VA

انتخاب نسبت تبدیل:

نسبت ولتاژ سیستم به 100 یا 110 ولت را نسبت تبدیل V.T گویند ، ولتاژ اولیه را اصولاً ولتاژ V_m شبکه انتخاب میکنند ، بنابراین اگر V.T دو فاز باشد نسبت تبدیل برابر است با V/100 یا V/110 ولت ، اما چنانچه یک فاز باشد و بین فاز و زمین وصل گردد و نسبت تبدیل برابر است با :

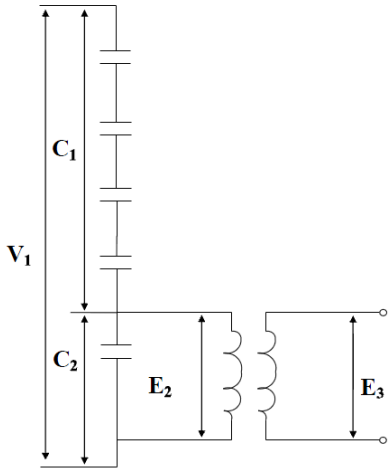
$$\frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{\frac{110}{\sqrt{3}}} \quad \text{OR} \quad \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{\frac{100}{\sqrt{3}}}$$

مشاهده میشود که ولتاژ ثانویه 100 یا 110 ولت است.

تذکر:

مدار ثانویه ترانسفورماتور در هیچ شرایطی در موقع کار ترانسفورماتور نباید اتصال کوتاه باشد زیرا جریان زیادی از ثانویه آن عبور نموده و ایجاد گرمای زیادی در ترانسفورماتور نموده و سبب سوختن آن میگردد.

نسبت تبدیل در C.V.T



با توجه به شکل مقدار نسبت تبدیل بین خازنها برابر است با :

$$K_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{E_1}{E_2}$$

اما نسبت تبدیل ترانسفورماتور ولتاژ منشعب از خازنها برابر است با :

$$K_2 = \frac{E_2}{E_3}$$

بنابراین مقدار نسبت تبدیل برابر خواهد بود با:

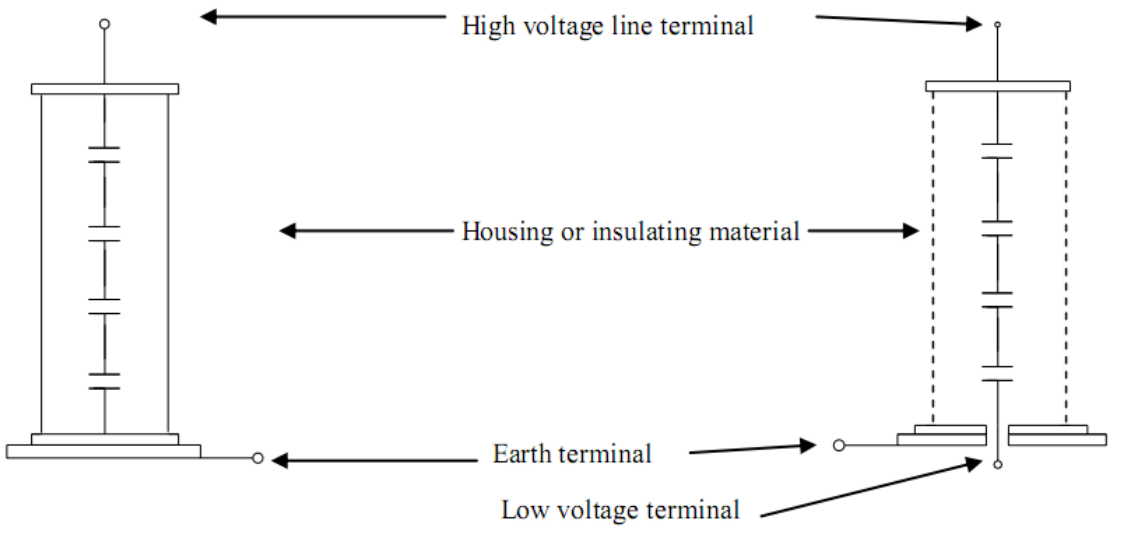
$$K=K_1.K_2$$

اصولاً K_1 را طوری انتخاب میکنند که $E_2 = 22\sqrt{3}^{KV}$ شود و برای اینکار در ولتاژهای مختلف کافی است که C_1 را تغییر دهند.

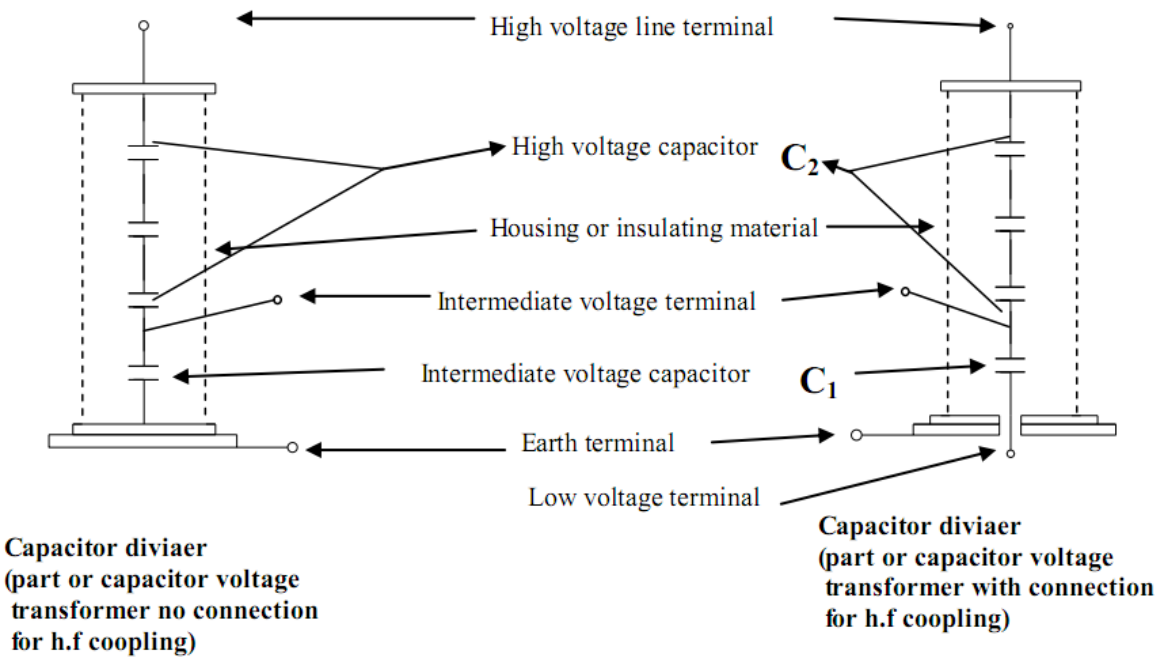
موارد استفاده C.V.T

همانطوریکه گفته شد تا ولتاژهای 72kv اقتصادی نیست که از C.V.T به عنوان ترانسفورماتور ولتاژ استفاده نمود ، ولی برای ولتاژهای بالا با توجه به ایزولاسیون و سادگی استفاده ، اصولاً از C.V.T بهره میگیرند. C.V.T علاوه بر اینکه به عنوان ترانسفورماتور ولتاژ استفاده میشود ، اصولاً دارای تعدادی خازن میباشد که به خازنهای کوپلاژ معروف است و این خازنها را جهت سیستم های PLC استفاده مینمایند که برای سیستم مخابرات پستها است.

در شکل هایی که در ادامه آمده است، انواع C.V.T مشخص شده است.



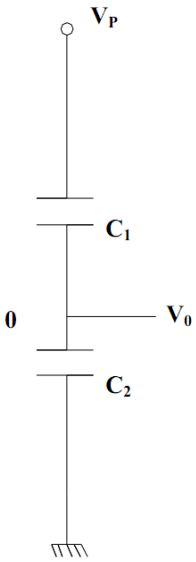
Capacitor for over voltage protection **Capacitor for h.f coopling**



بررسی C.V.T

همانطوریکه گفته شد از ولتاژهای 132kv به بالا استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ الکترومغناطیس اقتصادی نیست و ترانسفورماتور خازنی یا C.V.T به جای آن به کار میرود.

بدیهی است که از C.V.T علاوه بر استفاده به عنوان P.T جهت PLC نیز استفاده خواهد شد.



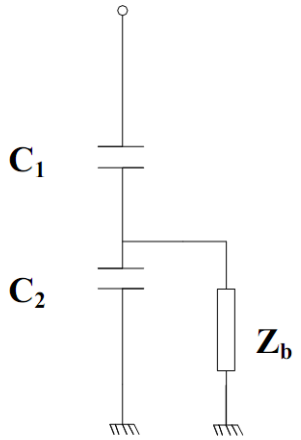
مدار C.V.T

در شکل مقابل یک C.V.T نشان داده شده است.

$$V_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_P = K V_P$$

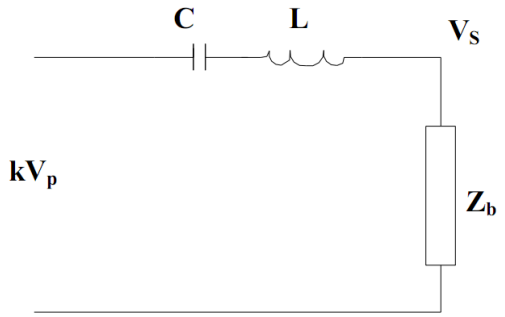
$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

با انتخاب مناسب C_1 و C_2 در حقیقت انتخاب K میتوان نسبت تبدیل لازم را به دست آورد اگر چنانچه مطابق شکل مقابل امپدانس Z_b را به دو سر خازن C_2 وصل کنیم ، بدیهی است که نسبت تبدیل به هم خواهد خورد.



بنابراین میتوان در اینحالت مدار معادل را به صورت زیر در آورد.

برای اینکه اثر سلف فوق را از بین ببریم ، در اینحالت از یک سلف هماهنگ کننده استفاده میکنیم. بنابراین مدار به صورت زیر خواهد بود.

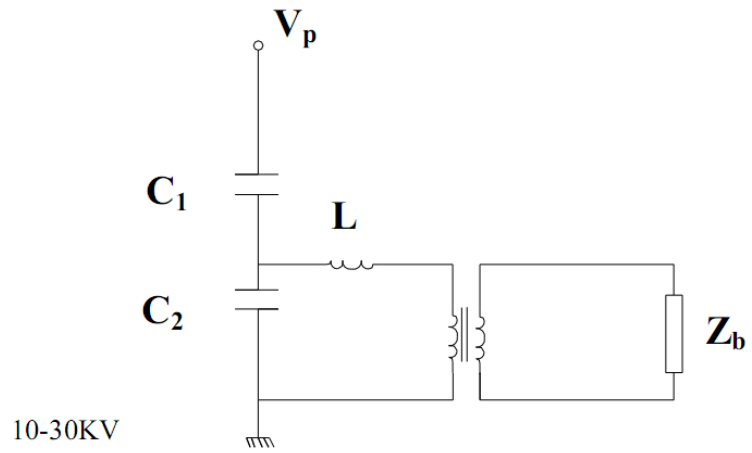


بنابراین در این حالت خواهیم داشت :

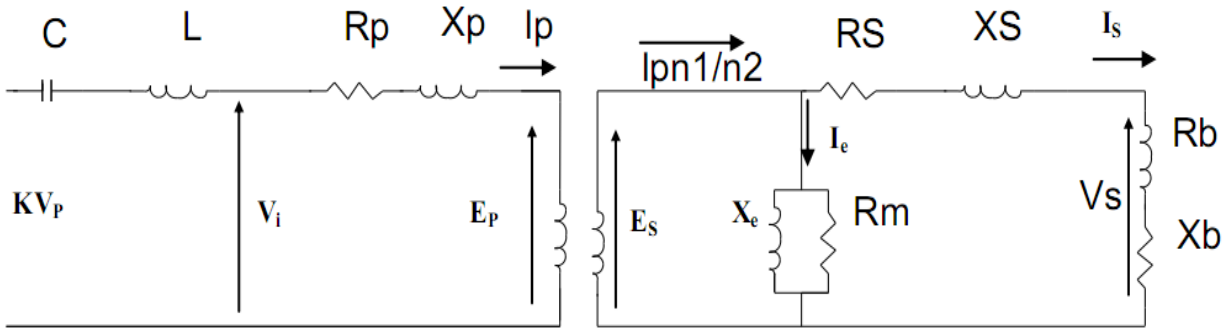
$$V_S = KV_P$$

در عمل چون تبدیل ولتاژ بالا به 110 یا 100 ولت عملاً لازم است که از خازن C_2 بزرگی استفاده کرد، بنابراین ابتدا تقسیم ولتاژ را تا حدود 10 تا 30 کیلو ولت انجام داده، سپس

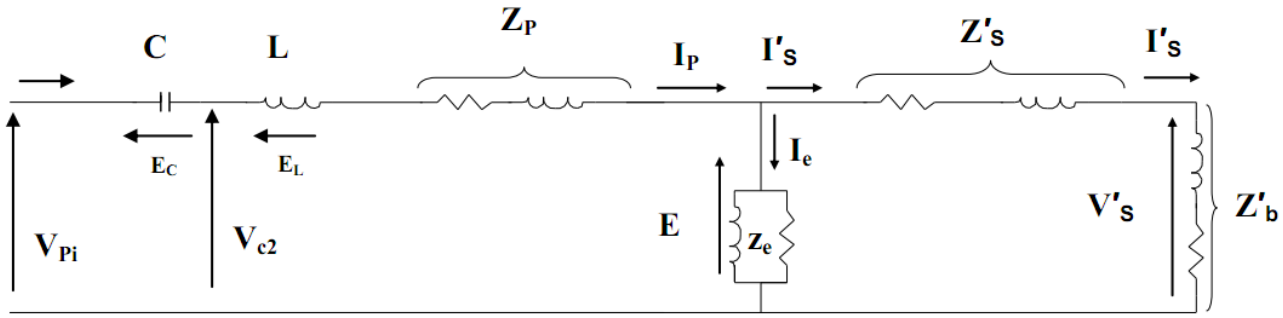
از ترانسفورماتور ولتاژ الکترومغناطیس استفاده میشود ، جهت کاهش نهایی ولتاژ مدار را به صورت زیر در میآوریم:



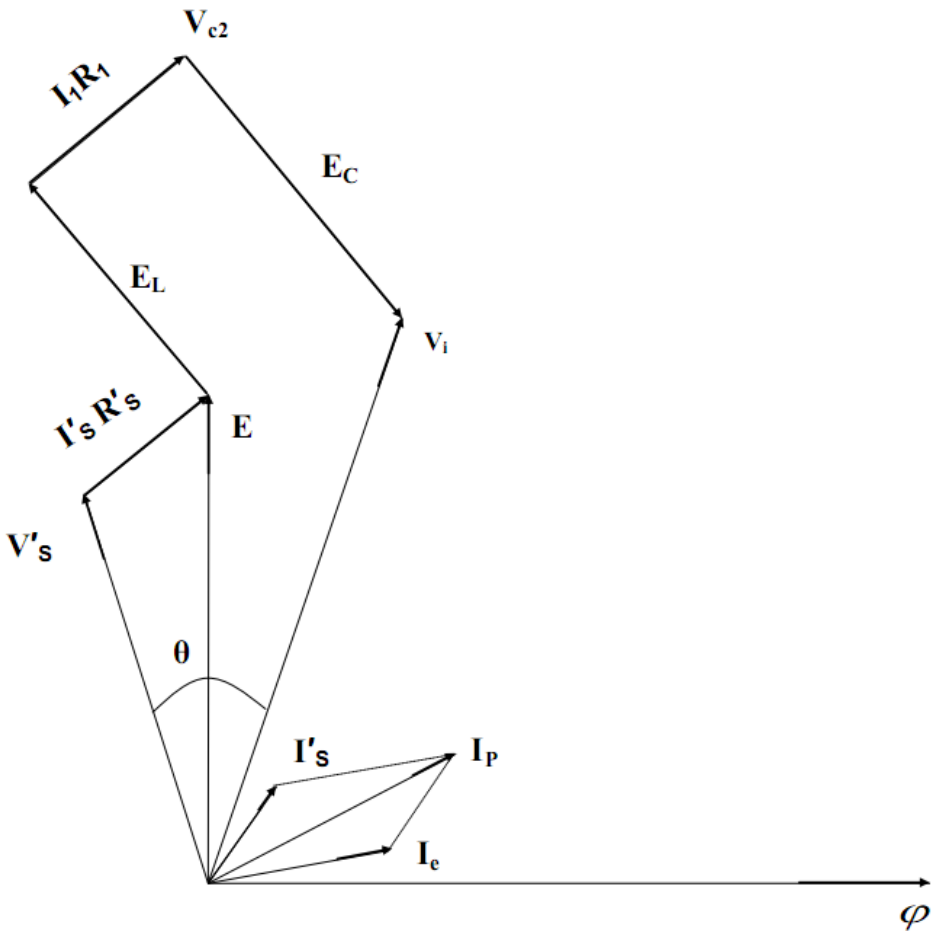
حال با در نظر گرفتن مدار معادل P.T ، مدار معادل کلی C.V.T به صورت زیر خواهد بود.



با انتقال امپدانسهای ثانویه به طرف اولیه مدار به صورت زیر خلاصه میشود.



با توجه به مدار بالا دیاگرام برداری به صورت زیر خواهد بود.

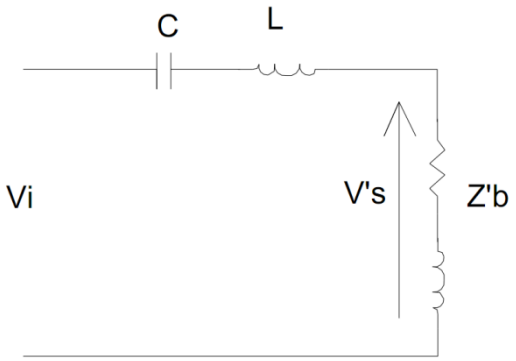


مشاهده می شود که C.V.T نیز مانند P.T و C.T چون کاملاً ایده آل نیست دارای خطا است، مقدار خطای آن برابر زاویه θ و خطای نسبی ولتاژ برابر است با :

$$\text{خطای نسبی ولتاژ} = \frac{V_i - V_S'}{V_i}$$

منشأ خطا میتواند که از انحراف فرکانس هم باشد که هماهنگی C و L را بر هم میزند.

با صرف نظر از تلفات ترانسفورماتور دوم داریم که:



$$V_S' = \frac{V_i Z_b'}{Z_b' + (J\omega L - \frac{1}{J\omega C})}$$

$$\text{خطا} = \frac{|V_i| - |V_S'|}{|V_i|} \qquad \omega = \omega_0 \neq \Delta\omega$$

حفاظت جریان زیاد در خطوط انتقال

2.1 مقدمه

همانطوری که اشاره شد واضح ترین تأثیر خطاها ایجاد یک جریان ناگهانی است. از این رو طبیعی است که از دامنهٔ جریان برای اثبات وجود خطا استفاده شود. از این رو هیچ جای تعجبی نیست که از حفاظت های اضافه جریان به عنوان گسترده ترین نوع حفاظت استفاده می شود در خیلی از موقعیتها احتمال دارد این نوع حفاظت تنها نوع حفاظت باشد این نوع حفاظت که تنها به دامنهٔ جریان بستگی دارد بدون توجه به زاویه فاز به عنوان حفاظت اضافه جریان غیر جهت دار شناخته می شود. اما حین مواقع نیاز است که بین خطاهای جلوی بریکر و پشت بریکر تفاوت قائل شویم. این امر تنها زمانی ممکن است که ما علاوه بر دامنهٔ جریان فاز آن را نیز با توجه به ولتاژ در محل رله در نظر بگیریم، در این حالت ها حفاظت به عنوان حفاظت جهت دار شناخته می شود کمی فکر خواننده را متقاعد میکند که حفاظت اضافه جریان جهت دار قابلیت انتخاب بیشتری را نسبت به حفاظت غیر جهت دار تأمین میکند. ما نباید فراموش کنیم که هر نوع حفاظت در ابتدا یک نظریه است سپس نیاز دارد که معرفی شود وسیلهٔ اجرا کردن حفاظت رله است، از این رو ما می توانیم یک رله اضافه جریان غیر جهت دار را تصور کنیم که حفاظت اضافه جریان غیر جهت دار را برای ما تعیین می کند و الی آخر.

به طور تاریخی فیوزها قبل از رله های اضافه جریان برای تأمین حفاظت اضافه جریان به کار برده میشود از این رو ما در بخش آینده یک نگاه مختصری به فیوزها می اندازیم.

2.2 فیوز

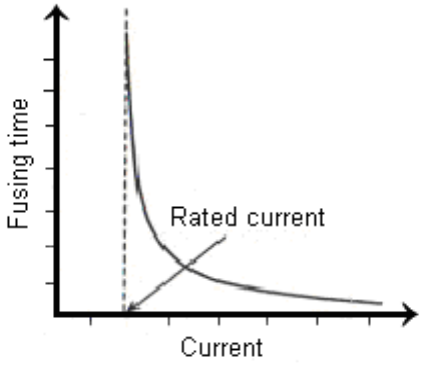
فیوزها یکی از قدیمی ترین وسایل حفاظتی هستند که کاربرد خود را تا عصر حاضر ادامه داده اند که دلیل آن می تواند سادگی عملکرد آنها باشد. فیوز اجازه می دهد که جریان نرمال از آن عبور کند اما وقتی جریان در زمان معینی از مقدار مشخصی بیشتر شود فیوز ذوب شده و مدار را قطع می کند.

در واقع فیوز سه وظیفهٔ حس کردن جریان، مقایسه کردن جریان و قطع کردن مسیر عبور جریان را در خود ترکیب کرده است.

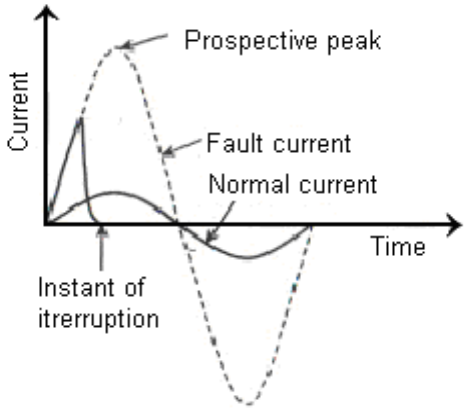
شکل (a)1-2 شکل خارجی یک فیوز با قابلیت قطع بالا (HRC) را رسم کرده است.

مشخصه جریان زمان یک فیوز در شکل (b) 2.1 نشان داده شده است. شکل موج جریان اتصال کوتاهی که فیوز از عبور آن جلوگیری می کند در شکل (c) 2.1 نشان داده شده است که در اینجا ما می توانیم ببینیم که فیوز مانع عبور جریان می شود حتی قبل از اینکه جریان به مقدار ماکزیمم خود برسد.

(a) External appearance of HRC fuse



(b) Time-current characteristic of a fuse



(c) Short-circuit current interrupted by a fuse

Figure 2.1 High raputring capacity (HRC) fuse.

2.3 رله های حرارتی

رله های حرارتی از نوع بی متال بر اساس یک قاعده کلی انبساط طولی کار می کنند این قاعده کلی بدین قرار است که دو فلز با ضریب انبساط طولی متفاوت در اثر گرمایی که به وسیلهٔ عبور جریان خطا ایجاد می شود انبساط طولی متفاوت پیدا می کنند. شکل 2.2a یک رله بی متال را نشان می دهد رلهٔ بی متال عبارت است از تسمه AB و تسمه CD که از دو فلز مختلف انتخاب

شده اند هر دو تسمه در یک دمای معین، طول یکسانی دارند اما در دمای بالاتر انبساط طولی متفاوت پیدا می کنند. شکل 2.2b عملکرد رله را نشان می دهد.

فلز با ضریب انبساط طولی بیشتر سطح خارجی منحنی است در حالی که فلز با ضریب انبساط طولی کمتر سطح داخلی منحنی را تشکیل می دهد.

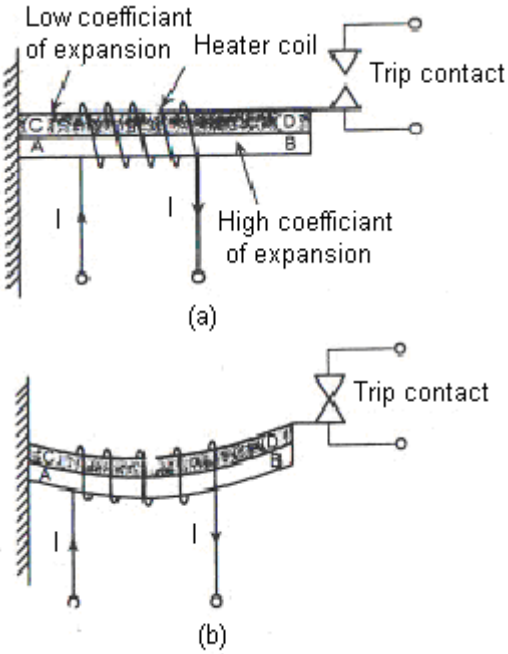


Figure 2.2 A bimetallic relay

با توجه به اینکه تأثیر گرما متناسب با مجذور جریان است و انرژی که تلف می شود برابر است با RI^2t که در اینجا t زمانی است که جریان از رله عبور می کند.

از این پس مقدار گرمای کافی در رله های حرارتی به خاصیت رله حرارتی بستگی دارد که موجب می شود که نسبتاً زیاد باشد این رله ها در جایی که عملکرد سریع آنها احتیاج نباشد مورد استفاده قرار می گیرند. در عمل کاربرد رله های حرارتی این است که یک حفاظتی را در برابر ادامه یافتن شرایط اضافه بار برای موتورها فراهم می کنند.

2.4 رله جریان زیاد

رله جریان زیاد (OC) یک ورودی از نوع جریان ac دارد خروجی رله، یک کنتکت باز است زمانی این کنتاکت بسته می شود که رله تریپ بدهد. (رله اعلام خطا کند) رله دو حالت برای تنظیم کردن دارد. time setting و plug setting. time setting زمان عملکرد رله را تعیین می کند در حالی که plug setting جریانی را که رله باید بر اساس آن تنظیم شود را تعیین می کند. اسم plug setting از رله های الکترو مکانیکی جریان زیاد آمده است. در این رله ها ما مجبوریم که یک دو شاخه کوتاه شده (کوتاه کننده) را در پل plug setting bridge تنظیم دو شاخه برق وارد کنیم تا تعداد حلقه های (دورهای) سیم پیچ عمل کننده را تغییر دهیم تا یک مقدار خاص نمونه گیری شده را بدست آوریم. این واژه در رله های مدرن نیز استفاده می شود. بلوک دیاگرام رله (oc) در شکل 2.3 نشان داده شده است.

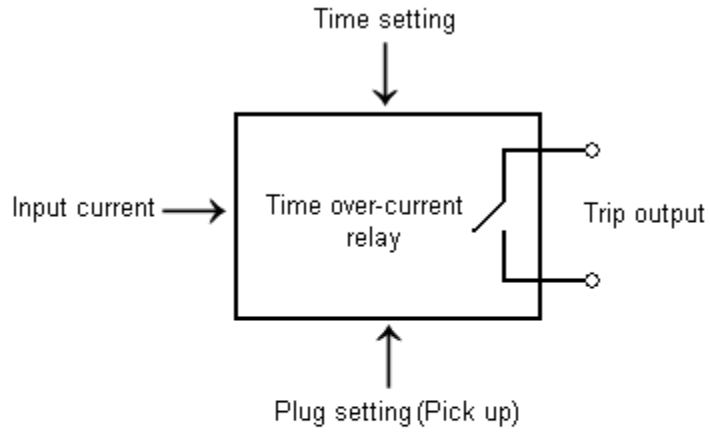


Figure 2.3 Block diagram of an over-current relay

$$PSM = \frac{I_{relay}}{PS}$$

plug setting افزاینده

(ضرب کننده)، PSM به صورت زیر تعریف می شود.

$$PSM = \frac{I_{relay}}{PS}$$

در اینجا I_{relay} جریان گذرنده از سیم پیچ عمل کننده و PS ، plug setting رله است.

مقدار PSM، جریانی که به وسیله رله دیده می شود را بیان می کند.

PSM کوچکتر از 1 به معنی جریان بار نرمال گذرنده است.

در PSM بزرگتر از 1 رله باید قطع کند.

مقادیر بالای PSM بیانگر آن است که شدت خطا چقدر است.

به عنوان مثال بیایید فرض کنیم رله یک آمپری (رله با سیم پیچی طراحی شده است که این سم پیچ در شرایط نامی جریان 1A را می تواند تحمل کند) که دو شاخه (plug) آن برای 0.5A تنظیم شده است. (50% جریان نامی) فرض کنید که برای یک خطای معین جریان رله 5.0A باشد بنابراین گفته می شود که رله باید در $PSM = \frac{5.0}{0.5} = 10$ عمل کند.

2.4.1 رله های جریان زیاد آنی

باید توجه داشت که کلمهٔ آنی معنی متفاوتی در حوزه حفاظت سیستم قدرت دارد آنی واقعاً به معنای زمان تأخیر ارادی نیست هر چند که ما می خواهیم رله سریع عمل کند که این احتیاج به یک مقدار زمان می نیمم معینی دارد زمان عملکرد رله های آنی در حدود چند میلی ثانیه است. این رله فقط یک تنظیم نمونه گیری piclcup setting دارد ولی time setting ندارد. ساختمان و مشخصهٔ آرمی چر جذب کننده رله های جریان زیاد آن در شکل 2.4 نشان داده شده است که در آنجا ما می توانیم ببینیم که آرمیچر رله، سیم پیچ را به سمت خودش جذب می کند و فاصله هوایی کوچک تر می شود و بنابراین رلوکتانس (مقاومت مغناطیسی) کوچک می شود که نتیجه آن افزایش شار است که باعث می شود روی آرمی چر ایجاد شود (نیرو متناسب با مجذور چگالی شار است) که این یک فیدبک مثبت است که نتیجه آن این است که آرمی چر با سرعت و با یک عمل ناگهانی حرکت کند. گشتاور عمل کننده روی آرمی چر متناسب با مجذور جریان است.

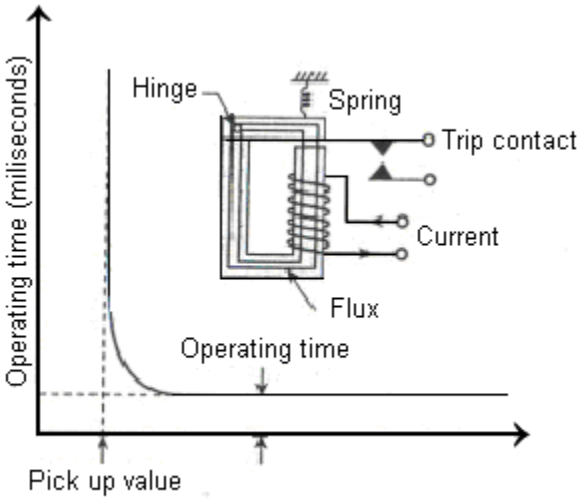


Figure 2.4 Instantaneous over-current relay characteristic

شکل 2.4 (مشخصه رله جریان زیاد لحظه ای)

2.4.2 رله های جریان زیاد زمان ثابت

رله جریان زیاد زمان ثابت می توانند تنظیم شوند تا در یک زمان ثابت و معین تریپ بدهند (اعلام خطای خروجی کنند) بعد از اینکه از خروجی نمونه گیری کردند بنابراین یک time setting و plug setting دارند. مشخصه و بلوک دیاگرام در شکل 2.5 نشان داده شده است.

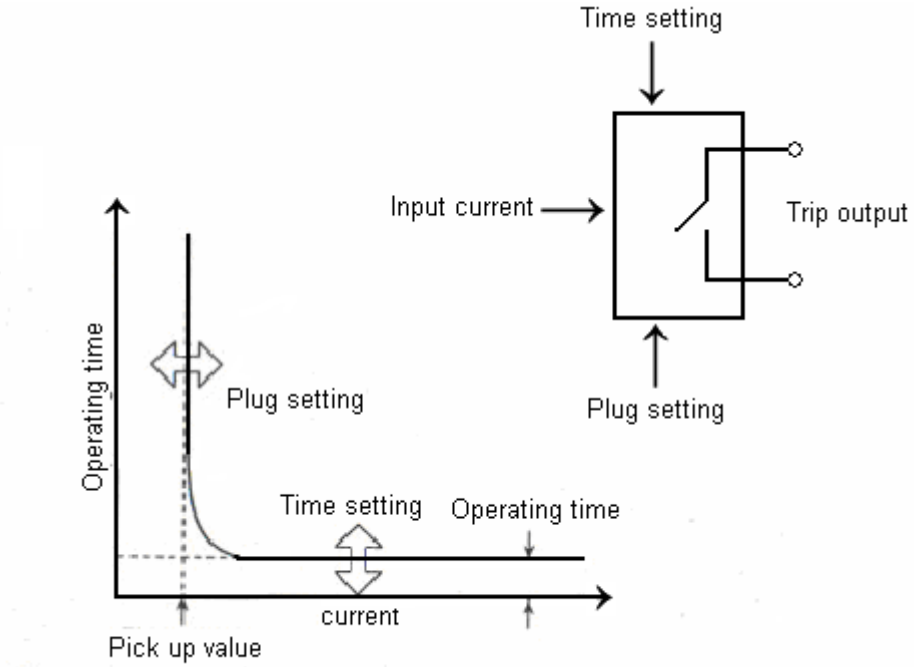


Figure 2.5 Definite time over-current relay characteristic

2.4.3 رله جریان زیاد زمان معکوس

مشخصه زمان معکوس خیلی خوب جور در می آید (جوابگو است) با نیازی که در خطای سخت تـر هست که باید سریع تر خطا را بردارد تا از صدمه زدن به دستگاه جلوگیری کند. این شگل مشخصه طبیعتاً در رله های الکترو مکانیکی معمول است که به طور معمول استفاده مـی شـده و اسـتاندارد شده است با ظهور رله های میکرو پروسلسوری این امکان پذیر اسـت کـه تـا هـر مشخصـه زمـان-جریان قابل تصوری را ایجاد کنیم. هر چند به منظور اینکه سازگاری ایجاد کنـیم بـا تعـداد خیلـی زیادی از رله های الکترومکانیکی هنوز در دست تعمیر مشخصـه زمـان معکـوس معینـی در بخـش بعدی استاندارد شده است. رله جریان زیاد (IDMT) یا زمان معکـوس « زمـان مـی نـیمم ثابـت معکوس» این امکان پذیر است که به طور گسترده از مشخصه استفاده شود این مشخصه در قسمت ابتدایی معکوس است که به یک زمان عملکرد می نیمم معین منجر می شود یعنی زمانی که جریان خیلی زیاد می شود دلیل زمان عملکرد می نیمم معین در جریان های معین این است کـه در رلـه های الکترو مکانیکی شار در جریان های بالا اشباع می شود و گشتاور عمل کننده رله که متناسب با مجذور شار است اساساً نمی تواند بعد از اینکه اشباع شروع شد افزایش یابد.

همانطور که از مشخصه می توان استنباط کرد که این یک محدودیت در تکنولوژی رله های الکترومکانیکی است. در حالت ایده آل، ممکن است انتظار داشته باشیم که زمان عملکردن در رنج عملکردن آن در تمام مدت معکوس شود.

رابطه ریاضی بین جریان عملکردن مشخصه IDMT می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$t_{op} = \frac{0.14(TMS)}{(PSM)^{0.02} - 1}$$

در اینجا PSM، plug setting افزاینده و TMS، Time setting افزاینده رله است. بنابراین زمان عملکردن رله به طور مستقیم با TMS و به طور معکوس با PSM متناسب است مشخصه رله IDMT در شکل 2.6 نشان داده شده است.

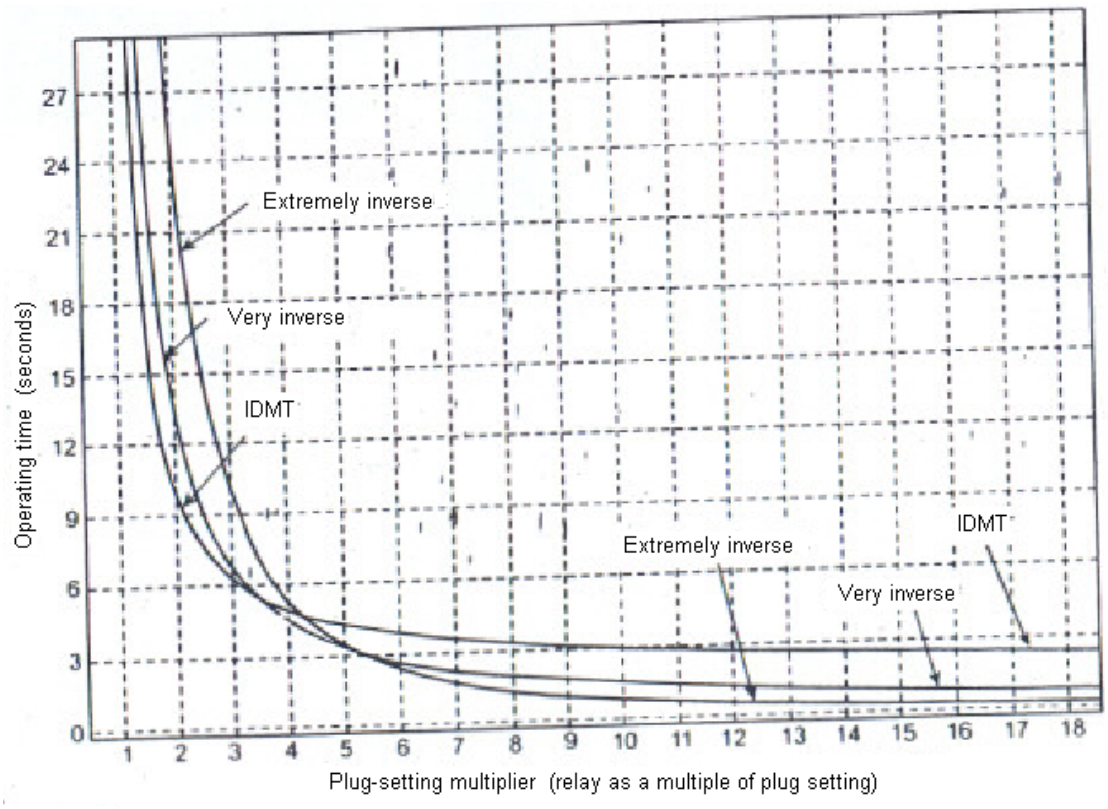


Figure 2.6 Inverse definite minimum time relay characteristic (TMS = 1.0).

رله جریان زیاد بسیار معکوس

مشخصه رله بسیار معکوس از مشخصه رله IDMT معکوس تر است رابطه ریاضی بین جریان و زمان عملکردن این رله به صورت زیر بیان می شود :

$$t_{op} = \frac{13.5(TMS)}{(PSM)-1}$$

شاخصه این رله در شکل 2.6 نشان داده شده است.

رله جریان زیاد بی نهایت معکوس

مشخصه این رله از مشخصه رله های دیگر معکوس تر است رابطه ریاضی بین جریان و زمان عمل کردن این رله به صورت زیر بیان می شود.

$$\mathbf{t_{op} = \frac{80.0\,(TMS)}{(PSM)^2 - 1}}$$

مشخصه این رله در شکل 2.6 نشان داده شده است.

2.5 کامل کردن رله جریان زیاد با استفاده از دیسک القا .

به منظور درک کردن طرز کار رله از نوع دیسک القاد بیایید ابتدا ببینیم چگونه گشتاور می تواند به وسیلهٔ عمل کردن دو شار متناوب روی یک فنر معمولی اما یک روتور غیر مغناطیسی تولید شود. شکل 2.7 دو شار متناوب Q_1 و Q_2 که با هم اختلاف فاز θ دارند را نشان می دهد.

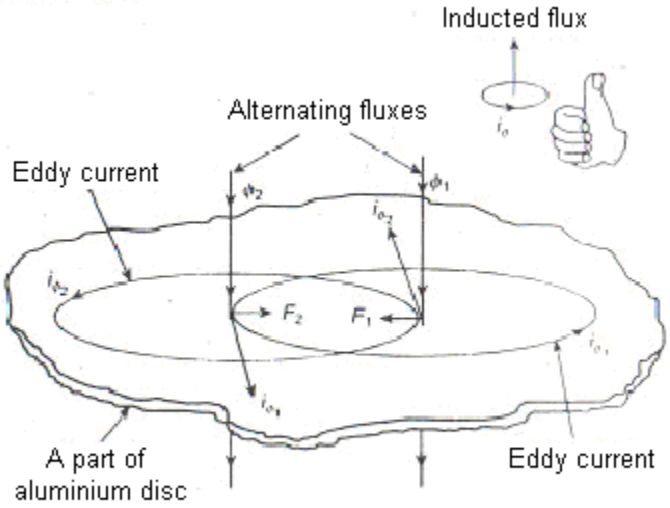


Figure 2.7 Operating principle of induction disc type relay

بنابراین داریم :

$$\phi_1 = \phi_{m_1} \sin \omega t$$
$$\phi_2 = \phi_{m_2} \sin (\omega t + \theta)$$

هر شار در دیسک ولتاژی القاء می کند و باعث می شود که جریان های Q_1 تا ایجاد شود با فرض اینکه مسیر جریان گردابی اندوکتانس کمی دارد می توانیم روابط زیر را بنویسیم.

$$i_{e_1} \propto \frac{d\phi_1}{dt} = \omega\phi_{m_1} \cos \omega t$$
$$i_{e_2} \propto \frac{d\phi_2}{dt} = \omega\phi_{m_2} \cos (\omega t + \theta)$$

همانطوری که در شکل 2.7 نشان داده شد اثر متقابل Ø۱ باعث ایجاد نیروی $i_{Ø2}$ می شود به همین ترتیب اثر متقابل $Ø_2$ باعث ایجاد نیروی $i_{Ø1}$ می شود. با فرض ثابت بودن داریم:

$$F_1 = \phi_1 i_{\phi_2} \propto \phi_{m_1}\phi_{m_2} \sin \omega t \cos(\omega t + \theta)$$
$$F_2 = \phi_2 i_{\phi_1} \propto \phi_{m_1}\phi_{m_2} \sin(\omega t + \theta) \cos \omega t$$

بنابراین برایند(F_1-F2) از این طریق به دست می اید که به صورت زیر ساده می شود:

$$F_2 - F_1 \propto \phi_{m_1}\phi_{m_2}[\sin(\omega t + \theta)\cos \omega t - \cos(\omega t + \theta)\sin \omega t]$$

نتایج مهمی که در موردگشتاور از عبارات بالا می توان برداشت کرد

- دو شار متناوب با یک اختلاف فاز باعث تولید گشتاور می شوند و یک شار متناوب به تنهایی نمی تواند باعث ایجاد گشتاور شود.
- ماکزیمم گشتاور وقتی تولید می شود که دو شار متناوب اختلاف فاز داشته باشند.
- گشتاور برایند پایدار است و تابع زمان نیست همانطوری که از عبارت بالا برمی آید عبارتی که برای گشتاور نوشتیم شامل t نمی شود.

در رله های جریان زیاد فقط یک مقدار ورودی داریم و فقط زمانی امکان دارد که گشتاور ایجاد شود که دو شار با اختلاف فاز تولید شود.

قاعده کلی بالا در دیسک القاء رله های جریان زیاد استفاده شده است که در شکل ساختمان آن نشان داده شده است در این جا دو شار با اختلاف فاز زمانی از یک مرودی جریان به وسیله سیم پیچ سایه انداز به دست آمده است شار در سیم پیچ سایه دار باعث عقب افتادن سیم پیچ اصلی می شود بنابراین گشتاور به وسیله بر هم کنش این دو شار تولید می شود البته با صرفنظر از اشباع که متناسب با I^2 است و هر یک از دو شار متناسب با I است که این گشتاور یک گشتاور انحرافی است که یک فنر مارپیچ یک گشتاور کنترل ایجاد می کند گشتاور کنترل می تواند فرض شود که به طور مستقیم با زاویه δ متناسب است.

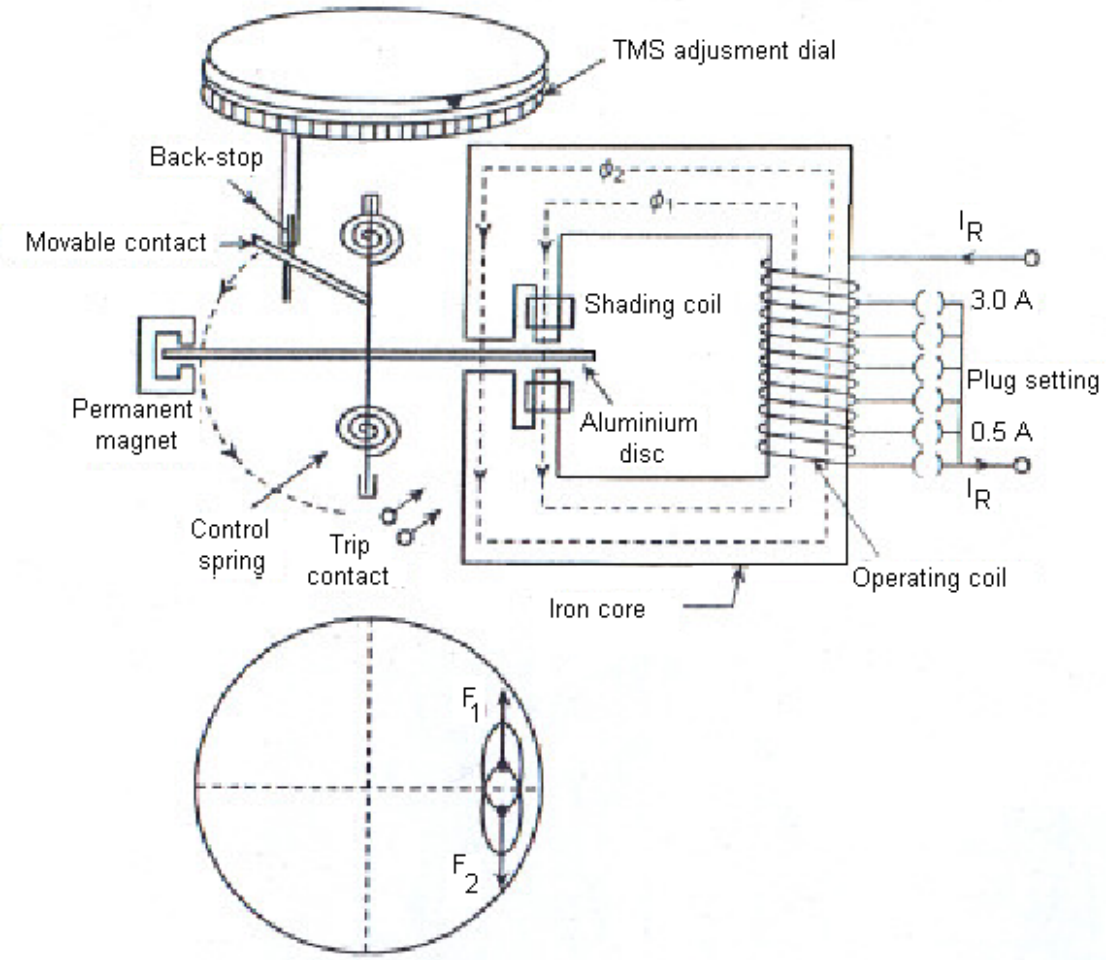


Figure 2.8 Construction of an induction disc relay

مغناطیس دائمی یک گشتاور کننده ای ایجاد می کند و وقتی فعال است که دیسک در حال حرکت است و بنابراین متناسب با آهنگ تغییرات فاز است. بنابراین گشتاور معادل می تواند نوشته شود که K یک ثابت انحراف است و S ثاب فنر است و D ثابت است همه این ثابت ها به طراحی رله بستگی دارد زمانی که نزدیک است که دیسک منحرف شود ما می توانیم گشتاور را ثابت فرض کنیم و بنویسیم

راه حل معادله بالا به این صورت است

$$T_{\text{deflecting}} > T_{\text{controlling}} + T_{\text{damping}}$$

or

$$\boxed{KI^2 > S\delta + D\frac{d\delta}{dt}}$$

$$\frac{d\delta}{dt} + K_1\delta - K_2I^2 = 0, \quad K_1 = \frac{S}{D} \text{ and } K_2 = \frac{K}{D}$$

$$\delta = K_3e^{-t} - K_4$$

where K_3 and K_4 are functions of K_1 and K_2, i.e. S, D and I^2. Now,

At $t = 0; \quad \delta = \delta_{\text{initial}}$

At $t = t_{\text{op}}; \quad \delta = 0$

ما می توانیم زمان عمل کردن رله را با پیدا کردن مقدار زمان t پیدا کنیم برای حالتی که $\delta = 0$ شود.

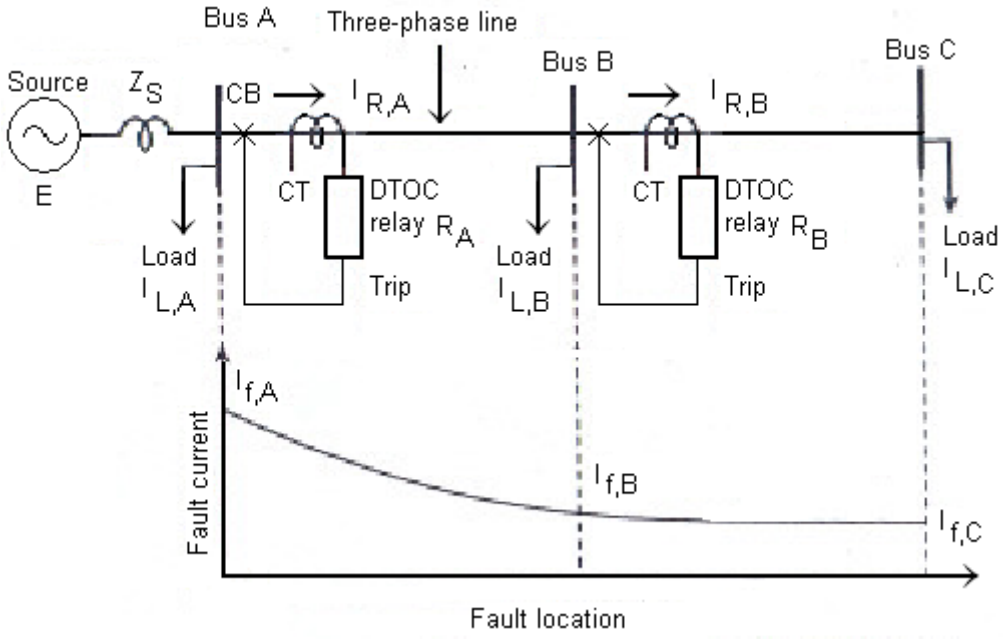
مقدار δ از طریق زمان تنظیم افزاینده معین می شود.

تحلیل دقیق دینامیکی دیسک القاء نیز کاملاً تضمین می شود هر چند باید توجه داشت که با طراحی درست یک مدار مغناطیسی، یک رنج وسیع مشخصه از بی نهایت معکوس تا زمان ثابت می توان به دست آورد

2.6 کاربرد رله های جریان زیاد زمان ثابت برای حفاظت فیدر توزیع

دیاگرام یک خطی فیدر فاز در شکل 2.9 نشان داده شده است که در خط AB و BC دارد.

فرض کنید که رله های DTOC در باس A و B استفاده شده اند در هر سه باس بار وجود دارد.



شکل 2.9 کاربرد رله های DTOC برای حفاظت فیدر.

مسأله حفاظت به شرح زیر می تواند شروع شود

مقدار دادن به تمام بارها و جریان های خطا در تمام باس ها، چگونه رله های DTOC را در باس A و باس B تنظیم کنیم به طوری که فیدر ورودی حفاظت جریان زیاد داشته باشد به عنوان حفاظت primary و backup (حفاظت اولیه و حفاظت پشتیبان)

مرحله اول در طراحی حفاظت جریان زیاد این است که نسبت تبدیل CT ها را انتخاب کنیم جریان ثانویه CT به وسیلهٔ درجه بندی سیم پیچ جریان رله تعیین می گردد. جریان اولیهٔ CT به وسیلهٔ ماکزیمم جریان باری که به وسیلهٔ رله قابل تحمل است تعیین می شود در مرحله بعدی ما مجبوریم رله را تنظیم کنیم. باید توجه داشت که واژه تنظیم در جایی که رله های DTOC داریم بدین معنی است که

۱) چطور Pickup رله را انتخاب کنیم؟ (مقدار نمونه گیری)

۲) چطور زمان عمل کردن رله را تنظیم کنیم.

چطور pickup ralue (مقدار نمونه گیری) رله را انتخاب کنیم؟

مسأله تنظیم به شکل 2.10 نشان داده شده است.

ما می توانیم pickup value را تنظیم کنیم که رله اجازه دهد جریان بار نرمال با یک درجه ای از اضافه بار تهیه شود. بنابراین pickup value رله باید بیشتر باشد نسبت به ماکزیمم بار در همان زمان، رله باید به اندازه کافی حساس باشد که بتواند به کوچکترین خطا پاسخ دهد. سپس، مقدار مشخص باید از کوچکترین جریان خطا کوچکتر باشد. در نتیجه، می توانیم رابطه زیر را بنویسیم، به محض تنظیم مقدار بدست آمده، رله مدار باز نیز درگیر می شود

$$I_{L,max} < I_{p.u} < I_{f,min}$$

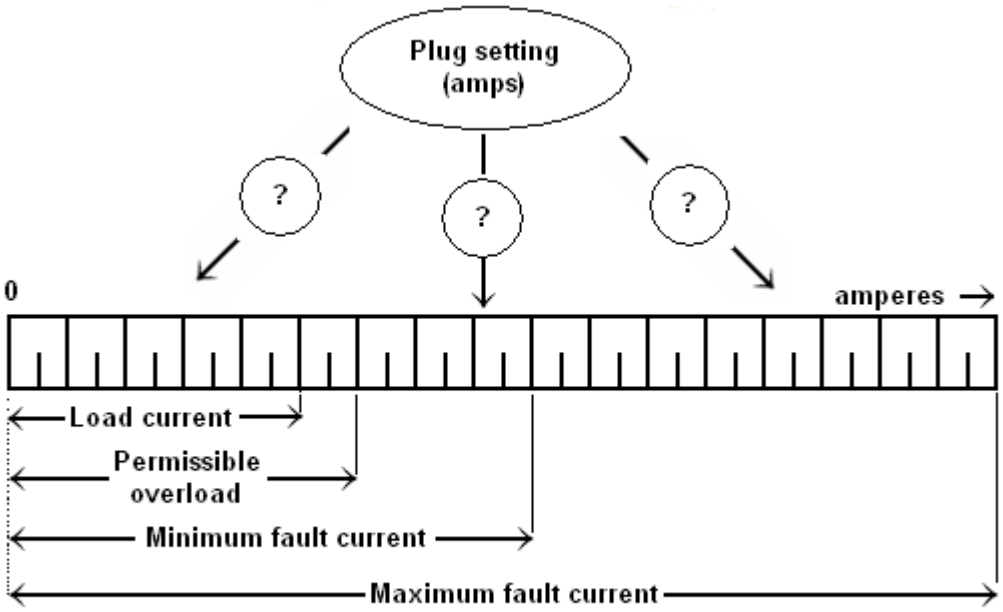


Figure 2.10 The plug setting of DTOC relays.

چگونه تنظیم کردن زمان کار رله:

در این قسمت بدین گونه پیش می رویم که رله باید توانایی دقیقی برای حفاظت اولیه منطقه زیر پوشش خود داشته باشد. فقط اگر حفاظت اولیه خطا را از بین نبرد، حفاظت پشتیبان (back up) باید شروع به کار کند.

در نتیجه به محض وقوع خطا، هم به وسیله حفاظت اولیه و هم حفاظت پشتیبان احساس میشود. به طور طبیعی، نخست حفاظت اولیه شروع به کار می کند، زمان شروع به کار آن کمتر از زمان شروع به کار رله پشتیبان است.

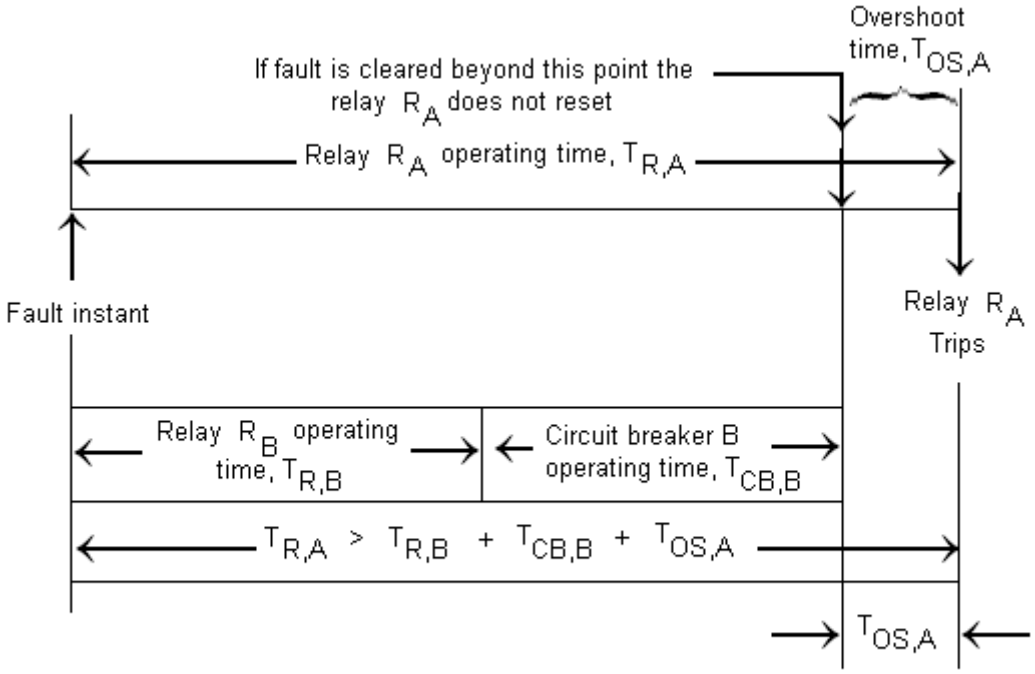


Figure 2.11 The time setting of DTOC relays.

ارتباط بین زمان شروع به کار رله اولیه و رله پشتیبان را نشان می دهد. ما باید برای over shoot رله مقدماتی اجازه دهیم در نتیجه هماهنگی مناسب بین رله مقدماتی و پشتیبان موجود می باشد زمان over shoot همانگونه که زمان مکانیزم رله ادامه حرکت می یابد مشخص می شود، حتی بعد از بی انرژی شدن کار سیم پیچ over shoot به علت لحظه اینرسی حرکت سیستم می باشد.

در ادامه بحث بالا، روش صحیح این گونه است که تنظیم از انتهای تغذیه کننده سیستم میباشد. رله که در انتهای feeder منشعب می باشد، می تواند بدون تأخیر کار کند به گونه ای که با هیچ کدام از رله ها هماهنگی نداشته باشد. در مثال ۹-۲ فرض کنید که زمان شروع به

کار R_B ۰/۱ ثانیه باشد. بنابراین، رله R_A ۰/۱ ثانیه صبر کند به علاوه زمان شروع به کار مدار در باس B ($T_{CB,B}$) به علاوه زمان over shoot رله A ($T_{OS,A}$). بنابراین می توانیم بنویسیم:

$$T_{R.B} = 0/1S$$
$$T_{R.A} = T_{R.B} + T_{CR.B} + T_{OS.A}$$

فرض کنید زمان شروع به کار CB برابر ۰/۵ ثانیه و زمان over shoot برابر ۰/۲ ثانیه باشد.

$$T_{R.A} = 0/1 + 0/5 + 0/2 = 0/8S$$

گام زمانی بین زمان شروع دو رله، که برابر است با جمع زمان شروع به کار Circuit breaker در B و over shoot رله A و برای نگهداری انتخابی بین رله های A و B ضروری است.

بنابراین فاصله ارجاع داده می شود همانند «فاصله زمانی انتخابی» (STI). نتیجه گیری تنظیم رله ها در جدول ۱-۲ نمایش داده شده است.

Table 2.1 Purpose and setting of relays

Relay	*Purpose*	*Pick-up value*	*Time setting*
R_B	Primary protection of section BC *Note:* R_B is at the tail end of the system	$I_{L,C} < I_{pu\,R,B} < I_{f,C,min}$	Fastest $T_{R,B} = 0,1$ s
R_A	Back-up protection of section BC Primary protection of section AB	$(I_{L,B} + I_{L,C}) < I_{pu\,R,A} < I_{f,C,min}$	$T_{R,A} = T_{R,B} + T_{CR,B} + T_{OS,A}$ $= 0.1 + 0.5 + 0.2$ $= 0,8$ s

شایان ذکر است که مرحله تنظیم باید از رله که از انتهای سیستم است شروع شود. این به خاطر این است که رله به وسیله مشکل های انتخابی اجباری نمی شود تنظیم رله های بالا دست به وسیله رله های پایینی مقید می شود.

نتیجه مرحله تنظیم در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. از این شکل می توان دید که همانطور که خطا به سمت منبع حرکت می کند، جریان خطا و همچنین زمان تصحیح خطا

بزرگتر می شود. ای نبه خاطر این است که رله های نزدیک تر به منبع عمداً تأخیر دارند در نتیجه، انتخابی هستند یا رله های پایین دست.

در نتیجه رله های نزدیک به منبع آهسته ترین می باشند و این به میل ما نیست و می توان نشان داد که پیشرفت قابل توجه در زمان تصحیح خطا همانطور که به سمت منبع حرکت میکنیم، اگر ما از رله های زمان می نیمم مشخص معکوس (IDMT) استفاده کنیم.

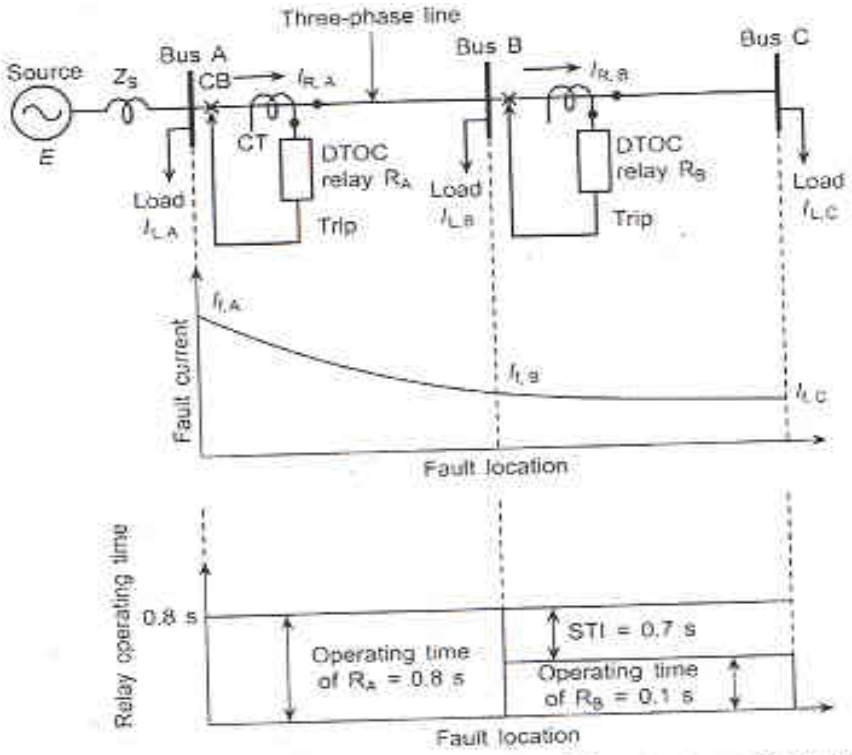
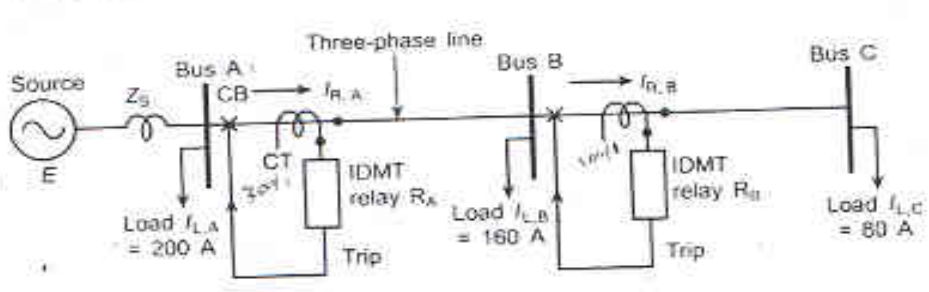


Figure 2.12 Setting of DTOC relays for OC protection of a feeder.

2.7 کاربرد رله IDMT در شبکه توزیع:

یک Feeder منشعب با دو باس A و B را در نظر بگیرید که رله های مدار باز IDMT استفاده می شوند (شکل2.13) باید ذکر شود که:



Bus A	Bus B	Bus C
$I_{f,min}$ = 3500 A	$I_{f,min}$ = 2000 A	$I_{f,min}$ = 1000 A
$I_{f,max}$ = 4000 A	$I_{f,max}$ = 3000 A	$I_{f,max}$ = 1500 A

Figure 2.13 Setting of IDMT OC relays.

هدف رله R_B، فراهم کردن حفاظت خط BC باشد.

هدف رله R_A، فراهم کردن حفاظت اولیه خط AB و پشتیبان خط BC می باشد.

ما تنظیم را از انتهای سیستم انجام می دهیم.

تصمیم گیری نسبت CT و تنظیم PLUG.

در رله B، ماکزیمم جریان Load با فرض ۲۵٪ over load:

$$80A + (0/25 \times 80A) = 100A$$

فرض کنید رله 1A استفاده می شود، نسبت CT می تواند ۱۰۰ به ۱ انتخاب شود.

تنظیم Plug می تواند ۱۰۰٪ انجام شود.

P_S=1A

تصمیم گیری تنظیم Time- Multiplier: شروع از رله کنترل از راه دور R_B

از آنجایی که مجبور به نگهداری انتخابی با رله دیگری نمی باشد، می تواند سریع تر از همه به کار بیفتد. بنابراین $TMSOFR_b$ می تواند ۰/۱ انتخاب شود حالا برای نگهداری انتخابی بین R_A و R_B، به شکل زیر پیش می رویم:

زمان شروع به کار R_A برای ماکزیمم خطا در B= زمان شروع به کار R_B برای ماکزیمم خطا در B + زمان کار Circuit breaker + زمانR_A overshoot

زمان شروع به کار R_B برابر ماکزیمم خطا فقط آن طرف باس B را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$T_{R.B} = \frac{0/14(TMS)}{(PMS)^{0/02} - 1}$$

برای ماکزیمم خطا در B، جریان خطا= ۳۰۰۰A در طرف اولیه که می شود:

(۳۰۰۰/۱۰۰) =۳۰A

از آنجاییکه تنظیم Plug در 1A انجام می شود.

$$PSM = \frac{I_{rcley}}{ps} = \frac{30}{1} = 30$$

$TMSOF_{RB}$ قبلاً در ۰/۱ تنظیم شده است با جایگزینی این مقادیر داریم:

$$T_{R,B} = \frac{0/14(0/1)}{30^{0/02} - 1} = 0/1988 \cong 02S$$

اگر $T_{CB,B}$=0/5S بگیریم، سپس:

$$T_{R,B} + T_{CB} = 0/7S$$

۰/۷S مقدار مورد علاقه زمان شروع به کار R_A می باشد. با فرض زمان R_B over shoot که ۱۰٪ از VC رد می باشد: $T_{OS,A} - 0/07S$

بنابراین ما زمان شروع به کار R_A مورد نیاز برای ماکزیمم خطا در باس B را داریم

$$T_{R,A,\max faultB} = 0/2 + 0/5 + 0/07 = 0/77S$$

MTS of R_A را می توان از رابطه زیر برای زمان شروع به کار R_A بدست آورد:

برای شرایط بالا برای R_A داریم،

درنتیجه برای R_A

و بدین گونه تنظیم هر دو رله پایان می پذیرد.

می توان رسیدگی کرد که انتخاب برای می نیمم خطا در باس B به طور اتوماتیک نگهداری میشود.

مینیمم جریان خطا برای خطا در باس B ۲۰۰۰ آمپر است. رله جریان B مشابه این به صورت ۲۰A= ۲۰۰۰/۱۰۰ می باشد از آنجاییکه تنظیم 1A Plug می باشد، تبدیل به ۲۰ PSM می شود.

برای رله R_B، $TMS = 0/1$، در نتیجه زمان شروع به کار R_B برای مینیمم خطا در باس B بدین گونه خواهد بود:

زمان شروع به کار مورد انتظار R_A برای این خطا باید بیشتر از مقدار زیر باشد:

حال به بررسی رابطه واقعی زمان شروع به کار R_A برای مینیمم خطا در باس B می پردازیم:

حداقل جریان خطا=A ۲۰۰۰

رله جریان R_A مشابه به این: ۲۰۰۰/۳۰۰=۶/۶۶A

از آنجاییکه تنظیم 1A Plug می باشد، در تبدیل به PSM ۶/۶۶. برای رله R_A و TMS =۰/۲۶

بنابراین زمان شروع به کار R_A برای مینیمم خطا در باس B بدین گونه خواهد بود:

مقدار S ۰/۹۴ از مینیمم زمان شروع ۰/۸S مورد نیاز برای نگهداری انتخابی بین R_A و R_B بزرگتر می باشد.

نتیجه مانند لیست زیر می باشد:

نقشه ساده زمان تصحیح خطا به عنوان تابع خطای محلی برای رله های IDMT در شکل ۲/۱۴ نشان داده شده است.

ما می توانیم قانونهای کلی زیر را از تمرین تنظیم بالا نتیجه بگیریم:

- تنظیم رله را باید از انتهای سیستم آغاز کرد.
- تنظیم Plug باید بدین گونه باشد:

برای تنظیم plug، مینیمم جریان خطا را در انتهای قسمت بعدی در نظر می گیریم.

- TMS باید بدین گونه انتخاب شود که انتخاب با رله پایین دست بعدی برای ماکزیمم جریان خطا در ابتدای قسمت بعدی نگه داشته شود.

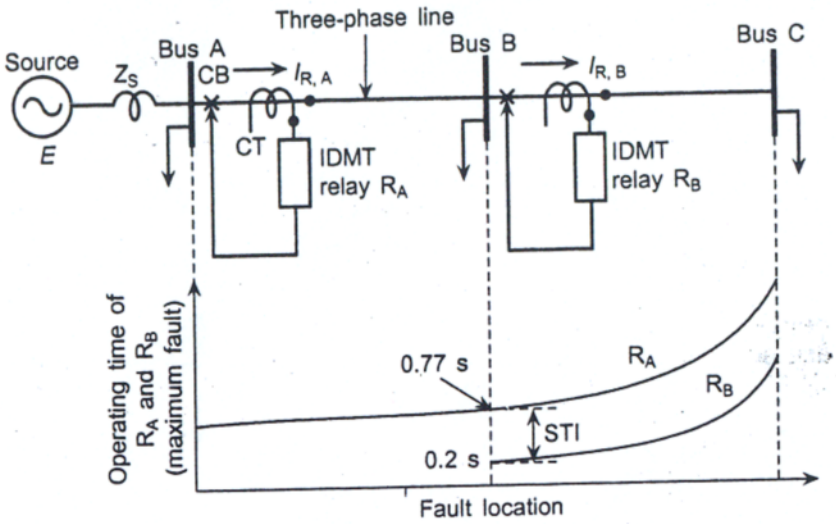
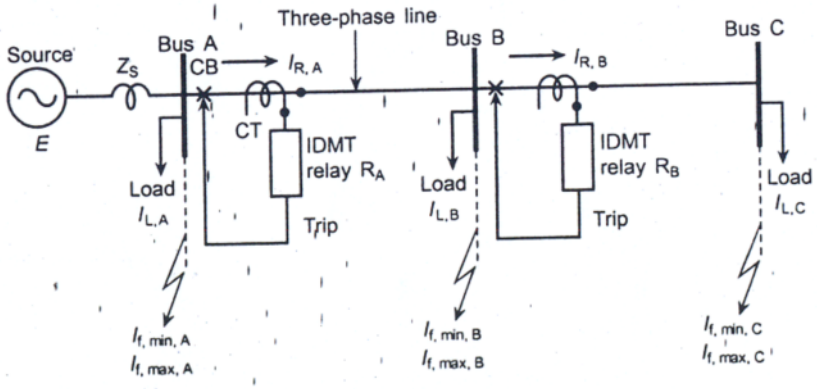


Figure 2.14 Variation of fault current against fault location for IDMT relays under maximum fault condition.

این قوانین در شکل ۱۵-۲ برای یک سیستم سادهٔ شامل ۲ باس نشان داده شده است. اصل مشابه می تواند به n باس تعمیم داده شود. در واقع یک الگوریتم کامپیوتری می تواند به طور اتوماتیک این کار را در یک سیستم بزرگ انجام دهد.



Plug setting of R_B should be such that:

$$I_{f,min,C} > \text{PS of } R_B > (I_{L,C} + \text{Overload})$$

TMS of R_B can be set at the smallest value of 0.1.

Plug setting of R_A should be such that:

$$I_{f,min,C} > \text{PS of } R_A > [(I_{L,B} + I_{L,C}) + \text{Overload}]$$

TMS of R_A should be such that:

Operating time of R_A for $I_{f,max,B}$ = Operating time of R_B for $I_{f,max,B}$ + Circuit breaker B operating time + Overshoot time of R_A

Figure 2.15 Rules for setting IDMT OC relays.

انتخاب بین رله های IDMT و DTOC:

مشاهده می شود که رله های IDMT برتری قابل توجهی را در زمان تصحیح خطا بر رله های DTOC نمی باشد. به هر حال، شرایطی وجود دارد که رله های IDMT برتری خاصی نسبت به رله های DTOC ندارند. برای مثال، سیستمی که $Z_S>>Z_L$ باشد را در نظر بگیرید. از انجاییکه جریان خطا به عنوان تابع خطای محلی به طور نسبی می باشد، پایداری بیشتر یا کمتر در کل طول فیدر باقی خواهد ماند، بنابراین مشخصات IDMT میتواند استفاده شود. در این شرایط رله های DTOC ارزانتر و قابل استفاده ترند. چنین فیدرهایی همچنین به عنوان درازای کوتاه الکتریکی توضیح داده می شوند، صرف نظر از طول فیزیکی، بنابراین می توان بیان کرد که رله های DTOC برای خطهای با طول کوتاه مناسب می باشد. یک تمرین برای پیشنهاد ترین رله های DTOC وقتی $\frac{Z_S}{Z_L} \geq Z$

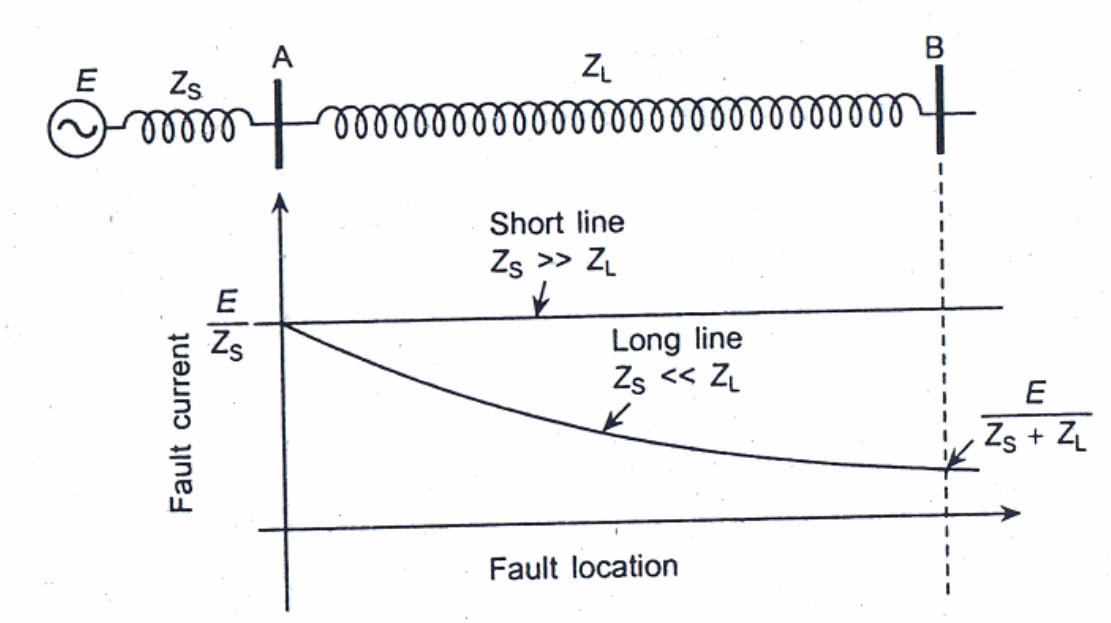


Figure 2.16 Choice between DTOC and IDMT relays.

2.8 حفاظت فیدرهای سه فاز:

تا اینجا، فیدرهای سه فاز با کمک دیاگرام تک خطی نشان داده شده این دیاگرام تک خطی پیچیدگی دیاگرام تک خطی را پنهان می کند. سیستم سه فاز تابع خطاهای فاز می باشد و همینطور خطاهای زمین.

برای فراهم کردن حفاظت کامل یک فیدر سه فاز، می توانیم با سه رله متصل به سه CT مانند شکل ۲-۱۷ شروع کنیم. همانطور که از جدول ۲-۲ می توان دید، همه ۱۱ شماره خطاهای شنت بوسیله سه رله رسیدگی می شود. رله ها در باس A با رله های باس B هماهنگ می شوند با استفاده از دستورالعمل نشان داده شده در قسمت ۲-۷.

می توان ذکر کرد که جریان خطا برای تک خطی به خطای زمین بستگی به سیستم زمین به علاوه مقاومت پایه برج دارد. بنابراین ممکن است جریان خطا برای تک خطی به خطای زمین اتفاق بیفتد، و ممکن است از جریان Load کمتر باشد. در این شرایط امکان فراهم کردن اینگونه خطا ممکن است اگر ما از نقشه شکل ۲-۱۷ استفاده کنیم.

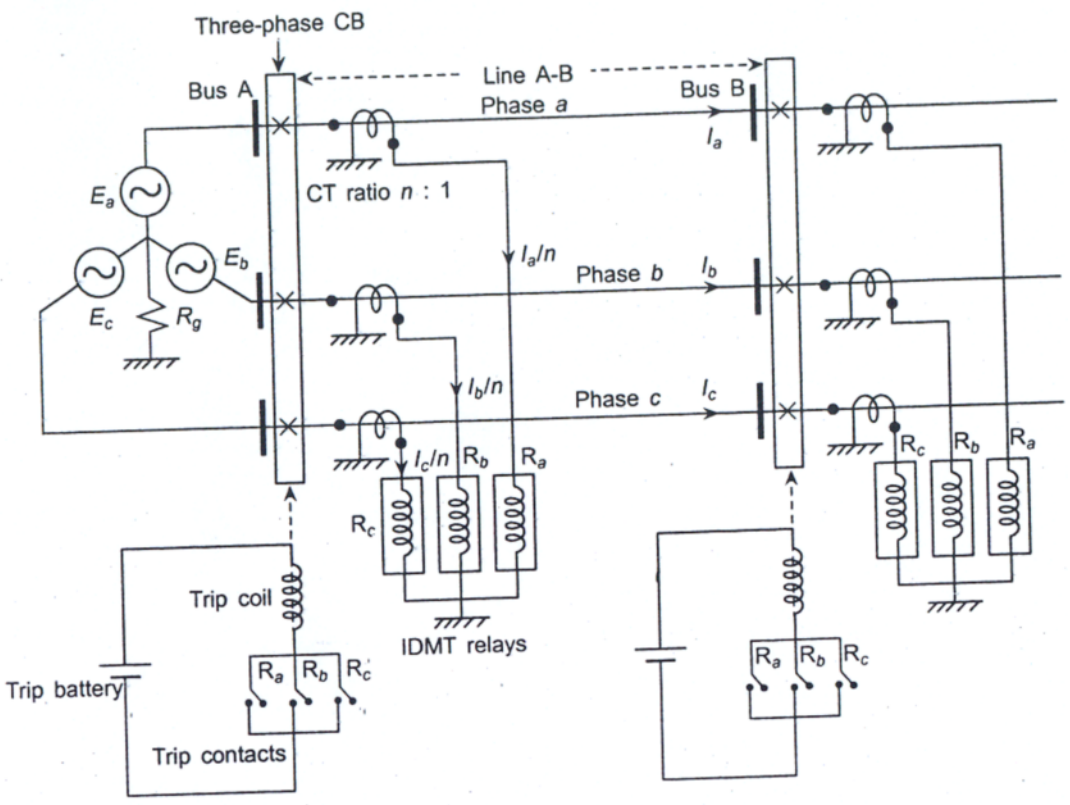


Figure 2.17 OC protection of a three-phase feeder.

Table 2.2 Protection of a three-phase feeder

Fault	*Relays which will operate*	
	Three-phase fault relays of Figure 2.17	*Two-phase fault + one ground fault relay of Figure 2.18*
a-g	R_a	R_a, R_g
b-g	R_b	R_g
c-g	R_c	R_c, R_g
a-b	R_a, R_b	R_a
b-c	R_b, R_c	R_c
c-a	R_c, R_a	R_c, R_a
a-b-g	R_a, R_b	R_a, R_g
b-c-g	R_b, R_c	R_c, R_g
c-a-g	R_a, R_c	R_a, R_c, R_g
a-b-c	R_a, R_b, R_c	R_a, R_c
a-b-c-g	R_a, R_b, R_c	R_a, R_c

در ادامه نشان خواهیم داد که اگر ما یک رله OC به جریان باقی مانده راه نشان داده شده در شکل ۲-۱۷ متصل کنیم، برای جریان Load ناپیدا می باشد (که جریان سه فاز بالانس شده است) و فقط جریان های خطای زمین دیده می شود. جریان در این راه صفر یا نزدیک صفر خواهد بود در طی شرایط load بالانس نرمال همانگونه در طی خطا سه فاز می باشد. بنابراین

تنظیم این رله که در راه جریان باقیمانده است. می تواند مستقل از جریان load باشد و در حقیقت می تواند خیلی کوچک تر از جریان load باشد. در ادامه همانطور که در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است احتیاج به استفاده از هر سه رله برای تشخیص و حفاظت در مقابل خطای فاز نمی باشد. ما می توانیم از هر کدام از سه رله استفاده کنیم بدون اثر در کار کلی. در شکل ۱۸-۲ رله در فاز b برداشته شده است.

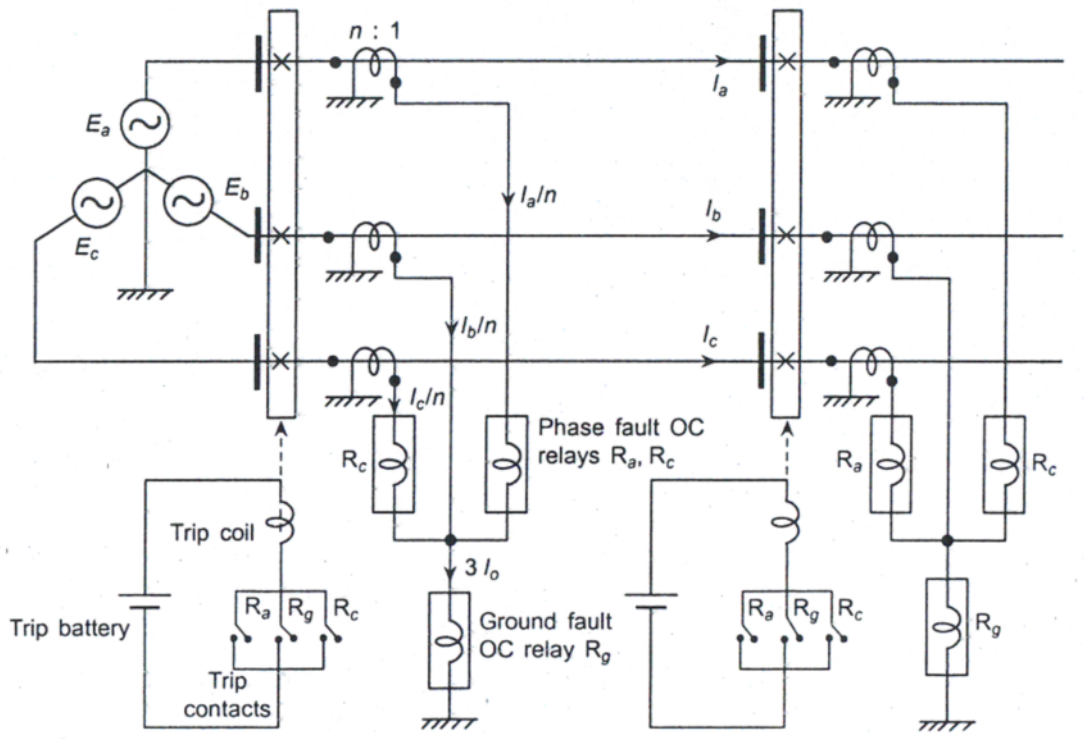


Figure 2.18 Two-phase fault relays and one ground fault relay for OC protection of a three-phase feeder.

جدول ۲-۲ طرز کار رله ها برای همه ۱۱ خطای شنت برای OC شکل ۱۷-۲ و شکل ۷-۲ را نشان می دهد. که نشان می دهد همه ۱۱ خطای شنت بوسیله این schemes رسیدگی میشود.

2.9 رله جریان زیاد جهتی:

شکل ۱۹-۲ تغذیه یک سیم قدرت دو سر بسته را نشان می دهد.

منطقه کار رله ها نیز مشخص شده است. فرض کنید که ما فقط یک رله جریان زیاد در مقصد داریم.

آیا امکان دارد با استفاده از رله های جریان زیاد در منطقه مورد نظر کار کند به منظور جواب به این سئوال اجازه دهید روی رله های OC در باس C متمرکز شویم. شایان ذکر است که رله های OC روی بزرگی جریان خطا کار می کنند و نمی تواند جهت خطا را حس کنند.

خطای F_a را فرض کنید طبق منطقه مورد نظر فقط CB های ۴و۵ باید trip. به هر حال به راحتی دیده می شود که اگر رله های OC استفاده شوند، CB های ۶.۵.۴.۳ همه trip همانطور که خطا بوسیله رله های OC در این محلها دیده می شود. بنابراین منطقه مورد نظر پوشش داده نمی شود جواب رله مورد علاقه در جدول ۳-۲ با توجه به خطاهای F_a و F_b نشان داده شده است.

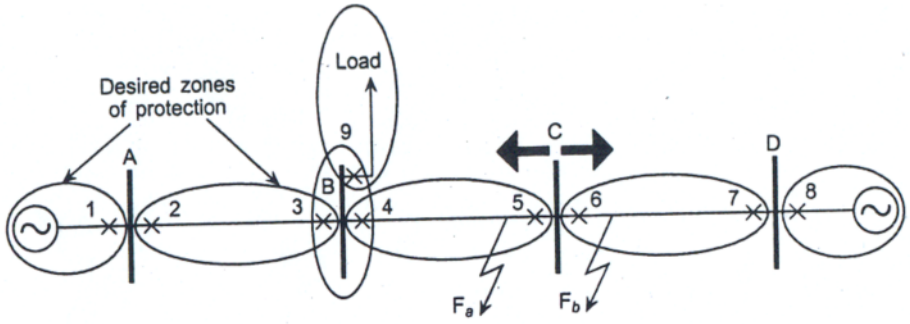


Figure 2.19 Need for directional relay.

Table 2.3 Response of OC relays to generate desired zones of protection

Fault	*Direction of fault power flow at bus C as seen from 5*	*Desired response of OC relay at 5*	*Direction of fault power flow at bus C as seen from 6*	*Desired response of OC relay at 6*
F_a	Away from bus C	Trip	Towards bus C	Restrain
F_b	Towards bus C	Restrain	Away from bus C	Trip

بنابراین از جدول ۳-۲ می توان دید که وقتی خطا از باس جاری شود، مورد نظر است که رله trip OC دهد باید restration اگر خطا را به طرف باس ببینند.

۲.۹.۱ حالتهای دیگر که رله های OC جهتی ضروری می باشند:

یکی از این شرایط سیستم تغذیه یک طرف بسته فیدرهای موازی می باشد که در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است که خطا روی هر کدام از خطهای موازی نه فقط از خط خطا بلکه از خط سالم نیز تغذیه می شوند.

اگر رله های جهتی موجود نباشند. در تداخل با رله های OC سپس منطقه مورد نظر پوشش داده نخواهد شد این در هر دو خط در حال trip برای هر خطا روی هر خط نتیجه می شود.

قابل ذکر است که رله های جهتی با trip مینیمم از باس در محلهای ۲.۳ در شکل ۲۰-۲ مورد نیاز است. به هر حال در محلهای ۱.۴ رله های جریان زیاد بدون جهت کافی می باشد. از انجاییکه رله جهتی هزینه بیشتر و همچنین provision و PT ها را لازم دارد.

باید فقط کاملاً ضروری است از انها استفاده شود.

مکانهای دیگری که استفاده از رله های اضافه جریان جهتدار لازم است:

مکانهای دیگری نیز وجود دارد که در انجا استفاده از رله های جهتدار لازم است تا بر عملکرد درست رله های اضافه جریان نظارت کند. یکی از این موقعیتها در سیستمهای فیدر موازی است که از یک طرف تغذیه می شود، همانطور که در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است که یک خطا روی هر کدام از خط های موازی نه تنها از طریق خط دارای خطا بلکه توسط خط سالم نیز تغذیه می شود.

اگر رله های جهتدار همراه با رله های اضافه جریان بکار نروند، مناطق حفاظتی خوبی ایجاد نمی گردد. این امر سبب می شود که هر دو خط بدلیل هر خطایی روی هر کدامشان با یکدیگر trip بدهند و از سیستم خارج شوند. این موضوع به ما نشان می دهد که برای نقاط ۲.۳ در شکل ۲۰-۲ رله های جهتداری با جهت trip دادن دور شوند، از باس مورد نیاز است اما در نقاط ۱.۴ رله های اضافه جریان عادی کفایت می کنند. از انجایی که رله های اضافه جریان

جهتدار قیمت بالاتری دارند و همچنین به یک PT نیز نیاز دارند. پس تنها زمانی باید بکار گرفته شوند که واقعاً به آنها نیاز است.

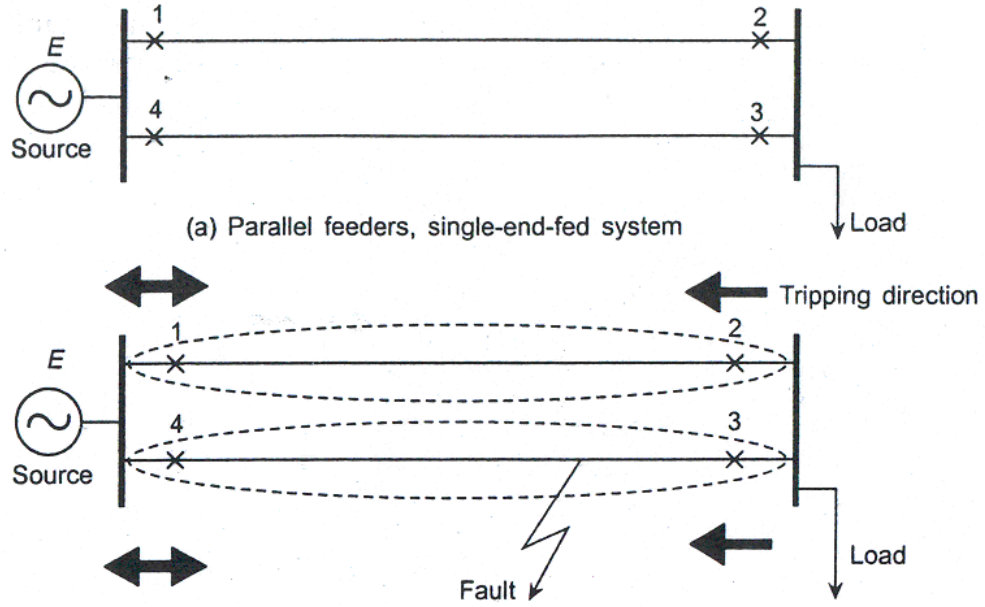


Figure 2.20 Single-end-fed parallel feeder needs directional OC protection.

فیدر موازی که از یک طرف تغذیه می شود و نیاز به حفاظت رله های جهتدار دارد.

سیستم فیدر اصلی حلقوی شکل ۲۱-۲ را در نظر بگیرید این یک موقعیت دیگری است که در ان نیاز به وجود رله های اضافه جریان جهتدار وجود دارد. بخوبی می دانیم که در فیدرهای حلقوی این امکان وجود دارد که بدون توجه به محل خطا در قسمتهای مختلف حلقه توان مورد نیاز به بارها برسد. هر خطایی در یک بخش فقط سبب trip دادن سیرکویت بریکر مرتبط با آن بخش می شود و بدلیل تکنولوژی سیستم حلقوی توان از راه های جایگزین جاری میشود.

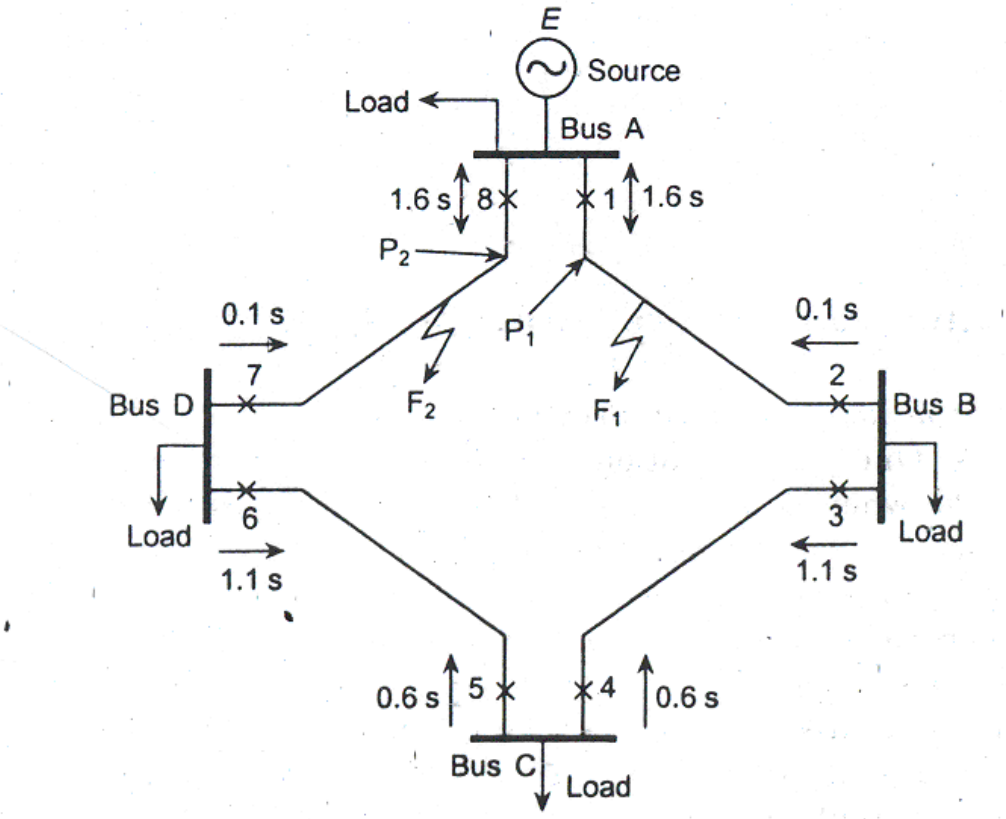


Figure 2.21 Protection of ring feeder using directional OC relays.

شکل ۲۱-۲: حفاظت شبکه حلقوی با استفاده از رله های جهتدار

توجه داشته باشید که هر رله جهتدار دارای جهت trip دادن دور شوند از bus مرتبط هستند.

روند set کردن رله های (رله ها DTOC فرض شده اند) بصورت زیر است:

خطای F_1 را در نظر بگیرید فرض کنید که خط در نقطه P_1 پاره شده باشد. با توجه به توضیحات بخش ۷-۲ رله شماره ۲ که دورترین رله از منبع و نزدیک ترین رله به خطا است میتواند به عنوان سریعترین رله عمل کننده و یک رله جهتدار باشد. به ما اجازه بدهید سرعت عملکرد رله شماره ۲ را ^{s} ۰/۱ انتخاب کنیم رله شماره ۴ رله ۲ را پشتیبانی خواهد کرد لذا

زمان عملکرد رله شماره ۴ می تواند روی ^{s} ۰/۶ = ۰/۱+۰/۵ تنظیم شود که در اینجا زمان عملکرد بریکر ^{s} ۰/۵ فرض شده است. بطور مشابه رله ۶.۸ روی ^{s} ۱/۱ ^{s} ۱/۶ به ترتیب تنظیم شده اند.

همین روند برای خطای F_2 نیز تکرار می شود. سیستم در نقطه P_2 پاره شده و بطور مشابه زمانها همانطور که در شکل ۲۱-۲ نشان داده شده است تعیین می گردند.

۲-۹-۲: دیاگرام فاز برای ولتاژ و جریان برای خطای مستقیم و معکوس (سیستم تکفاز)

شکل ۲۲-۲ بلوک دیاگرام ولتاژ و جریان را در محل رله در زمان های خطای مستقیم، خطای معکوس و بار عادی نشان می دهد. در اینجا فرض شده است که در محل رله، اندازه و فاز ولتاژ ثابت باقی می ماند. وقتی خطا از قسمت جلوی رله به سمت پشت آن حرکت می کند جریان در محل رله دچار تقریباً ۱۸۰° تغییر فاز می شود.

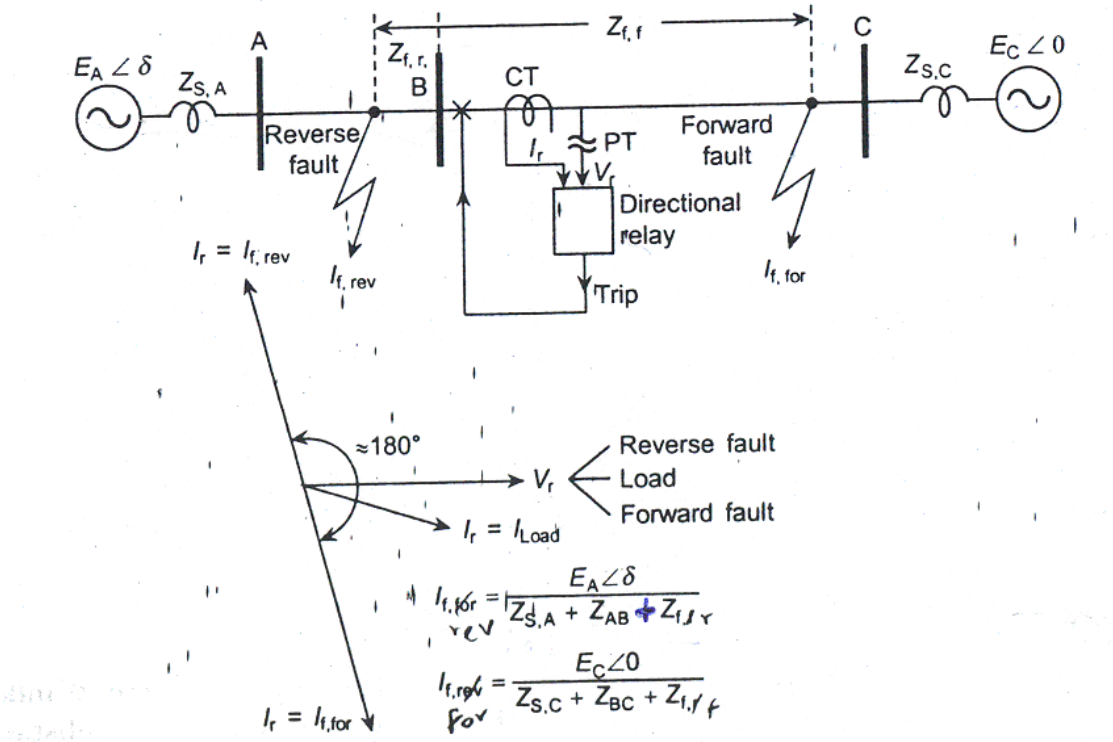


Figure 2.22 Voltage and current during a forward and a reverse fault.

شکل ۲۲-۲: ولتاژ و جریان در طول خطای مستقیم و معکوس

این شیفت فاز بین جریان و ولتاژ در محل رله می تواند برای شناسایی جهت خطا به کار رود و پایه کار کردن رله های جهتدار است.

مشخصات رله های جهتدار:

یک رله جهتدار را می توان با یک واتمتر اتصال دهنده مقایسه کرد. یک واتمتر وقتی بیشترین گشتاور را ایجاد می کند که ولتاژ و جریان وارد شونده به سیم پیچ فشار و سیم پیچ جریانش هم فاز باشند. اگر ما ماکزیمم زاویه گشتاور را (MTA) به عنوان زاویه ای تعریف کنیم که بین ولتاژ و جریان است و در آن رله حداکثر گشتاور را ایجاد می کند آنگاه می توانیم واتمتر را یک رله جهتدار با MTA صفر درجه بنامیم.

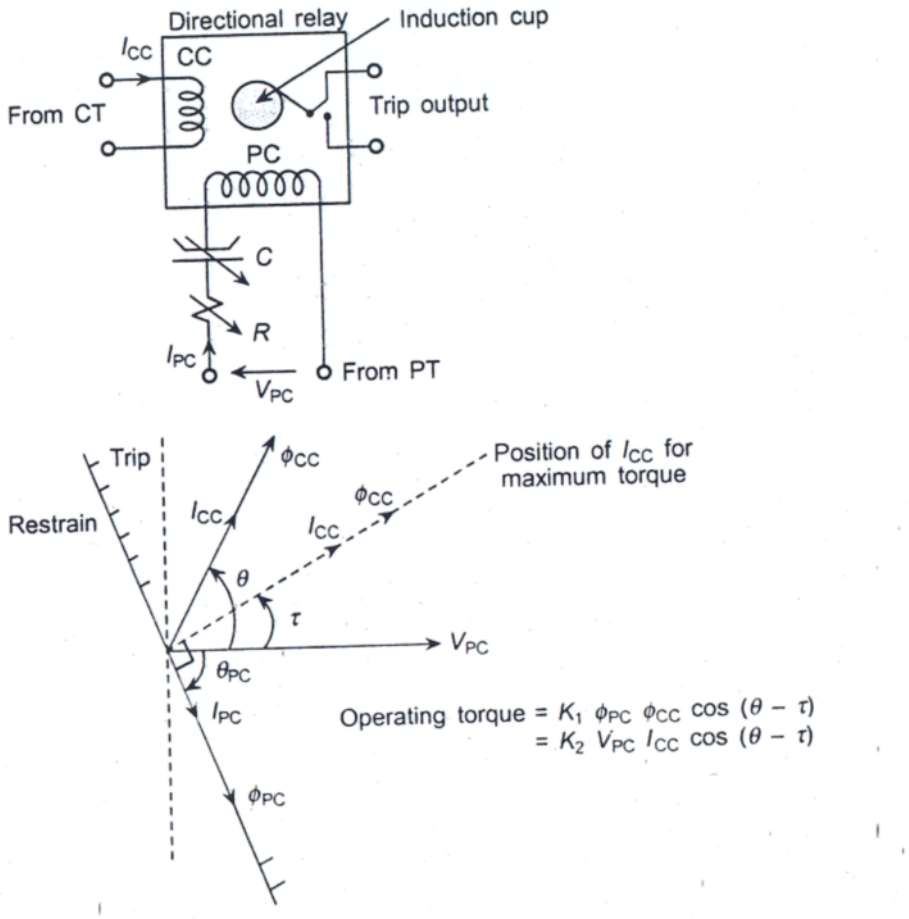


Figure 2.23 Phasor diagram for a directional relay based on induction principle.

شکل ۲۳-۲: دیاگرام فاز روی یک رله جهتدار که در اصل القایی استوار است

V_K ولتاژ داده شده به سیم پیچ فشار است. جریانی که بوسیله سیم پیچ فشار کشیده می شود (I_{PC}) با زاویه بزرگ θ_{PC} از ولتاژ پسفاز تر است.

هنگامی که خطا از سمت Forward به سمت revers حرکت می کند. جریان دچار یک تغییر بزرگ در فازش می شود در حالی که فاز ولتاژ چنین تغییری نمی کند. از اینرو سیکنال ولتاژ مرجعی است در برابر اندازه گیری فاز جریان.

حال در یک رله که بر پایه اصول القایی استوار است دو شاری که برای تولید گشتاور لازمند، ϕ_{ec}, ϕ_{pc} باید در فاز به مقدار ۹۰° شیفت پیدا کنند تا بتوانند حداکثر گشتاور را ایجاد کنند. گشتاور هنگامی که فاروز جریان ۹۰°+ از محل MTA فاصله دارد برابر صفر است. این موضوع جهت فازور جریان برای حداکثر گشتاور را نمایش می دهد، حداکثر زاویه گشتاور با Z نمایش داده می شود. همچنین مرز بین مناطق trip دادن و restratoin را نیز مشخص می کند.

گشتاور عمل کننده رله های جهتدار می تواند بصورت زیر نشان داده شود:

از دیاگرام فاروزی می توان نتیجه گرفت که

$$\theta_{PC} + \tau = 90^\circ$$

$$\theta_{PC} = 90^\circ - \tau$$

$$T_{operating} \propto \phi_{PC}\, \phi_{CC} \sin(\theta + 90^\circ - \tau)$$

$$\propto \phi_{PC}\, \phi_{CC} \sin[(\theta - \tau) + 90^\circ]$$

$$= K_1\, \phi_{PC}\, \phi_{CC} \cos(\theta - \tau)$$

$$\text{Since } \phi_{PC} \propto V_{PC} \text{ and } \phi_{CC} \propto I_{CC}$$

$$T_{\text{operating}} = K_2 V_{PC} I_{CC} \cos(\theta - \tau)$$

از دیاگرام فازوری براحتی می توان دید که حداکثر زاویه گشتاور Z بصورت زیر بدست می آید:

$$Z = 90^\circ - \theta_{pc}$$

از آنجایی که سیم پیچ فشار بصورت خیلی زیادی القایی است مقدار θ_{pc} در حدود ۷۰ درجه تا ۸۰ درجه می باشد.

این سبب به دست آمدن MTA، ۱۰ درجه الی ۲۰ درجه می شود. اما θ_{pc} و همچنین Z می تواند به هر مقداری تنظیم شود تنها کافی است یک مقاومت خارجی یا خازن به مدار سیم پیچ فشار اضافه کنیم.

2.9.3 کاربرد رله جهتدار برای یک فیدر سه فاز:

در موضوع کاربرد رله های جهتدار برای یک فیدر سه فاز نیاز است تا خطاهای زمین و خطای فاز به صورت جداگانه در نظر گرفته شوند. روش های مختلفی برای انرژی دار کردن این رله ها وجود دارد؛ با این حال باید به دقت انرژی دار کردن آنها مورد نظر باشد. رله های جهتدار باید ملزومات زیر را دارا باشند:

۱- رله باید برای خطای fornakd عمل کند.

۲- رله نباید برای خطای معکوس (reverse) عمل کند و باید restrain عمل کند.

۳- رله نباید برای خطاهایی که برایش تعریف نشده است عمل کند و trip بدهد برای مثال نباید اشتباهی عمل کند.

حفاظت خطای فاز جهتدار:

یک رله جهتدار را در نظر بگیرید که برای حفاظت در مقابل همه خطاهای فازی است که شامل خطاهای a- b- c-g a-b a-b-g. a-c. a-c-g. a-b-c است . اجازه بدهید خطای a-b را در نظر بگیریم منطقی است که جریان I_a را برای انرژی دار کردن سیم پیچ جریان در نظر بگیریم اما انتخاب ولتاژی که باید به سیم پیچ فشار اعمال شود در حال حاضر مشخص نیست. شکلهای ۲۴-۲ و ۲۵-۲ در مورد امکان استفاده از ولتاژهای V_{ab},V_{CA} برای سیم پیچ فشار رله جهتدار در حین خطای فاز A بررسی لازم را انجام می دهند. از شکل ۲۴-۲ می توان فهمید که ولتاژV_{ab}, تمایل به کاهش یافتن در طول خطاa-b را دارد به علاوه زاویه بین I_a , V_{ab} در طول خطا خیلی زیاد است. برای زاویه MTA نشان داده شده، رله در طول خطا ایجاد گشتاور مثبت نمی کند. از این اشکال می توان به راحتی دید که هیچ کدام از این دو ولتاژ مناسب نیستند. به این دلیل که انها ملزومات بخش ۳-۹-۲ را ندارند.

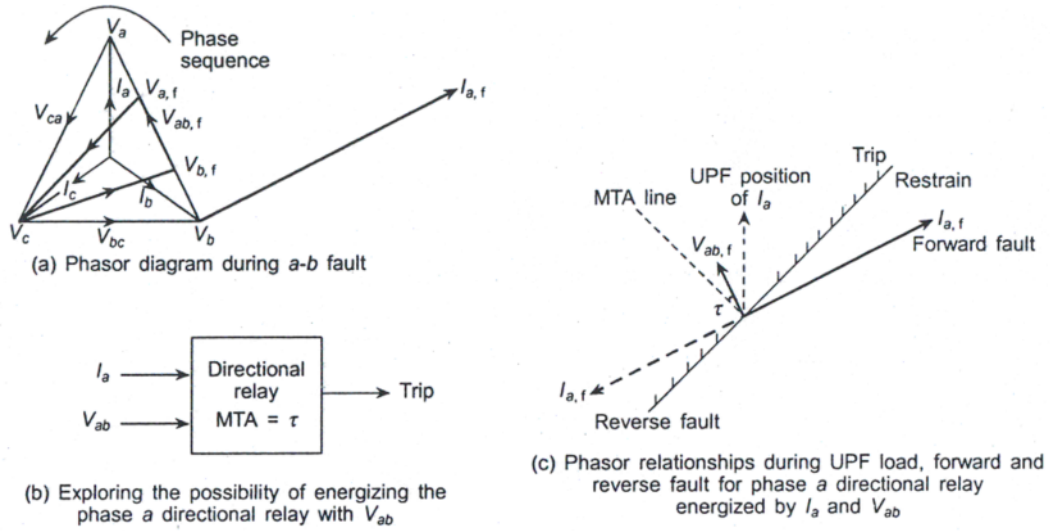


Figure 2.24 Exploring the possibility of energizing the pressure coil of phase *a* directional relay with voltage V_{ab}.

شکل ۲۴-۲: بررسی امکان انرژی دار کردن سیم پیچ فشار رله جهتدار فاز A با ولتاژ V_{ab}

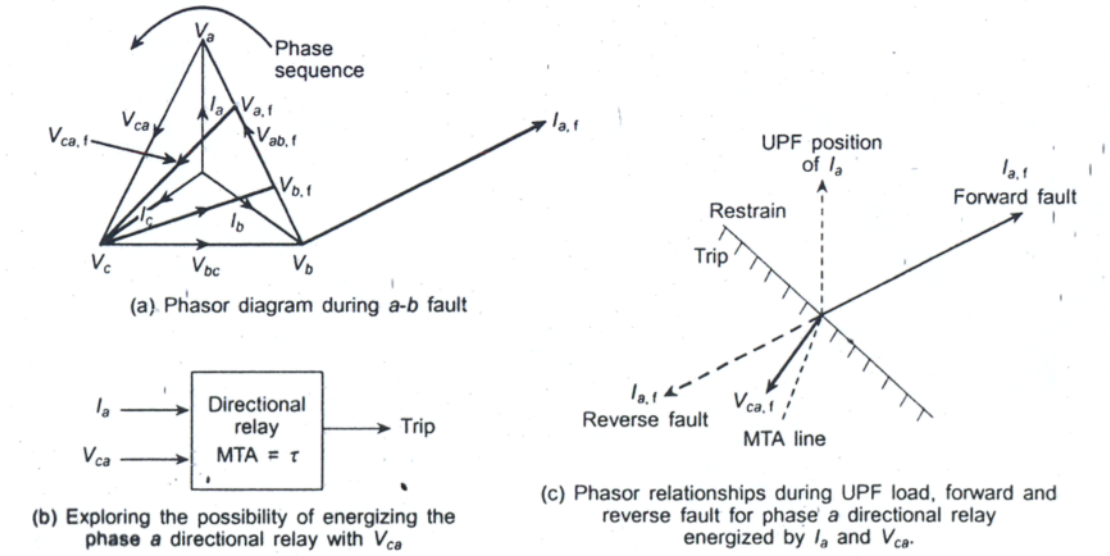


Figure 2.25 Exploring the possibility of energizing pressure coil of phase *a* directional relay with voltage V_{ca}.

شکل ۲۵-۲: بررسی امکان انرژی دار کردن سیم پیچ فشار رله جهتدار فاز A با ولتاژ V_{ca}

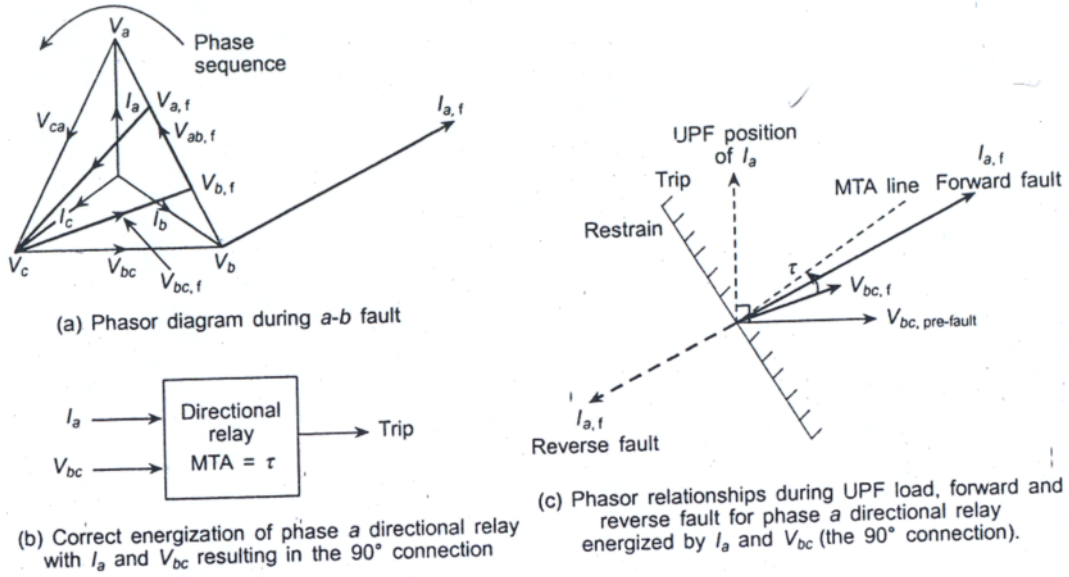


Figure 2.26 Correct energization of directional relay: 90° connection.

شکل ۲۶-۲ نشان میدهد که ولتاژ: V_{bc} انتخاب درست است. از آنجاییکه محل ضریب توان I_a(vpf) ۹۰ درجه از V_{bc} پیش فاز تر است، این اتصال را اتصال ۹۰ درجه می نامند.

شکل ۲۶-۲: انرژی دار کردن صحیح رله جهت دار با اتصال ۹۰ درجه

اتصال های ۳۰ درجه و ۶۰ درجه:

همانطور که قبلاً اشاره شد امکان انرژی دار کردن سیم پیچ فشار رله جهتدار به صورتهای دیگر نیز وجود دارد. اما تمام این ولتاژهای ممکن ملزومات عدم اشتباه عمل نکردن را دارا نیستند. به همین دلیل انتخابها به سه مورد کاهش می یابد. دو ولتاژ ممکن دیگر برای رله جهتدار فاز .a ولتاژ V_{ac} و $V_{ac}+V_{bc}$ است. اینها به عنوان اتصالات ۳۰ درجه و ۶۰ درجه نامیده می شوند. بدلیل ارتباط زاویه ای بین محل ضریب توان یک (upf) جریان I_a و این ولتاژها در طول شرایط قبل از خطا.

جدول ۴-۲ ترکیب های مختلف ولتاژها و جریان هایی را که باید به رله های خطای باز جهتدار اعمال شود و شامل خطاهای سه فاز می شود را برای اتصالات ۳۰ درجه، ۶۰ درجه و ۹۰ درجه به صورت خلاصه شده نشان می دهد:

جدول ۴-۲: خلاصه تحریک رله های خطای فاز

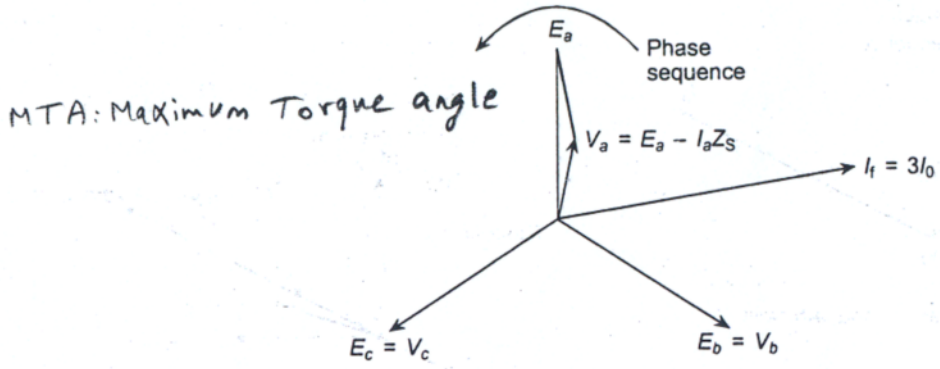
Table 2.4 Summary of phase fault relay excitation

Type of connection	*Phase faults involving phase, a*		*Phase faults involving phase, b*		*Phase faults involving phase, c*	
	Current	*Voltage*	*Current*	*Voltage*	*Current*	*Voltage*
90°	I_a	V_{bc}	I_b	V_{ca}	I_c	V_{ab}
30°	I_a	V_{ac}	I_b	V_{ba}	I_c	V_{cb}
60°	I_a	$V_{ac} + V_{bc}$	I_b	$V_{ba} + V_{ca}$	I_c	$V_{cb} + V_{ab}$

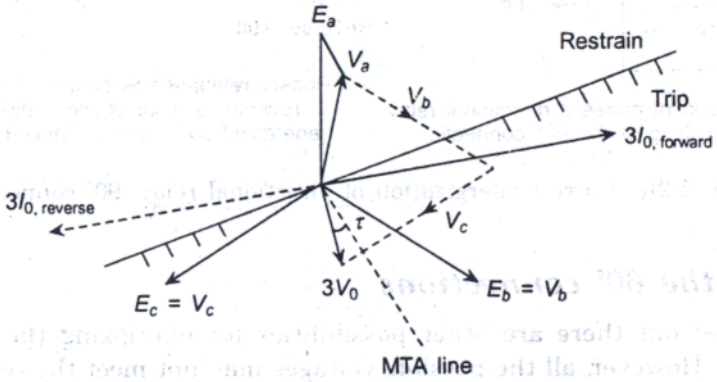
2.9.4 حفاظت خطای زمین جهت دار:

رله خطا زمین جهتدار زمانی بدرستی TRP می دهد که بوسیله جریان باقی مانده $I_\circ$ و ولتاژ باقی مانده $V_\circ$ تغذیه شود این در شکل ۲۷-۲ نشان داده شده است.

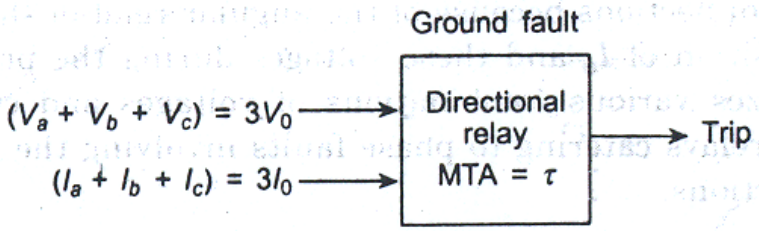
MTA: Maximum Torque angle



(a) Phasor diagram for *a-g* fault



(b) Phasor relationships between actuating quantities during forward and reverse faults



(c) Directional ground fault relay energized by residual voltage and current

Figure 2.27 Directional ground fault relay energization.

حفاظت اضافه جریان جهتدار برای یک فیدر سه فاز:

شکل ۲۸-۲ یک فیدر سه فاز حفاظت شده بوسیله رله های جهتدار را نشان می دهد بوسیله رله های اضافه جریان زیر نظر گرفته شده اند.

شکل ۲۸-۲: شماتیک کامل حفاظت جریان زیاد جهتدار یک فیدر سه فاز

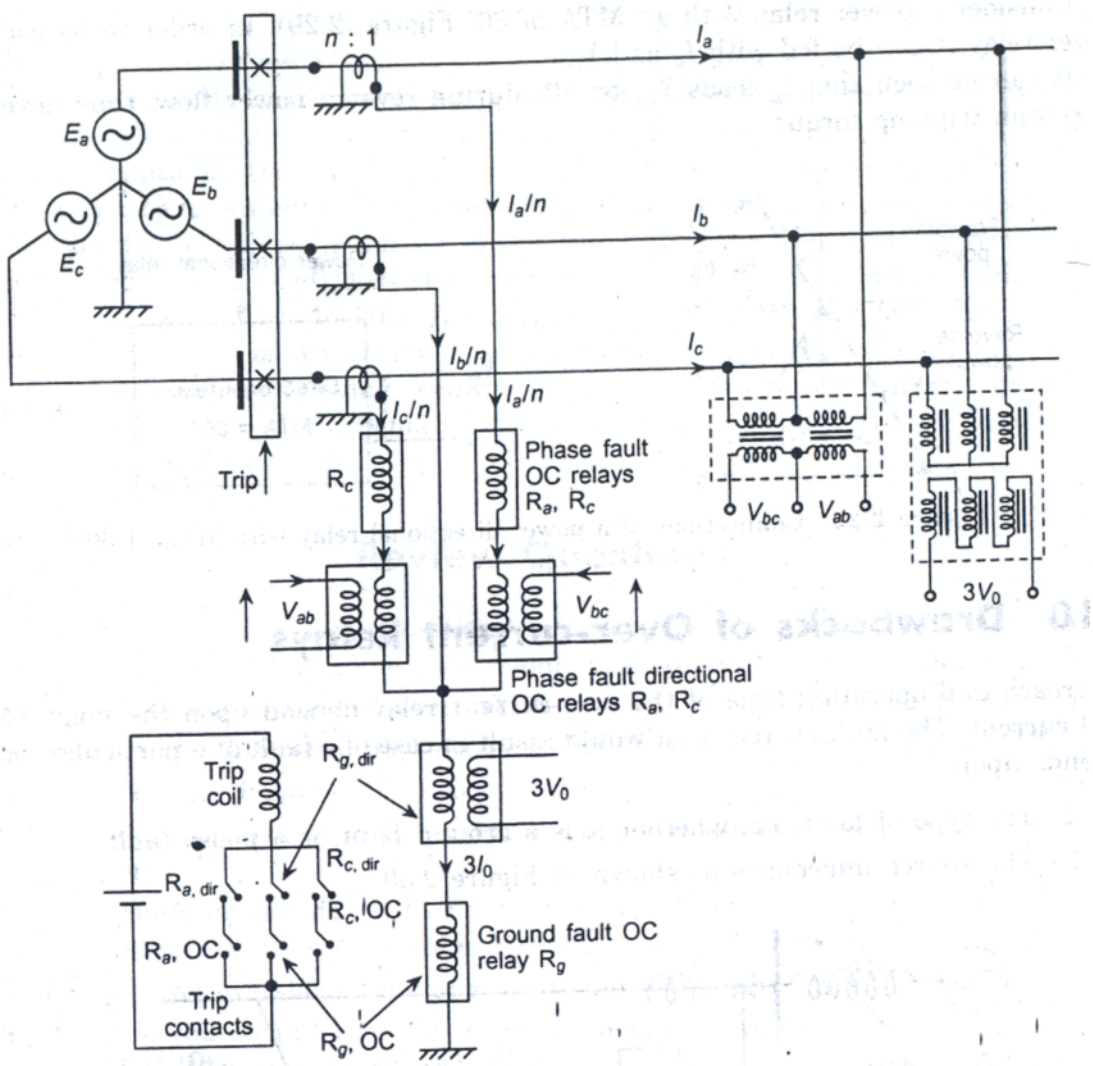


Figure 2.28 Complete scheme for directional OC protection of a three-phase feeder.

۲.۹.۵ حفاظت جهتدار تحت شرایط بدون خطا (رله توان معکوس):

موقعیت هایی وجود دارد که رله های جهتدار باید تحت شرایط بدون خطا به کار گرفته شوند. این کاربرد رله های جهتدار در حفاظت توان معکوس توربو آلتی ناتورها ظاهر می شود. برای ایجاد تمایز بین این دو اجازه بدهید به این رله ها رله های توان جهتدار بگوییم.

این موقعیتها از ان دسته موقعیتها که رله های جهتدار در طول خطا در آنها بکار گریفته می شوند متفاوت است، در رله های قدرت هیچ افت ولتاژ سیستم نداریم. رله های جهت دار برای اتصال کوتاه طوری متصل می شوند که تحت شرایط خطا، حداکثر گشتاور عمل کننده را به وجود آورند.

اما رله های جهتدار توان طوری متصل می شوند که وقتی جهت حرکت توان عکس شد، حداکثر گشتاور را به وجود آورند.

یک رله قدرت با MTA، ۳۰ درجه که در شکل ۲۹-۲ نشان داده شده است را در نظر بگیرید.

برای اینکه به عنوان رله قدرت استفاده شود می تواند با I_a و V_{ca} تغذیه شود.

مشخص است که I_a از V_{ca} در طول جریان توان معکوس ۳۰ درجه پیشفازتر است، از این رو حداکثر گشتاور TRIP داده را ایجاد می کند.

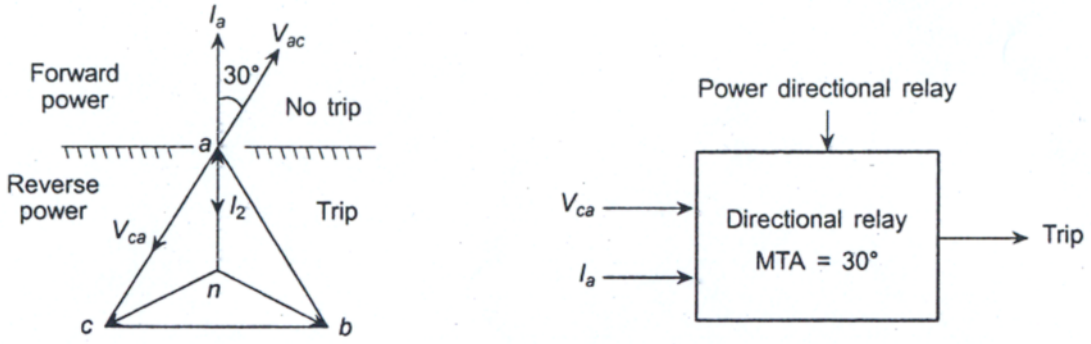


Figure 2.29 Connections of a power directional relay with MTA of 30°.

شکل ۲۹-۲: اتصال یک رله جهتدار توان دار با MTA، ۳۰ درجه

۲.۱۰ عقب کشیدن رله های اضافه جریان:

زمان دستیابی به عملکرد رله اضافه جریان به اندازه جریان خطا بستگی دارد. جریان خطایی که باید سبب خطا در یک محل مشخص شود به موارد زیر بستگی دارد:

۱- نوع خطا برای مثال خطای زمین باشد یا خطای فاز.

۲- امپدانس منبع همانطور که در شکل ۳۰-۲ نشان داده شده است.

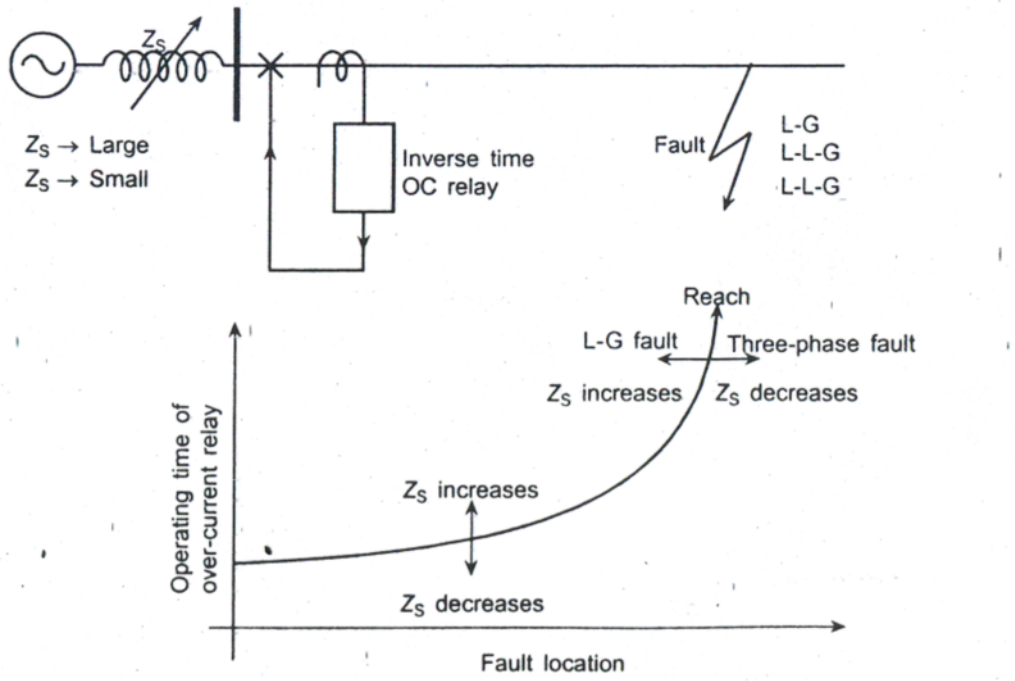


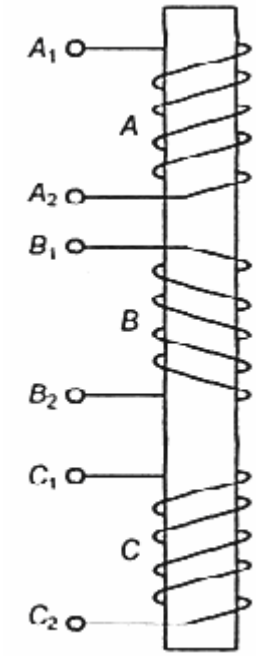
Figure 2.30 Fault current and reach is a function of fault type and source impedance.

شکل ۳۰-۲: جریان خطا و دستیابی از نوع خطا و امپدانس منبع است.

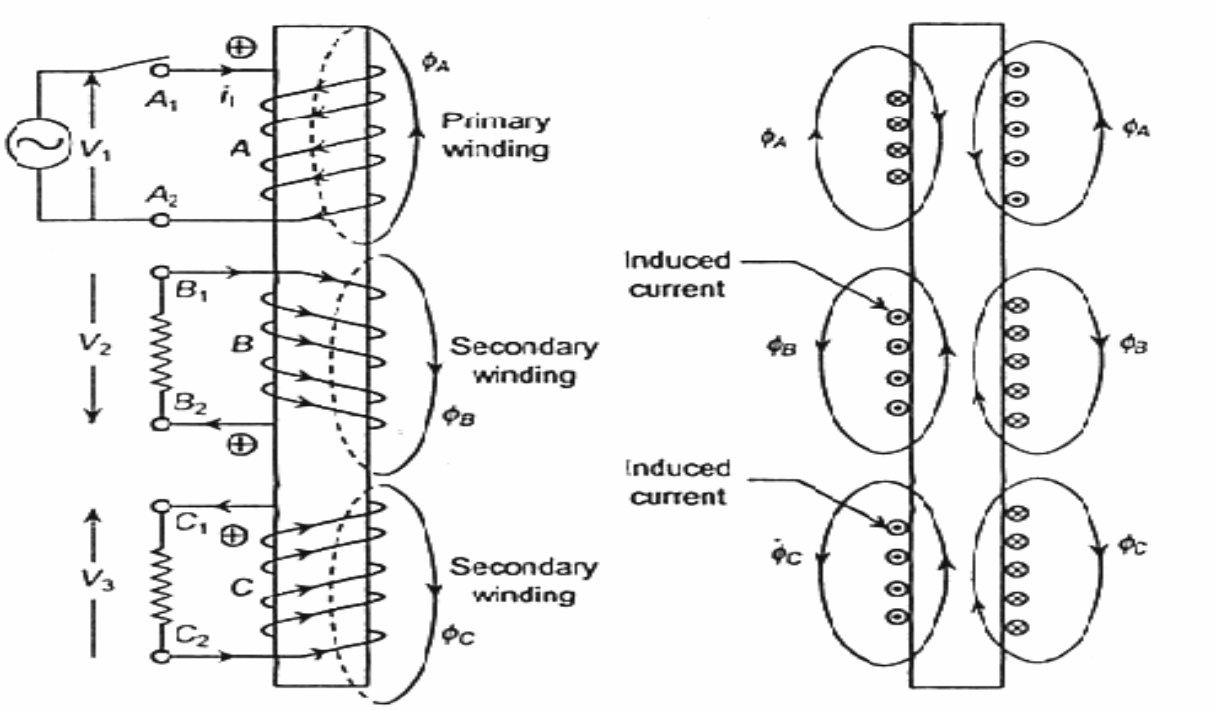
از آنجایی که نوع خطا و امپدانس منبع قابل پیش بینی نیستند، Reach رله های اضافی جریان با توجه به شرایط منبع و نوع خطا همیشه در حال تغییر است. از این رو، حتی اگر رله ها با دقت زیادی نسخه تنظیم شده باشند از آنجا که Reach آنها در حال تغییر است، لذا Selectivity خود را از دست می دهند. این از دست دادن قابلیت انتخاب تا حدودی در سیستم های توزیع ولتاژ پایین قابل تحمل است، در این سیستم ها تنها هدف رساندن هدف بدون وقفه به مشتری است اما در سیستمها اتصال داخلی EHV (gvid)، از دست دادن قابلیت انتخاب (Selectivity) علاوه بر ایجاد بی نظمی در بارها می شود، سبب به خطر افتادن پایداری سیستم قدرت ما نیز می گردد. از این رو در سیستم ها EHV رله های اضافی جریان نمی توانند به عنوان حفاظت اولیه عملکرد مطمئنی داشته باشند.

یک اصل دیگر در رله ها برای حفاظت کردن که با عنوان اندازه گیری مسافت (Distance) شناخته می شود، یکreach خیلی دقیق تر را پیشنهاد می کند که از وضعیت منبع و نوع خطا مستقل از این موضوع بحث فصل ۶ است.

برای جواب دادن به این سوال اجازه دهید که سیم پیچ A را مانند شکل ۲-۵ توسط یک منبع انرژی، تحریک کنیم. بنابراین همانند شکل ۲-۵ سر A_1 نسبت به سر A_2 مثبت می شود که باعث می شود جریانی در سیم پیچ A جاری شود و بنابراین شار ϕA در جهت نشان داده شده ایجاد می گردد . این شار همچنین سیم پیچ های B و C را نیز در برمی گیرد و ولتاژی در این سیم پیچها القا می گردد . حال اگر باری به ترمینال های B_1-B_2 وصل شود جریانی برقرار خواهد شد . با توجه به قانون لنز جریان در جهتی برقرار می گردد که با عامل بوجود آورنده اش (شار φA) مخالفت می کند . بنابراین جهت جریان در سیم پیچ B به گونه ای است که شار φB با شار سیم پیچ φA مخالف است . بنابراین جریان از سر B_2 خارج می شود و سر B_2 نسبت به سر B_1 مثبت خواهد بود.



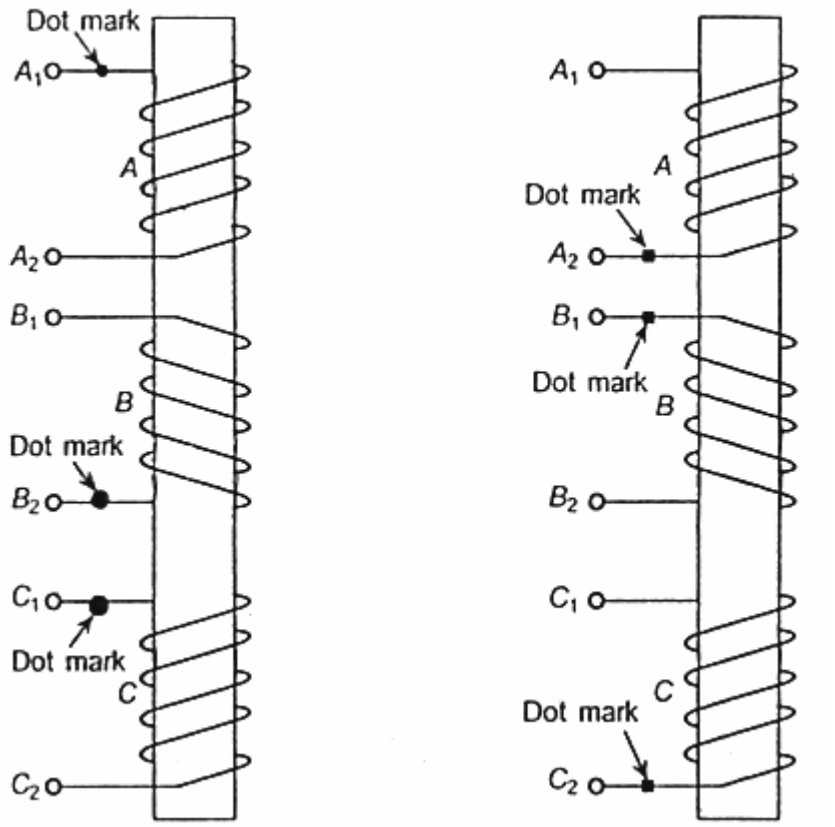
شکل (۱-۵) نشانه گذاری نقطه ای



شکل (۲-۵) نشانه گذاری نقطه ای : جریانها و شار

بنابراین B_2 همان پلاریته A_1 را خواهد داشت . همان طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است می توان بر روی ترمینال های A_1 و B_2 نقطه گذاشت تا نشان دهد که هر دو ترمینال از نظر فازی مشابه هستند . با بحث مشابه در مورد سیم پیچ C_1 می توان نشان داد که جریان باید از ترمینال C_1 خارج شود . بنابراین C_1 مشابه A_1 خواهد بود . بنابراین بر روی سرهای A_1 و B_2 و C_1 نقطه گذاشته می شود .

کمی فکر کردن ، خوانندگان را قانع می کند که می توان علامت نقطه را روی ترمینال های A_2 و B_1 و C_2 مانند شکل ۳-۵ گذاشت .



شکل (۳-۵) نشانه گذاری نقطه ای : روش سمبولیک برای نمایش نقطه ای

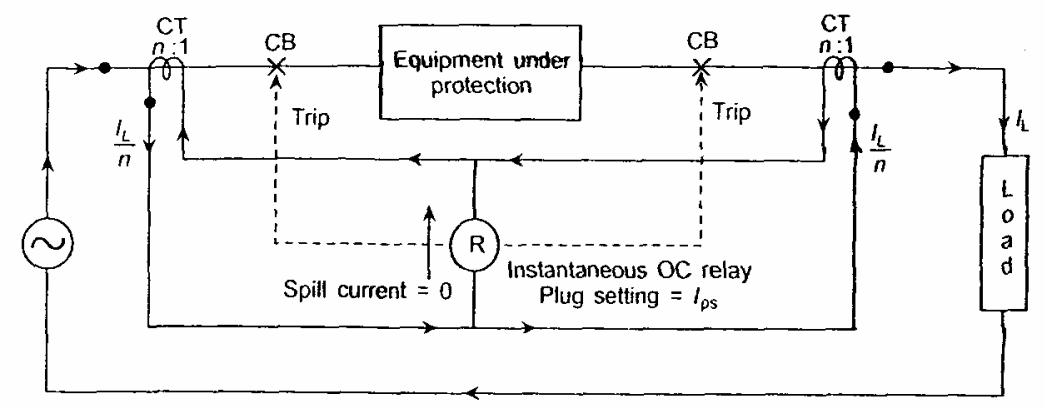
با توجه به بحث بالا موارد زیر در مورد قرارداد نقطه ای برقرار می باشد :

- وقتی جریان وارد سر نقطه دار در طرف اول ترانس جریانمی شود جریان باید از سر نقطه دار طرف دوم خارج شود .
- اگر جریان ها به ترمینال نقطه دار سیم پیچ کوپل شده وارد شود ، سپس شار تولید شده توسط این جریانها با هم جمع می شوند .

۳-۵- حفاظت دیفرانسیلی ساده:

5-3-1-حفاظت دیفرانسیلی ساده : در هنگام تغذیه بار

شماتیک یک رله دیفرانسیل ساده در شکل (٤-٥) نشان داده شده است . (این رله، طرح مرزپرایز نیز نامیده می شود) . جریان هایی که واردشونده و خارج شونده از تجهیز تحت حافظت، توسط ترانس های جریان که در دو طرف تجهیز گذاشته شده کاهش می یابد . باید به نشانه گذاری نقطه ای بر روی ترانس های جریان توجه شود.



شکل (۴-۵) حفاظت دیفرانسیلی ساده

جهت جریانها در مدار می تواند طبق موارد زیر درنظر گرفته شود :

- وقتی جریان به سر نقطه دار ترانس جریاندر طرف اول وارد می شود جریان باید سر نقطه دار مشابه در ثانویه ترانس جریانرا ترک کند .

برای بررسی وضعیت بار در مورد شکل (٤-٥) توجه به این نکته حائز اهمیت است که جریان هایی که از دو ترانس جریان عبور می کنند هم از نظر اندازه و از نظر فازی با هم برابرند. بنابراین جریان تمایلی برای ورود به رله اضافه جریان نخواهد داشت . همان طور که در شکل نشان داده شده است رله اضافه جریان در مسیر جریان سرریز قرار دارد تا در مواقع لزوم، به دو کلید یا (مدارشکن یا Circuit Breaker) که در طرفین تجهیز تحت حفاظت قرار دارند فرمان تریپ دهد .

فرض کنید که تجهیز محافظت شده می تواند یک ترانس با نسبت تبدیل ۱:۱ یا یک سیم پیچ ژنراتور یا یک شین باشد . دو جریان مربوط به اولیه و ثانویه با هم مساوی می باشند و همچنین نسبت تبدیل دو ترانس جریانبا هم برابرند. مدارهای ثانویه ترانس جریانطوری متصل شده اند که در شرایط نرمال ، جریان بین دو سری که سیم پیچ ثانویه را وصل می کند گردش می نماید . در حالت عادی جریانی از رله اضافه جریان عبور نخواهد کرد،

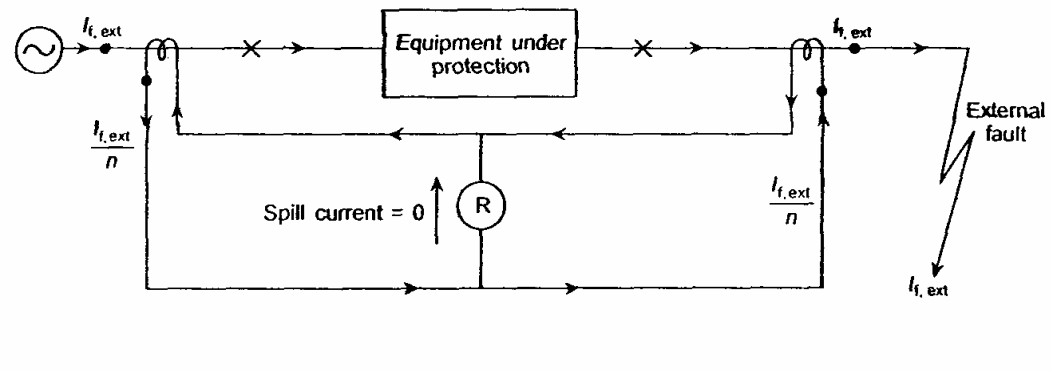
بنابراین رله اضافه جریان عمل نکرده و باعث باز شدن دو کلید نخواهد شد . بنابراین رله دیفرانسیل ساده در حالت نرمال پایدار خواهد ماند.

5-3-2- رله دیفرانسیلی ساده (رفتار در هنگام وقوع خطای خارجی):

رله دیفرانسیل هنگامی که هر خطایی در خارج از منطقه محافظت شده آن رخ می دهد همچنان پایدار خواهد ماند. این نوع خطا را خطای خارجی یا خطای معمولی می نامند و جریان سرریز وجود ندارد . شکل (5-5) نشان می دهد در زمان خطای فازی همچنان جریانی که رله دیفرانسیل را ترک می کند مشابه جریانی است که به آن وارد می شود (جریان های ورودی به تجهیز و خروجی از آن با هم برابرند) . چون جریان هایی که از ثانویه ترانس های جریان عبور می کنند با هم برابرند، بنابراین رله دیفرانسیل در حالت پایدار می ماند .

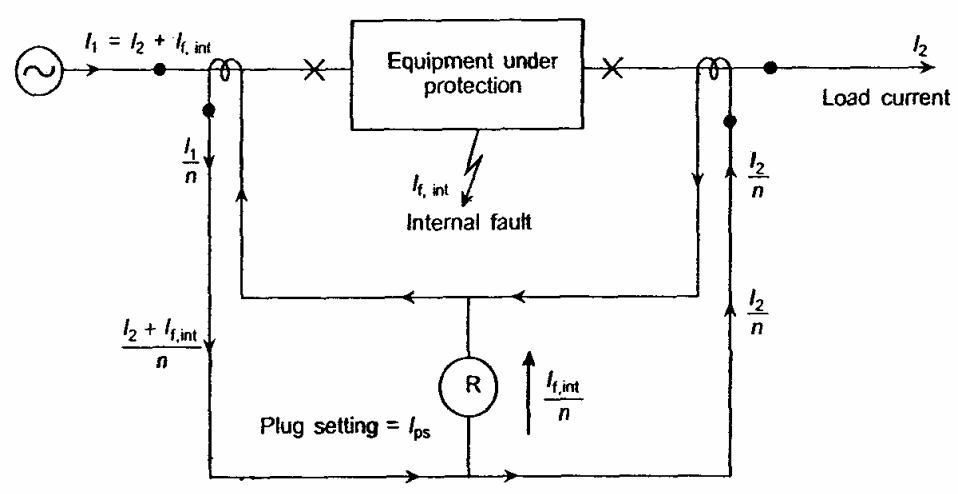
5-3-3- رله دیفرانسیلی ساده (رفتار در هنگام وقوع خطای داخلی):

شکل (٦-٥) وقوع یک خطای داخلی را با اندازه جریان $I_{f,int}$ نشان می دهد . جریانی که از منطقه تحت حفاظت خارج می شود I_2 می باشد و جریانی که به آن وارد می شود I_1 می باشد ، پس: $I_1=I_2+I_{f,int}$



شکل(٥-٥) شماتیک حفاظت دیفرانسیلی ساده پایدار در مقابل خطای خارجی

همان طوری که در شکل نشان داده شده جریانی که وارد رله اضافه جریان می شود $\frac{I_{f,int}}{n}$ می باشد.که n نسبت تعداد دورهای سیم پیچ ثانویه به تعداد دور های سیم پیچ اولیه می باشد و با توجه به این که جریان عبور کننده از رله اضافه جریان بیشتر از جریانی است که باعث عمل کردن رله اضافه جریان خواهد شد، بنابراین رله اضافه جریان عمل کرده و باعث باز شدن دو Circuit Breaker خواهد شد.



شکل(۶-۵) شماتیک حفاظت دیفرانسیلی ساده تریپ در مقابل خطای داخلی

نکته: کمترین جریان خطای داخلی از نظر اندازه که باعث عملکرد رله خواهد شد به صورت زیر است:

$I_{f,min} = (\text{ترانس جریان ratio})(\text{Plug setting of the OC relay}) = nI_{ps}$

n = نسبت تبدیل نرانسفورماتور جریان

I_{ps} = ضریب تنظیم جریانی رله

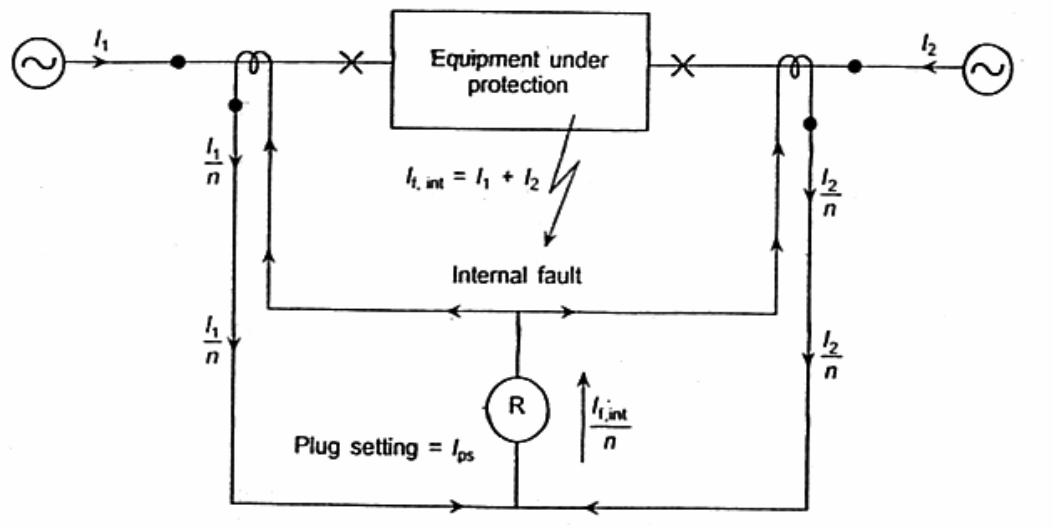
4-3-5-حفاظت دیفرانسیلی ساده از دو سو تغذیه: در هنگام وقوع خطای داخلی

برای آنالیز این حالت یک سیستم از دو سو تغذیه در نظر گرفته شده و سوال این است که رله دیفرانسیل چگونه در این حالت عمل می کند ؟

در شکل (۷-۵) یک سیستم از دو تغذیه شونده را نشان داده شده که در آن خطای داخلی از دوسو تغذیه می شود.

جریان$I_{f,int}$ برابر است با I_1+I_2 و دوباره مشاهده می شود که جریان رله اضافه جریان برابر است با :

$$\frac{I_{f,int}}{n}$$

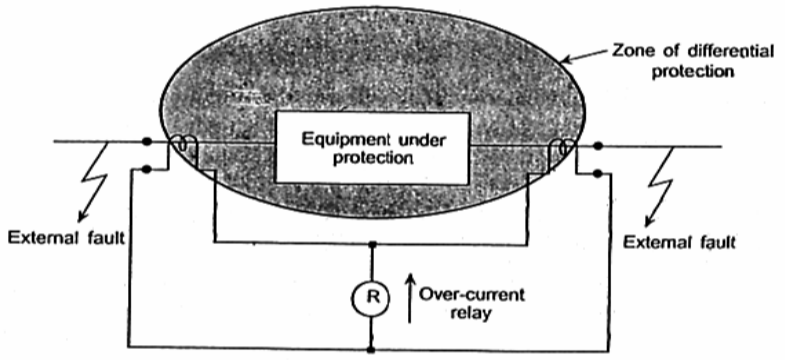


شکل(۷-۵) شماتیک حفاظت دیفرانسیلی ساده در سیستم دو سو تغذیه و تریپ در مقابل خطای داخلی

اگر جریان سرریز(Spill Current) از I_{ps} بزرگتر باشد آنگاه رله اضافه جریان باعث باز شدن دو کلید در اطراف تجهیز تحت حفاظت خواهد شد.

۵-۴- ناحیه حفاظتی رله دیفرانسیلی

شماتیک و طرح رله دیفرانسیل، یک ناحیه حفاظتی بسته و مشخص شده را تعریف می کند . این ناحیه بین دو ترانس جریانکه در شکل (۸-۵) نشان داده شده است را در برمی گیرد . بنابراین خطاهایی که در این ناحیه بین دو ترانس جریانرخ می دهد به نام خطاهای داخلی و هر خطایی خارج از آن را خطای خارجی می دانیم . بنابراین حدس زده می شود که رله در مورد خطا های داخلی عمل کند و خطا های خارجی را پوشش نمی دهد.



شکل(۸-۵) ناحیه حفاظتی رله دیفرانسیل

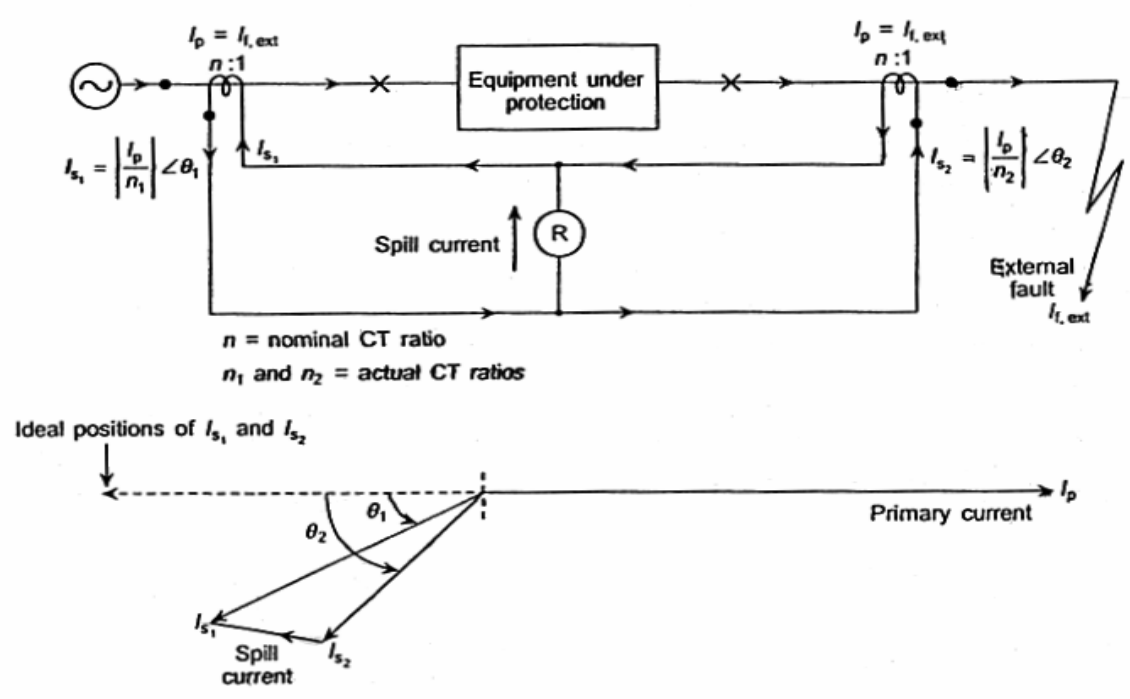
بنابراین طرح دیفرانسیلی گفته شده در مورد خطاهای کوچک داخلی جواب می دهد اما خطاهای بزرگ خارجی را پوشش نمی دهد. دستیابی به این ایده آل خیلی مشکل است مخصوصا برای خطاهای سنگین خارجی

که رفتارهای غیرخطی تجهیزات سیستم حفاظتی را به دنبال خواهد داشت که در بخش بعد درباره آن بحث می شود.

۵-۵- شماتیک یک رله دیفرانسیلی ساده در حالت واقعی:

در بحث قبلی فرض کرده بودیم که ترانس های جریان ایده آل هستند ولی در حالت عملی ترانس های جریان تابع نسبت تبدیل و خطای زاویه ای می باشند. این خطاها بستگی به ظرفیت ترانس جریان و طولهای اضافی و امپدانس سیم پیچ رله دارد. خطاها به طور کلی با افزایش جریان اولیه زیاد می شوند مانند هنگام وقوع خطای خارجی. شکل (۹-۵) فازور جریان های اولیه و ثانویه را به هنگام وقوع خطای خارجی را نشان می دهد.

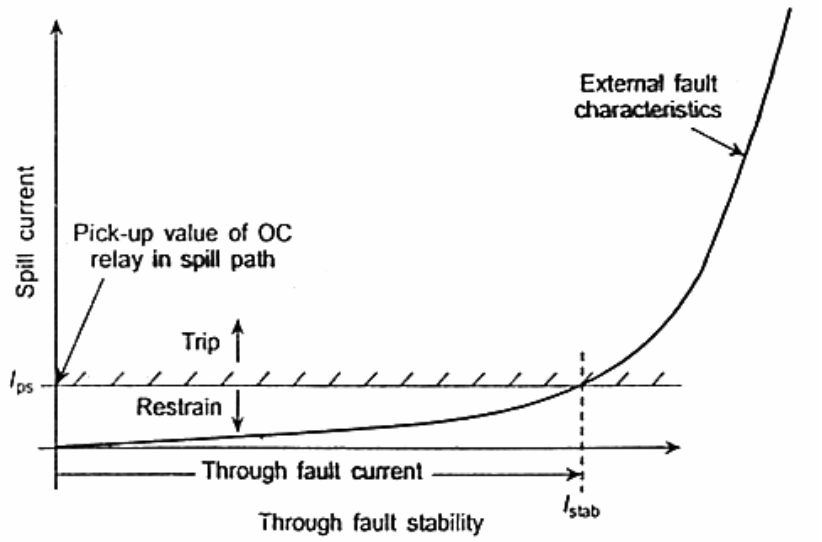
به طور ایده آل جریان های ثانویه دوترانس جریان هم از نظر فازی وهم ازنظر اندازه با هم برابر می باشند بنابراین جریان شاخه سرریز (Spill Current) صفر خواهد شد. اگر همان طور که در شکل (۹-۵) نشان داده شده ترانس جریان اول دارای نسبت واقعی n_1 وخطای زاویه ای θ_1 باشد و ترانس جریان دوم دارای نسبت واقعی n_2 وخطای زاویه ای θ_2 باشد.تفاوت بین این دو جریان باعث جاری شدن جریان شاخه موازی (جریان سرریز) مطابق شکل(۹-۵)خواهد شد. آنجائیکه هر دو خطای نسبت تبدیل و خطای زاویه فاز، با افزایش جریان اولیه زیاد می شوند، جریان شاخه سرریز (Spill Current) در هنگام وقوع خطای خارجی افزایش خواهد یافت.



شکل (۵-۹) جریان سرریز(Spill Current) بخاطر خطای ترانس جریان

۱-۵-۵- پایداری خطای خارجی و نسبت پایداری :

با افزایش جریان خطای خارجی خطاهای متفاوت ترانس های جریان بزرگتر شده و اهمیت بیشتری پیدا می کند. بنابراین با افزایش جریان خطای خارجی (که در شکل (۱۰-۵) نشان داده شده است) جریان سرریز (Spill Current) ایجادخواهد شد (این جریان به اختلاف جریان های ثانویه دو ترانس جریان وابسته است) که باعث تجاوز این جریان از مقدار I_{ps} رله اضافه جریان شاخه موازی خواهد شد وسبب می شود رله تجهیزات تحت حفاظت خود را قطع کند . واضح است وقتی که رله هنگام وقوع خطای خارجی فرمان قطع می دهد و تجهیزات تحت حفاظت خود را قطع می کند، درست عمل نکرده و در چنین مواقعی گفته می شود شماتیک دیفرانسیلی و رله دیفرانسیلی پایداری خود را از دست داده است. برای این که رله تحت خطای خارجی عمل نکرده و مدارات تحت حفاظت خود را قطع نکند حد پایداری خطای خارجی را تعریف می کنیم: ماکزیمم جریان خطای خارجی که بیشتر از آن باعث می شود رله پایداری خود را ازدست دهد. در شکل (۱۰-۵) حد پایداری خطای خارجی با I_{stab} نشان داده شده است.



شکل(۱۰-۵) مشخصه رله دیفرانسیل ساده

این مشخصه را با موقعیت خطای داخلی مقایسه کنید. کمترین مقدارجریان خطای داخلی که طرح دیفرانسیلی بحث شده تحت آن عمل خواهد نمود توسط جریان I_{ps} رله اضافه جریان تعیین می شود. برای مشخص کردن بازه ای بین کمترین جریان خطای داخلی و بیشترین مقدار جریان خطای خارجی که بیش از ان شماتیک بدرستی عمل نمی کند، نسبت پایداری به صورت زیر تعریف می شود :

ماکزیمم جریان خطای معمولی که بیشتر از آن رله عملکرد نادرست دارد

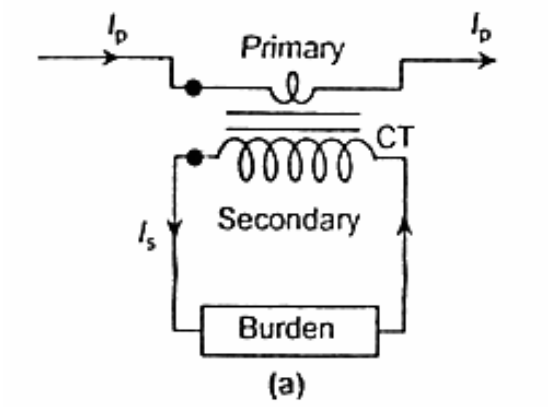
ضریب نسبت پایداری = ——————————————————

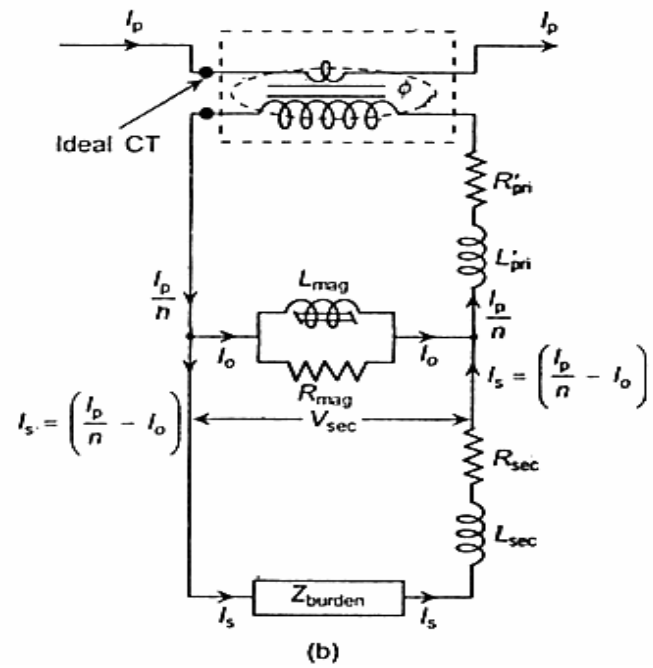
مینیمم جریان خطای داخلی لازم جهت قطع

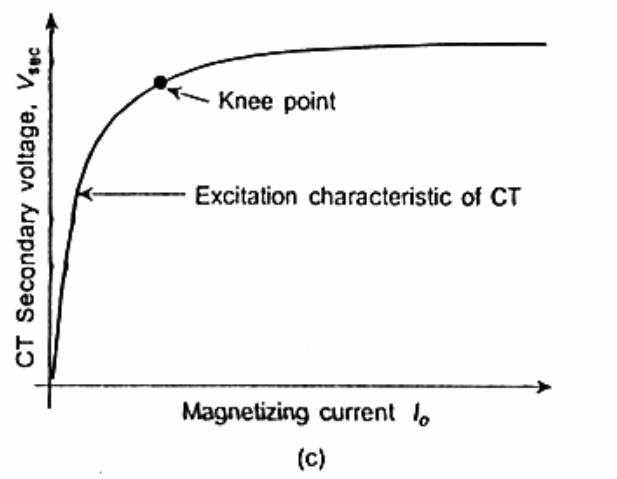
نسبت پایداری بالاتر، توانایی بهتر سیستم برای تشخیص بین خطای خارجی و داخلی را نشان می دهد. با نزدیک شدن و هماهنگ شدن و مشابه شدن دوترانس جریان می توان نسبت پایداری را مطلوبتر کرد.

۲-۵-۵-مدار معادل ترانس جریان :

شکل (۱۱-۵) مدار معادل ترانس جریان ارجاع شده به سمت ثانویه را نشان می دهد. R'_{pri} و L'_{pri} مقاومت و اندوکتانس نشتی سیم پیچ اولیه ارجاع شده به ثانویه می باشند. R_{mag} و L_{mag} از شاخه مغناطیس کننده موازی می باشند که باید توجه کرد اندوکتانس مغناطیس کننده به مقدار زیادی غیر خطی است.







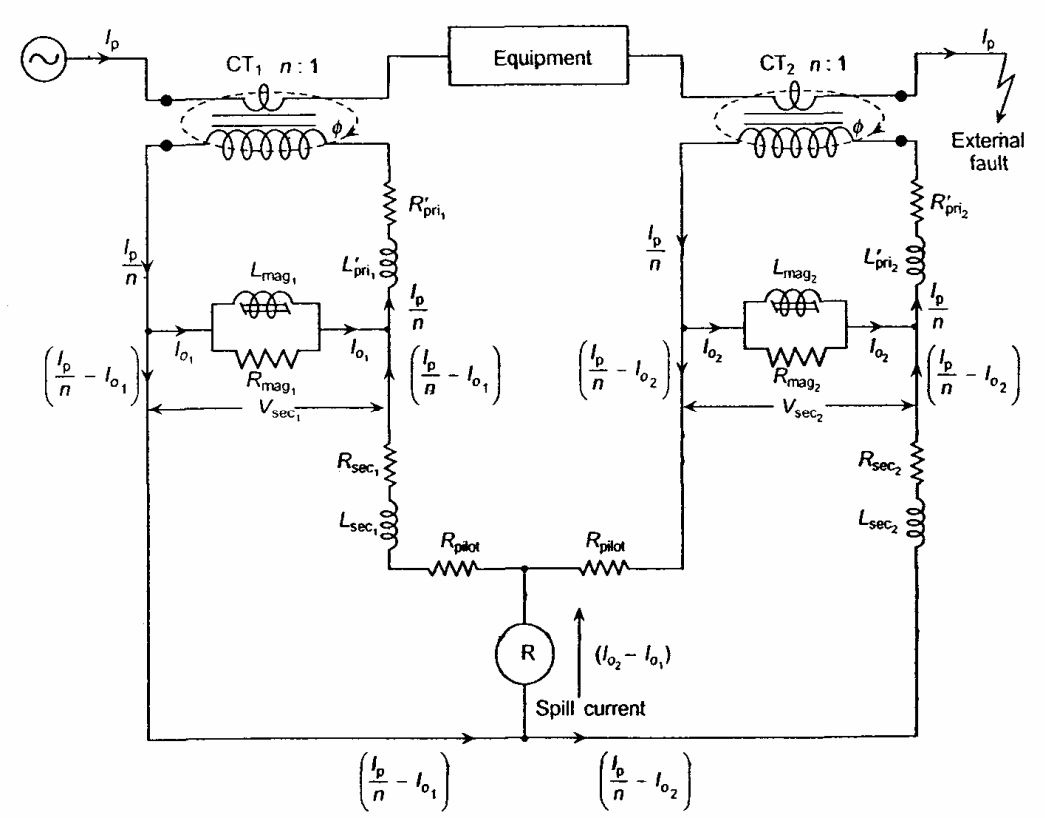
شکل (۱۱-۵) مدار معادل ترانس جریان

R_{sec} و L_{sec} بترتیب مقاومت و اندوکتانس نشتی سیم پیچ ثانویه می باشند. امپدانس Z_{burden} شامل اندوکتانس سیم پیچ های رله و مقاومت سیم های اضافی می باشد. همچنین درشکل (c) (۵-۱۱) مشخصه مغناطیس کنندگی ترانس جریان نشان داده شده است که مشخصه مدار باز هم نامیده می شود.

اگر جریان اولیه ترانس جریان ایده ا ل I_p فرض شود، جریان ثانویه I_p/n خواهد بود و جریان شاخه مغناطیس کنندگی I_o در نظر گرفته شده است . باید توجه شود که جریان مغناطیس کننده تابع غیر خطی از ولتاژ تحریک می باشد. در زمان کار عادی وقتی که V_{sec} کوچک است می توان جریان شاخه مغناطیس کنندگی را در نظر نگرفت اما در مقادیر بالای جریان اولیه مثلا هنگام وقوع خطای خارجی، ولتاژ ثانویه (که برابر است با $I_s(Z_{sec}+Z_{burden})$) افزایش یافته و باعث می شودکه I_o بخش اعظمی از جریان ترانس جریان ایده آل را شامل شود، بنابراین همواره نمی توان I_o را ندیده گرفت.

شماتیک دیفرانسیلی با در نظر گرفتن مدار معادل ترانس های جریان :

شکل (۱۲-۵) یک طرح دیفرانسیلی ساده را که از مدار معادل ترانس جریان تشکیل شده است، نشان می دهد. جریان های متفاوت نشان داده شده به خاطر در نظر گرفتن خطای خارجی می باشد. با توجه به اینکه دو ترانس جریان دارای نسبت نامی یکسان n می باشند می بینیم که جریان شاخه موازی برابر است با تفاوت دو جریان مغناطیس کننده دوترانس جریان و تا وقتی که تفاوت آنها زیاد باشد یک جریان اساسی در شاخه موازی ایجاد می شود که نتیجه آن از دست رفتن پایداری و عملکرد نادرست طرح دیفرانسیلی ساده می باشد. با یک نگاه ساده می توان دریافت که این طرح به اصلاحات بیشتری نیاز دارد.



شکل(۱۲-۵) شماتیک حفاظت دیفرانسیلی ساده

برای حفاظت ترانسفورمرها می توان از این روش استفاده کرد: چون ترانس های جریان قرار گرفته در دو سمت ترانسفورمرها در ولتاژ اولیه متفاوت مجبور به کارند، بنابراین جریان های ترانس های جریان هم با هم متفاوت هستند (به شرط یکسان گرفتن نسبت تبدیا ترانس های جریان). برای رفع این مشکل باید نسبت تبدیل دو تران جریان را متناسب با ترانسفورمر تحت حفاظت انتخاب کرد. بنابراین غیر ممکن است بتوان مشخصه های ترانس های جریان را با هم یکسان کرد. این موضوع نشان می دهدکه چرا هنگام افزایش جریان خطا جریان شاخه موازی افزایش می یابد.

در مورد حفاظت شین ها ولتاژ اولیه دو ترانس جریان با هم یکی است و همین طور نسبت نامی دو ترانس جریان نیز یکی می باشد. اما چون شین ها تحت جریان های خطای سنگین می باشند و این مسئله باعث تشدید اختلاف بین دو مشخصه دو ترانس جریان می شود، بنابراین برای حفاظت شین ها هم باید طرح دیفرانسیلی ساده اصلاح شود.

۶-۵- رله دیفرانسیلی درصدی:

اگر گشتاور نگهدارنده ای متناسب با جریان خطای خارجی به وجود آید، رله دیفرانسیلی ساده می تواند بیشتر پایدار شود. این گشتاور همچنین به جریان سرریز (Spill Current) نیز وابسته است.

این ایده در شکل (۱۳-۵) نشان داده شده است. این رله از یک سیم پیچ نگهدارنده تشکیل شده که تپی درمرکز آن قرار گرفته وآن را به دو قسمت تقسیم می کند که تعداد دورهای هر قسمت $N_r/2$ می باشد. سیم پیچ نگهدارنده به مسیر جریان گردش کننده وصل است، بنابراین جریان خطای خارجی را دریافت می کند. تعداد دورهای رله عمل کننده N_o دور می باشد. حال معادله گشتاور را برای این رله توضیح می دهیم:

آمپر دور عمل کننده بخش سمت چپ سیم پیچ نگهدارنده = $N_rI_1/2$

آمپر دور عمل کننده بخش سمت راست سیم پیچ نگهدارنده = $N_rI_2/2$

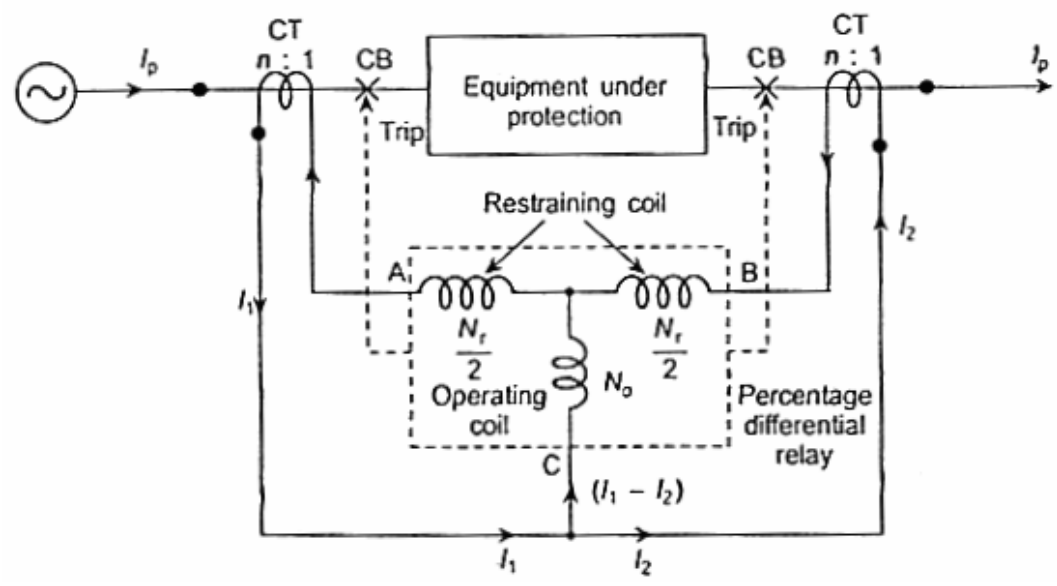
آمپر دور عمل کننده کل روی سیم پیچ نگهدارنده = $N_r(I_1+I_2)/2$

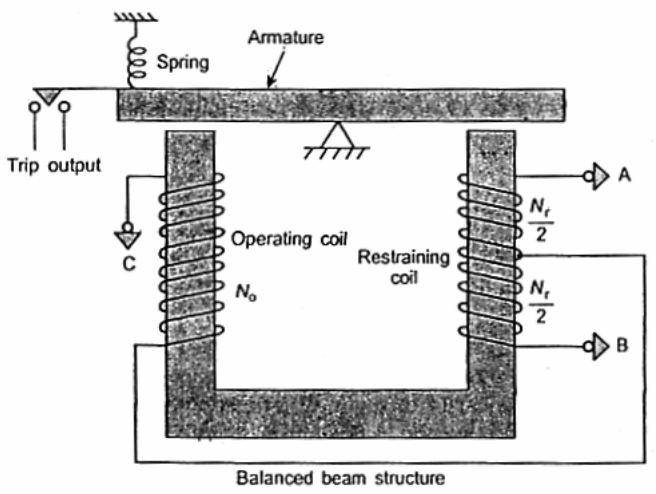
گشتاور در رله های الکترو مغناطیسی با توان دوم شار متناسب است. بنابراین:

گشتاور تولید شده توسط سیم پیچ نگهدارنده= $M.((N_r(I_1+I_2)/2)^2)$

M :ثابت تناسب می باشد.

گشتاور نگهدارنده تولید شده توسط فنر کنترل کننده را T_{spring} می نامیم، پس داریم:





شکل (۱۳-۵) رله دیفرانسیلی درصدی

گشتاور نگهدارنده کل = $M.((N_r(I_1+I_2)/2)^2)+T_{spring}$

به طور مشابه :

گشتاور عمل کننده= $M.((N_o\ (I_1-I_2))^2)$

اگر گشتاور عمل کننده بزرگتر از گشتاور نگهدارنده باشد رله فرمان قطع می دهد. زمانی که گشتاور عمل کننده و گشتاور مقاوم کننده با هم برابر باشند، رله در مرز عمل کردن قرار می گیرد. با صرفنظر از گشتاور مقاوم تولیدی توسط فنر، داریم:

$$M((N_r(I_1+I_2)/2)^2)= M((N_o\ (I_1-I_2))^2)$$

$$I_1-I_2=K(I_1+I_2)/2$$ یا :

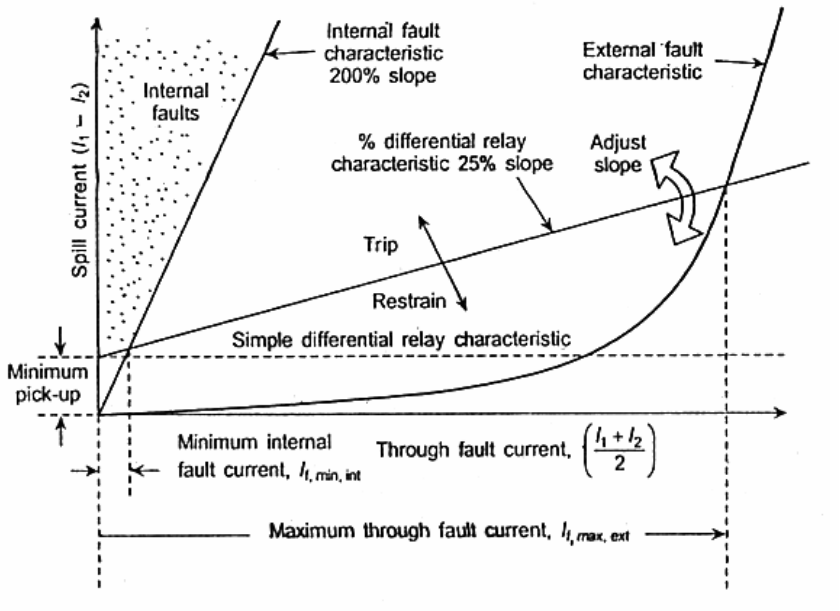
که: $K=N_r/N_o$

حال با در نظر گرفتن تأثیر فنر کنترل کننده داریم:

$$I_1-I_2=K(I_1+I_2)/2+K_0$$

بنابراین مشخصه عمل کننده این رله یک خط مستقیم با شیب N_r/N_o می باشد که محور y ها را در K_0 قطع می کند. تمامی نقاط بالای خط مستقیم موقعیتی را نشان می دهد که گشتاور عمل کننده بزرگتر از گشتاور نگهدارنده می باشد از این رو در ناحیه قطع می افتد. تمامی نقاط پایین خط مستقیم متعلق به گشتاور نگهدارنده است.

مشخصه عمل کننده رله دیفرانسیلی درصدی در شکل (۱۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۴-۵) مشخصه عملکرد رله دیفرانسیل درصدی

بنابراین جریان شاخه موازی باید بزرگتر از درصد معینی ازجریان خطای مستقیم باشد تا رله عمل کند. از این رو نام آن را رله دیفرانسیلی درصدی گذاشته اند. که شیب، معرف درصد می باشد. یعنی شیب 0.4 معرف 40% شیب می باشد.

رله دیفرانسیلی یک مقدار ثابت جریان تحریک (Pick Up) ندارد. بلکه مقدارجریان تحریک آن با مقدار جریان خطای خارجی وفق داده می شود. یعنی همان طور که جریان خطا افزایش می یابد از رله انتظار داریم که آن را به آسانی تشخیص دهد. این کار با اختصاص مقداری به ضریب تناسب گشتاور نگهدارنده در برابر جریان جرخشی بدست می آید. در شکل (۱۴-۵) دیده می شود که پایداری و نسبت پایداری رله دیفرانسیلی درصدی به طور ذاتی از رله دیفرانسیلی ساده بهتر است. سیم پیچ نگهدارنده، سیم پیچ بایاس کننده نیز نامیده می شود. شیب منحنی مشخصه نیز به عنوان درصد بایاس شناخته می شود. همان طور که در شکل (۱۴-۵) نشان داده شده است، منحنی مشخصه رله دیفرانسیلی درصدی روی مشخصه خطای مستقیم و مشخصه خطای داخلی قرار گرفته است. شیب مشخصه خطای داخلی به صورت زیر محاسبه می شود:

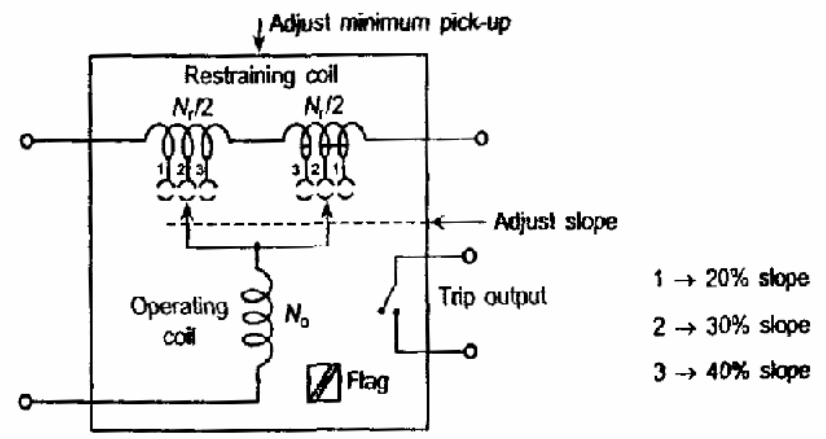
خطای داخلی در یک سیستم از یک سو تغذیه را در نظر بگیرید. تا وقتی که ترانس جریان دوم جریانی را عبور نمی دهد برای مثال $I_2=0$ ، جریان سرریز (Spill Current) که I_1-I_2 است برابر می شود با I_1 و جریان گردش کننده که $(I_1+I_2)/2$ است برابر می شود با $I_1/2$. بنابراین جریان سرریز (Spill Current) دو برابرجریان گردش کننده خواهد شد.که شیب ۲ را می دهد که با ۲۰۰٪ نشان می دهیم. مینیمم جریان خطای

داخلی که رله مورد نظر واکنش نشان نمی دهد با $I_{f,min,int}$ و ماکزیمم جریان خطای خارجی که شماتیک به اشتباه عمل می کند با $I_{f,max,ext}$ در شکل (۱۴-۵) نشان داده شده است. بنابراین نسبت پایداری برابر می شود با:

$$\text{نسبت پایداری} = I_{f,max,ext} / I_{f,min,int}$$

1-6-5-بلوک دیاگرام رله دیفرانسیل درصدی

شکل (۱۵-۵) بلوک دیاگرام رله دیفرانسیلی درصدی را نشان می دهد. رله دارای دو ورودی است: ۱- ورودی شیب و۲-کمترین مقدار جریان تحریک یا pick up. که شیب با تغییر دادن تپ روی سیم پیچ نگهدارنده عوض می شود و باید دقت نمود که هر دو نیمه از سیم پیچ نگهدارنده برای تپهای متقارن نیاز است وکمترین مقدار جریان تحریک pick up توسط تغییر کشش فنر کنترلی تعیین می شود.



شکل (۱۵-۵) بلوک دیاگرام رله دیفرانسیل درصدی به همراه نمایش تنظیمات آن

۷-۳-حفاظت جریان نشتی زمین

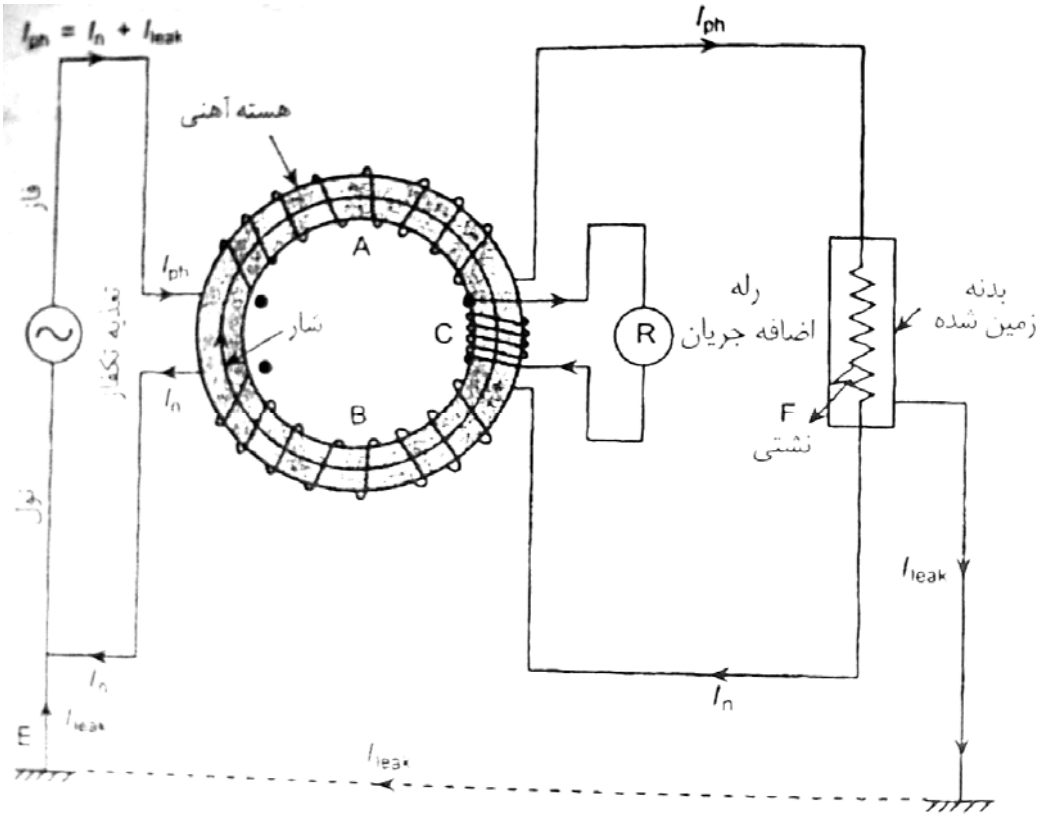
در بعضی از مواقع به دلیل از بین رفتن عایقها، بدنه تجهیزات برق دار می شود. بدلیل اینکه بدنه همیشه در تماس با زمین است یک جریان نشتی بین بدنه و زمین برقرار می شود. البته ممکن است که این جریان برای عملکرد رله اضافه جریان کافی نباشد. اما برای پرسنلی که با بدنه دستگاه در تماس هستد بسیار خطرناک است.

یک نوع خاص از رله دیفرانسیل به نام رله جریان نشتی زمین (Earth Leakage Relay) و یا رله تعادلی جریان (Current Balanced Relay) براحتی می تواند این قبیل خطاها را تشخیص دهد.

در حالتی که بدنه تجهیزات زمین نشده باشد رله نمی تواند به واسطه جریان نشتی زمین عمل کند ولی اگر بدنه تجهیزات اتصال زمین شده باشدبه محض اینکه شخصی که با زمین در تماس است بدنه تجهیز را لمس کند یک مسیر جریان توسط شخص به زمین به وجود می آید. با فرض اینکه دامنه جریان نشتی به اندازه کافی باشد

رله اضافه جریان عمل خواهد کرد. البته ناگفته نماند قبل از عمل نمودن رله یک شوک الکتریکی به شخص وارد می شود.

شکل ۱۶-۳ یک رله حفاظت جریان نشتی زمین برای بار تکفاز را نشان می دهد.



شکل ۱۶-۳ حفاظت جریان نشتی زمین برای بار تکفاز

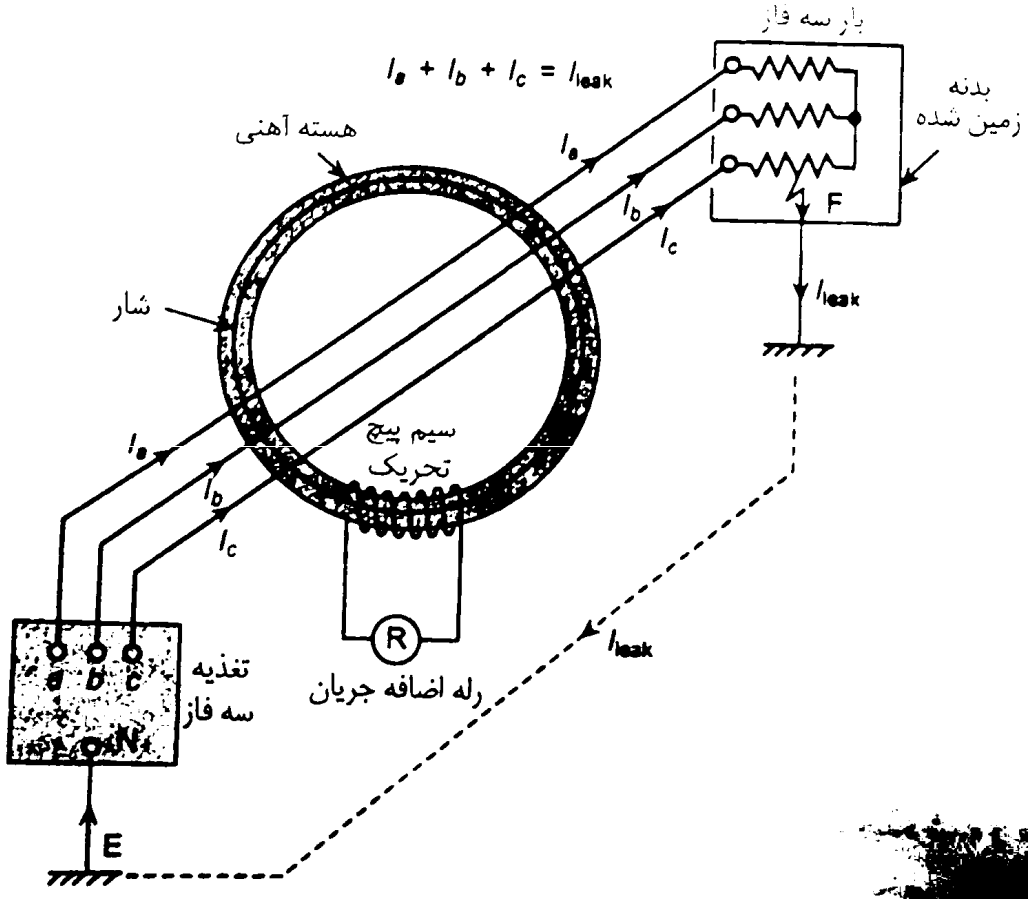
رله شامل یک هسته حلقوی شکل است که بر روی آن دو سیم پیچ یکنواخت B و A قرار گرفته است. هر کدام از این سیم پیچ ها دارای N دور هستند و بطور تقریبی نزدیک یک قرار گرفته اند.

سیم پیچ سوم یعنی C که سیم پیچ تحریک نام دارد، نیز به دور هسته حلقوی پیچیده شده و دو سر ان به رله اضافه جریان اتصال داده شده است (شکل ۱۶-۳). همانطور که در شکل مشخص است سیم های فاز و زمین به این سیم ها متصل شده است. بنابراین سیم پیچ های A و B به ترتیب حامل جریان های فاز و نول می باشند. در شرایط عادی سیستم، جریان جاری شده در سیم فاز (سیم پیچ A) دارای مقدار مساوی با جریان جاری شده در سیم زمین (سیم پیچ B) است. بنابراین هیچ نیروی محرکخ مغناطیسی خالص (mmf) در هسته حلقوی وجود ندارد و از اینرو شار در برگیرنده سیم پیچ تحریک نیز صفر است.در نتیجه هیچ ولتاژی روی سیم پیچ تحریک القا نمی شود و رله تحزیک نمی شود (عملکردی ندارد).

حال وضعیت اتصال زمین را که در شکل ۱۶-۳ نشان داده شده است در نظر می گیریم. در این حالت جریان جاری شدهدر سیم فاز بزرگتر از جریان جاری شده در سیم نول است و بخشی از این جریان توسط زمین هدایت می شود. نیروی محرکه mmf در هسته برابر با $[N(I_{ph}-I_n)]$ و یا $[N(I_{leak})]$ است. این نیرویمحرکه مغناطیسی باعث افزایش شار در هسته و القای ولتاژ در سیم پیچ تحریک می گردد و رله اضافه جریان متصل به سیم پیچ عمل نموده و مدار را قطع می کند.

۲-۷-۳-حفاظت جریان نشتی زمین برای بارهای سه فاز

شکل ۱۷-۳ حفاظت جریان نشتی زمین را برای یک بار سه فاز نشان می دهد. سیم های حامل جریان سه فاز از وسط هسته ترانس جریانی که بر روی آن یک سیم پیچ تحریک قرار دارد، عبور کرده و به بار سه فاز متصل شده اند. سیم پیچ تحریک و رله اضافه جریان نمی توانند سیستم را در برابر اتصال یک فاز به زمین محافظت نمایند.



شکل ۱۷-۳ حفاظت جریان نشتی زمین بارهای سه فاز

در طی وضعیت عادی و متعادل سیستم، مجموع فازورهای جریان سه فاز برابر با صفر است. در این حالت نیروی mmf خالص در هسته رله اضافه جریان وجود ندارد و در نتیجه رله تحریک نمی شود و بدون عملکرد به کار خود ادامه می دهد. ولی در طی وضعیت خطا در هسته، نیروی mmf خالص I_{leak} بر حسب آمپر دور به وجود می آید و بالطبع این نیرو باعش تولید شار می گردد. ولتاژ القا شده در سیم پیچ تحریک باعث تحریک رله و عملکرد آن به واسطه خطا می شود.

فصل چهارم: حفاظت ترانسفوماتور

۱-٤ انواع مختلف ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها در شکل ها و سایزهای مختلفی می باشند . از یک مبدل کوچک که می تواند در روی کف دست جا بگیرد تا ترانسفورماتورهای ولتاژ بالای قدرت که وزنی معادل چند تن دارند و جای زیادی نیز اشغال می کنند ساخته می شوند .

انواع گوناگون ترانسفورماتورهایی که در صنعت استفاده می شوند به شرح ذیل می باشند :

- ترانسفورماتور مولد
- ترانسفورماتور قدرت
- ترانسفورماتورهای توزیع
- ترانسفورماتور روشنایی با پلاریته ثابت
- ترانسفورماتور زمین
- ترانسفورماتور تنظیم کننده
- ترانسفورماتورهای جوشکاری
- ترانسفورماتورهای مبدل
- ترانسفورماتورهای اندازه گیری

بعضی از ترانسفورماتورهای بالا می توانند ترانسفورماتورهای اتو ترانسفورماتور باشند. به هر ترتیب در اینجا خود را به ترانس های قدرت و توزیع محدود می کنیم .

یک ترانسفورماتور متناسب با نسبت ولتاژ، ظرفیت و توان تولیدی و اهمیت و حساسیت کاربردش محافظت می شود .

به عنوان مثال ، حفاظت در مقابل اضافه جریان توسط فیوزها ، تنها یک نوع از حفاظت می باشد که ترانسهای توزیع با مشخصات 11KV/440V با قدرت کمتر از 100KVA را حفاظت می کند. از طرف دیگر یک ترانسفورماتور 250MVA و 15KV/400KV در یک نیروگاه بخاری با یک طرح بسیار مطمئن حفاظت می شود . این طرح ممکن است یک حفاظت دیفرانسیل درصدی (با نگهدارنده هارمونیک) و حفاظت در برابر خطاهای ابتدایی و حفاظت اضافه شار برای حفاظت اولیه باشد . در این طرح می توان یک رله اضافه جریان برای حفاظت ثانویه (پشتیبان) استفاده کرد. از آنجا که ترمینال های یک ترانسفورماتور بطور فیزیکی بهم بسته می شوند ، استفاده از رله دیفرانسیل یک انتخاب ایده آل می باشد .

۲-٤ دیاگرام فازوری ترانس های سه فاز :

در کل چهار نوع اتصال برای ترانسفورماتورهای سه فاز : به نام های ستاره–ستاره ، ستاره–مثلث ، مثلث–ستاره و مثلث–مثلث وجود دارد.

در ترانسفورماتورهای ستاره–مثلث و مثلث–ستاره ، یک اختلاف فاز حتمی بین ولتاژ و جریان در طرف اولیه و ثانویه ی ترانسفورماتور ایجاد خواهد شد . این اختلاف فاز باید حتما در موقع بکارگیری حفاظت تفاضلی درنظر گرفته شود .

هنگام اتصال ترانسفورماتور اندازه گیری (ترانسفورماتور جریان) در طرف سیم پیچ ثانویه ما می توانیم اتصال را به نحوی انتخاب کنیم که این اختلاف فاز را خنثی کند .

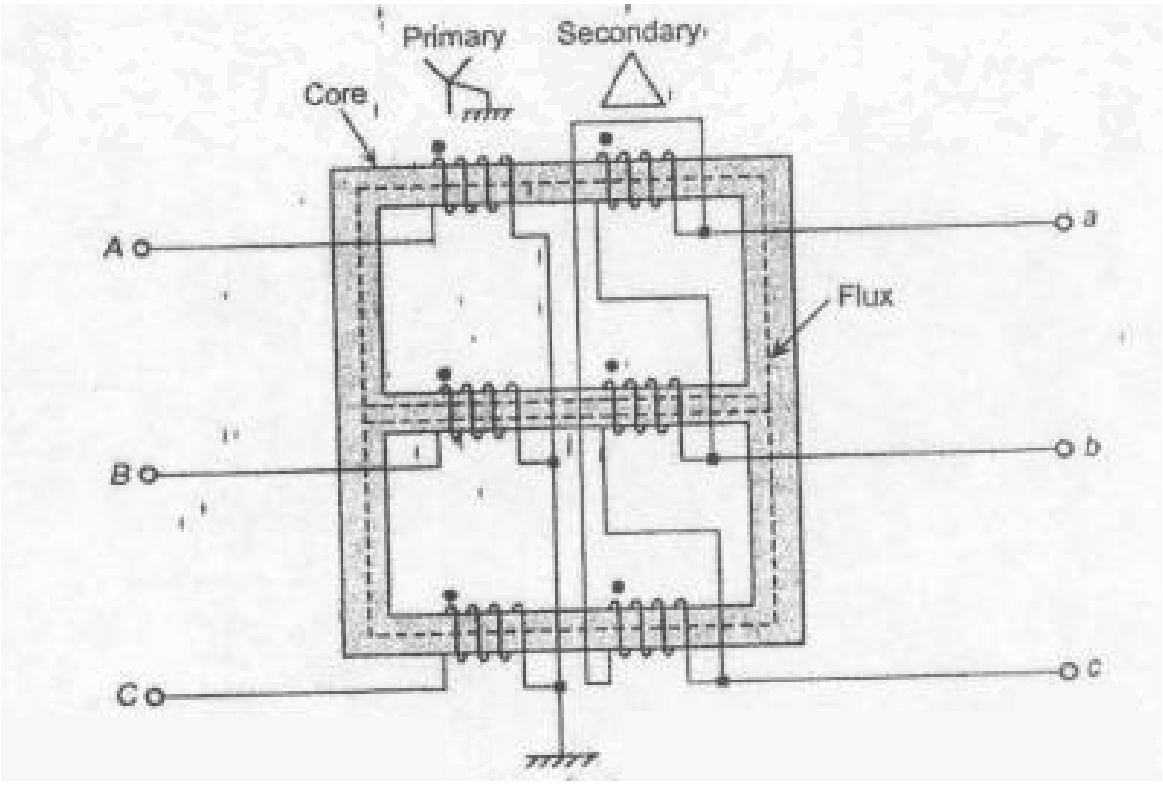
بعلاوه، به خاطر نسبت انتقال ترانس قدرت بین طرف اولیه و ثانویه ، جریان اولیه برای ترانسفورماتورهای جریان روی دو طرف متفاوت خواهد بود . بنابراین ترانسفورماتورهای جریان باید چنان نسبت انتقالی داشته باشند که جریانی که بوسیله ی کابل کمکی رله و از ترانسفورماتورهای جریان روی دو سر رله می آید، مساوی باشد .

بنابراین نسبت انتقال روی ترانسفورماتورهای جریانی که در طرف های اولیه و ثانویه ی ترانسفورماتور تحت حفاظت قرار دارند در حالت عادی متفاوت می شود .

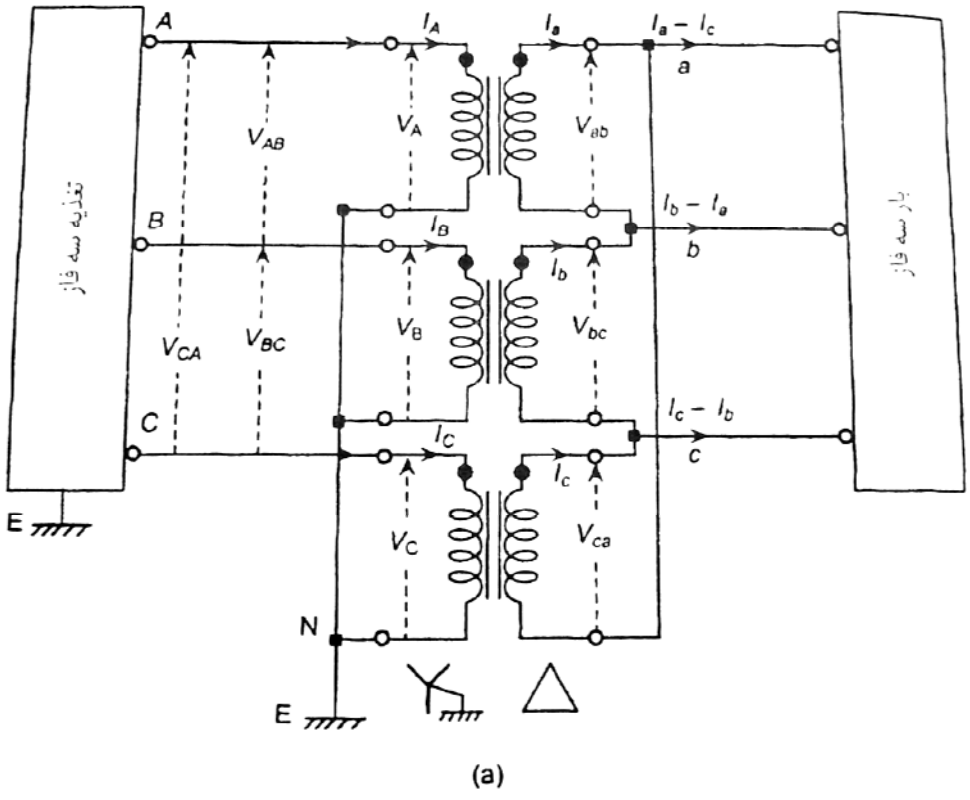
این حالت تضمین خواهد کرد که در طول بارداری نرمال و همچنین در طول شرایط خطای خارجی ، سیستم دیفرانسیل پایدار باقی بماند .

شکل ۱-٤ یک ترانسفورمر سه فاز را نشان می دهد . به نظر می رسد که سیم پیچی طرف ستاره جریان های خط I_A و I_B و I_C را حمل می کند، در صورتیکه سیم پیچی طرف دلتا جریان های فازی را حمل می کند که مقادیر به صورت زیر است :

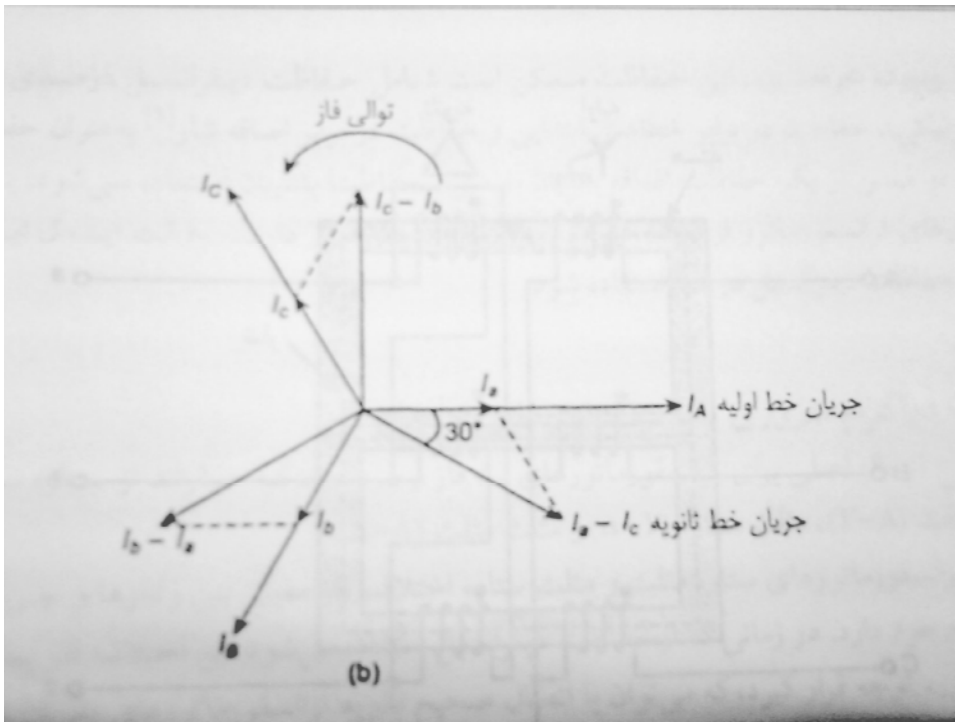
$$|I_a| = |I_a - I_c| / \sqrt{3}$$
$$|I_b| = |I_b - I_a| / \sqrt{3}$$
$$|I_c| = |I_c - I_b| / \sqrt{3}$$



شکل ۱-٤ اتصال ترانسفورماتور سه فاز



شکل ۲-٤ a) طرح شماتیک ترانسفورماتور ستاره-مثلث



شکل ۲-۴ b) دیاگرام فازوری با اختلاف فاز ۳۰ درجه بین جریان های خط در دو سمت یک ترانسفورماتور ستاره-مثلث

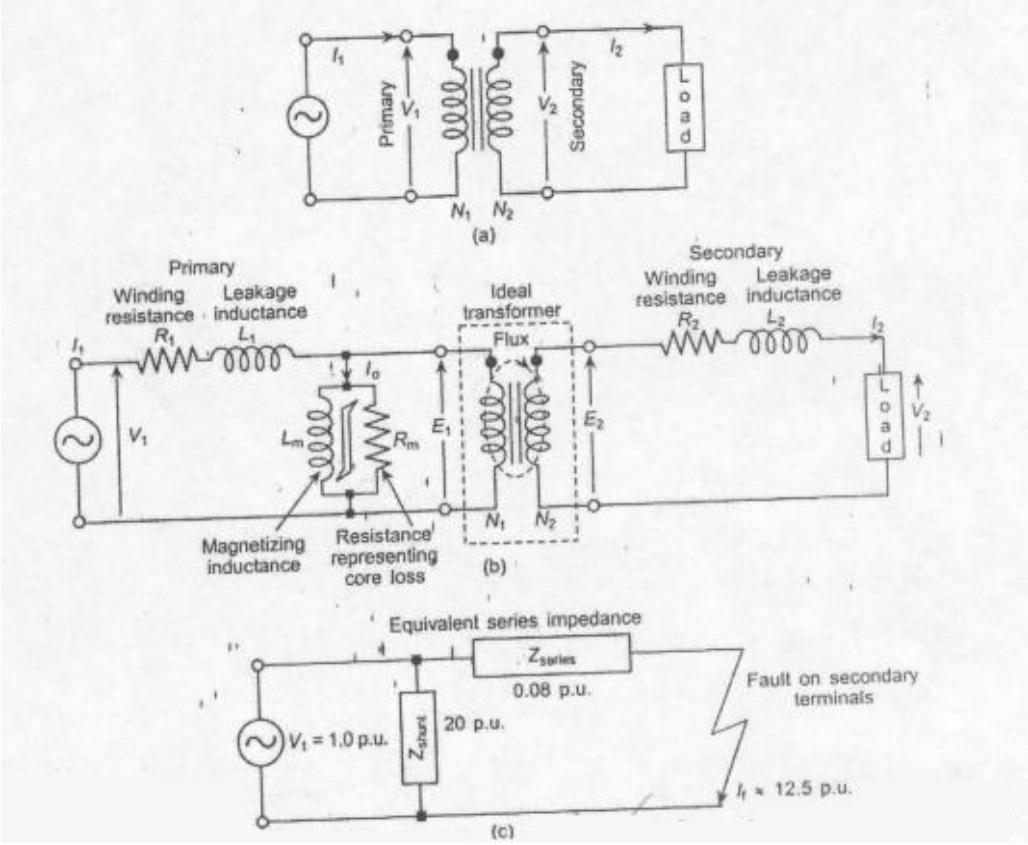
همان طوری که در دیاگرام فازوری شکل ۲-٤ نشان داده شده است ، هر یک از جریان های خط روی سمت مثلث برابر جمع فازوری دو جریان فازی دیگر می باشد . بنابراین تغییر فازی 30^{o} بین جریان خط در دو طرف ترانس با اتصال ستاره – مثلث وجود خواهد داشت .

شکل ۲-٤ طرح شماتیکی از ارتباطات بین تمام ولتاژها و جریان های یک ترانس را می دهد. از آن جایی که در طرح حفاظت تفاضلی تنها به مطالعه ی جریان روی دو سمت ترانس علاقه مند هستیم ، تنها نمایش فازوری جریان نشان داده شده است . تغییر فاز 30^{o} بین جریانهای خط در دو طرف ترانسفورماتور ستاره-مثلث قابل ملاحظه است .

۳-٤ مدار معادل ترانس

شکل (الف)۳-٤ یک مدل شماتیک از ترانس تکفاز را نشان می دهد . مدار مذکور می تواند به شکل (ب)۳-٤ نیز خلاصه شود . در این طرح یک شاخه ی موازی دیده می شود، که معادل مغناطیس شوندگی و تلفات هسته در ترانس است و در مقایسه با شاخه ی سری، که معادل مقاومت سیم پیچ و شار نشتی سیم پیچ ها می باشد ، دارای امپدانس بزرگتری است .

بنابراین در مورد رخ داد اتصال کوتاه ، این شاخه ی سری است که تعیین کننده ی جریان اتصال کوتاه می باشد . همان طوری که در شکل (ج)۳-٤ نشان داده شده است ، اگر امپدانس سری (p.u.) ۸٪ در مقیاس واحد باشد ، پس جریان خطای اتصال کوتاه روی ترمینال ثانویه $(1/0.08) = 12.5$ (p.u.) خواهد بود .



شکل ۳-٤ ترانسفورماتور تک فاز (الف)دیاگرام شماتیک (ب)مدار معادل (ج) مدل برای پیدا کردن اتصال کوتاه

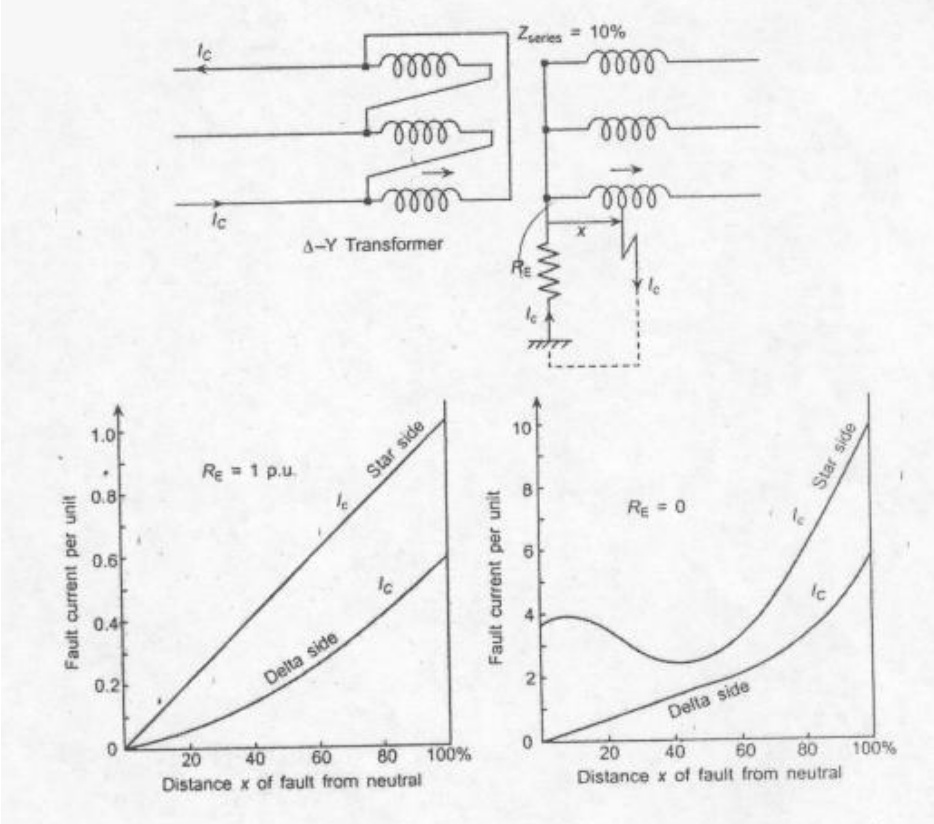
٤-٤ انواع خطا در ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها در معرض انواعی از خطاها قرار دارند . رایج ترین آنها، حالتی است که خطا از سیم پیچ ها به داخل هسته به علت ضعف عایقی وارد می شود . خطای فاز در داخل ترانس به ندرت اتفاق می افتد . بهرحال ممکن است چنین خطایی خارج ترانس و روی ترمینال ترانسفورماتور اتفاق بیفتد که همچنان در منطقه حفاظتی ترانسفورماتور واقع شده است.

تفاوت جریان خطا با توجه به محل رخداد خطا در داخل ترانسفورماتور به مواردی از جمله : اتصال ترانس، روش زمین کردن نقطه خنثی در ترانس و این که جریان خطا به طرف اولیه یا ثانویه ترانس مربوط می باشد بستگی دارد .

خوانندگان علاقمند می توانند به کتاب (حفاظت سیستم های قدرت) منتشر شده توسط سازمان مهندسان برق انگلیس مراجعه کنند .

شکل ٤-٤ انواع گوناگون جریان خطا (با درنظر گرفتن موقعیت خطا در خطای سیم پیچ (فاز) به زمین که بوسیله یک مقاومت زمین شده) در طرف اولیه و ثانویه ی یک ترانسفورماتور مثلث–ستاره را نشان می دهد .



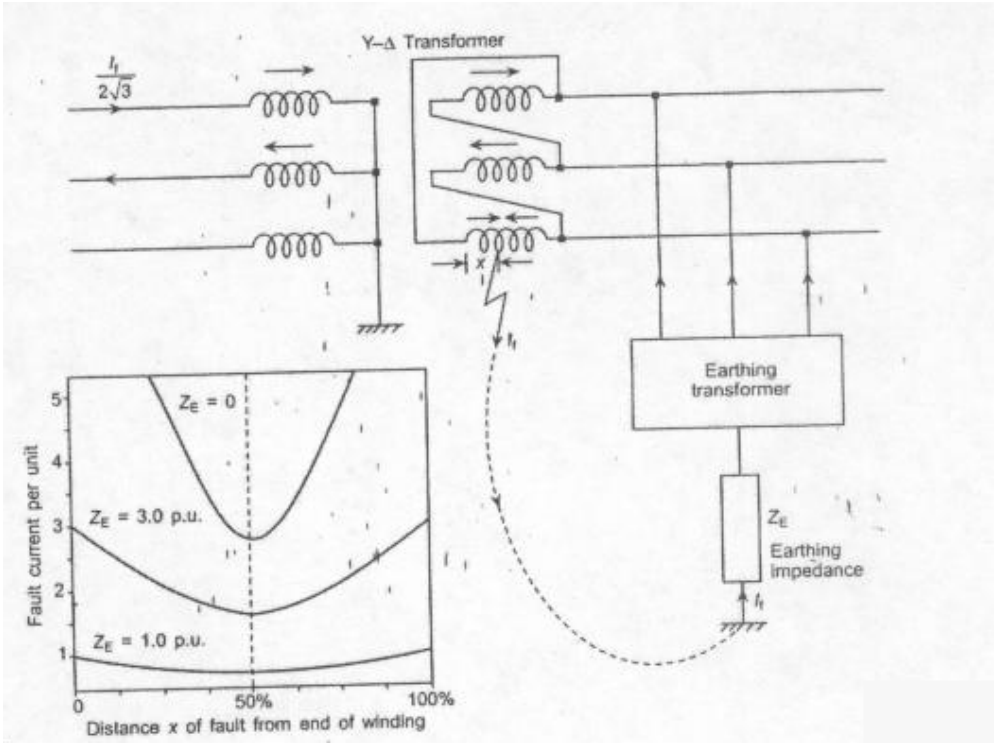
شکل ٤-٤ تعیین جریان خطا در محل برای ترانسفورماتور دلتا – ستاره

همانطور که در شکل ٤-٤ پیداست برای سیم پیچ با اتصال ستاره بهمراه یک مقاومت زمین شده، جریان خطای یک سیم پیچ به زمین بستگی به مقدار مقاومت زمین شده و فاصله خطا از انتهای نیوترال (نقطه صفر) سیم پیچ دارد . نسبت تبدیل موثر بین سیم پیچ اولیه و قسمت اتصال کوتاه شده سیم پیچ ثانویه با مکان خطا تغییر می کند . جریان عبوری از ترمینال ترانسفورماتور برای مقاصد عملی متناسب با مجذور درصد سیم پیچ اتصال کوتاه شده می باشد .

برای یک سیم پیچ ستاره زمین شده سخت (محکم) جریان خطا به فاصله خطا از انتهای نیوترال ربطی ندارد چونکه راکتانس مسیر خطا با جای خطا تغییر می کند .

همانطوریکه در شکل ٤-٤ نشان داده می شود مقدار مینیمم جریان خطا زمانی رخ می دهد که فاصله انتهای سیم پیچ از انتهای نیوترال ۳۰ یا ٤۰ درصد است.

برای سیم پیچ با اتصال مثلث ولتاژ مینیمم روی سیم پیچ مثلث در مرکز یک فاز و ۵۰ درصد از ولتاژ نرمال فاز به زمین می باشد . مقدار جریان خطا در این سیم پیچ کمتر از سیم پیچ با اتصال ستاره است . مقدار جریان خطا به چیدمان سیستم زمین بستگی دارد. منحنی شکل ٥-٤ مقدار مینیمم جریان خطا را که در مرکز یک فاز سیم پیچ رخ می دهد نشان می دهد .



شکل ٥-٤ تعبیر جریان خطا با محل برای یک ترانسفورماتور ستاره – مثلث

ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع معمولا از نوع تپ زیربار (OLTC) می باشد . که این خود عاملی برای ایجاد خطا می باشد . اکثر ترانسفورماتورها از نوع غوطه ور در روغن می باشند که به علت تراوش روغن احتمال کم شدن روغن در این ترانسفورماتورها زیاد است که در این حالت می بایست سیگنال مربوط به کاهش روغن روشن شده و ترانسفورماتور باید از مدار خارج شود .

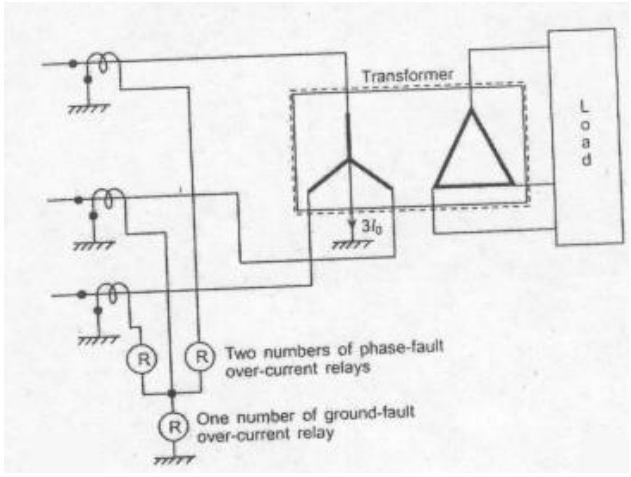
یک خصوصیت عجیب ترانسفورماتورها این است در حالت بی باری وقتی تحت سو ئیچینگ قرار بگیرند، مورد حمله ی جریان هجومی بسیار زیادی قرار می گیرند که این عامل یک عامل غیرعادی و یا عامل ایجاد خطا برای ترانسفورماتور نمی باشد . در هنگام طراحی حفاظت برای ترانسفورماتورها می بایست توجه خاصی را به جریان های هجومی لحظه ای داشته باشیم. ترانسفورماتورها ممکن است به علت خطای دور سیم پیچ ها در داخل سیم پیچ تولید گرما نماید . البته این خطا عاملی جهت ایجاد جریان زیاد نخواهد بود. بنابراین خطای

داخلی دور، از نظر الکتریکی بسیار مشکل شناسایی می شوند و بهتر است که حفاظت مربوط به این خطاها الکتریکی نباشد (معمولا توسط روش های غیرالکتریکی این خطاها را پیدا می کنند).

ترانسفورماتورها ممکن است از اضافه شار و یا عبارت دیگر اضافه تحریک به علت زیر فرکانس کارکردن در ولتاژ نامی نیز آسیب ببینند ، شار زیاد همچنین ممکن است به علت ولتاژ بالا و فرکانس نامی نیز رخ دهد. از آنجایی که اکثر ترانسفورماتورها معمولا در محدوده طراحی شده خود کار می کنند شارهای زیاد عامل خطرناک می باشد و نیازمند حفاظت فوری می باشند . تمامی این خطاها و شرایط عملکرد در بخش های بعدی به ترتیب مورد بررسی قرار می گیرند .

٤-٥ حفاظت جریان زیاد

شکل ٦-٤ نشان دهنده دو رله ی اضافه جریان فازی و رله ی اضافه جریان خطای زمین است که برای حفاظت جریان زیاد در ترانسفورماتور ستاره–مثلث تعیین شده است . این طرح می تواند جهت حفاظت اولیه برای ترانسفورماتورهای کوچک و حفاظت پشتیبان جهت ترانسفورماتورهای بزرگ مورد استفاده قرار گیرد .



شکل ٦-٤ حفاظت اضافه جریان برای ترانسفورماتور

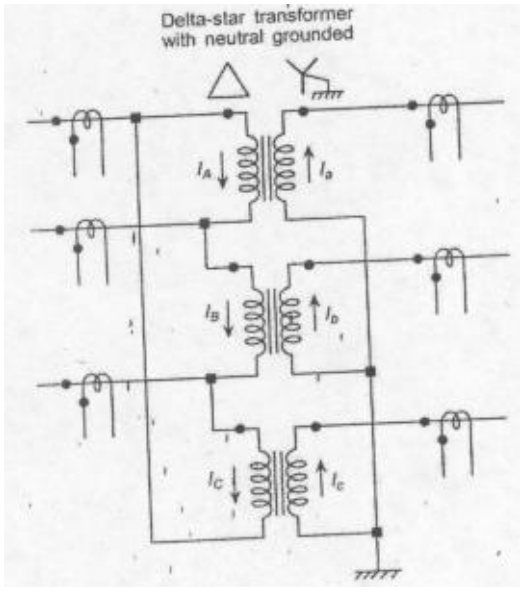
مقدار پیک آپ جریان رله ی خطای فاز طوری تنظیم می شود که برای ماکزیمم اضافه بار مجاز عملکرد نداشته باشد اما حساسیت کافی عملکرد برای کوچکترین خطاهای فازی را داشته باشد. از طرفی مقدار پیک آپ برای رله خطای زمین، به بار ترانسفورماتور بستگی ندارد. در شرایط بار نامی جریان عبوری از رله ی خطای فاز خیلی کوچک است. جریان نیوترال در اثر بالانس نبودن بار می باشد. جالب است که توجه کنید که جریان

هارمونیک سوم که معمولا به علت انحراف و اختلال توسط بارهای الکترونیکی به وجود می آید معمولا به جریان متوالی صفر میل می کند و از مسیر سطح خنثی عبور می کند .

٦-٤ رله دیفرانسیل درصدی ترانسفورماتورها

برقراری ارتباطات

شکل ٧-٤ نشان دهنده ترانسفورماتور مثلث-ستاره می باشد. ضریب انتقال 1:1 را فرض نمایید و توجه کنید نقطه ستاره زمین شده است .



شکل ٧-٤ اتصال ترانسفورماتور جریان برای حفاظت دیفرانسیل جهت ترانسفورماتور سه فاز

جهت برقراری اتصال ترانسفورماتور جریان مراحل زیر را به ترتیب به کار می گیریم :

١) تعیین جهت جریان های لحظه ای I_a و I_b و I_c از میان سیم پیچ دوم (شکل ٧-٤)

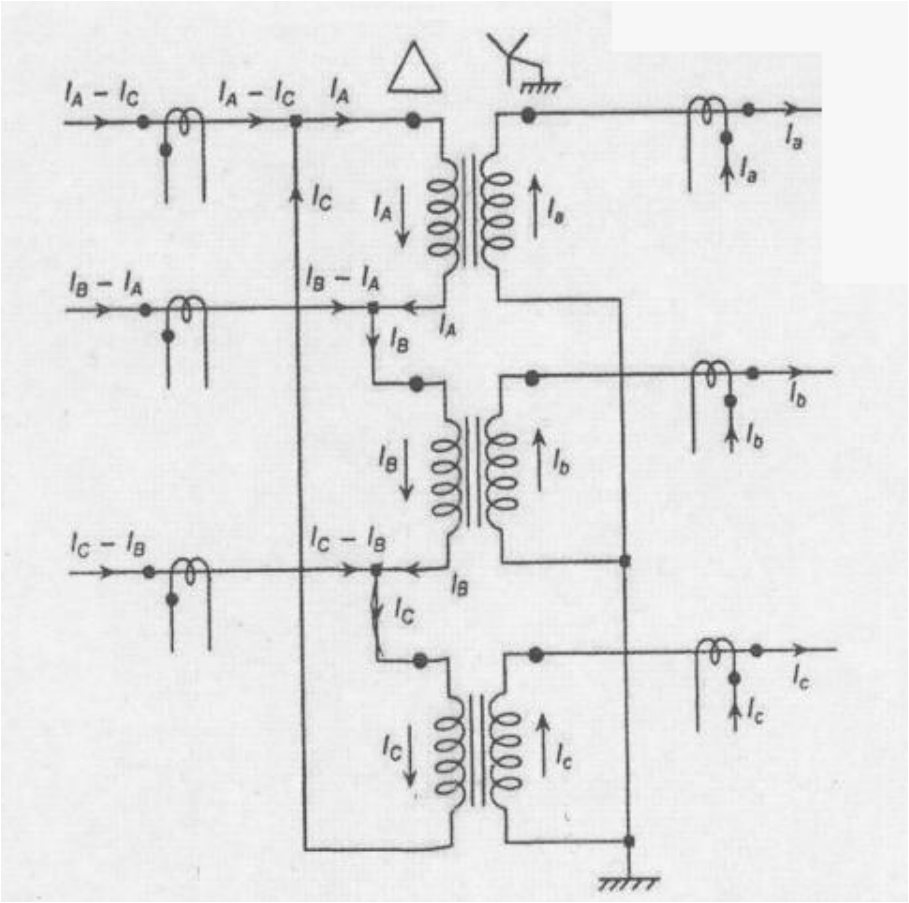
٢) جریان های سیم پیچ اولیه I_A و I_B و I_C تعیین می گردند .

توجه کنید به علت نسبت تبدیل 1:1 ، $I_a=I_A$ ، $I_B=I_b$ ، $I_C=I_c$ می باشند (شکل ٨-٤)

٣) تعیین جریان خط : که در سمت ستاره در واقع همان جریان فازی می باشد.

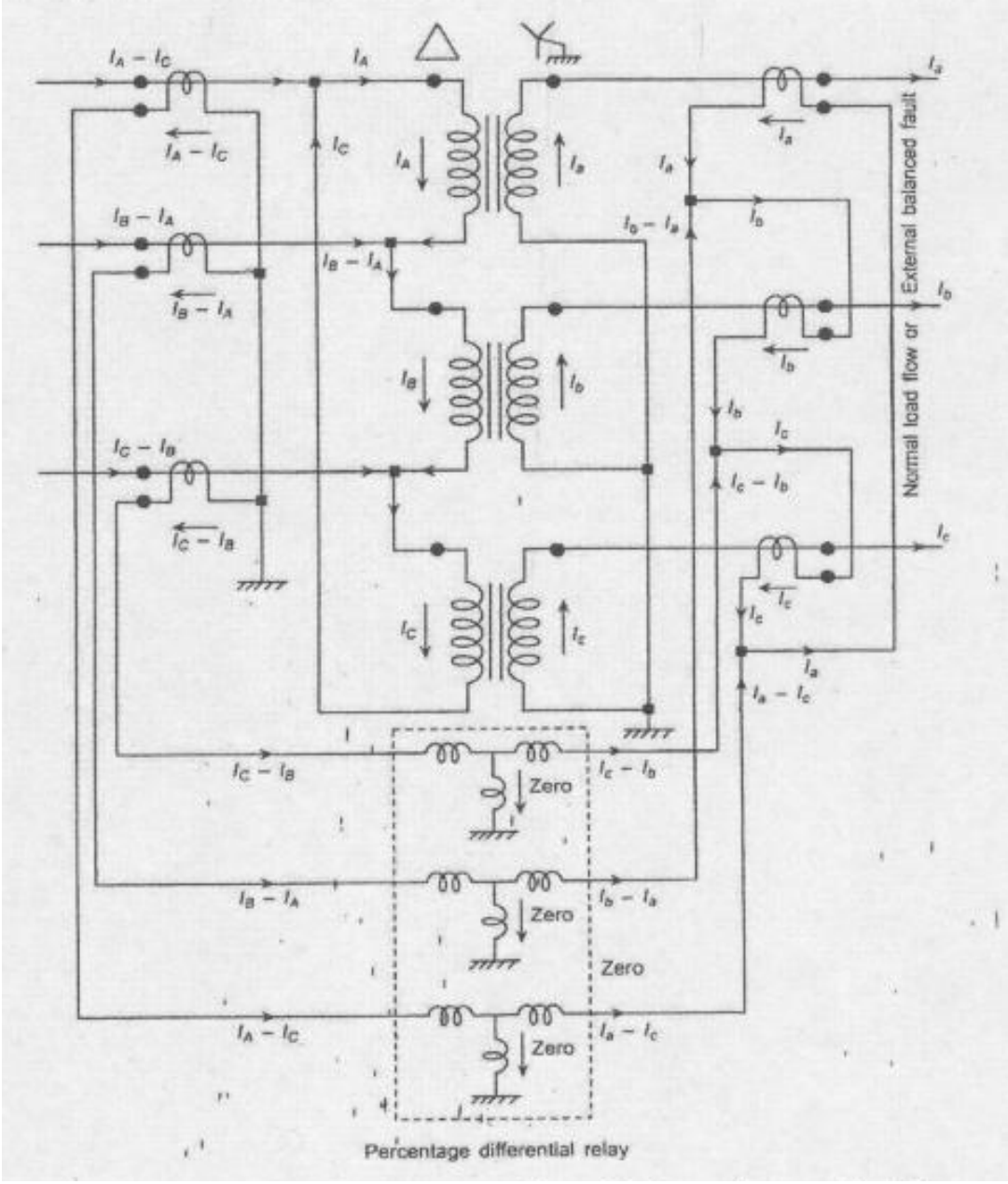
٤) جریان خط در سمت مثلث تعیین شده همانطور که در شکل ۸-٤ مشخص شده به صورت (I_B-I_C) و (I_A-I_B) و (I_C-I_A) می باشد .

توجه : (I_C-I_A) و غیره بیانگر اختلاف فازوری است .



شکل ۸-٤ تعیین جریان خط در دو طرف ترانسفورماتور

٥) بنابراین اگر ثانویه ترانسفورماتور جریان را در هر دو سمت به صورت ستاره ببندیم، جریانها متناسب نخواهند بود و جریان سرریز وجود خواهد داشت. اگر ثانویه ترانسفورماتور جریان در سمت ستاره را به صورت مثلث ببندیم، در نتیجه جریان خط کاملا متناسب با جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان در طرف مثلث در صورتیکه که همگی به صورت ستاره بسته شده باشند، خواهد بود . این مسئله در شکل ۹-٤ نشان داده شده است .

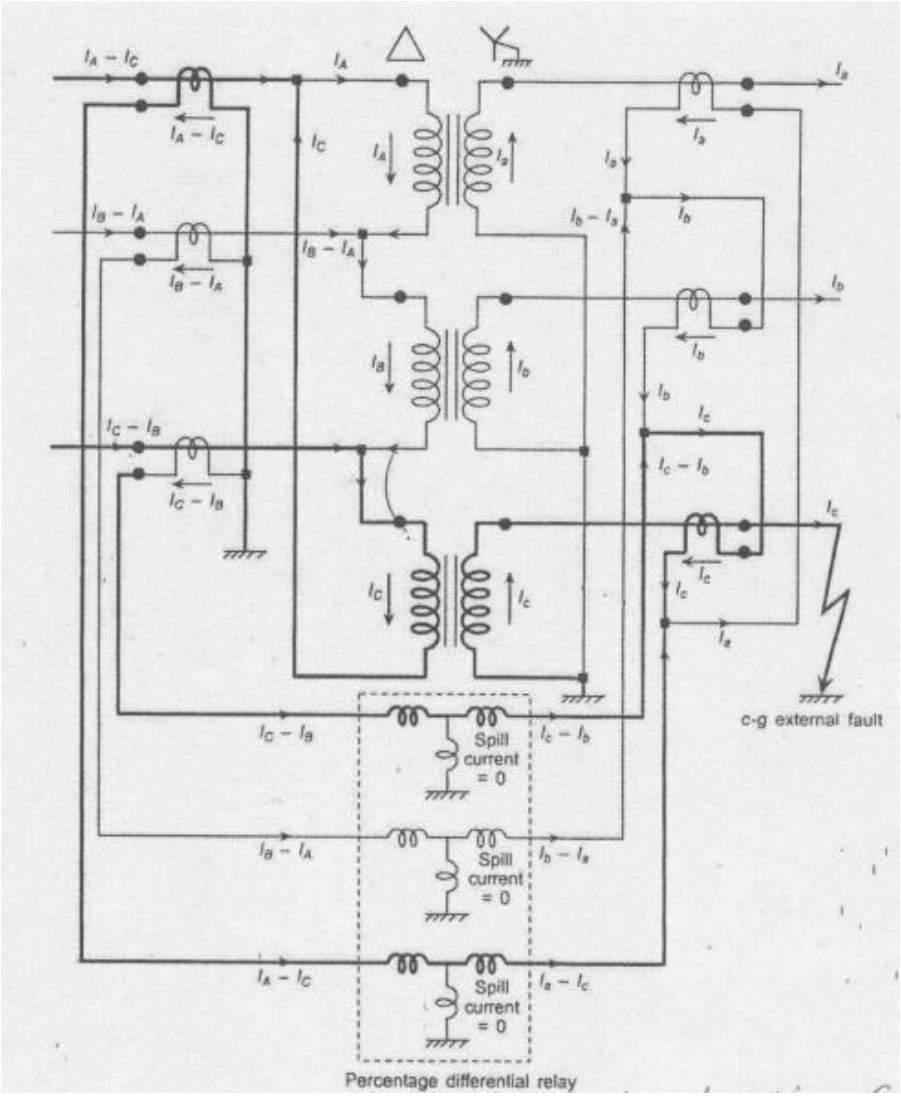


شکل ۹-٤ اتصال رله دیفرانسیل درصدی زیربار نرمال و خطای خارجی بالانس

۲-٦-٤ خطای خارجی فاز C به زمین

خطای فاز C به زمین (c-g) در شکل (۱۰-٤) به عنوان یک خطای خارجی درنظر گرفته شده است. می توان دید که که بخاطر خطا در فاز C اضافه جریان وجود دارد. این جریان در دو خط در طرف دلتا عبور می کند . در نتیجه برای خطای خارجی C به زمین پایدار باقی می ماند .

مشابها جریان خط در ثانویه ی ترانسفورماتور جریان با اتصال مثلث در طرف ستاره توسط دو عدد سیم کمکی حمل می شود و باعث چرخش جریان در دو دستگاه رله دیفرانسیل شده و جریان Spill (سرریز) صفر می باشد .

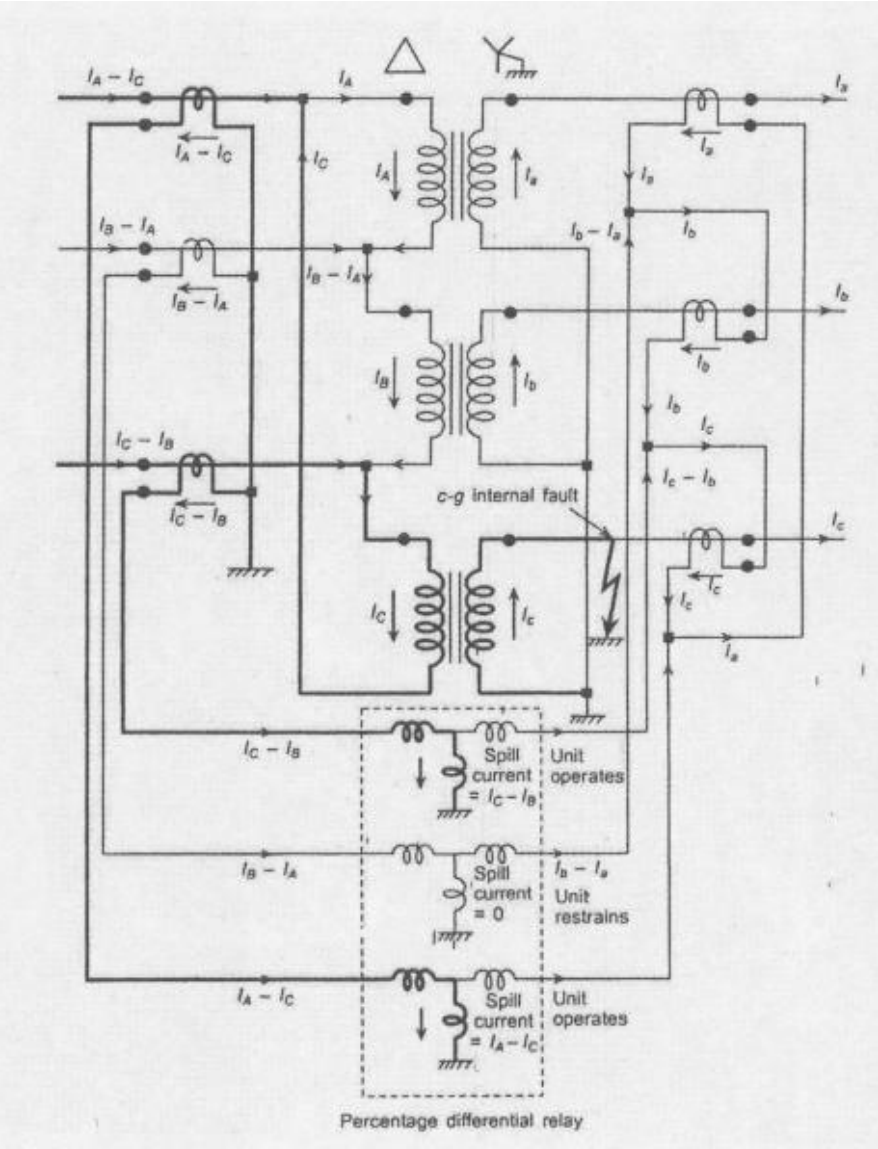


۱۰-٤ خطای خارجی فاز C به زمین (c-g)

۳-٦-٤ خطای داخلی فاز C به زمین

خطای داخلی C به زمین در شکل ۱۱-٤ نشان داده شده است ، جریان خطا در سمت مثلث دقیقا مانند حالت خطای خارجی C به زمین می باشد . بهرحال به علت اینکه خطا داخلی می باشد جریان خطایی در اولیه ترانسفورماتور جریان و در قسمت ستاره ترانس وجود ندارد . مسیر عبور جریان خطا با خطوط پررنگ نشان داده شده است .

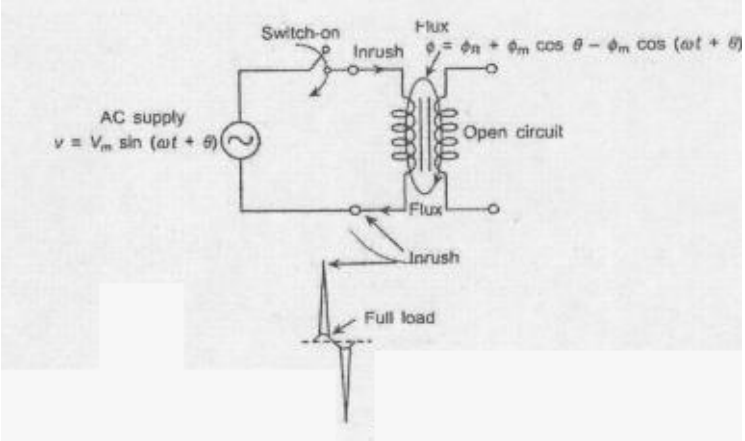
مطابق شکل می توان دید که جریان خطا در مسیر Spill (سرریز) در هر دو دستگاه دیفرانسیل درصدی عبور کرده و باعث عملکرد می شود و ترانسفورماتور را از مدار خارج می کند .



شکل ۱۱-٤ خطای داخلی یک فاز به زمین (c-g)

٤-۷ پدیده جریان هجومی

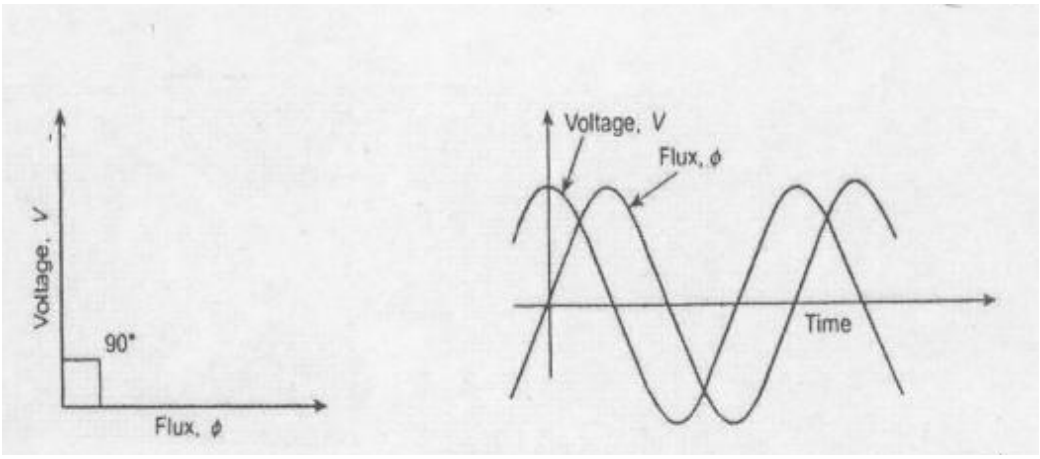
شکل ۱۲-٤ نشان دهنده ترانس بی باری می باشد که به منبع تغذیه AC متصل می گردد .



شکل ۱۲-٤ پدیده جریان هجومی : سوئیچ زدن یک ترانسفورماتور بدون بار

اگر شار درون ترانس را به صورت $\Phi = \Phi m * \sin(\omega t)$ بنویسیم در نتیجه ولتاژ القایی می توان به صورت $V = N * d\Phi / dt = N * \Phi m * \omega * \sin(\omega t + 90)$ نوشت .

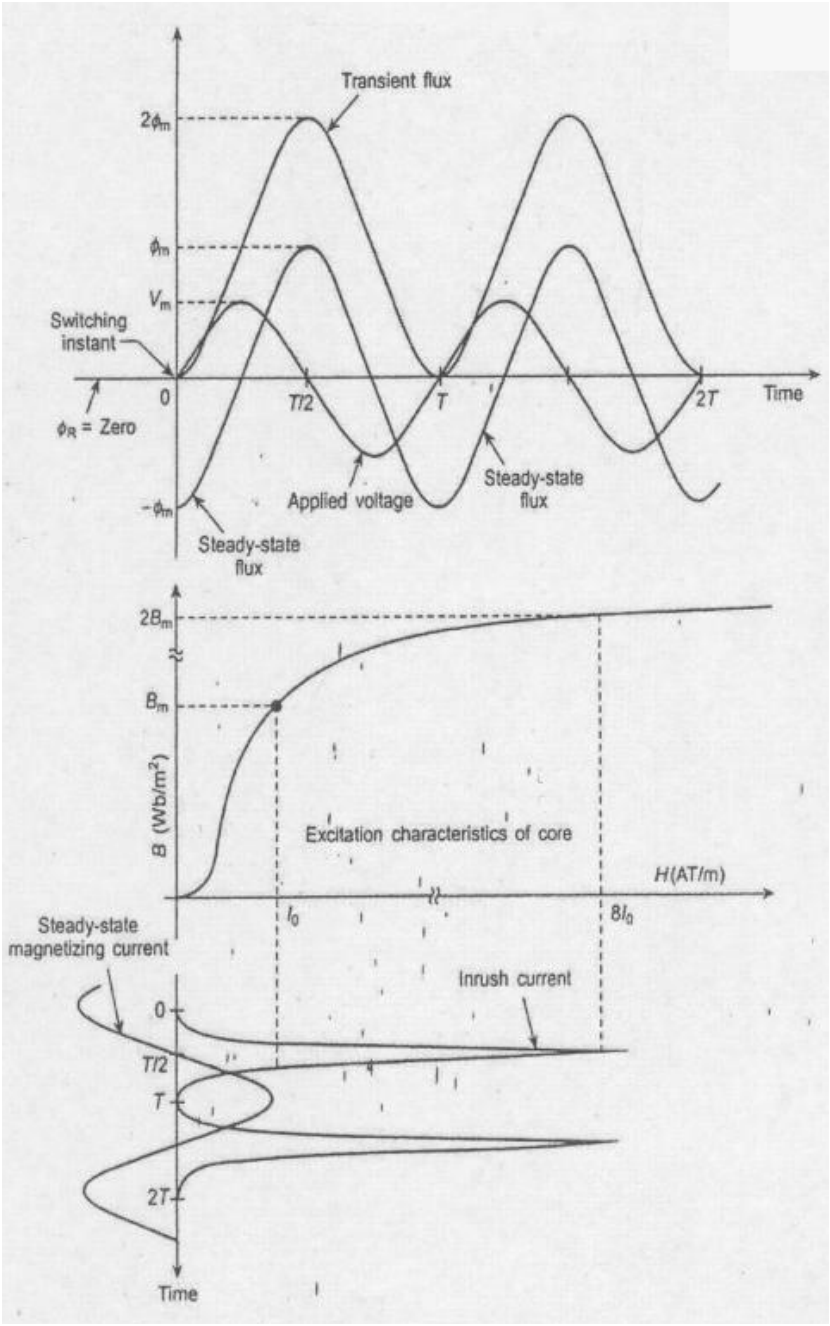
همانطور که در شکل ۱۳-٤ نشان داده شده است این ولتاژ اعمال شده کاملا برابر ولتاژ القایی بوده، بنابراین شار درون ترانسفورماتور نسبت به این ولتاژ اعمالی ۹۰ درجه پس فاز و در حالت پایدار (مانا) می باشد .



شکل ۱۳-٤ شار نسبت ولتاژ اعمال شده 90^{o} پس فاز است

همانطور که در شکل ۱۳-٤ نشان داده شده است هنگامی که ولتاژ از نقطه صفر عبور کرده و مثبت می شود شار باید در ماکزیمم منفی خود بوده و در حال زیاد شدن باشد .

مطابق شکل ۱٤-٤ در زمانی برابر نصف سیکل (T/2) شار از $-\Phi_M$ به $+\Phi_m$ می رسد پس تغییرات شار در T/2 ثانیه برابر $2\Phi_m$ می باشد . توجه شود که شکل ۱٤-٤ حالت مانا را نشان می دهد .



شکل ١٤-٤ پدیده هجومی

همانطور که در شکل ١٤-٤ نشان داده شده است فرض کنید ترانس در زمانی که شکل موج ولتاژ مثبت بوده و در حال عبور از صفر می باشد سوئیچ زده شود و همچنین فرض کنید که شار پسماند صفر باشد درنتیجه مقدار اولیه شار صفر است، ولی بعد از آن تغییرات شار باید مانند شکل موج خود در حالت مانا باشد بنابراین شار باید به حداکثر مقدار خود $+2\Phi_m$ در نصف سیکل برسد . و از آنجایی که ترانس های قدرت در نزدیکی نقطه

اشباع خود کار می کنند شار به اندازه $2\Phi_m$ باعث می شود که هسته ترانس به اشباع برود و باعث کشیدن یک جریان مغناطیس کنندگی بسیار بزرگ با شکل موج پیک های غیرسینوسی می شود .

این جریان مغناطیس کنندگی در حدود ۸ تا ۳۰ برابر جریان نامی می باشد که به نام جریان هجومی شناخته می شود . زمان این جریان گذرا می تواند در بدترین شرایط چند ثانیه باشد .

این پدیده هجومی از لحاظ ریاضی اینگونه بیان می شود :

اگر ولتاژ به صورت $V = V_m \sin(\omega t + \theta)$ باشد و θ زمان کلیدزنی را کنترل می کند .

Φ(مقدار شار لحظه ای) که می توان نوشت :

$$V = N * d\Phi / dt \;\Rightarrow\; N * d\Phi / dt = Vm\sin(\omega t + \theta) \;\Rightarrow\; d\Phi = (Vm / N)\sin(\omega t + \theta)dt \;\Rightarrow$$

$$\Phi = (Vm / N)\int \sin(\omega t + \theta)dt = -(Nm / N * \omega) * \cos(\omega t + \theta) + k$$

K مقدار ثابت انتگرالگیری می باشد. مقدار K می تواند از مقادیر اولیه پیدا شود یعنی زمانی که t=0 و شار پسماند $\Phi = \Phi_R$ است:

با جایگذاری این شرایط اولیه در معادله 4.4 داریم :

$$\Phi_R = -(\frac{V_m}{N_\omega})\cos\theta + K$$

که K را داریم:

$$K = \Phi_R + (\frac{V_m}{N\omega})\cos\theta$$

پس مقدار شار در ترانسفورماتور در لحظه اولیه درست بعد از کلیدزنی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\Phi = \Phi_R + (\frac{V_m}{N\omega})\cos\theta - (\frac{V_m}{N\omega})\cos(\omega t + \theta) \qquad (4.6)$$

می توان $Vm / N * \omega$ را به عنوان شار ماکزیمم Φ_m بنویسیم :

$$\Phi = \Phi_R + \Phi_m \cos\theta - \Phi_m \cos(\omega t + \theta)$$

پس شار درون ترانسفورماتور تابعی از سه فاکتور زیر می باشد :

۱- شار پسماند Φ_R

۲- زمان کلید زنی θ

۳- مشخصات مغناطیسی هسته (مقدار جریان مغناطیس کنندگی لازم برای تولید مقداری از شار)

بنابراین مشاهده می شود برای $\Phi_R = +\Phi_m, \theta = 0$ شار بدست آمده برابر $3\Phi m$ در $\omega t = \Pi$ رادیان می باشد .برای ایجاد شاری برابر $3\Phi_m$ اولیه ترانسفورماتور جریان مغناطیس کنندگی زیادی با شکل موج پیک های غیرسینوسی می کشد.

پدیده هجومی همچنین زمانی که تغییر ناگهانی در ولتاژ سیستم به وقوع می پیوندد اتفاق می افتد مانند برگشت ناگهانی ولتاژ در هنگام پاک کردن خطا.

زمانی که پدیده هجومی در یک ترانس بدون بار در هنگام کلیدزنی اتفاق می افتد باعث می شود پدیده هجومی کمتری در ترانس مجاور که در حال کار می باشد اتفاق می افتد که به این پدیده هجومی موافق Sympathetic می گویند .

از آنجائیکه این جریان زیاد در طرف اولیه ترانسفورماتور (طرفی که به منبع تغذیه وصل شده) پدید می آید مثل خطای داخلی دیده می شود و باعث عبور جریان در رله دیفرانسیل می گردد .

همانطوریکه در قسمت ٤-۳ می توان دید اتصال کوتاه در ترمینال ترانسفورماتور باعث عبور جریان با این مقدار می شود . بنابراین رله دیفراسیل درصدی می تواند عملکرد اشتباه در برابر جریان هجومی داشته باشد.

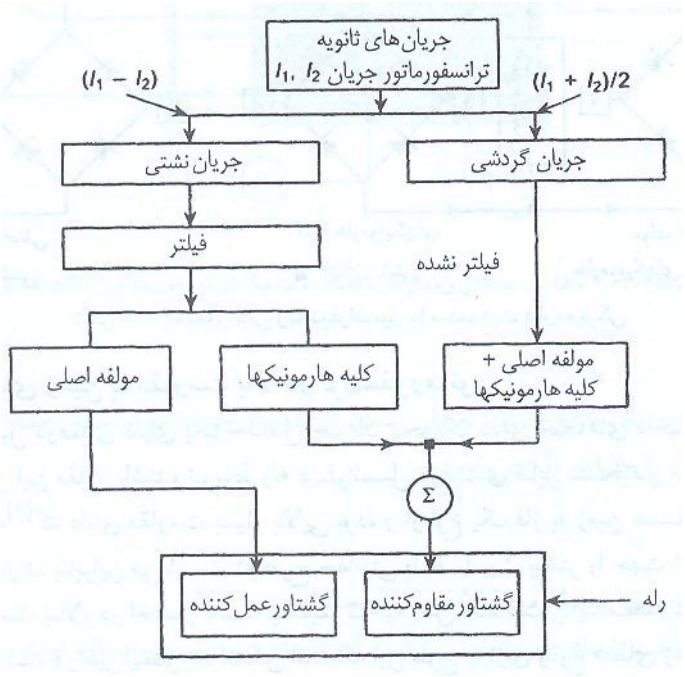
4.7.1 رله دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیکی

دیده شد که طرح دیفرانسیل درصدی در برابر جریان هجومی عملکرد نادرست خواهد داشت . یکی از راههای مقابله با این مسئله از بین بردن حساسیت رله برای زمان کوتاهی درست بعد از سوئیچ زدن است. بهرحال این راه مناسب و درست نیست و ممکن است که بعد از سوئیچ زدن گرمای داخل سیم پیچ باعث از بین رفتن عایق سیم پیچ شود و اتصال کوتاه رخ دهد که رله نمی تواند این را حس کند و خطا باعث مشکلات فراوانی می شود .

فرکانس	دامنه
اصلی (اساسی)	٪۱۰۰
DC	۴۰-٪۶۰
هارمونیک دوم	۳۰-٪۷۰
هارمونیکم سوم	۱۰-٪۳۰
هارمونیک چهارم	کمتر از ٪۵
هارمونیک پنجم	کمتر از ٪۵
هارمونیک ششم	کمتر از ٪۵
هارمونیک هفتم	کمتر از ٪۵

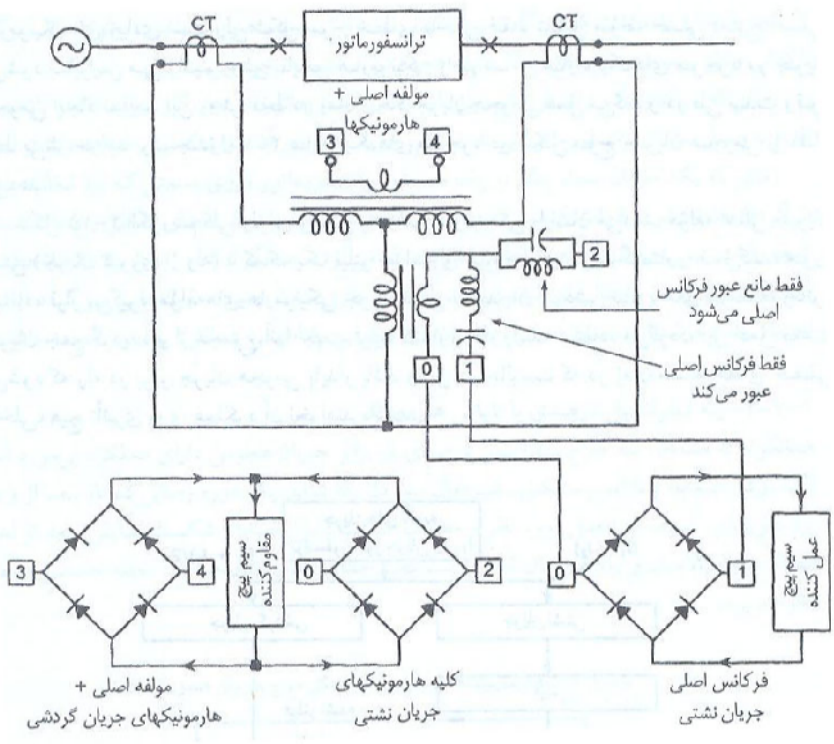
جدول۱-٤ هارمونیک های موجود درشکل موج جریان هجومی

یکی از راه حل های ارائه شده مقایسه شکل موج جریان خطای داخلی با جریان هجومی است . شکل موج جریان هجومی دارای هارمونیک دوم فراوان می باشد در صورتیکه جریان خطای داخلی فقط هارمونیک اول را داراست . بنابراین ما می توانیم نگهدارنده ای براساس هارمونیک جریان هجومی داشته باشیم .



شکل ۱۵-٤ : مفهوم رله دیفرانسیل درصدی با استفاده از نگهدارنده هارمونیک

رله دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیکی طرح شکل ۱۵-٤ در شکل ۱٦-٤ نشان داده شده است .



شکل ٤،١٦ رله دیفرانسیل متمایل درصدی با نگهدارنده هارمونیک

4.8 مقاومت زیاد خطای زمین در ترانسفورماتورها

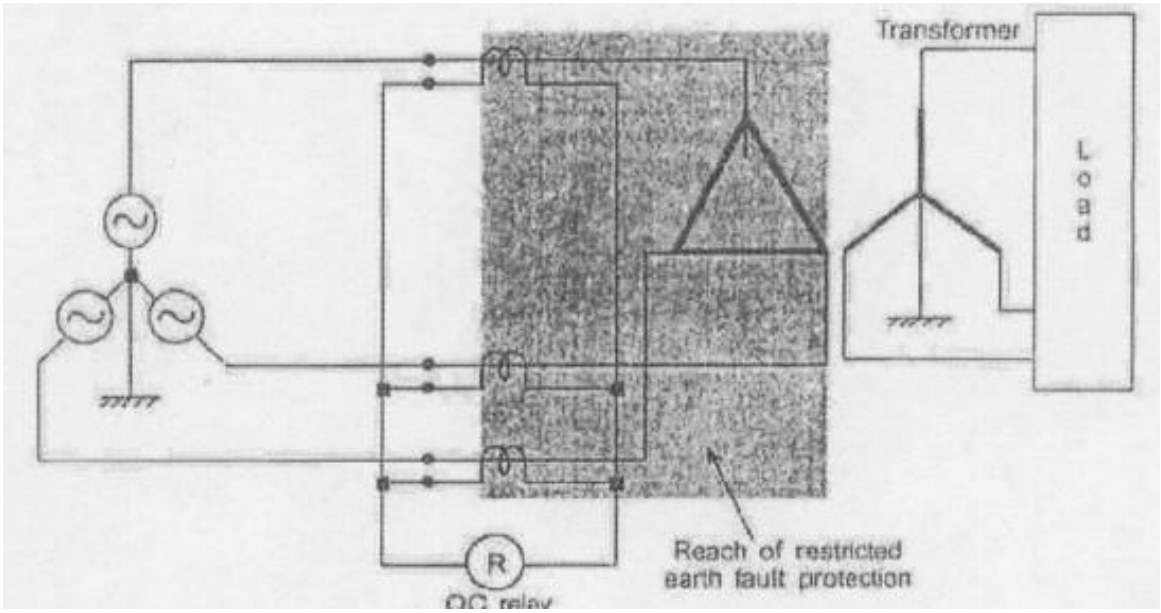
رله دیفرانسیل درصدی دارای مقدار مینیمم مشخص پیک آپ برای خطای داخلی می باشد . خطا یا جریان خطا زیر این مقدار بوسیله رله دیفرانسیل درصدی شناسایی نمی شود .

آن دسته از خطای سیم پیچ به هسته که از نوع تک فاز به زمین و دارای مقاومت زیاد هستند جزو این طبقه هستند . بنابراین ما باید سیستم رله ای حساستری برای خطای زمین با مقاومت زیاد داشته باشیم . فراتر ، دسترسی به چنین حفاظتی برای سیم پیچ ترانسفورماتور بایستی محدود شود در غیر اینصورت ممکن است برای هر خطای زمین در هر جای سیستم بعد از ترانسفورماتور عملکرد داشته باشد . بنابراین این چنین حفاظتی حفاظت محدود کننده خطای زمین نامیده می شود .

٤،٨،١ مقاومت زیاد خطای زمین در طرف مثلث

شکل ١٧-٤ حفاظت خطای زمین برای طرف مثلث یک ترانسفورماتور مثلث-ستاره را نشان می دهد . اگر خطایی در طرف ستاره رخ دهد، جریان عبوری در خطهای متصل شده به طرف مثلث برابر هستند و جریان

سرریز در رله ای که به طرف ثانویه ی ترانسفورماتور جریان وصل شده عبور نمی کند. بنابراین دسترسی به طور اتوماتیک به طرف مثلث محدود می شود.

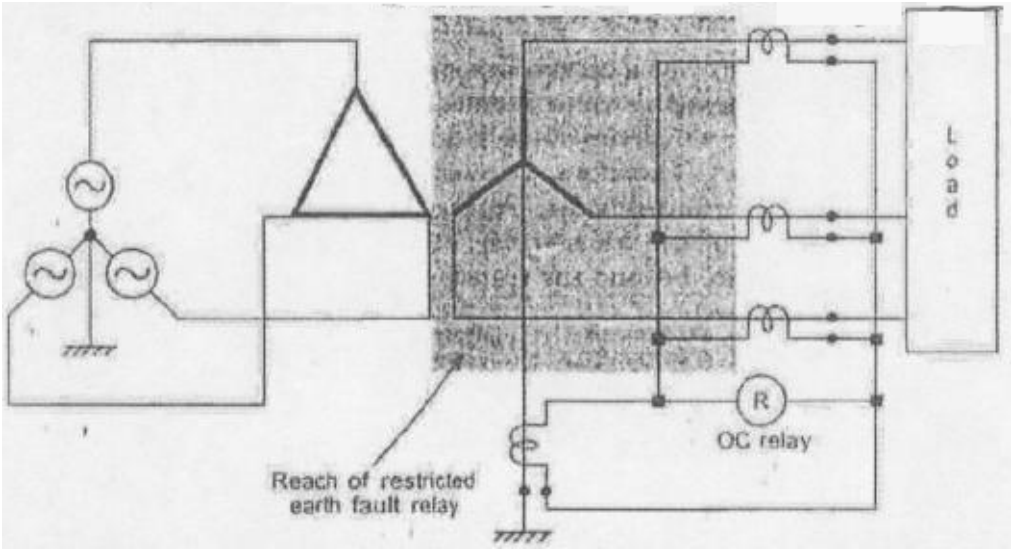


شکل ۱۷-۴ حفاظت خطای زمین در طرف دلتا در یک ترانسفورماتور دلتا – ستاره

از آنجایی که سیستم جریان متعادل است ، پس از جریان بار مستقل است و می تواند به هر شکل دلخواه حساس ساخته شود .

۲-۸-۴- خطای زمین با مقاومت زیاد در طرف ستاره

شکل ۱۸-۴ حفاظت یک خطای زمین محدود شده در سمت ستاره ترانس را نشان می دهد . خطای زمین بعد از ترانسفورماتور جریان در طرف ستاره ترانس و یا هر جایی در سیستم موجب عبور جریان در ثانویه ترانسفورماتور جریان می شود . بهرحال ، جریان چرخش بین ترانسفورماتور جریان در مسیر نیوترال و ترانسفورماتور جریان در فاز خطادار می چرخد . بنابراین ، جریان سرریز از رله عبور نمی کند و سیستم برای خطای خارجی پایدار است.

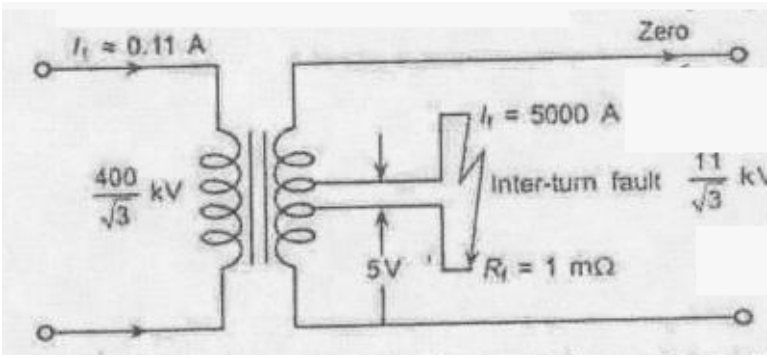


شکل ۱۸-۴ حفاظت خطای زمین محدود کننده برای طرف ستاره یک ترانسفورماتور مثلث–ستاره

عملکرد این سیستم برای خطای داخلی محدود شده به سمت ستاره می تواند به آسانی مشخص شود و به صورت تمرین به خوانندگان گرامی واگذار می شود .

۹-۴ خطای دور به دور در ترانسفورماتورها

خطای دور به دور در داخل ترانسفورماتورها باعث عبور جریان سنگینی بین دورهای اتصال کوتاه شده می شود . بهرحال ، از ترمینال ترانسفورماتور پیداست که جریان معکوس می تواند خیلی کوچک باشد . این را می توان از آنالیز شکل ۱۹-۴ دید .



شکل ۱۹-۴ محاسبه جریان ترمینال برای خطای دور به دور

تلفات توان :

$$I_f^2 R_f = (5\times10^3)^2 (1\times10^{-3}) = 25\,kW$$

ولت – آمپر اولیه و ثانویه از رابطه زیر بدست می آید

$$\left(\frac{400}{\sqrt{3}}kV\right)(I_f) = (5\ V)(5000\ A)$$

$$I_f \approx 0.11\ A$$

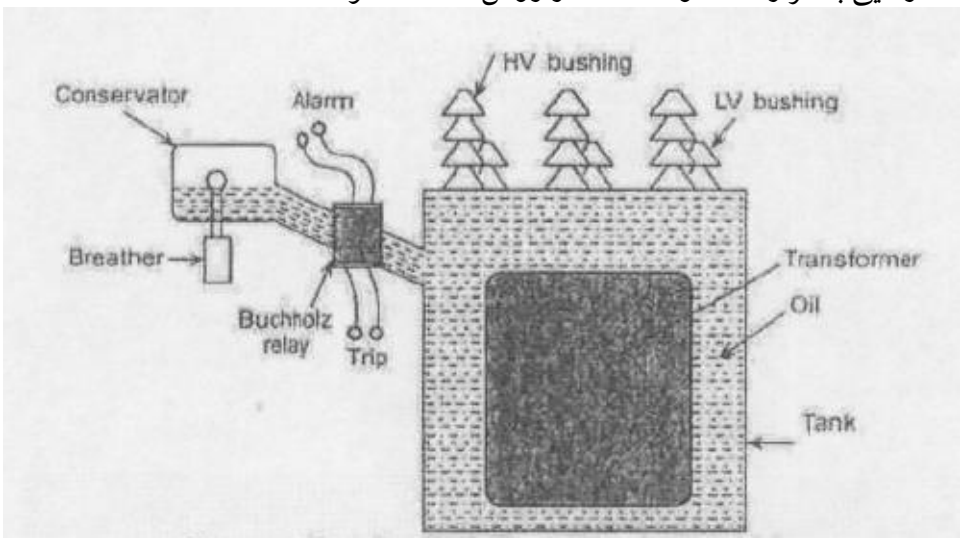
جریانی که بین سیم پیچهای اتصال کوتاه شده می گذرد 5000A است اما در ترمینالهای ۴۰۰KV این جریان فقط 0.11A است . پس خطا به سختی توسط رله های جریان زیاد یا رله های دیفرانسیل قابل شناسایی هستند اما به هر حال ممکن است دور به دور باعث گرمای شدید و موجب آسیب دیدن عایق بندی شود . این موجب پیشرفت رله های بوخ هلز شده تا جایی که رله هایی طراحی شده اند تا از دمای تولید شده و تحلیل روغن تجزیه شده استفاده کنند تا از راههای کاملاً غیرالکتریکی خطا را تشخیص دهد .

۴-۱۰ خطاهای ابتدایی در ترانسفورمرها

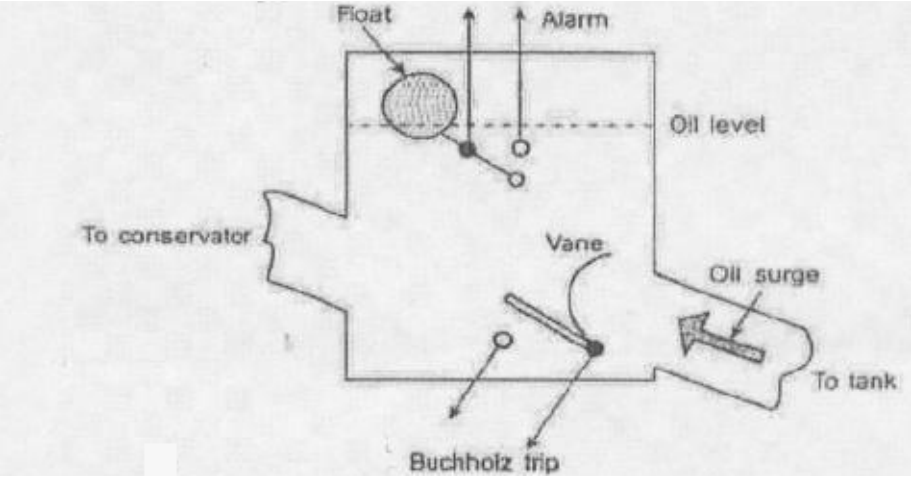
خطاهایی که در ابتدای رخدادشان اهمیتی ندارد اما به تدریج گسترش می یابند را با نام خطاهای ابتدایی می شناسیم که رله بوخ هلز حفاظت در مقابل چنین خطاهایی را فراهم می کند .

۴-۱۰-۱ رله بوخ هلز

شکل ۴-۲۰ موقعیت رله بوخ هلز را نسبت به مخزن ترانسفورماتور و مخزن روغن آن نشان می دهد. در شکل ۴-۲۱ دیاگرام عملکرد داخلی رله بوخ هلز نشان داده شده است هنگامی که یک خطای داخلی مانند خطای سیم پیچی به هسته یا یک خطای دور به دور روی سیم پیچ رخ می دهد حرارت شدیدی در روغن ایجاد می شود که باعث می شود گازهایی با حرارت حدود $350^{O}c$ از روغن متصاعد شود .



شکل ۴-۲۰ طرز قرار گرفتن رله بوخ هلز



شکل ۲۱-۴ ساختمان رله بوخ هلز

این افزایش دما موجب افزایش فشار روغن می شود که باعث حرکت روغن به سمت مخزن روغن خواهد شد. یک پره در مسیر بین مخزن روغن و ترانسفورمر قرار داده شده است و چند کنتاکت با حرکت این پره فعال می شوند که به عنوان کنتاکتهای تریپ برای رله بوخ هلز استفاده می شوند. این خروجی های رله بوخ هلز می توانند برای تریپ دادن به ترانسفورمر استفاده شوند .

رله بوخ هلز چند کنتاکت دیگر نیز دارد که توسط یک شناور فعال می شوند. این کنتاکتها هنگامی که ترانسفورمر پر از روغن باشد باز هستند. اما در مواردی که با سرریز روغن و یا تجزیه آن مواجه هستیم حرکت شناور موجب بسته شدن کنتاکتها می شود . کمبود روغن بدون شک موجب افزایش دمای ترانس می شود اما در این حال نیازی به تریپ بلافاصله نیست به همین دلیل معمولاً این کنتاکتها به آلارمهایی متصل هستند که به اپراتور هشدار می دهند .

۲-۱۰-۴ آنالیز گازهای جمع شده

گازهای جمع شده در مخزن روغن اطلاعات با ارزشی از خطای رخ داده شده در ترانس را به ما می دهد . علت این امر این است که عایق بین سیم پیچی ها و عایق بین لایه های هسته و روغن هر کدام در هنگام حرارت دیدن، به علت خطا، گازهای مشخصی را از خود ساطع می کنند . بررسی این گازها می تواند نوع خطای رخ داده شده در ترانس را مشخص کند. جدول ۲-۴ این اطلاعات را نشان می دهد .

تشخیص	نوع گاز
قوس در روغن بین قسمت‌های ساختمانی	H_2 , C_2H_2
قوس همراه با تعدادی خرابی و فساد در عایق فنلی (خطا در تپ چنجر)	H_2 , C_2H_2 , CH_4
نقاط داغ در اتصالات هسته	H_2, CH_4 , C_2H_4
نقاط داغ در سیم‌پیچ	H_2 , CH_4 , CO_2 ,C_2H_6

جدول ۲-۴ آنالیز گازهای متصاعد شده از روغن ترانسفورماتور

۴-۱۱ پدیده شار در ترانسفورماتورها

۴-۱۱-۱ حفاظت در مقابل شار

شار و ولتاژ اعمال شده به ترانسفورماتور طبق رابطه زیر با هم متناسبند :

$$V = 4.44\varphi_m \ fN$$

که در آن

V= مقدار موثر ولتاژ.

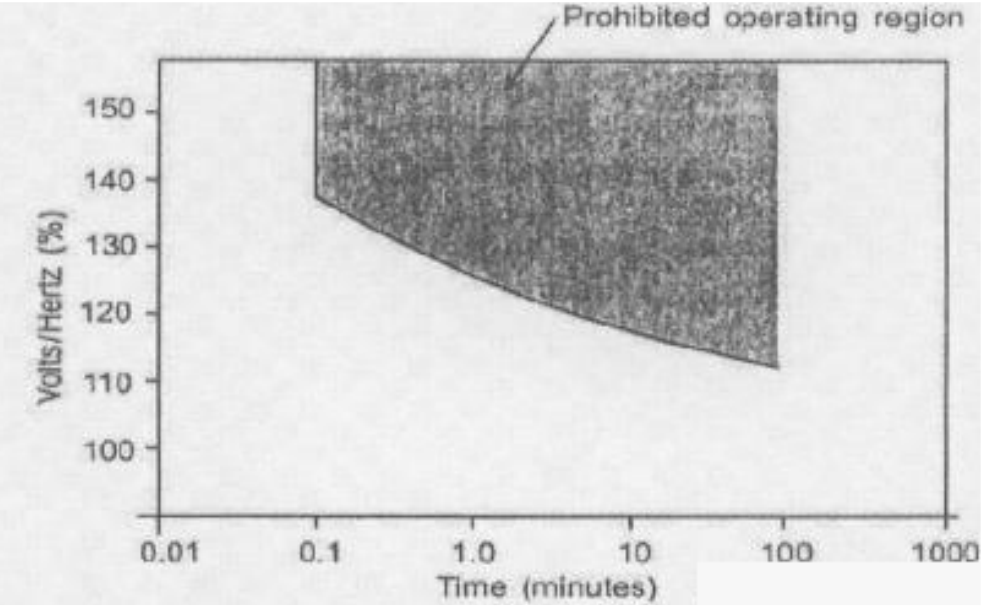
f = فرکانس .

N = تعداد دور سیم پیچی .

پس می توانیم بنویسیم :

$$\phi_m = \frac{V}{4.44\,fN}$$

در هنگام رخ دادن یک اضافه ولتاژ (در حالیکه فرکانس ثابت بماند) هسته ترانسفورمر در معرض شار زیادی قرار می گیرد تا بتواند ولتاژ اعمالی را تحمل کند . طبق طراحی ، ترانسهای قدرت در ولتاژ معمولی در حوالی زانوی منحنی اشباع کار می کنند پس هر افزایشی در ولتاژ اعمالی و در نتیجه افزایش در چگالی شار، ترانس را به سوی اشباع شدن می برد. پس ترانس یک جریان مغناطیس شدگی بیش از حد را تحمل می کند که این حالت به عنوان اضافه تحریک شناخته می شود و به طور قابل ملاحظه ای تلفات هسته را بالا می برد و موجب ایجاد حرارت بیش از اندازه می شود . اشباع هسته شار را مجبور می کند که به استراکچرهای مجاور حرکت کند و همین امر موجب تلفات شدید در هسته و هادیهای مجاور آن می شود . چنین شرایط کاری نمی تواند برای دراز مدت باقی بماند و حفاظت ترانس باید در صورت حس کردن حالت اضافه تحریک تریپ دهد . شکل ۲۲-۴ یک منحنی محدود اضافه تحریک مجاز را نشان می دهد. به سادگی می توان فهمید که رخداد اضافه تحریک در حالت عملکرد در فرکانس پایین و ولتاژ نامی نیز امکان پذیر است .



شکل ۲۲-۴ یک منحنی محدود کننده افزایش شار در ترانسفورماتور نمونه

برای نگه داشتن شار در محدود مجاز طراحی نسبت v/f نباید از محدوده مجاز زیادتر شود . به عنوان مثال ترانسی که برای کار در ولتاژ .p.u ۱/۲۵ در مقیاس واحد تحت فرکانس نامی طراحی شده است هنگامی که نسبت پریونیت ولت بر هرتز از ۱/۲۵ تجاوز کند اضافه شاری را متحمل خواهد شد. این اتفاق زمانی رخ می دهد که ولتاژ در فرکانس نامی از .p.u ۱/۲۵ در مقیاس واحد بالاتر رود و یا فرکانس در ولتاژ نامی زیر تقریباً ۸۰٪ مقدار نامی خود برسد (تقریباً کمتر از 40HZ براساس فرکانس نامی 50HZ). بنابراین می توان گفت که : اضافه تحریک با اندازه گیری نسبت v/f توسط رله ای که با نام رله ولت بر هرتز شناسایی می شود و قابل تشخیص است. امروزه رله میکروپروسسوری ولت بر هرتز تولید و استفاده می شود .

۴-۱۲ جدول کاربرد حفاظت ترانسفورماتور

ترانسفورماتورها کاربردهای وسیعی دارند . نوع حفاظتی که برای ترانس ایجاد می شود به اهمیت و توان آن بستگی دارد . ساده ترین حفاظتی که برای یک ترانس کوچک روشنایی فراهم می شود به صورت فیوز است در حالیکه یک ترانس متصل به ژنراتور در یک نیروگاه حرارتی می تواند حفاظتهای متفاوتی داشته باشد .

جدولهای ۳-۴ و ۴-۴ چگونگی حفاظت ترانس و کاربرد حفاظتهای مختلف را نشان می دهند .

خطای خارجی	خطای داخلی
خطای فاز سیستم	خطای فاز
خطای زمین سیستم	خطای زمین
اضافه بار	خطای دور به دور
اضافه شار	خطای تپ چنجر
	خطای سرریز روغن از تانک

جدول ۳-۴ خطای داخلی و خارجی که روی ترانسفورماتور اثر دارند

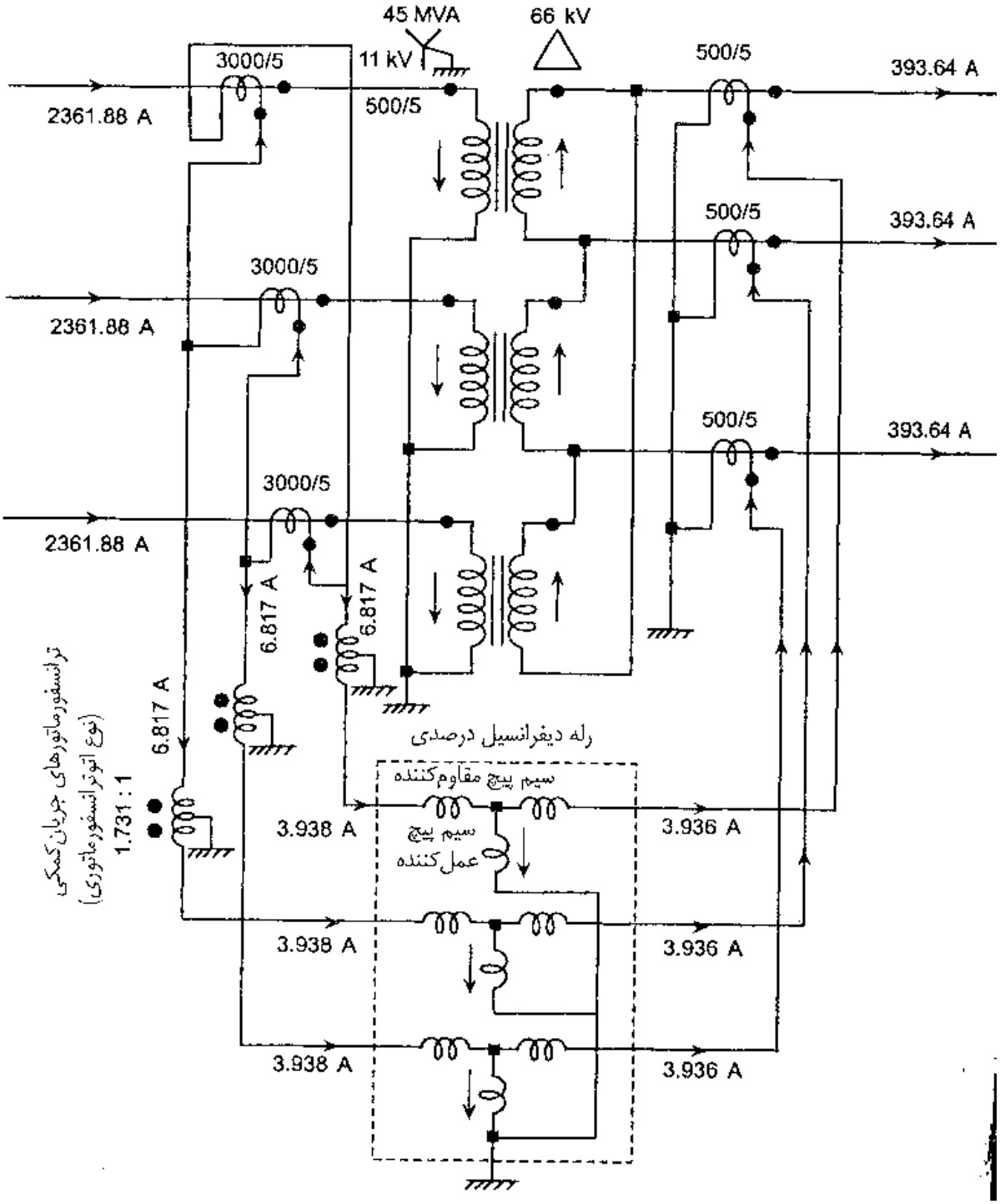
خطا	طرح حفاظتی	
	اولیه	پشتیبان
خطاهای فازی	رله دیفرانسیل درصدی	اضافه جریان/دیستانس
خطاهای زمین	رله دیفرانسیل درصدی	اضافه جریان/دیستانس
خطاهای اتصال حلقه	رله بوخ هلتس	
نشت روغن	رله بوخ هلتس	
اضافه بار	رله اضافه جریان با واحد حفاظتی حرارتی	
اضافه شار	رله اضافه شار با اندازه گیری نسبت $\frac{V}{F}$	

جدول ۴-۴ کاربرد طرح حفاظتی

۴-۱۳ مثال عددی با حل

مسأله : برای یک ترانس ۶۶/۱۱ kv و ۴۵^{MVA} ستاره مثلث حفاظت دیفرانسیل طراحی کنید . حداقل درصد بایاس مناسب چقدر است ؟

حل : همانطور که در جدول ۵-۴ نشان داده شده است فهمیدیم هنگامی که جریان سیم اصلی در طرف ستاره ترانسفورماتور جریانها حدود ۶/۸۱۷ می باشد و در طرف مثلث این مقدار ۳/۹۳۶ است . بنابراین برای تصحیح این عدم تطبیق به ترانسفورماتورهای جریان واسط نیاز داریم (شکل ۲۳-۴). چنین ترانسفورماتورهای جریانی را ترانسفورماتور جریانهای کمکی یا واسط می نامیم و معمولاً به صورت تیپ اتو ترانسفورماتور هستند. نسبت سیم پیچ چنین ترانسفورماتور جریانی باید $\frac{6/817}{3/936} = \frac{1/731}{1}$ باشد .



شکل ۲۳-۴ مثال عددی برای طراحی حفاظت دیفرانسیل درصدی یک ترانسفورماتور

مرحله	سمت ستاره ۱۱ kV	سمت مثلث ۶۶ kV
جریان خط بار کامل I_{FL}	$\frac{۴۵\times۱۰^{۶}}{\sqrt{۳}\times۱۱\times۱۰^{۳}}=۲۳۶۱/۸۸A$	$\frac{۴۵\times۱۰^{۶}}{\sqrt{۳}\times۶۶\times۱۰^{۳}} = ۳۹۳/۶۴A$
جریان بار کامل مجاز برای اضافه بار ۲۵٪ بعنوان جریان اولیه (IFL×۱/۲۵)	۲۳۶۱/۸۸×۱/۲۵=۲۹۵۲/۳۵A	۳۹۳/۶۴×۱/۲۵ = ۴۹۲/۰۵
نسبت ترانسفورماتور جریان (رله 5A)	انتخاب ترانسفورماتور جریان ۲۰۰۰/۵ یا بعبارت دیگر نسبت تبدیل = ۶۰۰	انتخاب ترانسفورماتور جریان ۵۰۰/۵ یابعبارت دیگر نسبت تبدیل = ۱۰۰
جریان‌های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان	جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان $\frac{۲۳۶۱/۸۸}{۶۰۰}$ = ۳/۹۳۶ A	جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان $\frac{۳۹۳/۶۴}{۱۰۰}$ = ۳/۹۳۶
جریان سیم‌پیچ‌های رابط (پایلوت)	جریان سیم‌های رابط (ثانویه ترانسفورماتور جریان در سمت مثلث است) $\sqrt{۳}\times۳/۹۳۶$ = ۶/۸۱۷ A	جریان سیم‌های رابط (ثانویه ترانسفورماتور جریان در سمت ستاره است) = ۳/۹۳۶ A
نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان کمکی = ۱/۷۳۱:۱	جریان بعد از ترانسفورماتور جریان کمکی $\frac{۶/۸۱۷}{۱/۷۳۱}$ = ۳/۹۳۸ A	جریان سیم‌های رابط = ۳/۹۳۶ (پایلوت)

جدول ۵-۴ محاسبات درصد رله دیفرانسیل

فرض کنید جریان سرریز مورد نیاز جهت عملکرد با شیب ۴۰٪ به صورت زیر باشد:

$$0/4\left(\frac{3/936+3/938}{2}\right)=1/57\,A$$

مقدار واقعی این جریان سرریز برابر است با ۰/۰۰۲A=۳/۹۳۶-۳/۹۳۸ . بنابراین سیستم در بار کامل یا خطای خارجی پایدار می ماند .

پرسشهای مروری

۱- در حفاظت دیفرانسیل ترانس هنگام خطای خارجی چه عواملی باعث ایجاد جریان داخلی می شوند .

۲- توضیح دهید که چرا در طرح حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور سه فاز، ثانویه ی ترانسفورماتورهای جریان در سمت ستاره باید به صورت مثلث و در سمت مثلث به صورت ستاره بسته شوند.

۳- توضیح دهید که چرا نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان های دو طرف ترانس متفاوت است .

۴- تأثیر تغییر تپ در درصد تنظیم رله دیفرانسیل چیست ؟

۵- برای یک ترانس ستاره-مثلث سه فاز نشان دهید که خطای فاز به زمین در سمت ستاره از سمت مثلث به صورت خطای فاز به فاز دیده می شود .

۶- واحدهای دیفرانسیلی که در خطای a-g داخلی و خارجی عمل می کنند را تفسیر کنید .

۷- سوال قبل را برای خطای فاز به فاز داخلی و خارجی تکرار کنید .

۸- پدیده جریان هجومی را شرح دهید . چه فاکتورهایی به دامنه جریان هجومی وابسته هستند ؟

۹- برای یک ترانس شرایط سوئیچینگ زیر را درنظر بگیرید .

a) موج ولتاژ از سمت منفی رسیده و از صفر عبور می کند ، شار باقی مانده برابر پیک مثبت شار حالت دائمی است .

b) موج ولتاژ در پیک خودش و در حال کم شدن است ، شار باقی مانده برابر مقدار پیک منفی حالت دائمی شار است .

c) موج ولتاژ از سمت مثبت رسیده و از صفر عبور می کند . شار باقی مانده برابر صفر است .

۱۰- مهمترین هارمونیک در شکل موج جریان هجومی وجود دارد کدام است ؟

۱۱- اصل percentage bias رله دیفرانسیل را توضیح دهید .

۱۲- چرا رله دیفرانسیل درصدی نمی تواند خطای مقاومت بالای بین سیم پیچی و هسته را تشخیص دهید .

۱۳- چه حفاظتی برای خطای مطرح شده در سوال ۱۲ استفاده می شود ؟

۱۴- ثابت کنید که رله خطای زمین شدن محدود برای خطاهای خارج از سیم پیچ ستاره ترانس سه فاز ستاره مثلث عمل نمی کند.

۱۵- ثابت کنید که رله خطای زمین شدن محدود برای خطاهای بین سیم پیچ ستاره در ترانس سه فاز ستاره-مثلث عمل می کند .

۱۶- اضافه تحریک و اضافه شار را تعریف کنید . معنای نسبت (v/f) را بنویسید .

۱۷- چرا اضافه شار برای ترانسها مضر است ؟

۱۸- اصل حفاظت در مقابل اضافه شار چیست ؟

مسائل :

۱- یک ترانس تکفاز ۱۱ kv /۱۱ kv و ۱/۱ MVA که با دیفرانسیل درصدی حفاظت می شود ، را در نظر بگیرید ، ترانسفورماتورهای جریانی با ثانویه ۵A استفاده می شوند. می دانیم که جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتورهای جریان برای ماکزیمم خطای خارجی تا ۰/۵A تغییر می کند . فرض کنید هیچ منبع دیگری برای خطا وجود نداشته باشد و مینیمم pick-up ، ۱A٪ است . حداقل تنظیم percentage bias برای اینکه رله در مقابل جریان خطای خارجی پایدار بماند چقدر است ؟

2- حفاظت دیفرانسیل کامل برای یک ترانس سه فاز ^{HZ}۵۰ ستاره و مثلث با اطلاعات زیر طراحی کنید .

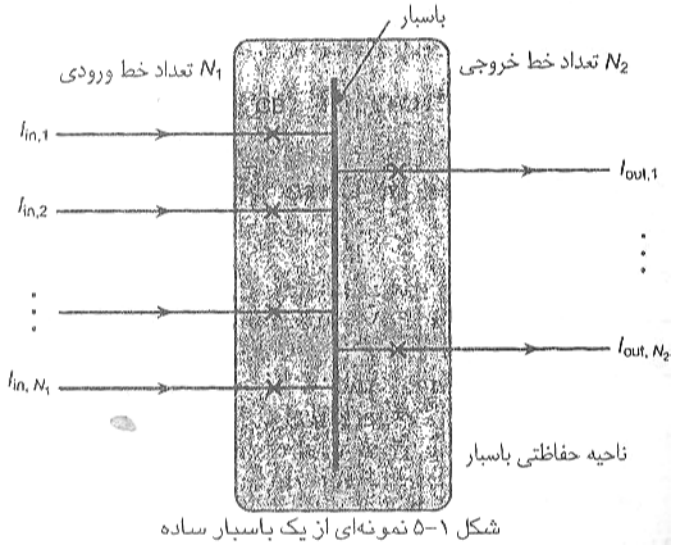
250 MVA 15.75kv/400kv

حفاظت باس بار

۱-۵-مقدمه

کلمه باس از کلمه لاتین omnibus که به معنی مشترک برای همه گرفته شده است. باس بار مرکز عصبی سیستم قدرت است و جایی است که مدارات مختلف با هم اتصال پیدا می کنند. باس ها، محل اتصال (گره) مدارات الکتریکی هستند. شکل ۱-۵ یک باس بار که دارای N_1 خط ورودی و N_2 خط خروجی است، را نشان می دهد. رنگ سیاه، ناحیه های حفاظتی که بایستی برای رله های حفاظتی درنظر گرفته شود را نشان می دهد. باید توجه کرد که در حالت نرمال مجموع جریان ورودی برابر با مجموع جریان خروجی است .

$$\sum_{k=1}^{N_1} I_{ink} = \sum_{m=1}^{N_2} I_{out\ m}$$



شکل ۱-۵ نمونه‌ای از یک باسبار ساده

بنابراین باس بار بایستی ظرفیت یک اتصال کوتاه بزرگ متمرکز را داشته باشد. خطای باس بار اگرچه به ندرت پیش می آید، اما باعث آسیب زیادی می شود. رله های حفاظتی به منظور ایزوله کردن باسبار از آسیب های وارده در هنگام خطا عمل می کنند. در چنین مواقعی یک وقفه در بار رسانی سیستم به وجود می آید. باس بارها یا در محوطه پست و یا در کیوسک تغذیه قرار دارند. در محوطه پست اگرچه به خوبی از رعد و برق محافظت می شوند اما چون در فضای آزاد قرار گرفته اند، تحت تأثیر همه عوامل جوی قرار می گیرند. با اینکه

پستها از هر نظر محافظت می شوند و درصد ایجاد خطا در آنها پایین می آید، اما در کیوسک تغذیه به علت بسته بودن و خوب مهر و موم شدن درصد خطا خیلی کم است .

عوامل زیر در ایجاد خطا روی باس بار تأثیر به سزایی دارند :

- ضعیف شدن عایق ها به علت عمر آنها
- خوردگی به علت آب شور
- از بین رفتن عایق به علت اضافه ولتاژ
- جسم خارجی و غیره

برای مثال موش و مارمولک و مار جانورانی هستند که باعث خطای باس بار می شوند .

چون درصد خطای باس بار بسیار کم است، برای سالهای زیادی لزوم داشتن حفاظت باس بار ضروری نبود. با این تفکر که حفاظت باس بار ممکن است با حس یک خطای معمولی عملکرد نادرست داشته باشد و این خودش یک مشکل اساسی می شود. البته بایستی مدنظر قرار گیرد که چون باس بار در ناحیه ی همپوشانی بین نواحی حفاظتی قرار دارد، دارای حفاظت پشتیبان خواهد بود. بنابراین مهندسین حفاظت، برای باس بار حفاظت خارجی درنظر نمی گرفتند.

بهرحال همانطوریکه ولتاژ سیستم رو به افزایش می رود، ظرفیت اتصال کوتاه هم زیاد می شود و این باعث شد که باس بار بدون حفاظت چندان عقلانی به نظر نرسد.

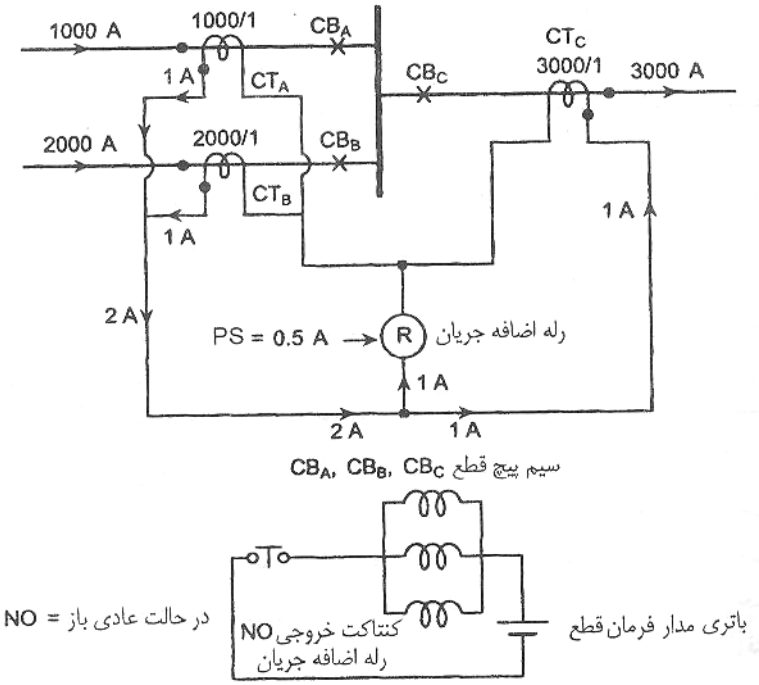
چه نوع حفاظتی مناسب باس بار می باشد؟ با کمی فکر به این نتیجه می رسیم که حفاظت دیفرانسیل می تواند مفید باشد. با قراردادن دو ترانسفورماتور جریان در طرفین باس بار و مقایسه جریان ورودی و خروجی آنها می توان باس بار را حفاظت کرد. هرگونه نامیزانی جریان ها می تواند جریان خطا باشد. در قسمت ۲-۵ حفاظت دیفرانسیل باس بار را توضیح می دهیم .

۲-۵-حفاظت دیفرانسیل باس بار

۱-۲-۵-انتخاب ترانس جریان برای حفاظت باس بار : روش غلط

شکل ۲-۵ یک باس بار که دارای دو فیدر ورودی و یک فیدر خروجی است را نشان می دهد که با حفاظت دیفرانسیل ساده محافظت شده است. جریان ها در حالت نرمال نشان داده شده است. اجازه دهید که نسبت تبدیل ترانس های جریان را براساس ماکزیمم جریان اولیه بار که بوسیله ترانسجریان دیده می شود بدست آوریم. بنابراین نسبت تبدیل ترانس های جریان در فیدر ورودی به ترتیب A ۱\۱۰۰۰ و ۱\۲۰۰۰ می شود. ترانس ترانس جریان فیدر خروجی، نسبت تبدیل A ۱/۳۰۰۰ را دارد . بهرحال با درنظر گرفتن نسبت تبدیل فوق، مقداری جریان اضافی در حالت سلامت و شرایط نرمال سیستم مشاهده می شود .

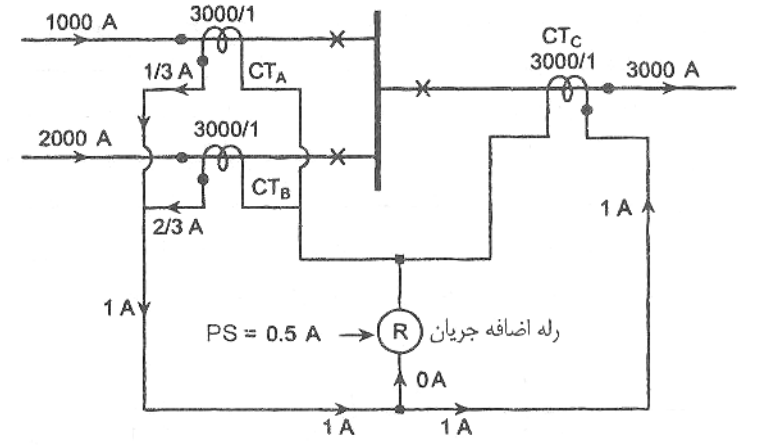
بنابراین انتخاب نسبت تبدیل با درنظر گرفتن ماکزیمم جریان اولیه روش مناسب و درستی نمی باشد.



شکل ۲-۵ متد غلط انتخاب نسبت تبدیل ترانس جریان برای حفاظت دیفرانسیل باس بار

۲-۲-۵-انتخاب نسبت تبدیل ترانس جریان جهت حفاظت باس بار : متد صحیح

شکل ۳-۵ روش درست انتخاب نسبت تبدیل ترانس جریان برای حفاظت دیفرانسیل باس بار را نشان می دهد. می توان دید که نسبت تبدیل ترانس جریان در تمامی ترانس های جریان یکسان هستند و براساس جریان اولیه فیدری که حامل ماکزیمم جریان است انتخاب می شود. بنابراین تمامی نسبت تبدیل تمامی ترانس های جریان A ۳۰۰۰/۱ است.



شکل ۳-۵ روش صحیح انتخاب نسبت تبدیل ترانس جریان برای حفاظت دیفرانسیلی باسبار

همانطور که از شکل پیداست هیچ جریان اضافی از رله اضافه جریان نمی گذرد و سیستم حفاظتی پایدار می باشد. ما یک قانون مهم برای انتخاب نسبت تبدیل ترانس جریان برای تمامی ترانس های جریان، جهت حفاظت دیفرانسیل باس بار داریم که از این قرار است :

ماکزیمم جریان خروجی بین تمامی فیدرها = نسبت تبدیل برای تمامی ترانس های جریان در حفاظت دیفرانسیل باسبار

۱ آمپر یا ۵ آمپر

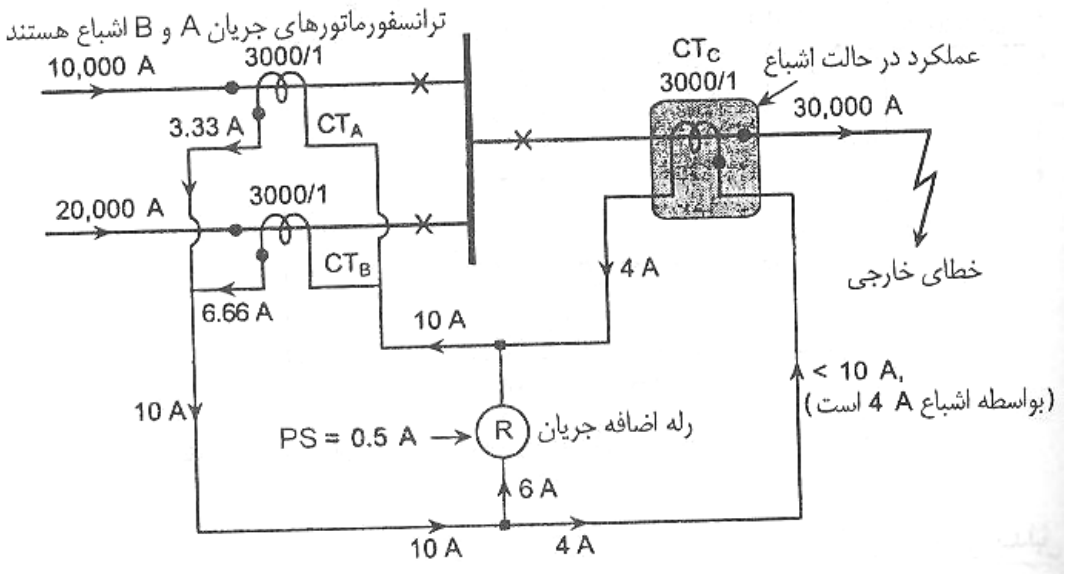
۳-۵-خطای خارجی و داخلی

در توضیحات قبل ما فرض کردیم که ترانس های جریان ایده آل باشند. وقتیکه جریان اولیه ترانسفورماتور جریان یا اضافه بار روی آن در محدوده طراحی شده باشد، می تواند فرض شود ترانس جریان کم و بیش ایده آل است. بهرحال هرچه جریان اولیه از مقدار طراحی شده یا اضافه بار بیشتر باشد، ترانس جریان نمی تواند ایده آل باشد. ایده آل نبودن ترانس جریان اثر نا مطلوبی روی سیستم حفاظتی دارد .

شکل ٤-٥ جریان بعد از ترانس جریان C در طول خطای خارجی را نشان می دهد . می توان مشاهده کرد که ترانس جریان C، که روی فیدر آن خطا رخ داده است، حامل مجموع تمامی جریان هایی است که از طریق فیدرهای مختلف خطا را تغذیه می کنند.

بنابراین، ترانس جریان C جریان اولیه زیادی را نسبت به ترانس جریان A یا ترانس جریان B می بیند. بنابراین ترانس جریان C اشباع می شود. بنابراین ما نمی توانیم فرض کنیم که ترانسفورماتور جریان C می تواند به خوبی جریان خطا را به ثانویه اش انتقال دهد. در شکل ما فرض کرده ایم که جریان ثانویه ترانس جریان C به جای ۱۰ آمپر، ٤ آمپر است.

بنابراین همانطور که از شکل ٤-٥ مشاهده می شود جریان اضافی برابر با ٦A از رله عبور می کند که باعث عملکرد نادرست رله می شود و پایداری سیستم برای خطای خارجی از دست می رود .

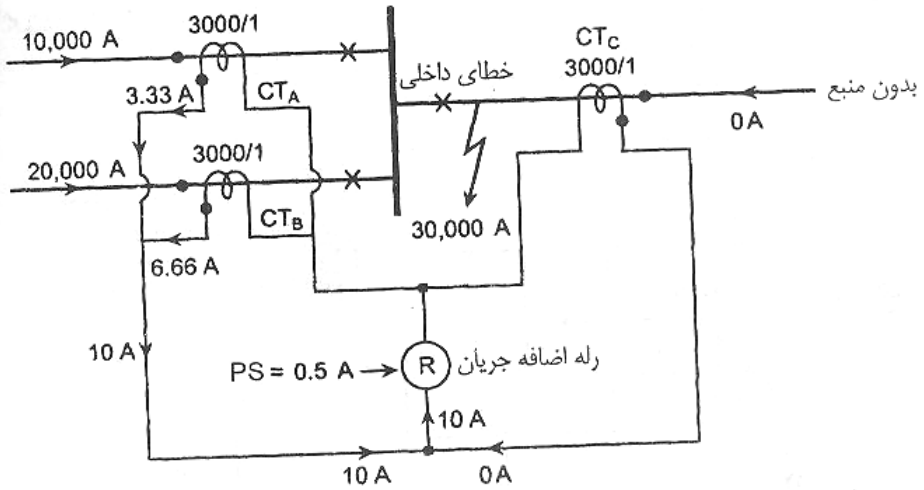


شکل ٤-٥ رفتار سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار بخاطر خطای خارجی

در بدترین حالت ترانس جریانB و ترانس جریان A براساس مشخصات پلاک خود به طور مداوم جریان را در ثانویه عبور می دهند، اما ترانسفورماتور جریان C که کل جریان خطا را حمل می کند کاملاً اشباع می شود. این به طور واضح نشان دهنده عدم تعادل در جریان عبوری از ثانویه و در نتیجه ایجاد جریان اضافی است. چنین شرایطی باعث می شود که سیستم حفاظتی عمل کند. عملکرد سیستم دیفرانسیل برای خطای خارجی یک مورد عملکرد نادرست بشمار می رود.

حال اگر خطای خارجی را با کمی جابجایی به سمت چپ ببریم، به یک خطای داخلی تبدیل خواهد شد که به همان اندازه جریان می کشد. در این شرایط ترانس جریان C تغییر شرایط می دهد و همانطور که در شکل ٥-٥ نشان داده شده است، می توان مشاهده کرد که ترانس جریان C جریانی نمی کشد (با فرض سیستم یک طرفه با منبع در طرف چپ).

از آنجائیکه ترانس جریان A و ترانس جریان B جریان زیادی در اولیه نمی کشند، جریان را بدون اشتباه زیاد به ثانویه منتقل می کنند. بنابراین جریان اضافی در مسیر رله برقرار می شود و سیستم حفاظتی عمل می کند، همانطور که انتظار عمل کردن آن میرفت.



شکل ۵-۵ رفتار سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار بخاطر خطای داخلی

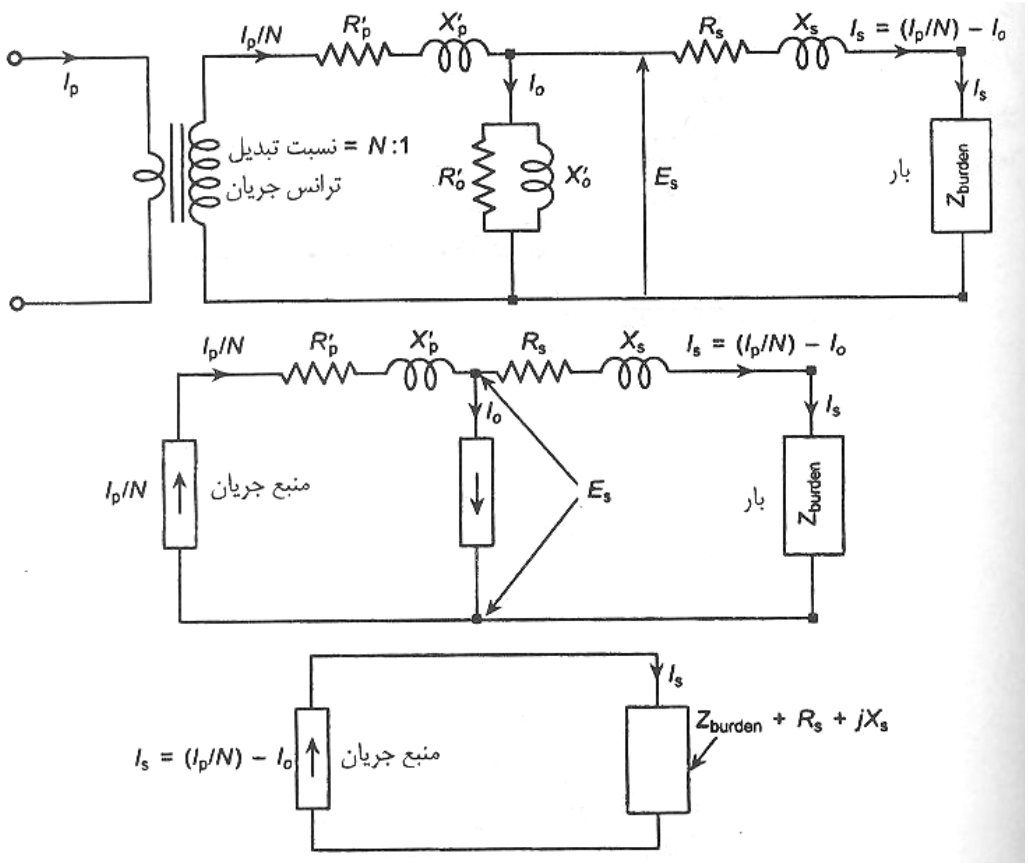
عملکرد نادرست سیستم دیفرانسیل باس بار بخاطر خطای خارجی بخاطر ایده آل نبودن رفتار ترانس جریان و کشیدن جریان زیاد در اولیه است. بنابراین بایستی به رفتار صحیح ترانس جریان حفاظتی نگاه کلی تری داشت.

٤-٥-رفتار اصلی ترانس های جریان حفاظتی

شکل ٦-٥ مدار معادل یک ترانس جریان ارجاع شده به ثانویه را نشان می دهد R'_P و X'_P مقاومت و راکتانس سیم پیچ اولیه ارجاع شده به ثانویه هستند. R_S و X_S مقاومت و راکتانس طرف ثانویه سیم پیچ هستند. مغناطیس شوندگی بوسیله X'_O و تلفات هسته R'_O در مدار معادل نشان داده شده است .

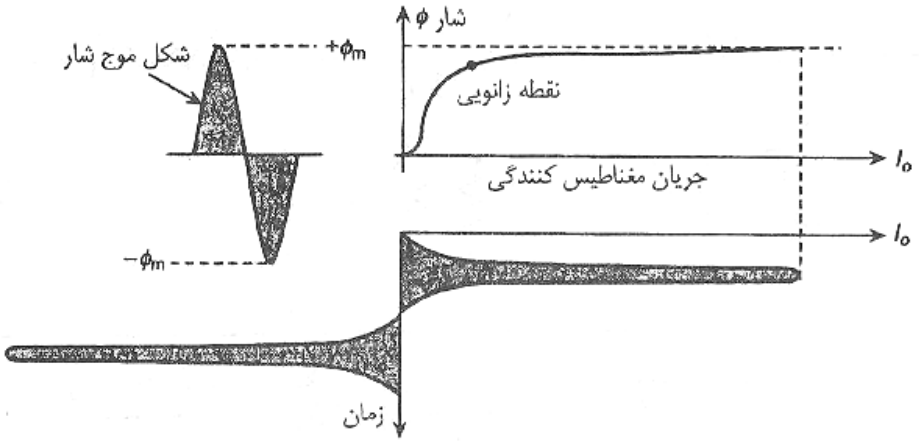
در زمانی که جریان اولیه I_P و همانطور I_S کم هستند، در سیم پیچ ثانویه ولتاژ E_S القا می شود که تقریبا مساوی $(Z_{burden}.I_S)$ است و به نسبت کم است. شار تولیدی در ترانس جریان، که مساوی است با $\frac{E_S}{4.44fN}$ نیز مقدار کمی است . جریان مغناطیس کننده هم بنابراین کم است. بنابراین جریان ثانویه I_S مساوی است با I_P/N.

اگر جریان اولیه زیاد شود جریان ثانویه هم به نسبت زیاد می شود. این باعث می شود ولتاژ القا شده در ثانویه هم زیاد شود. زیاد شدن ولتاژ ثانویه باعث زیاد شدن شار ترانس جریان می شود. هرچه که شار بیشتر شود ترانس جریان نیاز به کشیدن جریان مغناطیس کننده بیشتری دارد. بهرحال بخاطر غیرخطی بودن منحنی B-H در ترانس جریان، وقتی که مشخصه از نقطه ی زانویی بگذرد، هر چه شار بیشتر شود باعث افزایش شدید جریان مغناطیس کننده در ترانس جریان می شود. این مطلب در شکل ۷-۵ نشان داده شده است. در ضمن باید مورد توجه قرار گیرد که I_O (جریان عبوری از شاخه ی موازی) دیگر یک موج سینوسی نیست و شکل موج آن دارای نقاط نوک تیز می باشد.

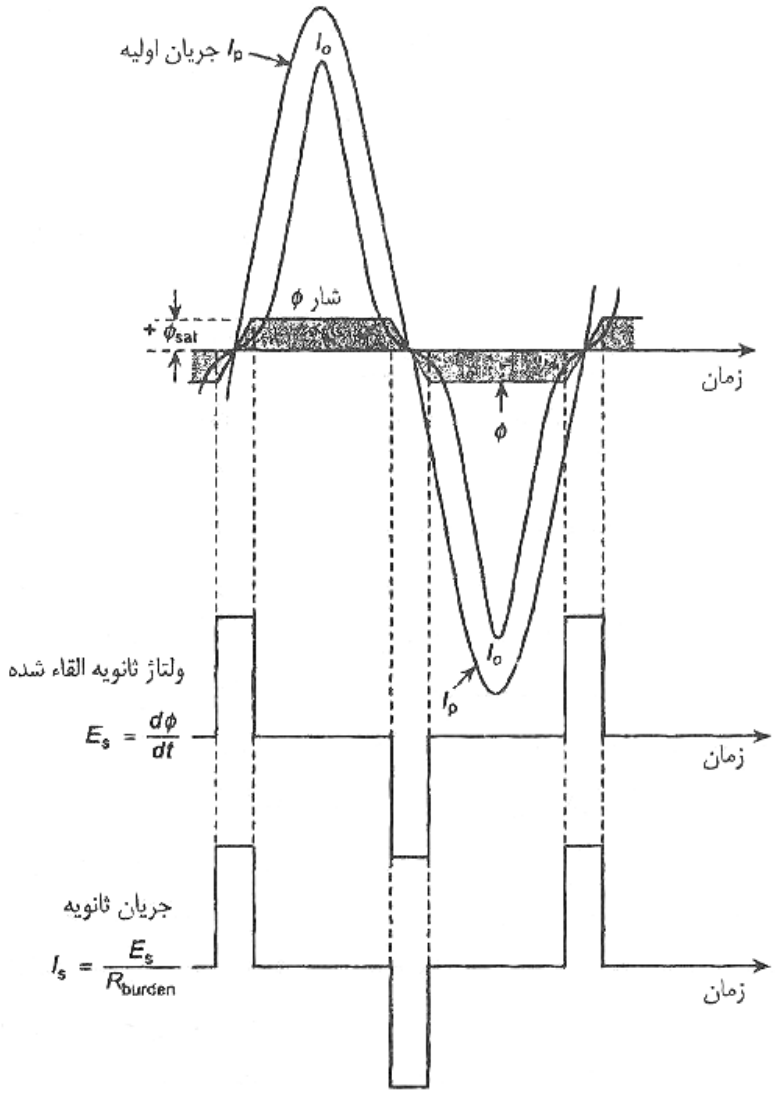


٦-٥ مدار معادل ترانس جریان اشباع شده

همانطوریکه جریان اولیه زیاد می شود ، حالتی پیش می آید که جریان مغناطیس کننده آنقدر زیاد می شود که تقریبا کل جریان انتقال داده شده صرف مغناطیس کنندگی می شود. در نتیجه جریان کمی به بار می رسد. در چنین حالتی می گوییم ترانسفورماتور جریان کاملا به اشباع رفته است. ولتاژ ثانویه القا شده و شکل موج جریان بار ترانس جریان در حالت اشباع کاملا تغییر شکل می دهد. در حقیقت این شکل موج شامل پالس های تیز در نزدیک عبور از صفر جریان اولیه است. این موضوع در شکل ۸-۵ نشان داده شده است که دیده می شود برای رسیدن به نوک شکل موج سینوسی شار، ترانس جریان به شدت به اشباع رفته است. در اثر صاف بودن مشخصه تحریک در ناحیه ی اشباع، یک جریان تحریک زیاد بوسیله ترانس جریان کشیده می شود . شکل موج جریان تحریک در حالت طبیعی خود همراه با اعوجاج و خیلی نوک تیز است.



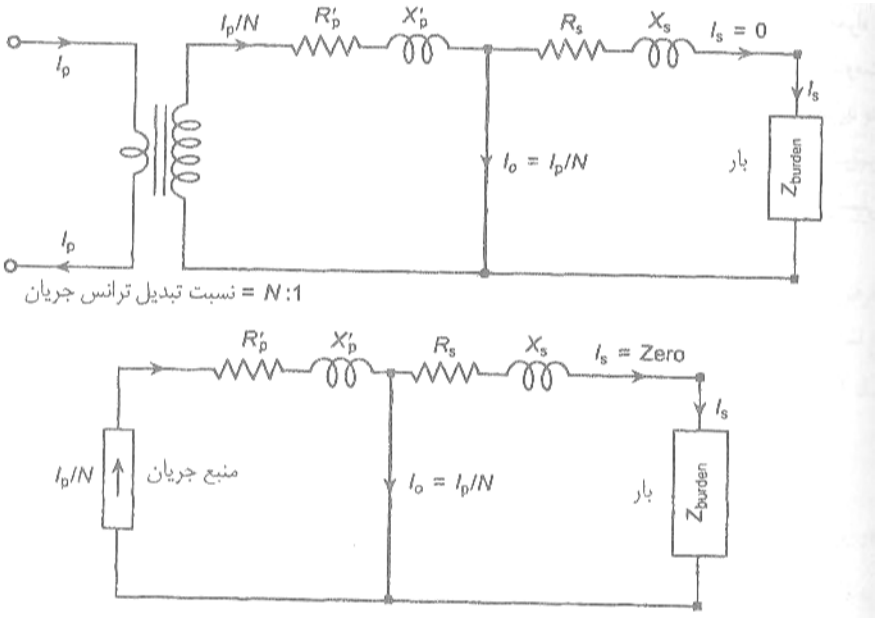
شکل ۷-۵ عملکرد ترانس جریان پس از نقطه زانویی منحنی B-H



شکل ۸-۵ ترانس جریان اشباع شده بخاطر افزایش جریان اولیه

۵-۵-مدل مداری ترانس جریان اشباع شده

ترانس جریان اشباع شده از نظر مداری در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. در این شکل نشان داده شده است که شاخه ی مغناطیس کننده، اتصال کوتاه شده تا نشان دهد که بخش مغناطیس کننده تمامی جریان را از ثانویه می کشد و دیگر جریان باری وجود ندارد.



شکل ۹-۵ مدل مداری ترانس جریان اشباع شده

بنابراین مدل مداری یک ترانس جریان اشباع شده، شامل یک منبع جریان با مقدار ($I_{P/N}$) است که جریان اتصال کوتاه را از طریق R'_P , X'_P تغذیه می کند. اتصال به فضای خارجی هم بوسیله R_S و X_S برقرار می شود.

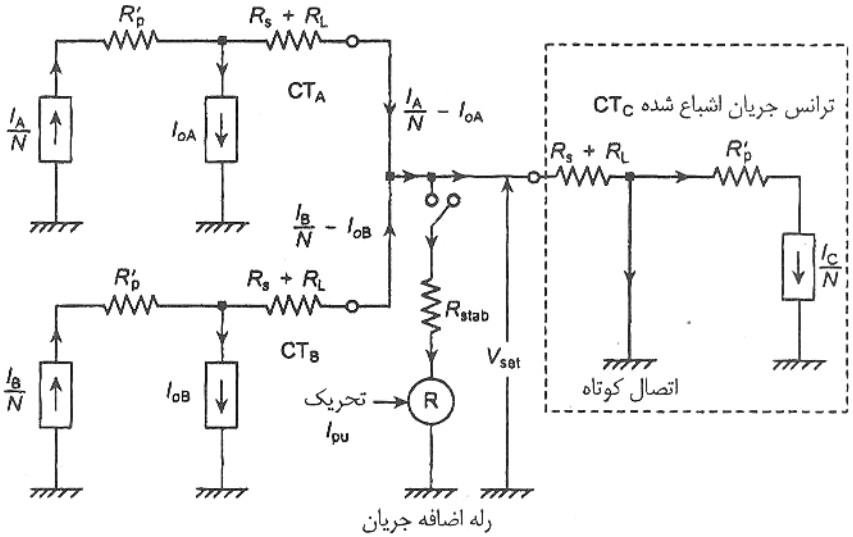
٦-۵-خطای خارجی با یک ترانس جریان اشباع شده : مورد نیاز برای حفاظت امپدانس بالای باس بار

حال ، خطای خارجی ۳۰۰۰۰ آمپری روی باس بار را در نظر بگیرید که باسبار در شکل ٤-۵ نشان داده شده است. فرض کنید که ترانس جریان C کاملا اشباع شود، در حالیکه ترانس جریان A و ترانس جریان B در حال عملکرد نرمال باشند. شکل ۱۰-۵ مدار معادلی را که از طرف ثانویه ترانس جریان دیده می شود نشان می دهد. توجه کنید که برای ساده سازی از راکتانس نشتی صرفنظر شده است .

از شکل ۱۰-۵ می توان دید که جریان ها $[(I_A/N)-I_{OA}]$ و $[(I_B/N)-I_{OB}]$ با هم جمع می شوند و جریان بدست آمده دارای دو مسیر موازی است. یک مسیر از رله اضافه جریان می گذرد و یک مسیر از طریق (R_S+R_L) و شاخه ی اتصال کوتاه که نمایانگر شاخه مغناطیس کنندگی در ترانس جریان اشباع شده است.

بنابراین با وجود آنکه خطا خارجی است قسمتی از جریان که از رله اضافه جریان می گذرد باعث عملکرد آن می شود.

اما رله اضافه جریان بایستی بازدارنده قطع برای خطای خارجی باشد (با یک ترانس جریان کاملا اشباع شده). ما می توانیم به آسانی یک مقاومت بالا که مقاومت پایداری نامیده می شود به حالت سری با رله اضافه جریان قرار دهیم. مقاومت پایداری پایه دارای مقداری باشد که در بدترین شرایط خطای خارجی ماکزیمم و اشباع کامل ترانس جریان، جریان عبوری از رله اضافه جریان کمتر از مقدار جریان تحریک رله باشد. این نوع سیستم، را سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالا می نامیم.



شکل ۵،۱۰ مدار معادل ثانویه با یک ترانس جریان کاملا اشباع شده در حین خطای خارجی

برای پیداکردن مقدار مقاومت پایداری، مقدار تحریک رله اضافه جریان را I_{pu} و مقاومت ترانسفورماتور جریان اشباع شده را (R_S+R_L) درنظر بگیرید. امپدانس مدار ثانویه ترانس جریان اشباع شده با Z_s نشان داده می شود که $Z_s=(R_S+R_L)$. عملکرد به این صورت است که اول با فرض اینکه رله اضافه جریان در مدار نباشد، ولتاژ دو سر آنرا (که V_{set} می نامیم) پیدا کنید. حال مقاومت پایداری بایستی دارای مقداری باشد که با وصل رله، جریان عبوری از آن کمتر از مقدار تحریک رله باشد.

بنابراین روابط زیر را داریم :

ولتاژ دو سر رله اضافه جریان که با مقاومت پایداری سری شده برابر است با:

$$V_{set} = \left[\left(\frac{I_A}{N} - I_{OA}\right) + \left(\frac{I_B}{N} - I_{OB}\right)\right] Z_S$$

$$= \left[\left(\frac{I_A}{N} + \frac{I_B}{N}\right) - \left(I_{OA} + I_{OB}\right)\right] Z_S$$

تحت این شرایط ، اگر بخواهیم جریان عبوری از رله کمتر از مقدار تحریک I_{pu} باشد:

$$R_{stab} \geq \frac{V_{set}}{I_{pu}}$$

با فرض وجود n فیدر و با فرض اینکه جریان شاخه مغناطیس کننده تمامی ترانس های جریان به اشباع نرفته، مساوی با I_O باشد و نسبت تبدیل هر ترانس جریان مساوی N باشد، ما می توانیم معادله کلی زیر را داشته باشیم:

$$V_{set} = \left[\left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{I_K}{N} \right) - (n-1) I_o \right] Z_s$$

که

K از ۱ تا ۱-n تغییر می کند

n تعداد فیدرهایی است که به باس وصل شده اند

$\sum_{k=1}^{n-1} I_k$ نشان دهنده ی ماکزیمم خطای خارجی است

و $I_{f,ext,max}$ به مقداری است که سیستم حفاظتی دیفرانسیل پایدار بماند. بنابراین با صرفنظر از جریان مغناطیس کننده می توانیم بنویسیم :

$$V_{set} = \left[\frac{I_{f,ext,\max}}{N} \right] Z_s$$

با نتیجه گیری از معادله بالا، معادله زیر مقدار ماکزیمم جریان خطای خارجی را که سیستم حفاظت دیفرانسیل به ازای آن پایدار است نشان می دهد:

$$I_{f,ext,\max} = \frac{N V_{set}}{Z_s}$$

۵-مینیمم خطای داخلی که بوسیله سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار شناسایی می شود

بحث در ارتباط با مینیمم جریان خطای داخلی $I_{f,internal,primary}$ و شناسایی آن بوسیله سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار جالب توجه می باشد.

مدار معادل ثانویه ترانس جریان در طول خطای داخلی در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است. با فرض اینکه هیچکدام از ترانسهای جریان اشباع نشده اند و سیستم امپدانس بالا دارای جریان تحریک I_{pu} و مقاومت پایداری R_{stab} است. و بنابراین نیاز به مینیمم ولتاژ V_{set} دارد که دردو سر مقاومت پایدار و رله اضافه جریان ایجاد می شود. بنابراین مینیمم جریان خطا در طرف ثانویه ترانس جریان که باعث ایجاد V_{set} مورد نیاز می باشد به صورت زیر است:

$$V_{set} = I_{f,\min,sec} R_{stab}$$

$$I_{f,\min,sec} = \frac{V_{set}}{R_{stab}}$$ واما

$$\frac{V_{set}}{R_{stab}} = I_{pu}$$ بنابراین

$$I_{f,\min,sec} = I_{pu}$$

شکل ۱۱-۵ نشان می دهد که در زمان وقوع خطای داخلی، ثانویه همه ترانسهای جریان مسیر رله اضافه جریان را تغذیه می کنند. بنابراین، جریان برای مینیمم خطای داخلی در مسیر رله امپدانس بالا به صورت زیر می باشد:

$$I_{f,\min,sec} = I_{pu} = \left(\frac{I_A}{N} - I_{OA}\right) + \left(\frac{I_B}{N} - I_{OB}\right) + \left(\frac{I_C}{N} - I_{OC}\right)$$

$$= \left(\frac{I_A}{N}\right) + \left(\frac{I_B}{N}\right) + \left(\frac{I_C}{N}\right) - \left(I_{OA} + I_{OB} + I_{OC}\right)$$

$$= \frac{I_A + I_B + I_C}{N} - (I_{OA} + I_{OB} + I_{OC})$$

$$= \frac{I_{f,\text{int},\min,pri}}{N} - 3I_O$$

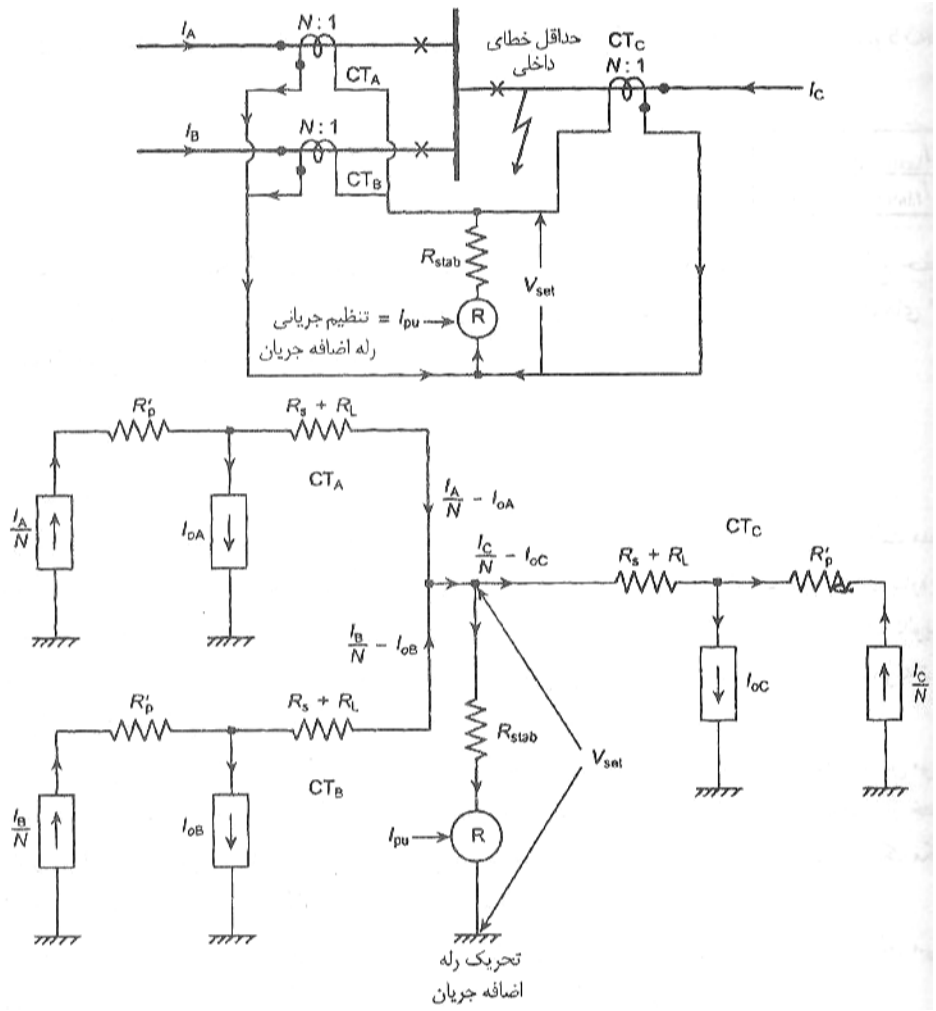
با فرض $I_{OA}=I_{OB}=I_{OC}=I_O$ (تمامی جریانهای مغناطیس کننده ترانسهای جریان مساوی باشند)، با ضرب N در دو طرف معادله داریم:

$$NI_{pu} = I_{f,\text{int},\min,pri} - 3NI_o$$

یا

با وصل ۳ فیدر به باسبار

$$I_{f,\text{int},\min,pri} = N(I_{pu} + 3I_o)$$



شکل ۱۱-۵ مینیمم جریان خطای داخلی که بوسیله سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار شناسایی می شود

در حالت کلی که تعداد فیدرهای وصل به باس بار n باشد ، مینیمم جریان خطای داخلی که بوسیله سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار شناسایی می شود به صورت زیر است :

$$I_{f,\text{int}ernal,\min imum,primary} = N\left(I_{pu} + nI_o\right)$$

۸-۵-نسبت پایداری سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار

نسبت پایداری سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار با S نشان داده می شود و با نسبت ماکزیمم خطای خارجی که برای آن سیستم پایدار است به مینیمم جریان خطای داخلی که برای آن سیستم عملکرد دارد تعریف می شود:

$$S = \frac{I_{f,external,\max imum}}{I_{f,\text{int}ernal,\min imum}}$$

نسبت پایداری از نظر مقدار بدون دیمانسیون است. هرچه مقدار نسبت پایداری بالاتر باشد حفاظت دیفرانسیل بهتر است. نسبت پایداری برای سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار فشارقوی (EHV) معمولا خیلی کم است.

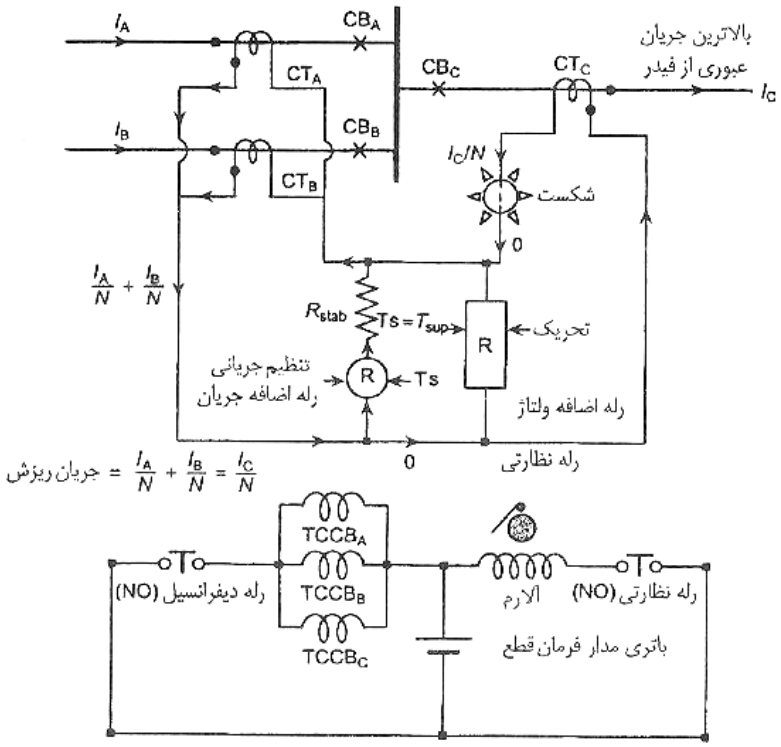
۹-۵-رله ناظر (سوپروایزر)

در سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار ممکن است ثانویه ترانس جریان مدار باز شود یا ممکن است پارگی در سیم ارتباطی بین طرف ثانویه سیم پیچ ترانس جریان و بار اتفاق بیفتد. بنابراین حتی اگر خطای داخلی روی باس بار نباشد در ثانویه عدم تعادل جریانی برقرار می شود که باعث تولید جریان نشتی یا سرریز می شود که مقدار آن برابر با جریانی است که ثانویه ترانس جریان قبل از بازشدن دارد.

این چنین وقایعی خطرناک هستند. سهم جریان یک ترانس جریان خاص می تواند خیلی کمتر از مقدار تحریک رله اضافه جریان باشد و در نتیجه سیستم حفاظتی می تواند در برابر بعضی از خطاهای مدار باز در ثانویه ترانس جریان غیر حساس باقی بماند. ما بایستی سیستمی را طراحی کنیم که بتواند این چنین خطاهایی را شناسایی نماید و آلارم را جهت هشدار به اپراتور فعال کند.

باز شدن مدار ثانویه ترانس جریان باعش افزایش جریان عبوری از رله می شود، زیرا قبلا از ترانس جریان، ماکزیمم جریان بار $I_{load,max}$ عبور می کرده است.

شکل ۱۲-۵ نشان دهنده جریان نرمالی است که بوسیله فیدرها حمل می شود. پارگی در سیم ارتباطی که از طرف ثانویه ترانس جریان C می آید ایجاد می شود. این مسئله باعث تولید جریان سرریز (جریان نشتی) می شود که مساوی با جریانی است که قبل از پارگی سیم بوسیله ترانس جریان C حمل می شد که در شکل ۱۲-۵ نشان داده شده است. بنابراین جریان نشتی برابر I_C/N می شود. این جریان نشتی ولتاژی در دو سر مقاومت پایداری رله اضافه جریان تولید می کند که می توان این اضافه ولتاژ را بوسیله رله ناظر حس کرد .



NO = Normally open, NC = Normally closed, TCCB = Trip coil of CB

شکل ۵،۱۲ رله ناظر که از عملکرد نادرست بخاطر قطع ثانویه ترانس جریان، جلوگیری می کند

رله ناظر برای عملکرد به صورت زیر تنظیم می شود:

$$V_{\sup ervisory} = \frac{I_{load,\max}}{N}(R_{stabilizing} + R_{OC\ relay})$$

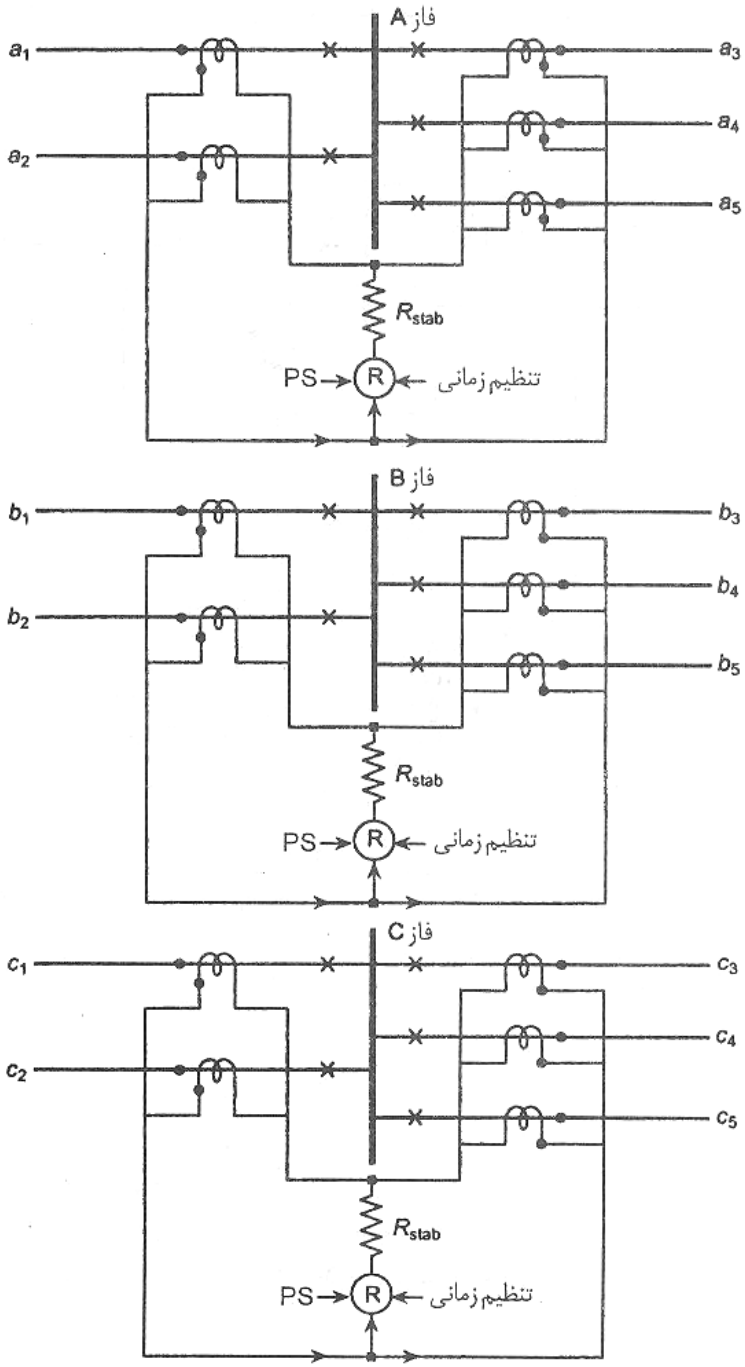
در محاسبات فوق از جریان مغناطیس کننده ترانسهای جریان صرفنظر شده است.

تنظیم ولتاژ رله ناظر $V_{supervisory}$ خیلی کمتر از تنظیم ولتاژ رله دیفرانسیل با امپدانس بالا V_{set} است.

۱۰-۵-حفاظت باس بارهای سه فاز

تمامی باس بارهای ولتاژ قوی سه فاز هستند، ولی ما بخاطر اینکه شکل را پیچیده نکنیم باس بار را تکفاز نشان داده ایم.

شکل ۱۳-۵ نشان دهنده باس بار سه فاز با دو خط ورودی و سه خط خروجی می باشد.



۱۳-۵ حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالا جهت باس بار سه فاز

۱۱-۵-مثال برای طراحی یک سیستم حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالای باس بار

یک باس بار ۱۳۲Kv شامل دو خط ورودی و چهار خط خروجی را در نظر بگیرید. سیستم مستقیما زمین شده است و ظرفیت سوئیچ گیر ۳۵۰۰MVA برای ۱۳۲Kv است. پارامترها عبارتند از :

ماکزیمم جریان بار کامل یک خط ۵۰۰A

مقاومت ثانویه ترانس جریان $R_S = 0.7\Omega$

مقاومت سیم ارتباطی	$R_{load\ wire} = 2.0\Omega$
بار رله (رله ۱A)	۱Ω
جریان مغناطیس کننده ترانس جریان تا ۱۲۰V	۰،۲۸ mA/V (خطی فرض شده)
V_{knee} ولتاژ اشباع ترانس جریان	$< 120\ V$

۱. اگر رله اضافه جریان در مسیر جریان اضافی (نشتی) برای ۱،۰A تنظیم شده باشد و ولتاژ آن $V_{set} = 100V$ تنظیم شده باشد موارد زیر را پیدا کنید :

(a) ماکزیمم خطای خارجی که سیستم باید پایدار باقی بماند .

(b) آیا جواب بالا با ظرفیت سوئیچ گیر هماهنگی دارد.

(c) مینیمم جریان خطای داخلی که بایستی بوسیله سیستم شناسایی شود.

(d) تنظیم I_{pu} برای شناسایی جریان خطای داخلی تا ۵۰۰A

(e) مقدار مقاومت پایداری

۲. پارگی سیم ارتباطی در ترانس جریان که در حال کشیدن جریان ۲۵A می باشد بایستی بوسیله رله ناظر شناسایی شود. تنظیم این رله را حساب کنید.

حل :

۱(a) اجازه دهید که ترانس جریان ۱A را انتخاب نماییم ، بنابراین همانطور که در تئوری توضیح داده شد :

نسبت تبدیل ترانس جریان برای تمامی ترانسهای جریان = ماکزیمم جریان فیدر : ۱

$$= 500:1$$

$$I_{f,ext,\max} = \frac{NV_{set}}{Z_s} \Rightarrow$$

$$\frac{500 \times 100}{2 + 0.7} = 18518.51A$$

۱(b) از مقادیر داده شده ماکزیمم جریان خطای خرجی که می تواند سوئیچ گیر تحمل کند برابر می شود با:

$$\frac{3500 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 132 \times 10^3} = 15{,}300\ A$$

سیستم در برابر جریان خطای خارجی تا ۱۸۵/۸،۵۱A پایدار می ماند. هرچند سوئیچ گیر طوری طراحی می شود که بتواند ۱۵،۳۰۰A را تحمل کند . بنابراین بایستی تنظیم به صورت زیر انجام شود :

$$V_{set} = \frac{15300 \times 2.7}{500} = 82.62V$$

۱(c) مینیمم جریان خطای داخلی (به ازای V_{set}=۱۰۰V , I_{pu}=۱A برابر است با:

$$I_{f,\text{int},\min,pri} = N(I_{p.u} + nI_o)$$

N=۵۰۰ و I_{pu}=۱A و n=۶

I_o داده شده برابر است با ۰،۲۸ mA per volt و برای ولتاژ ۸۲،۶۲ برابر است با:

$$I_o = 0.28mA \times 82.62V = 0.02313A$$

بنابراین:

$$I_{f,\text{int},\min,pri} = 500(1 + 0.6 \times 0.0231) = 569.39A$$

۱(d) برای مینیمم جریان خطای داخلی ۵۰۰A ، مقدار جریان تحریک رله برابر است با:

$$I_{pu} = \frac{I_{f,\text{int},\min,pr_i}}{N} - nI_o = \frac{500}{500} - 6 \times 0.0231 = 0.861A$$

$$R_{stabilizing} + R_{OC\,relay} = \frac{V_{set}}{I_{pu}} = \frac{82.62v}{0.861A} = 95.93\Omega$$

$$R_{OC\,relay} = 1\Omega$$

$$R_{stablizing} = 94.93\Omega$$

۲. در تنظیم رله ناظر از جریان مغناطیس کننده ی تمامی ترانسهای جریان صرفنظر شده است.

$$V_{\text{sup}\,ervisory} = \frac{I_{load,lost,CT}}{N}(R_{stabilizing} + R_{OC\,relay}) =$$

$$= \left(\frac{25}{500}\right)(95.93) = 4.79V$$

سوالات مروری

۱. حفاظت باس بار و طرز کار آن را توضیح دهید .

۲. چرا عملکرد نادرست حفاظت باس بار باعث اختلال در سیستم می شود؟ توضیح دهید

۳. نسبت تبدیل ترانسهای جریان در سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار بایستی شبیه به هم باشد و براساس جریان ماکزیمم که بوسیله فیدر حمل می شود، انتخاب می شود. توضیح دهید

٤. رفتار ترانس جریان که کاملا اشباع شده را توضیح دهید چه راهکاری برای حفاظت دیفرانسیل باس بار دارید؟

۵. چرا طرح سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار قابلیت عملکرد برای خطای خارجی را دارد ؟

٦. چگونه مقدار مقاومت پایداری و وات آن انتخاب می شود ؟

۷. در مورد طرح سیستم حفاظت دیفرانسیل باس بار چگونه مینیمم جریان خطای داخلی را که سیستم بایستی عمل کند پیدا کنیم؟

۸. نسبت پایداری چیست؟ مقدار نسبت پایداری برای طرح دیفرانسیل امپدانس چقدر است؟

۹. وقتی که جریان بار می گذرد اگر در مدار بار، در یک سیم قطعی اتفاق بیافتد، عملکرد طرح دیفرانسیل امپدانس بالا چیست؟

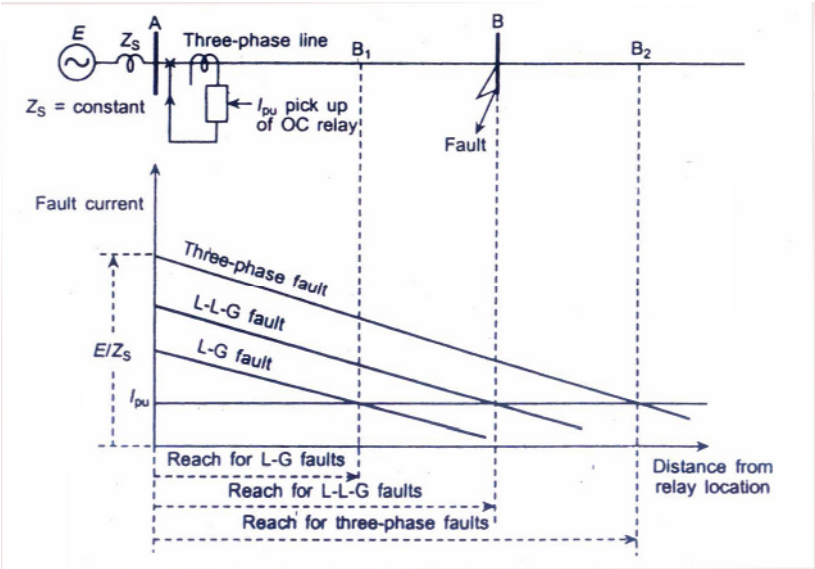
۱۰. چه طرحی پیشنهاد را برای جلوگیری از عملکرد بی مورد رله دیفرانسیل در مورد بالا پیشنهاد می کنید

۱۱. شکل حفاظت دیفرانسیل امپدانس بالا باس بار با رله فاز را که دارای سه فیدر ورودی و دو فیدر خروجی باشد رسم نمایید

حفاظت دیستانس برای خطوط انتقال

۱-۶- معایب حفاظت اضافه جریان :

حفاظت اضافه جریان بخاطرسادگی ذاتی اش موضوع بسیار قابل پژوهش و جالبی است و از آن به عنوان حفاظت اصلی در خطوط توزیع با ولتاژ پایین (LV) استفاده می شود . هر چند که دارای کاستی های مهمی است که موجب عملکرد نادرست (maloperation) آن میشود. در سیستم ولتاژپایین (LV) عملکرد نادرست رله میتواند مجاز باشد و تنها نکته قابل توجه در سیستم (LV) پیوسته ماندن برق مصرف کننده است (کمترین قطعی بار). اما در سیستم EHV عملکرد نادرست نمی تواند خطای مجازی باشد چون که خطوط EHV قسمتی از شبکه بهم پیوسته هستند و هر عملکرد نادرست این سیستم ها پایداری شبکه الکتریکی را به خطر می اندازد. تشخیص رله های اضافه جریان به نوع خطاو امپدانس منبع (همانطور که در شکل های ۱-۶ و ۲-۶ نشان داده شده است) بستگی دارد .

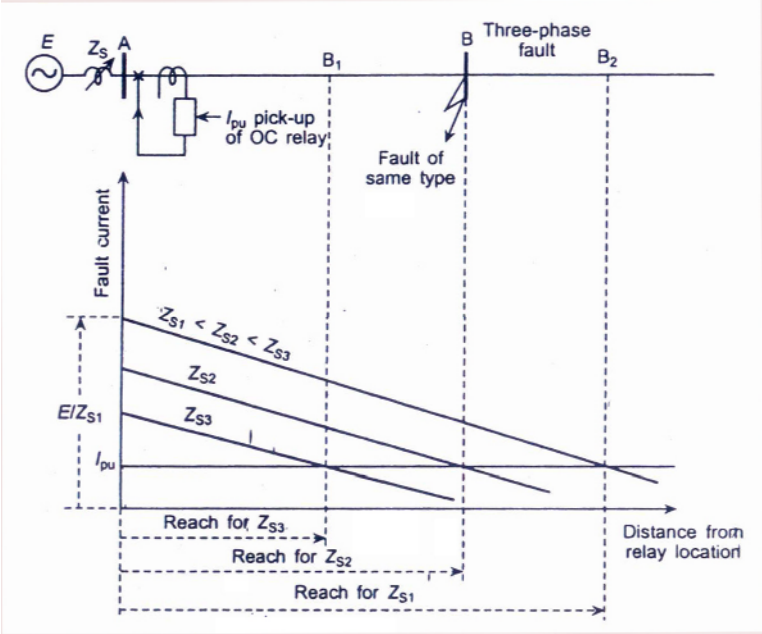


شکل ۱-۶ تاثیر انواع خطاها روی برد رله اضافه جریان

از شکل ۱-۶ دیده می شود که اگر تنظیم جریان تحریک (Pick Up) رله اضافه جریان مساوی با I_{pu} باشد، رله تا باس B خطاهای L-L-G را تشخیص می دهد و برای خطاهای L-G فقط تا نقطه B_1 و برای خطاهای سه

فاز تا نقطه B_2 را تشخیص می دهد بنابراین رله ممکن است بسته به نوع خطا دچار کاهش برد (under reach) یا افزایش برد (over reach) شود و این مشخصا ویژگی مطلوبی نیست .

شکل ۲-۶ نشان می دهدکه اگر تنظیم جریان تحریک رله اضافه جریان مساوی I_{pu} باشد با فرض اینکه امپدانس منبع Z_{S2} باشد، رله خطاها را تا باس B را تشخیص می دهد و اگر امپدانس منبع به Z_{S3} افزایش یابد تا نقطه B_1 دچار کاهش برد یا under reach می شود و اگر امپدانس منبع به Z_{S1} کاهش یابد (با فرض اینکه نوع خطا در هر سه مرحله مورد یکسان باشد) تا نقطه B_2 دچار افزایش برد یا over reach می شود که مجدداً ویژگی نامطلوبی است .



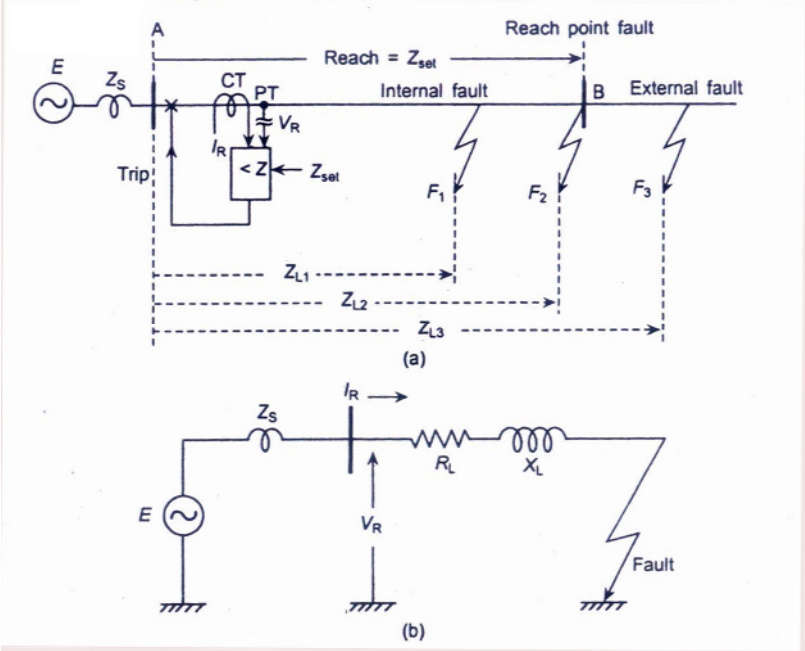
شکل ۲-۶ تاثیر امپدانس منبع روی برو رله اضافه جریان

بنابراین می بینیم که خطای جریان تابعی است از نوع خطا و امپدانس منبع که هر دو متغیر هستند. بنابراین ما باید رله ای را جستجو کنیم که تشخیص آن به مقدار واقعی (دامنه) جریان خطا بستگی نداشته باشد . جستجو برای چنین شیوه ای در رله گذاری، به رله های دیستانس منجر می شود، که تشخیص آنها به مقدار واقعی (دامنه) جریان خطا بستگی ندارد اما به نسبت مقادیر ولتاژ محل قرار گیری رله و جریان خطا وابسته است . این موضوع در بخش ۲-۶ بحث شده است .

۲-۶- معرفی حفاظت دیستانس :

یک خط انتقال AB همچون شکل (a) -۳-۶ را در نظر بگیرید . اجازه دهید فرض کنیم که یک منبع به تنهایی در ابتدای خط (باس A) وجود دارد . هدف ما ایجاد یک ناحیه حفاظت است که از A تا B را شامل

شود. فرض کنید که رله مفروض در انتهای A قرار دارد . جایی که جریان و ولتاژ محل توسط یک ترانس جریان و یک ترانس ولتاژ اندازه گیری می شوند. نسبتهای تبدیل این ترانسها برای ساده سازی ۱:۱ فرض شده است. برد تشخیص رله دیستانس از این طریق مساوی Z_{set} است . به منظور رله گذاری بدون از دست رفتن دقت عمل، این خط مانند یک مدار RL سری مدل شده است مانند شکل (b)-۳-۶ .



شکل ۳-۶ مقدمه ای بر حفاظت دیستانس

حال سه خطا در نظر بگیرید: خطای داخلی F_1 ، خطا در نقطه تشخیص F_2 و خطای خارجی F_3. حال بر اساس جریان رله I_R و ولتاژ رله V_R، مقایسه ای مانند آنچه در ذیل برای هر سه جریان خطا نشان داده شده انجام دهید . قانون فرمان قطع دادن رله دیستانس بصورت زیر است:

$$if\ |V_R| \langle |I_R||Zset| \Rightarrow then\ \ trip$$

$$else \Rightarrow restrain$$

همچنین می توان نوشت :

$$if\ \frac{|V_R|}{|I_R|} \langle |Zset| \Rightarrow then\ trip$$

$$else \Rightarrow restrain$$

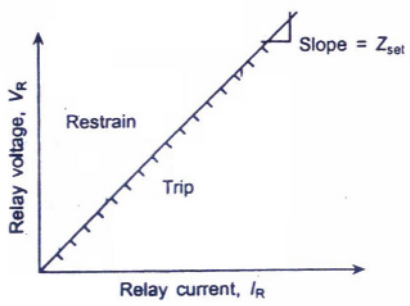
نسبت $\frac{|V_R|}{|I_R|}$ برابر مقدار ظاهری امپدانس $|Z_R|$ دیده شده توسط رله است. بنابراین دستور فرمان قطع می تواند بصورت زیر نوشته شود :

$if\,|Zr|\langle|Zset|\;then \Rightarrow trip$

$else \Rightarrow restrain$

بنابراین رله برای تصمیم گیری درباره ی صدور فرمان قطع، مجبور به محاسبه امپدانس دیده شده (از محلی که در آن قرار دارد) و مقایسه آن با مقدار تنظیم شده قبلی است. به علت مدل ساده سری خطی که دچار خطا شده، امپدانس خط مستقیماً با فاصله آن از محل وقوع خطا متناسب است . از اینرو این رله را، رله دیستانس می نامند. این چنین رله ای، رله $under-impedance$ نیز نامیده می شود که در عمل کلمه $under$ حذف گشته و رله همان رله امپدانس نامیده می شود. امکان اینکه ترکیبات پیچیده تری از چندین رله دیستانس داشته باشیم وجود دارد بنابراین برای تمایز این رله از رله های دیستانس دیگر ما آن رله امپدانس ساده می نامیم. باید توجه شود که ما برای محاسبه Z_R نیازمند انجام تقسیم واقعی $\frac{|V_R|}{|I_R|}$ نیستیم و می توانیم در نهایت بجای محاسبه کردن، یک مقایسه انجام دهیم. خوانندگان حتماً خوشحال خواهند شد چون انجام یک تقسیم جبری خیلی پیچیده تر از یک محاسبه مستقیم است. در حقیقت قبل از دسترسی به میکروپروسورها امکان انجام هیچ گونه محاسبه جبری در یک رله وجود نداشت. این در واقع یکی از آن راه حلهای مهندسی بسیار هوشمندانه است .

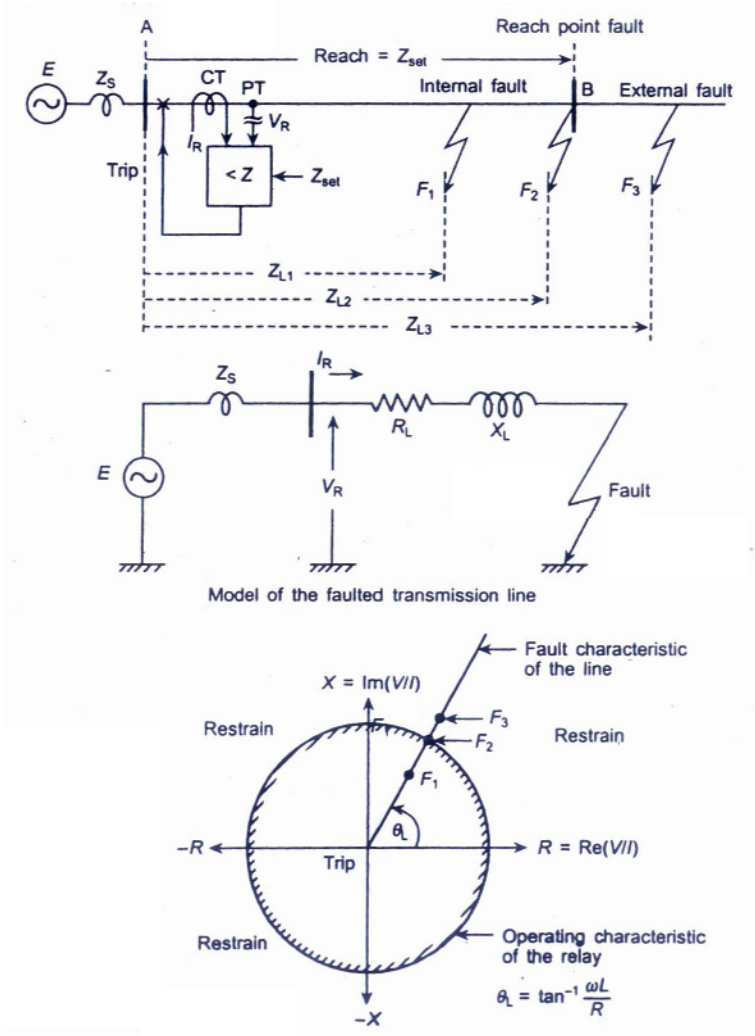
مشخصه یک رله دیستانس روی صفحه مختصات V-I در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همچنین می توان آنرا روی صفحات R-X نشان داد که محور R (مقاومت) برابر مقدار حقیقی نسبت $\frac{V}{I}$ و محور X (راکتانس) برابر مقدار موهومی آن است. در اینصورت V-I فازور خواهند بود.



شکل ۴-۶ مشخصه رله امپدانسی ساده روی نمودار V-I

این موضوع در شکل ۵-۶ نشان داده شده است که در آن مشخصه خطای خطی که دچار خطا شده با «خطای سخت» مشخص شده است (خطاهای سخت خطاهایی هستند که امپدانس خطای آنها شامل مقاومت قابل

توجهی نیست). این خط بصورت خطی مستقیم با شیبی برابر با زاویه مشخصه خط $\left(\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}\right)$ می باشد که در آن L اندوکتانس پریونیت طول خط و R مقاومت پریونیت طول خط است. بنابراین هر خطا روی خط انتقال را می توان روی این خط مستقیم نشان داد. آشکاراست که مشخصه *Trip* یا فرمان قطع رله دیستانس که برای حفاظت از کل طول خط انتقال مناسب باشد باید سطح کوچکی روی صفحه مشخصات R-X باشد تا به راحتی مشخصه خطای خط انتقال را در برگیرد. متأسفانه مشخصه فرمان قطع رله امپدانس ساده روی صفحه مشخصات R-X وسیعتر از ناحیه ای است که در حالت ایده ال به آن نیاز داریم . این یک ویژگی نامطلوب است که منجر به افزایش عملکرد نا درست رله می شود که در بخش بعد روی جزئیات بیشتر آن بحث می شود .



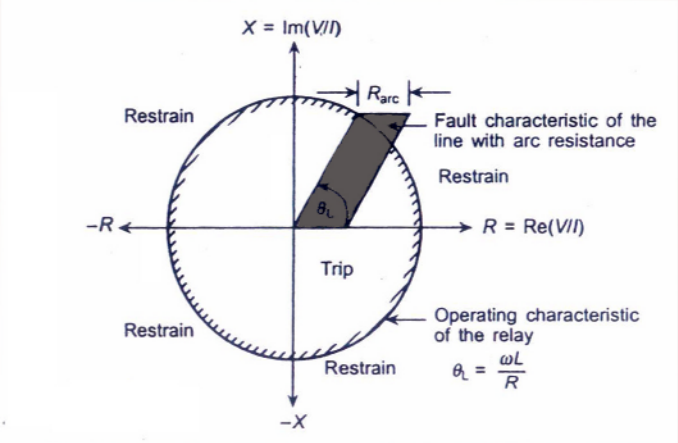
شکل ۵-۶ تلفیق مسخصات رله امپدانسی ساده با مشخصه خطای روی خط در صفحه R-X

ازطرفی بیشتر خطاها همراه آرک هستند و آرک ذاتاً یک مقاومت است . مقاومت آرک تابعی است از فاصله طول آرک یا $Spark-over$ (s) به فوت، سرعت باد (u) برحسب مایل بر ساعت و زمان (t) به ثانیه و

جریان (I) به آمپر. همانطور که قبلاً در فصل۱ به آن اشاره شده است مقاومت آرک با رابطه معروف *Warrington* به صورت زیر محاسبه می شود :

$$R_{arc} = \frac{8750(S + 3ut)}{I^{1.4}}$$

با در نظر گرفتن مقاومت آرک، مشخصه خطای خط انتقال از یک خط مستقیم به خطی با شیب $\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$ در یک سطح که در شکل ۶-۶ نشان داده شده تغییر می کند.



شکل ۶-۶ مشخصه ی خطای خط با در نظر گرفتن مقاومت خطا

۳-۶- رله امپدانس ساده

۱-۳-۶-قانون Trip رله امپدانس ساده با استفاده از معادلات کلی گشتاور:

گفتیم که امکان ترکیب انواع زیادی از رله ها با استفاده از ساختار های الکترومکانیکی وجود دارد. که می توانیم برای چنین ساختاری، یک معادله گشتاور عمومی نوشت که در آن منشا گشتاور هایی که درون ساختار رله بوجود می آید عبارتند از :

- جریان محل قرار گیری رله
- ولتاژ محل قرار گیری رله
- بر هم کنش میان ولتاژ وجریان بالا (سمت جهت دار)

گشتاورهای جداگانه ای می توانند جهت بسته شدن تیغه کنتاکت قطع یا مقاومت در برابر بسته شدن آن ساخته شوند. گشتاوری که منجر به بسته شدن کنتاکت قطع می شود گشتاور عملکرد یا عملگر $(Operating - Torgue)$ وگشتاوری که مانع از بسته شدن کنتاکت قطع می شود گشتاور نگه دارنده $(restrain - Torque)$ نامیده می شود .

معادله نوعی گشتاور را در نظر بگیرید :

$$T = K_1 |I_R|^2 + K_2 |V_R|^2 + K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) + k_4$$

که در آن

T : گشتاور شبکه (کل) روی ساختار متحرک رله .

$K_1|I_R|^2$: گشتاور ناشی از جریان تغذیه کننده سیم پیچ جریان رله .

$K_2|V_R|^2$: گشتاور ناشی از ولتاژ روی سیم پیچ فشار رله *Pessrecoil*.

$K_3|V_R||I_R|C(\theta-\tau)$: گشتاور ناشی از قسمت جهت یاب.

θ: زاویه بین ولتاژ وجریان رله .

τ: بیشترین زاویه گشتاور (زاویه ی گشناور ماکزیمم) برای قسمت جهت یاب.

K_4: گشتاور ناشی از فنرکه در آستانه عملکرد رله در مقابل گشتاور عملگر می توان از آن صرفه نظر کرد.

$K1$رامثبت ، $K2$ را منفی و $K_3 = 0$ را در نظر می گیر یم .

بنا براین رله زمانی فرمان قطع می دهد که:

$$K_1|I_R|^2 \rangle K_2|V_R|^2 \Rightarrow$$

$$\frac{|V_R|^2}{|I_R|^2} \langle \frac{K_1}{K_2} \Rightarrow$$

$$\frac{|V_R|}{|I_R|} \langle \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \Rightarrow$$

$$|Zseen| \langle \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$$

که $|Zseen| = \frac{|V_R|}{|I_R|}$ مقدار امپدانس دیده شده توسط رله است . از طرفی اگر $|Zset| = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$ (که $|Zset|$ امپدانس setting یا تنظیمی است) باشد، میتوان نوشت :

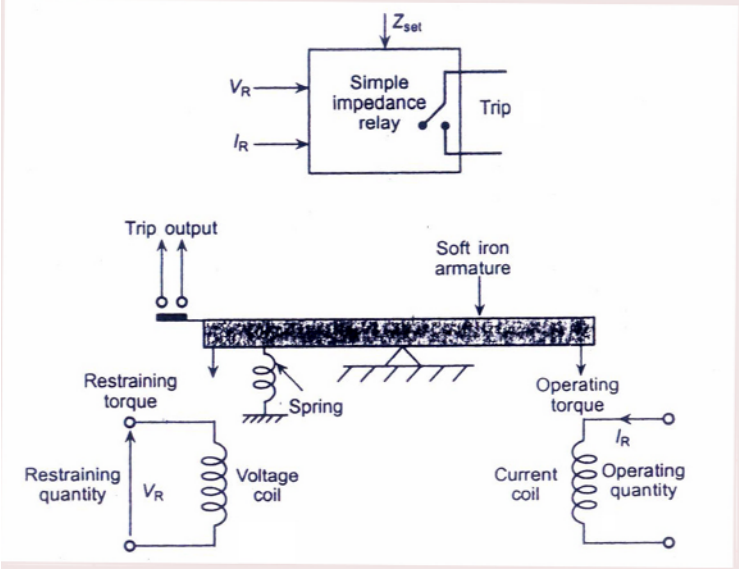
$$if\,|Zseen| \langle |Zset| then \Rightarrow Trip$$

$$else \Rightarrow restrain$$

این رابطه قانون Trip یا قطع برای رله ای است که *Simpleimpedance* رله یا رله امپدانسی ساده نامیده می شود . بنابراین می توان این رله را بعنوان یک Over – current relay with voltage restraint تشریح کرد (رله اضافه جریان با ولتاژ مقاوم) .

۲-۳-۶- عملکرد رله امپدانس ساده با استفاده از ساختار Balanced Beam (قاب تعادلی)

همانطور که در شکل ۷-۶دیده می شود ، رله امپدانس ساده بسادگی میتواند با استفاده از ساختار قاب تعادلی عمل کند. با توجه به شکل، سیم پیچ جریان روی آرمیچر آهنی نرم، گشتاوری اعمال می کند و از این طریق منجر به بسته شدن کنتاکت قطع می شود . از طرف دیگر سیم پیچ ولتاژ تمایل به باز نگه داشتن کنتاکت دارد. بنابراین سیم پیچ ولتاژ نقش گشتاورنگه دارنده را ایفا می کند. زمانیکه رله در موقعیتی است که به آن نیرو وارد نمی شود فنرکنترل، تیغه ها را باز نگه می دارد .



شکل۷-۶ ساختار قاب تعادلی برای رله امپدانسی ساده

گشتاور عملگر متناسب با $|I_R|^2$ وگشتاور نگهدارنده متناسب با $|V_R|^2$ است . بنا براین رله وقتی عمل می کند که:

$$K_1|I_R|^2 \rangle K_2|V_R|^2 \Rightarrow$$

که K_2, K_1 مقادیر ثابتی هستند.

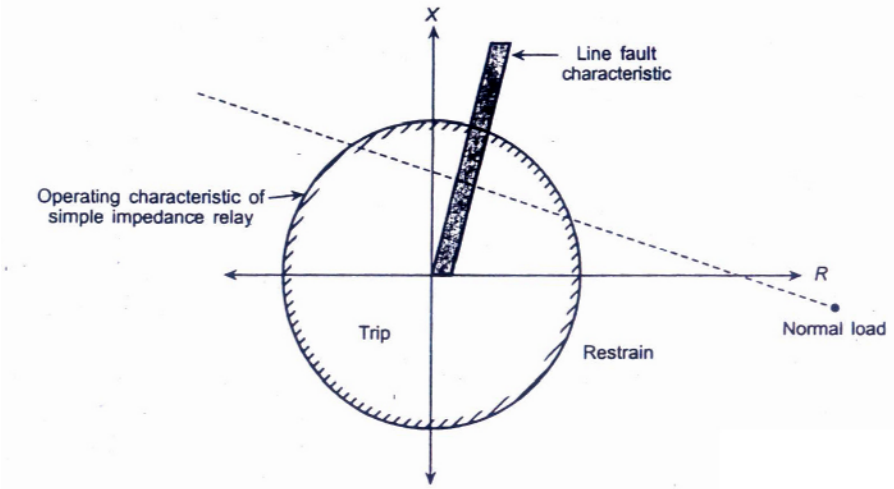
$$\frac{|V_R|^2}{|I_R|^2} \langle \frac{K_1}{K_2} \Rightarrow$$

$$\frac{|V_R|}{|I_R|} \langle \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \Rightarrow Zseen \langle Zset$$

بنا براین ، ساختار قاب تعادلی کار رله امپدانس ساده را تکمیل می کند.

۳-۳-۶- عملکرد رله امپدانس ساده ضمن پخش بار نرمال :

یک رله دیستانس با جریان و ولتاژ محل قرار گیریش تغذیه می شود. بنابراین وقتیکه بار توسط خط تغذیه می شود، رله در تمام مدت به کنترل کردن خط انتقال ادامه می دهد که شامل شرایط کار نرمال نیز هست. در این شرایط مقدار امپدانسی که رله می بیند چقدر است؟ آیا چنین موقعیت کار نرمالی منجر به عملکرد نادرست رله می شود؟ اینها برخی از سوالاتی است که باید پاسخ داده شود . امپدانس دیده شده توسط رله ضمن پخش نرمال همانطور است که در شکل ۸-۶ ، برای یک سیستم از دوسو تغذیه می بیند .خوشبختانه امپدانس دیده شده توسط رله در این شرایط بسیار بزرگ است و خارج از ناحیه عملکرد مشخصه رله قرار دارد. بنابراین رله امپدانسی ساده در حین شرایط کار نرمال پایدار است .



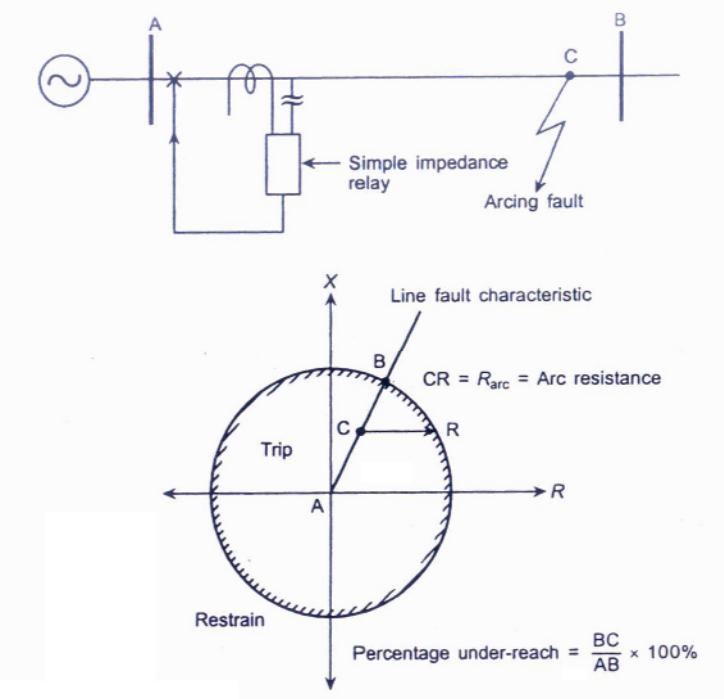
شکل ۸-۶ عملکرد رله امپدانسی ساده تحت شرایط عادی بار

۴-۳-۶- اثر مقاومت آرک روی تشخیص رله امپدانس ساده

یک خطای آرک را با مقاومت خطی R_{arc} در نقطه C در دیاگرام تک خطی شکل ۹-۶ در نظر بگیرید. امپدانس دیده شده توسط رله روی مرز بین نواحی عملکرد و عدم عملکرد می افتد . بنابراین هر خطای آرکی که دقیقاً بعد از نقطه C واقع شود تشخیص داده نخواهد شد.

بنابراین رله امپدانس ساده بخاطر یک خطای آرک کاهش برد می شود . درصد کاهش برد با نسبت فاصله کاهش برد رله به مقدار برد تنظیم شده رله تعریف می شود. با مراجعه به شکل ۹-۶ درصد کاهش برد بصورت زیر دیده می شود :

$$\frac{BC}{AB}\times 100\%$$



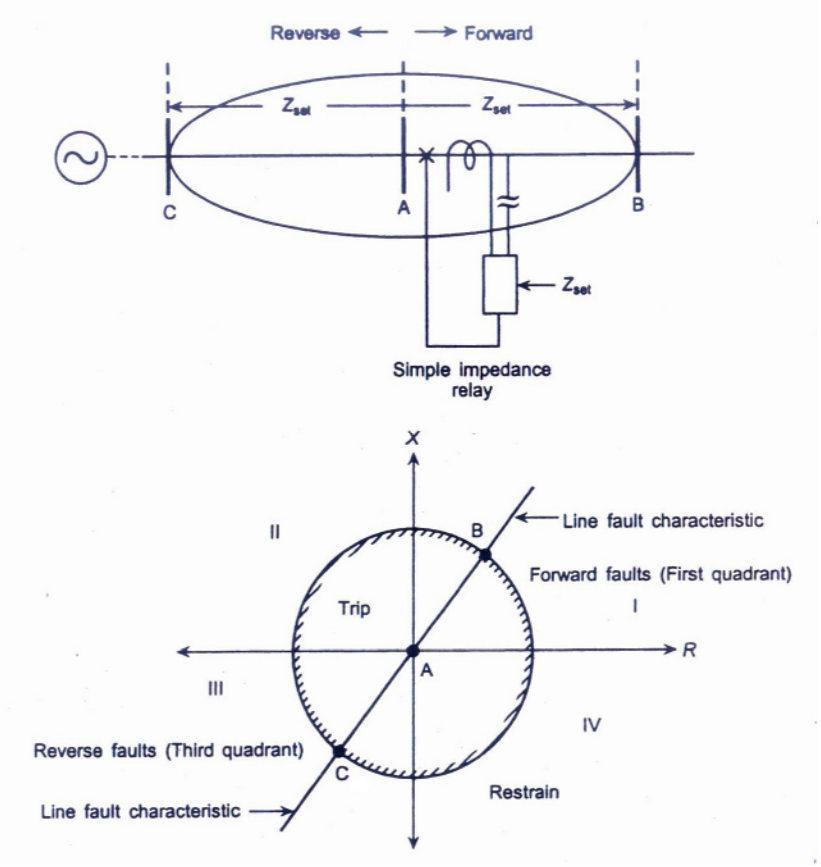
شکل ۹-۶ تاثیر مقاومت آرک روی برد رله امپدانسی ساده

۵-۳-۶- ارائه ویژگی جهت یابی در رله امپرانس ساده

تشخیص رله امپدانسی ساده مستقل از زاویه بین ولتاژ و جریان در محل قرار گیری رله است. بنابراین رله خاصیت جهت یابی از خود نشان نمی دهد. تشخیص رله امپدانسی ساده در جهت معکوس و جهت مستقیم با هم برابر است. همانطور که در شکل ۱۰-۶ دیده می شود ربع اول صفحه مختصات R-X خطاهای مستقیم و ربع سوم خطاهای در جهت معکوس را نشان می دهد. بنابراین رله امپدانسی ساده به تنهایی در شرایطی که باید بین خطاهای مستقیم و معکوس تمایز قائل شویم مفید نیست . هرچند که می توانیم برای دستیابی به تمایز مطلوب، به کمک یک عنصر جهت یاب روی کار آن نظارت کنیم.

۶-۳-۶-عملکرد رله امپدانسی ساده ضمن نوسان شبکه قدرت

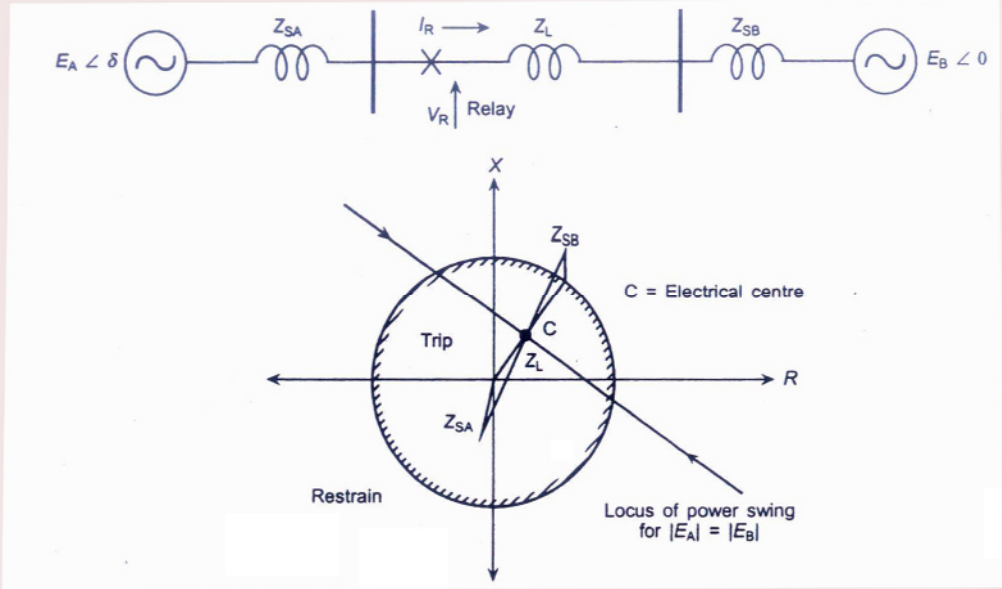
وقتی که یک سیستم قدرت در شرایط ماندگار عمل می کند زوایای ماشین یا روتور ثابت است . هنگامیکه یک تغییر بزرگ و ناگهانی در سیستم قدرت به وجود می آید (ناشی از قطع یک مصرف کننده مهم و بزرگ در انتهای خط)، زوایای روتور دستخوش نوسان می شوند تا زمانی که سیستم به یک حالت پایدار جدید برسد . این پدیده به نوسان قدرت معروف است. فرکانس نوسانات زاویه روتور بعلت اینرسی بالای نوسانگر (روتور) هنگام نوسان قدرت بسار کوچک است (در حدود چند هرتز).



شکل ۱۰-۶ خاصیت جهت یابی در رله امپدانسی ساده

امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس ضمن نوسان قدرت یکی از مباحث جذاب در مهندسی رله گذاری است. می توان نشان داد که ضمن نوسان قدرت مکان هندسی نوک امپدانس دیده شده توسط رله به کندی از مرکز الکتریکی سیستم انتقال عبور می کند. مرکز الکتریکی سیستم انتقال شامل ترکیب سری امپدانس منبع قبل از قرارگیری محل رله، امپدانس خط انتقال و امپدانس منبع در انتهای دیگر آن است. این مسئله در شکل ۱۱-۶ نشان داده شده است.

بنابراین در حین نوسان قدرت، در بعضی نقاط امپدانس ظاهری وارد ناحیه عملکرد رله در منحنی مشخصه رله می شود. از طرفی وقتی نوسان قدرت از مرکز الکتریکی عبور می کند همچون یک خطای سخت در مرکز الکتریکی سیستم انتقال بنظر می رسد. که این موجب می شود رله تریپ دهد، خط از مدار خارج شود و به اغتشاشاتی که قبلاً به سیستم وارد شده بود افزوده شود. بنابراین اغلب از عملکرد رله در حین نوسان قدرت جلوگیری می شود .



شکل ۱۱-۶ تاثیر نوسان قدرت روی رله امپدانسی ساده

در ایجا باید توجه کرد که هر چه ناحیه اشغال شده توسط رله روی دیاگرام R-X بیشتر باشد، احتمال عملکرد ناصحیح ناشی از نوسان قدرت بیشتر است. چون رله امپدانسی ساده ناحیه ای بر روی چهار ربع صفحه مختصات R-X اشغال می کند، در نتیجه نسبت به عملکرد ناصحیح در نوسان قدرت آسیب پذیرتر خواهد بود.

۴-۶- رله راکتانسی

۱-۴-۶-قانون Trip برای رله راکتانسی با استفاده از معادله کلی گشتاور :

معادله کلی گشتاور را مجدداً در نظر بگیرید :

$$T = K_1 |I_R|^2 + K_2 |V_R|^2 + K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) + k_4$$

اگر K_1 و $K_2 = 0$ مثبت باشد (بعبارت دیگر سیم پیچ جریان منجر به تولید گشتاور عملکرد می شود) و K_3 را منفی در نظر بگیریم (بعبارت دیگر گشتاور جهتی، در برابر عملکرد رله مقاومت می کند)، میتوان شرایط عملکرد را بدست آورد. توجه کنید که از K_4 وقتی رله در آستانه عملکرد است میتوان صرفه نظر کرد.

$$if K_1 |I_R|^2 > K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) then \Rightarrow trip$$

$$else \Rightarrow restrain$$

که می توانیم بنویسیم :

$$K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) \langle K_1 |I_R|^2$$

و به صورت زیر ساده می شود :

$$\frac{|V_R||I_R|}{|I_R|^2}Cos(\theta-\tau)<\frac{K_1}{K_3}\Rightarrow$$

$$\frac{|V_R|}{|I_R|}Cos(\theta-\tau)<\frac{K_1}{K_3}\Rightarrow$$

$$|Z_{seen}|Cos(\theta-\tau)<\frac{K_1}{K_3}$$

اگر : $\frac{|V_R|}{|I_R|}=|Z_{seen}|$

اگر MTA (زاویه ی گشتاور ماکزیمم) عنصر جهت یاب را روی 90 تنظیم کنیم و $X_n=\frac{K_1}{K_3}$ باشد، آنگاه بدست می آوریم :

$$|Z_{seen}|Cos(\theta-90)<X_n$$

X_{seen} را بعنوان قسمت موهومی امپدانس دیده شده توسط رله در نظر می گیریم :

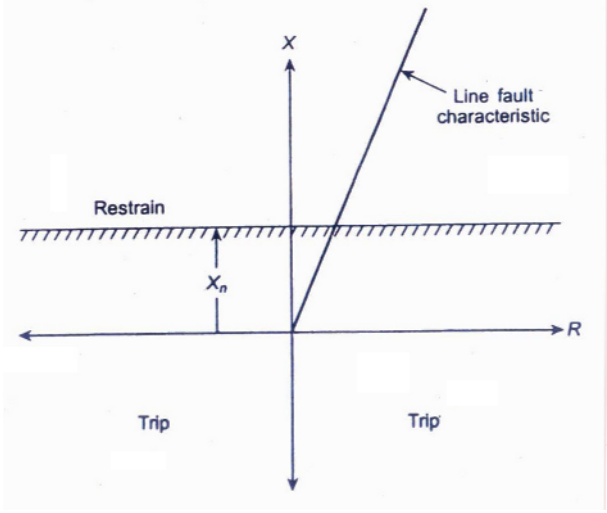
$$|Z_{seen}|Cos(\theta-90)=|Z_{seen}|Sin\theta=|X_{seen}|$$

در نهایت شرایط عملکرد به صورت زیر بدست می آید :

$$if|X_{seen}|<|X_n|\rightarrow then\Rightarrow Trip$$

$$else\Rightarrow restrain$$

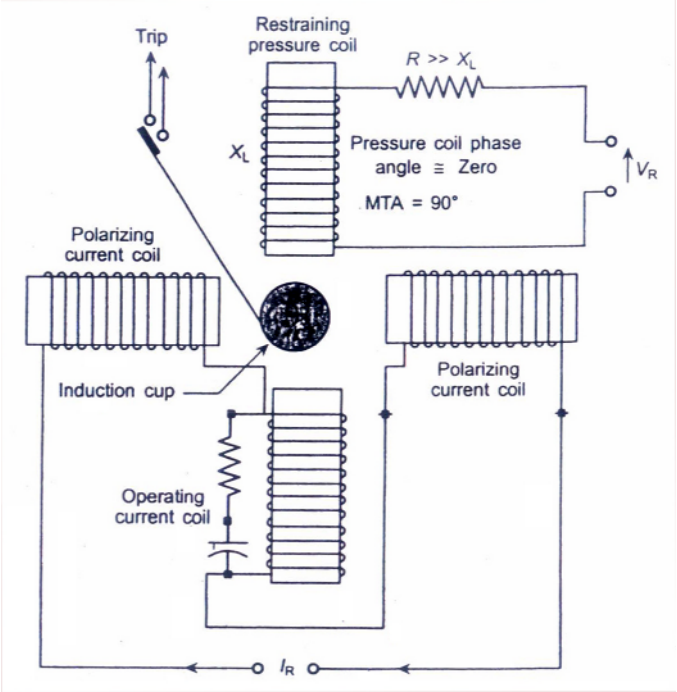
بنابراین رله تنها روی قسمت موهومی امپدانس دیده شده حساس است و وقتی قسمت موهومی از مقدار ویژه X_n تنظیم شده کوچکتر باشد، فرمان قطع می دهد. از این به بعد این رله را، رله راکتانسی می نامیم. مشخصه عملکرد رله روی صفحه مختصات R-X یک خط مستقیم است که محور موهومی را در X_n قطع می کند . تمام ناحیه زیر این خط مستقیم ناحیه عملکرد را مشخص می کند که ناحیه اشغال شده بسیار بزرگ است و در شکل ۱۲-۶ نشان داده شده است .



شکل ۱۲-۶ مشخصه رله راکتانسی

۲-۴-۶- عملکرد رله راکتانسی با استفاده از ساختار فنجان القایی :(Induction cup)

یک رله راکتانسی با استفاده از ساختار فنجان القایی در شکل ۱۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۶ ایجاد رله راکتانسی با استفاده از فنجان القایی

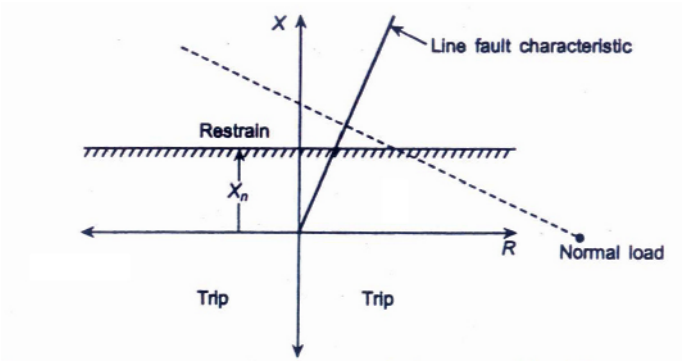
فاز جریان موجود در یکی از سیم پیچ ها شیفت پیدا می کند. بنابراین گشتاوری مناسب با I^2 در اثر برهم کنش شارهای تولیدی دو جریان به وجود می آید . جریان درون سیم پیچ فشار(Pressure Coil) تقریباً هم فاز با ولتاژ آن است، که بدلیل اتصال به مقاومتی است که مقدار آن در مقایسه با اندوکتانس سیم پیچ فشار خیلی

بزرگتر است. این موضوع زاویه فاز سیم پیچ فشار را تقریباً مساوی صفر می کند که منجر به زاویه گشتاور ماکزیمم $\tau = 90^{o}$ می شود. (زاویه فاز سیم پیچ فشار – ۹۰ = زاویه ی گشتاور ماکزیمم)

ساختار فنجان القایی چهار قطب نسبت گشتاور به وزن زیادی دارد . بنابراین واحد اندازه گیری بسیار حساسی است.

۳-۴-۶- عملکرد رله راکتانسی ضمن پخش بار نرمال

رله راکتاسی شامل کل ناحیه زیر خط مستقیم $X = X_n$ روی صفحه مختصات R-X می شود. امپدانس دیده شده توسط رله ضمن شرایط پخش بار نرمال (سیستم از دو سوءتغذیه) متاسفانه در ناحیه عملکرد مشخصه رله راکتانسی قرار می گیرد(همانگونه که در شکل ۱۴-۶ نشان داده شده است). بنابراین یک رله راکتانسی ضمن پخش نرمال عمل خواهد کرد. آشکاراست که این موضوع غیر قابل قبول است، بنابراین رله راکتانسی نمی تواند براحتی برای حفاظت خط انتقال استفاده شود و نیازمند رله جلوگیری برای جلوگیری از عملکردش روی بار عادی است. در این قسمت ممکن است سوالی در ذهن خوانندگان بوجود بیاید :چرا باید به خاطر رله ای که حتی نمی تواند روی بار عادی مقاومت کند خود را به زحمت انداخت؟ پاسخ این سوال به اولویت عملکرد رله در برخورد با مقاومت خطا بر می گردد که در بخش ۴-۴-۶ مورد بررسی قرار گرفته شده است.



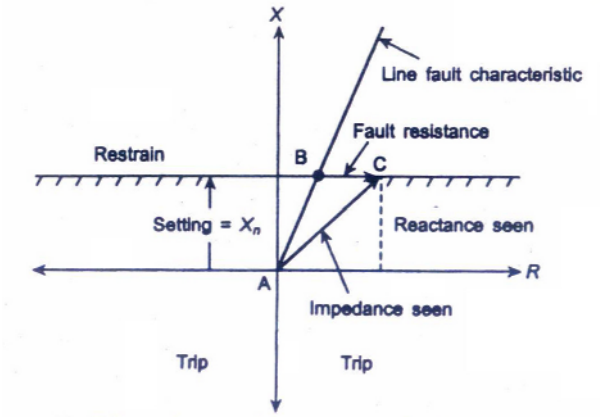
شکل ۱۴-۶ عملکرد رله راکتانسی تحت شرایط بار عادی

۴-۴-۶- اثر مقاومت آرک روی تشخیص رله راکتانسی

شکل ۱۵-۶ نشان می دهد که خط AB توسط یک رله راکتانسی محافظت می شود . اجازه دهید خطایی را در بخش انتهایی خط حفاظت شده، در نقطه B در نظر بگیریم که مقاومت آن برابر B-C است .

می بینید که فازور امپدانس ایجاد شده AC هنوز در ناحیه عملکرد باقی مانده است. بنابراین تشخیص رله راکتانسی بی تاثیر از حضور مقاومت آرک باقی می ماند (برد رله با وجود مقاومت آرک تغییری نمی کند). این

موضوع کاملا قابل پیش بینی است چرا که رله تنها قسمت موهومی نسبت فازورهای V و I را اندازه گیری می کند.

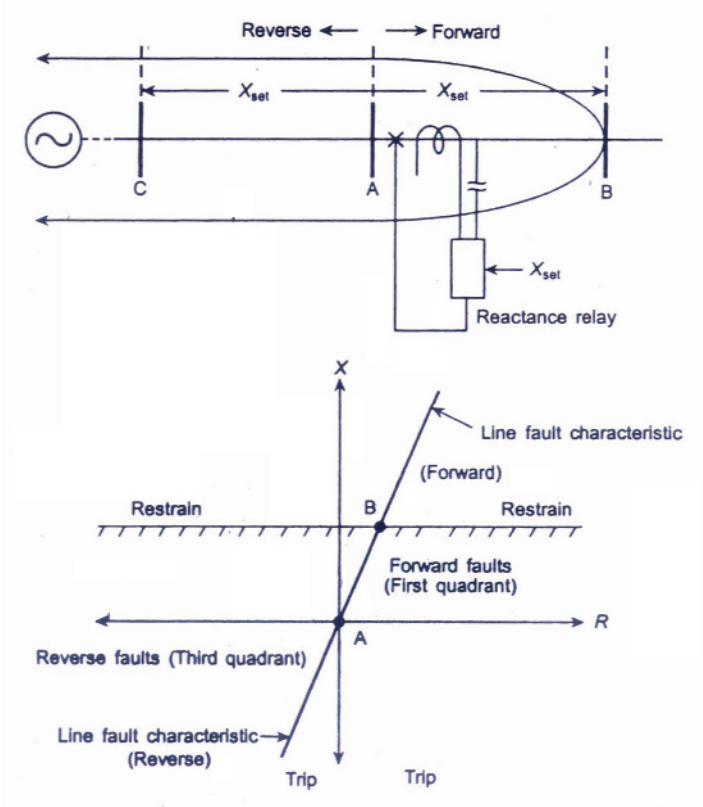


شکل ۱۵-۶ تاثیر مقاومت قوس روی برد رله راکتانسی

توانایی رله راکتانسی در پاسخ صحیح در حضور مقاومت خط ویژگی سودمندی است و با وجود عملکردهای نامطلوب ضمن پخش بارنرمال باعث شهرت این رله شده است. رله راکتانس کاربردهای وسیعی در مکان یابی های دقیق خطا در حضور مقاومت خطا دارد.

۵-۴-۶- ارائه ویژگی جهت یابی توسط رله راکتانسی

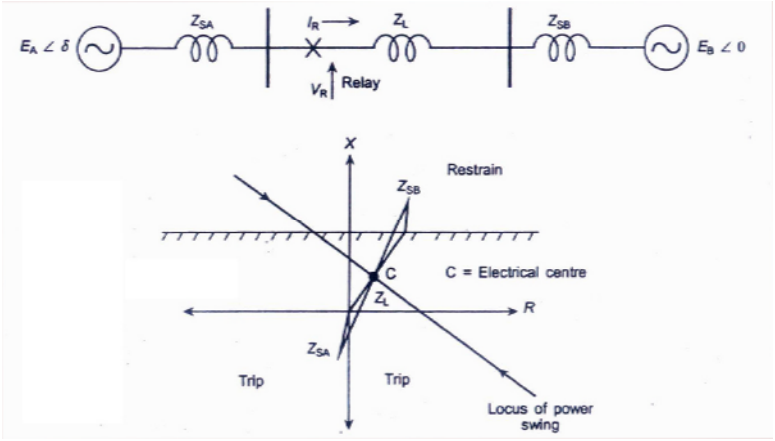
چنانچه قبلاً گفته شد، ربع اول خطاهای مستقیمی را نشان می دهد که در ربع سوم خطاهای معکوس هستند. زمانیکه مشخصه عملکرد رله راکتانسی نواحی هر دو ربع را اشغال میکند، رله ویژگی جهت یابی از خود نشان نمی دهد. بنابراین رله راکتانسی که برای حفاظت بخش AB خط در جهت مستقیم تنظیم شده،چنانچه در شکل ۱۶-۶ نشان داده شده در جهت معکوس نیز برای یک فاصله نا محدود پاسخ می دهد و عملکرد دارد، که این بازخصوصیت مطلوبی نیست. بنابر این باید از تلفیق رله راکتانس با یک رله جهت یاب یا رله دیستانس دیگری که دارای خصوصیت جهت یابی است استفاده کنید، مانند رله MHO (مهو).



شکل ۱۶-۶ خاصیت جهت یابی رله راکتانسی

۶-۴-۶- عملکرد رله راکتانسی ضمن نوسان قدرت

رله راکتانس ناحیه وسیعی را روی صفحه مختصات R-X اشغال میکندکه ضمن پخش بار نرمال هم عمل می کند. همانطور که در شکل ۱۷-۶ دیده می شود ضمن نوسان قدرت، نوک فازور امپدانس دیده شده به مرکز الکتریکی سیستم نزدیک می شود. حتی پیش از وقوع نوسان رله راکتانسی، در ناحیه trip یا عملکرد مشخصه قرار دارد. بنابراین رله راکتانس روی نوسان قدرت نیز عمل میکند،که این ویژگی مطلوبی نیست.



شکل ۱۷-۶ عملکرد رله راکتانسی بواسطه ی نوسان قدرت

۵-۶- رله مهو

۱-۵-۶- قانون Trip (عملکرد) برای رله مهو با استفاده از معادله عمومی گشتاور :

بار دیگر معادله گشتاور عمومی را در نظر بگیرید:

$$T = K_1 |I_R|^2 + K_2 |V_R|^2 + K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) + k_4$$

اگر $K_1 = 0$ و K_2 منفی باشد (ولتاژ، گشتاور نگهدارنده را تامین می کند) و K_3 مثبت (عنصر جهت یاب گشتاورعمل کننده را تولید می کند) و از K_4 در مقایسه با گشتاور عملکرد و گشتاور نگهدارنده صرف نظر شود، رله عمل می کند اگر :

$$K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau) > K_2 |V_R|^2$$

بنابراین رله می تواند بعنوان یک رله جهت دار با ولتاژ ثابت توصیف شود. معادله گشتاور می تواند به شکل زیر تغییر کند :

$$K_2 |V_R|^2 < K_3 |V_R||I_R| Cos(\theta - \tau)$$

یا

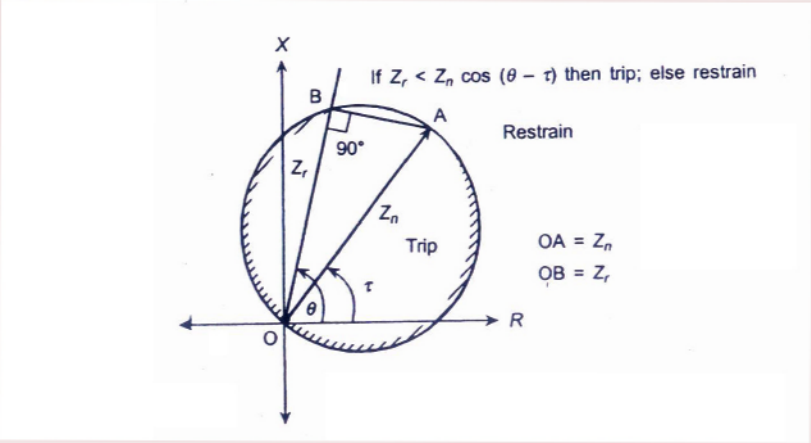
$$\frac{|V_R|}{|I_R|} < \frac{K_3}{K_2} Cos(\theta - \tau)$$

در اینجا $|Z_{seen}| = \frac{|V_R|}{|I_R|}$ و همچنین $\frac{K_3}{K_2} = Z_n$ قرار می دهیم (Z_n امپدانس تنظیمی).

حال قانون عملکرد رله را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$if\ |Z_{seen}| < |Z_n| Cos(\theta - \tau) then \Rightarrow trip$$
$$else \Rightarrow restra\,int$$

θ زاویه فاز بین ولتاژ و جریان تغذیه کننده رله است. مشخصه رله در شکل ۱۸-۶ نشان داده شده است.

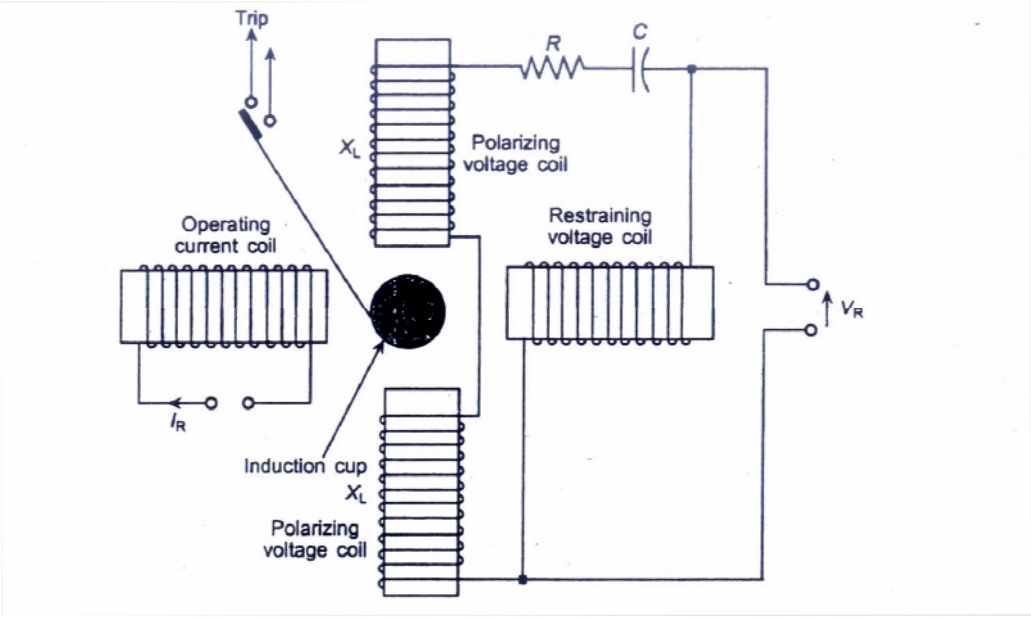


شکل ۱۸-۶ مشخصه رله مهو

۲-۵-۶- عملکرد رله مهو با استفاده از ساختار فنجان القایی :

شکل ۱۹-٦ یک ساختار فنجان القایی چهار قطب را نشان می دهد . برهم کنش شار ناشی از سیم پیچ ولتاژ عملگر با جریان القایی ناشی از سیم پیچ جریان، تولید گشتاور عملگر متناسب با $VICos(\theta - \tau)$ می کند. گشتاور نگهدارنده نیز به علت شارهای تولیدی سیم پیچ ولتاژ عملگر و سیم پیچ ولتاژ قطبیت تولید می شود. مقاومت R و خازن C در مدار سیم پیچ ولتاژ توانایی تنظیم MTA (زاویه گشتاور ماکزیمم) را روی هر مقدار دلخواهی فراهم می کند .

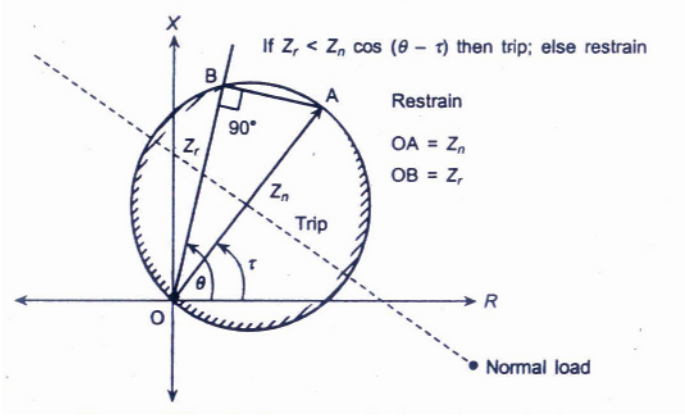
مزیت ساختار فنجان القایی چهار قطب نسبت به ساختار صفحه القایی ساده در حساسیت بالای آن است که ناشی از نسبت گشتاور به وزن زیاد این ساختار (ساختار فنجان القایی) است.



شکل ۱۹-۶ ایجاد رله مهو با استفاده از ساختار فنجان القایی

۳-۵-٦- عملکرد رله مهو ضمن پخش بار نرمال :

در شکل ۲۰-٦ می توان مشاهده کرد که امپدانس دیده شده توسط رله ضمن پخش بار نرمال (سیستم از دو سو تغذیه) بیرون از ناحیه Trip یا عملکرد مشخصه رله است. بنابراین رله ضمن شرایط بار عادی پایدار است.



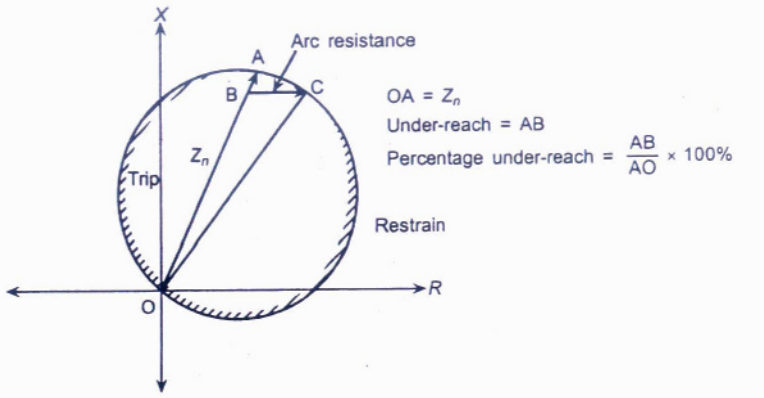
شکل ۲۰-۶ عملکرد رله مهو تحت بار

٤-۵-٦- اثر مقاومت آرک روی تشخیص رله مهو :

یک خطای آرک در نقطه B نزدیک انتهای بخش OA خط حفاظت شده همانند شکل ۲۱-٦ در نظر بگیرید و مقاومت خطا را BC قرار دهید . امپدانس دیده شده توسط رله با در نظر گرفتن مقاومت خطا درست روی لبه ی ناحیه Trip قرار می گیرد. هر خطا بعد از نقطه B موجب restrain شدن رله می گردد . بنابراین، عملاً تشخیص رله از OA تا OB پایین می آید .

کاهش برد مطلق برابر با AB است. درصد کاهش برد برابر است با:

$$\frac{AB}{OA} \times 100\%$$

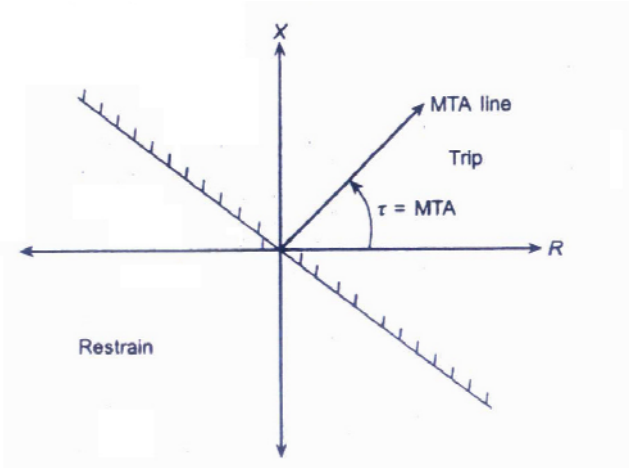


شکل ۲۱-۶ تاثیر مقاومت قوس روی برد رله مهو

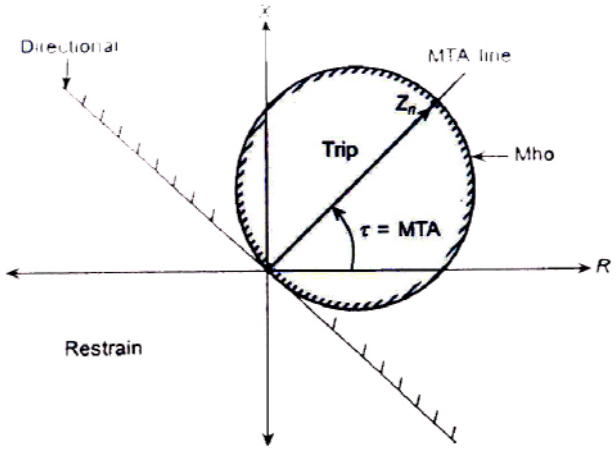
به خاطر آورید که رله امپدانس ساده نیز از کاهش برد ناشی از مقاومت خطا رنج می برد. اگر کاهش برد ناشی از این دو رله را در مقاومت خطای یکسان مقایسه کنیم می توان فهمید درصد کاهش برد رله مهو کمی بیشتر از رله امپدانس ساده است.

۵-۵- ٦- ارائه ویژگی جهت یابی توسط رله مهو :

شکل ۲۲-٦ مشخصه جهت یابی رله مهو را روی صفحه مشخصات R-X نشان میدهد که خط مستقیمی در سمت راست خط MTA بنظر می رسد. خط مستقیم همچنین می تواند دایره ای با شعاع بی نهایت در نظر گرفته شود . یک رله مهو ، یک رله جهت دار با ولتاژ محدود است. افزودن ولتاژ محدود به رله جهت دار موجب می شود که شعاع مقدار محدودی پیدا کند و به دایره مهو با قطری برابر Z_n (نشان داده شده در شکل ۲۳-٦) تبدیل شود. بنابراین رله مهو خصوصیت جهت یابی بسیار زیادی دارد که آنرا بسیار سودمند ساخته است.



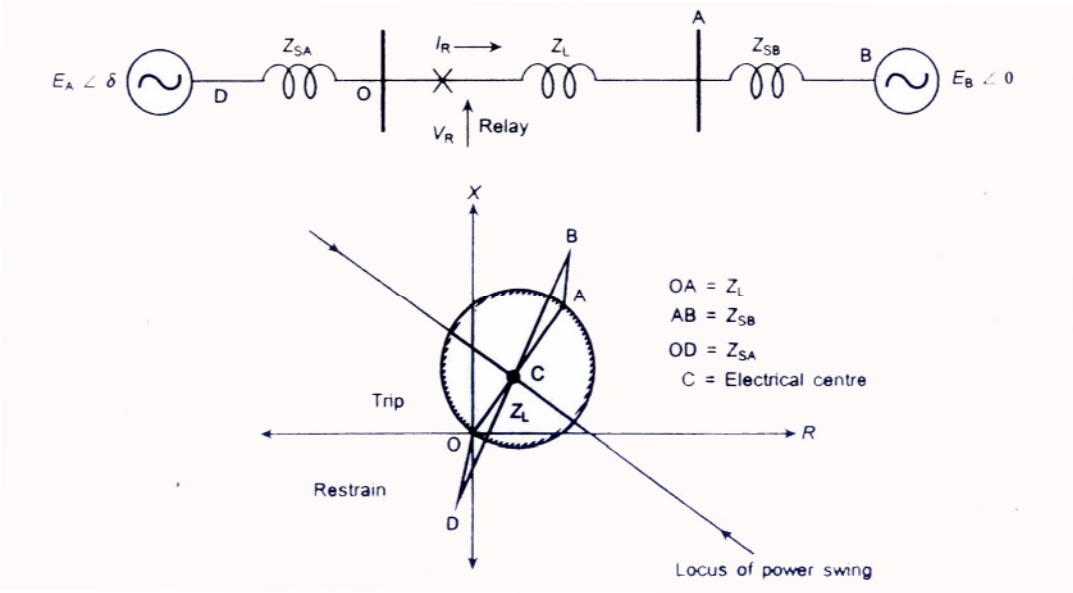
شکل ۲۲-۶ مشخصه رله جهت یاب در صفحه R-X



شکل ۲۳-۶ خاصیت جهت یابی رله مهو

٦-٥-٦-عملکرد رله مهو ضمن نوسان سیستم قدرت

رله مهو ناحیه خیلی کوچکتری را روی صفحه مختصات R_X اشغال می کند و تا اندازه ای در نوسان قدرت ایمنی بیشتری دارد . هر چند وقتیکه نوسان خیلی بزرگ است، امپدانس دیده شده وارد دایره مهو شده و رله عملکرد دارد. به شکل ٢٤-٦ مراجعه کنید. رله های مخصوصی معروف به blinders برای جلوگیری عملکرد رله ها در نوسان قدرت می توانند مورد استفاده قرار گیرند. نمودارهای ممانعت و عملکرد در شکل پیوست B مورد بحث قرار گرفته اند .



شکل ٢٤-٦ عملکرد رله مهو به واسطه ی نوسان قدرت

٦-٦-مقایسه ای بین رله های دیستانس :

چنانچه در جدول ٢-٦ نشان داده شده است از انجام مقایسه بین سه رله دیستانس نتایج سودمندی حاصل می شود. از جدول ٢-٦ می بینیم که امکان استفاده از رله راکتانسی برای حفاظت خط انتقال بر اساس اصل stand a lone (به تنهایی) وجود ندارد. بلکه مجبوریم از ترکیب آن با یک عنصر جهت دار یا مهو استفاده کنیم. رله مهو در اکثر موارد خیلی بهتر است. ویژگی برجسته رله راکتانسی، مصونیت آن در برابر مقاومت خطا است. اگر چه روی بار دچار عدم پایداری است و خاصیت جهتی ندارد. رله مهو برای خطوط بلند بسیار مناسب است زیرا این خطوط دائما در معرض نوسانات قدرت قرار دارند. این در حالیست که از رله راکتانسی به همراه رله مهو در خطوط کوتاه استفاده می شود.

	رله امپدانسی ساده (S.I.R)	رله راکتانسی	رله مهو
کمیت عملگر	جربان	جریان	عنصر جهت یاب با MTA = τ
کمیت نگهدارنده	ولتاژ	عنصر جهت یاب با MTA = 90	ولتاژ
خاصیت جهت یابی	ندارد	ندارد	دارد
عملکرد تحت بار	عدم عملکرد	عملکرد	عدم عملکرد
اثر خطای مقاومتی	کاهش برد	تأثیری بر برد ندارد	کاهش برد بیش از S.I.R
ناحیه پوشش داده **در** صفحه R-X	متوسط	بزرگ	بسیار کوچک
اثر نوسان قدرت	عملکرد بی مورد	عملکرد بی مورد	عملکرد بی مورد کمتر از S.I.R

۷-٦-حفاظت دیستانس یک خط سه فاز :

تا کنون خط انتقال را بطور ضمنی یک خط تکفاز فرض کردیم. اگر چه در عمل خط انتقال ذاتاً سه فاز است. یک خط سه فاز هم تابعی از خطاهای فاز است و هم تابعی از خطاهای زمین. سوالاتی که در این مورد پرسیده می شود عبارتند از :

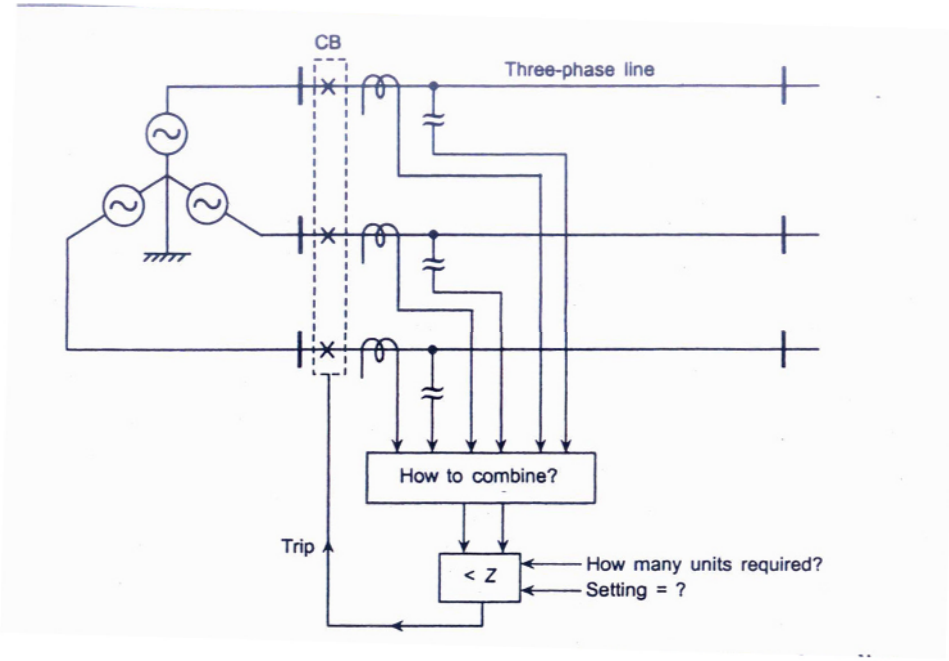
۱- چگونه حفاظت در برابر همه ۱۰ خطای شنت را فراهم آوریم ؟

۲- از چه راهی جریان ترانس جریان و ولتاژ ترانس ولتاژ بوجود می آیند ؟

۳- آیا یک واحد اندازه گیری دیستانس به تنهایی می تواند همه خطاهای فاز و زمین را تشخیص دهد؟ اگر نه، چند واحد اندازه گیری دیستانس نیازمند برای تشخیص همه ۱۰ خطای شنت هستند ؟

٤- تنظیم واحدهای اندازه گیری دیستانس چگونه خواهد بود ؟

٥- آیا باید امپدانس توالی مثبت را اندازه بگیریم یا امپدانس توالی منفی و یا صفر را (شکل ۲۵-٦ را ببینید).



شکل ۲۵-۶ ایجاد حفاظت دیستانس برای یک خط سه فاز

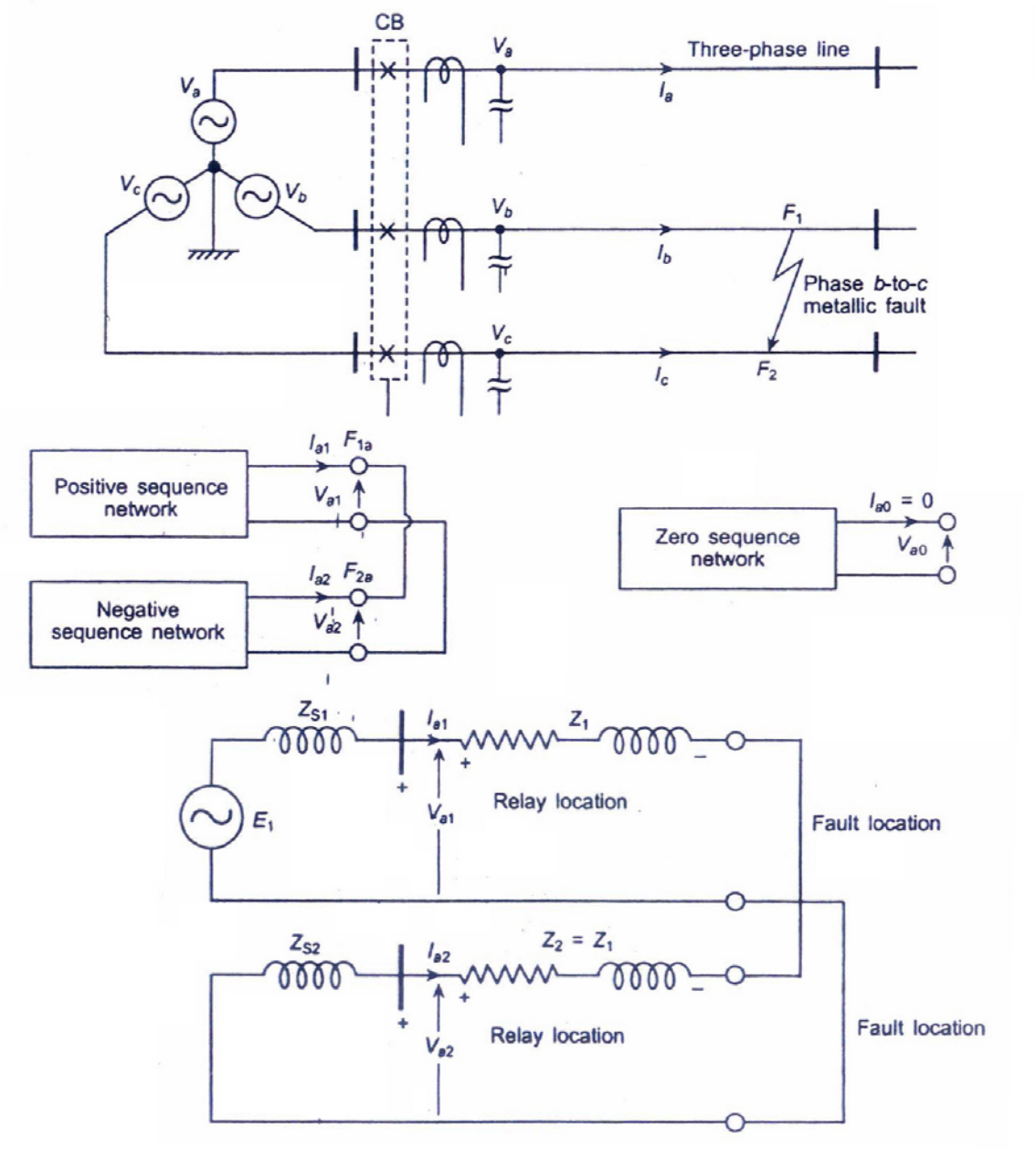
آنچه مشاهده می شود آنست که ما ملزم به فراهم کردن حفاظت جداگانه برای خطاهای فاز و زمین هستیم. خطاهای فاز به یک جفت از فازها که به یک واحد اندازه گیری دیستانس تنها مجهز هستند، وابسته است . بنابراین سه واحد از واحدهای اندازه گیری خطاهای فاز می تواند برای همه خطاهای هفت گانه فاز یعنی a-b ، a-b-g ، b-c ، b-c-g ، c-a ، c-a-g و a-b-c در نظر گرفته شود.

یک واحد اندازه گیری خطای دیستانس مجزا، برای هر سه خطا از خطاهای زمین در نظر گرفته می شود . بنابراین سه واحد اندازه گیری خطای زمین میتواند برای همه خطاهای زمین در نظر گرفته شود. پس یک مجموعه ٦ تایی از واحد های اندازه گیری برای حفاظت در برابر همه ۱۰ خطای شنت مورد نیاز است. جدول ٦-۳ ترکیبهای توالی موجود را در ولتاژ و جریان ضمن خطاهای مختلف را ارائه می کند که در آن می توان دید که ترکیب توالی مثبت تنها ترکیبی است که در همه خطاها حضور دارد. پس عاقلانه خواهد بود که امپدانس توالی مثبت بین خطا و محل قرارگیری رله را برای هر خطایی اندازه گیری کنیم.

خطا	توالی مثبت	توالی منفی	توالی صفر
L-G	دارد	دارد	دارد
L-L	دارد	دارد	ندارد
L-L-G	دارد	دارد	دارد
L-L-L	دارد	ندارد	ندارد

۱-۷-٦-خطاهای فاز

بگذارید یک خطای فاز B به C نشان داده شده در شکل ٦-٢٦ را در نظر بگیریم . چه ولتاژ و چه جریانی باید به یک واحد اندازه گیری دسیتانس اعمال شود تا امپدانس توالی مثبت بین محل قرارگیری رله و نقطه خطا اندازه گیری شود. این پرسش وقتی پاسخ داده می شود که ما این مسئله را به کمک ترکیبات متقارن تحلیل کنیم. یک خطای فاز به فاز می تواند با ترکیب موازی شبکه های توالی مثبت و منفی از دید نقطه محل خطا نشان داده شود. شبکه توالی صفر چنانچه در شکل ٦-٢٦ می بینید مدار باز باقی می ماند .



شکل ٦-٢٦ اتصال شبکه توالی فاز a برای خطای بین فاز b و c

با نوشتن KVL در حلقه ی شکل ۲۶-۶ خواهیم داشت:

$$V_{a1} + I_{a1}Z_1 + I_{a2}Z_1 - V_{a2} = 0$$

یا

$$V_{a1} - V_{a2} = (I_{a1} - I_{a2})Z_1$$

یا

$$Z_1 = \frac{V_{a1} - V_{a2}}{I_{a1} - I_{a2}}$$

بنابراین نسبت تفاضل توالی های مثبت و منفی ولتاژ و جریان مقدار مطلوب امپدانس توالی مثبت بین محل رله و محل خطا را نشان می دهد. هر چند که مولفه های توالی جریان و ولتاژ محل رله به راحتی در دسترس نیستند ولی در عوض ولتاژ و جریان خط معلوم هستند. حال می خواهیم ببینیم که آیا می توان با استفاده از ولتاژها و جریان های خط، مولفه های توالی مطلوب را بدست آورد یا خیر.

بنابراین می توان نوشت:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$
$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + aV_{a2}$$
$$V_c = V_{a0} + aV_{a1} + a^2 V_{a2}$$

که از آن نتیجه می شود:

$$\begin{aligned} V_b - V_c &= (a^2 - a)V_{a1} + (a - a^2)V_{a2} \\ &= (a^2 - a)V_{a1} - (a^2 - a)V_{a2} \\ &= (a^2 - a)(V_{a1} - V_{a2}) \end{aligned}$$
$$V_{a1} - V_{a2} = \frac{V_b - V_c}{a^2 - a}$$

و به طور مشابه می توان نشان داد که:

$$I_{a1} - I_{a2} = \frac{I_b - I_c}{a^2 - a}$$

بنابراین:

$$\frac{V_{a1} - V_{a2}}{I_{a1} - I_{a2}} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = Z_1$$

بنابراین یک واحد اندازه گیری دیستانس با ولتاژ $V_b - V_c = V_{bc}$ و جریان $I_b - I_c$ امپدانس توالی مثبت Z_1 تا محل خطا را بواسطه خطا بین فازهای c و b اندازه گیری خواهد کرد.

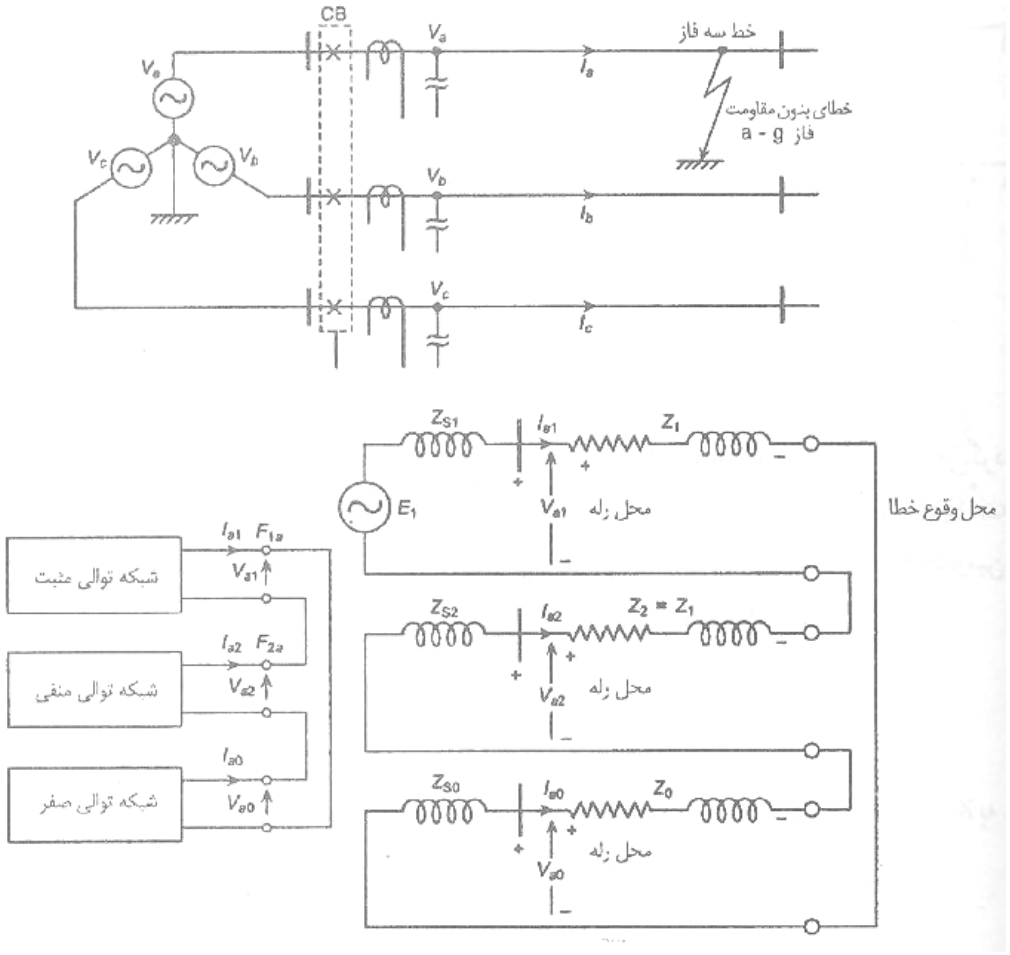
به طور مشابه به دو واحدهای دیگر ورودی های V_{ab} ، $I_a - I_b$ و $I_c - I_a$ ، V_{ca} برای تعیین خطاهای بین فاز a-b و c-a اعمال می گردد. واحدهای اندازه گیری دیستانس که برای خطاهای فاز a-b ، b-c ، c-a تدارک دیده شده اند بنام واحدهای خطای فازی معروف هستند.

۲-۷-۶-خطاهای زمین

یک خطای زمین را می توان بوسیله ترکیب سری شبکه های توالی مثبت و منفی و صفر مطابق شکل ۲۷-۶ نمایش داد.

با نوشتن KVL در حلقه تر کیب سری سه شبکه توالی خواهیم داشت.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = I_{a1}Z_1 + I_{a2}Z_1 + I_{a0}Z_0$$



شکل ۲۷-۶ اتصالات شبکه توالی فاز a برای خطای فاز a به زمین

از طرفی $V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = V_a$ است و با یکبار اضافه و کم نمودن $I_{a0}Z_1$ در طرف راست معادله خواهیم داشت:

$$V_a = I_{a1}Z_1 + I_{a2}Z_1 + I_{a0}Z_1 - I_{a0}Z_1 + I_{a0}Z_0$$

$$= (I_{a1} + I_{a2} + I_{a0})Z_1 + (Z_0 - Z_1)I_{a0}$$

$$= I_a Z_1 + (Z_0 - Z_1)I_{a0} \Rightarrow$$

$$V_a = (I_a + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_{a0})Z_1$$

هرچند:

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

$$I_a + I_b + I_c = I_{res} \Rightarrow$$

$$I_{a0} = \frac{I_{res}}{3}$$

$$V_a = \left[I_a + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} I_{res} \right] Z_1$$

در نهایت امپدانس مطلوب از نسبت زیر بدست می آید :

$$Z_1 = \frac{V_a}{I_a + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} I_{res}}$$

در معادله بالا Z_1 در هر دو طرف ظاهر شده است و رابطه کمی پیچیده به نظر می آید. هر چند در عمل بین Z_1 و Z_0 رابطه معینی وجود دارد، ولی برای یک خط انتقال سه فاز، Z_0 دو الی سه برابر Z_1 است. رابطه دقیق به شکل هندسی هادیهای فاز و مکان هادی زمین وابسته است. فرض کنیم Z_0=۳Z_1 پس معادله بالا بصورت زیر ساده می شود:

$$Z = \frac{V_a}{I_a + \frac{2}{3} I_{res}} = \frac{V_a}{I_a + KI_{res}} \Rightarrow K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$$

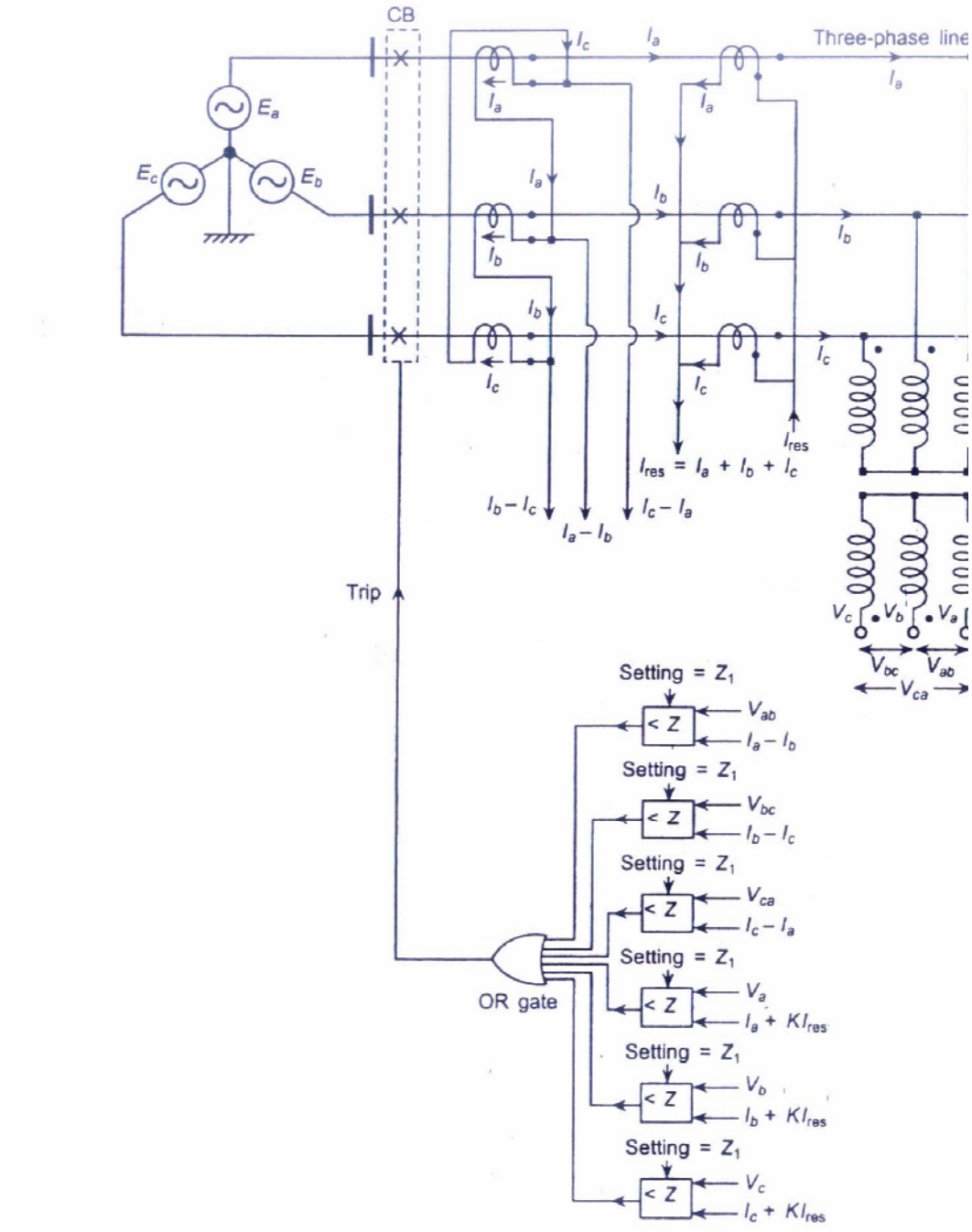
بنابراین جریان فاز باید بوسیله کسری از جریان باقیمانده جبران شود. ضریب K بعنوان ضریب جبران گر جریان باقیمانده یا ضریب جریان جبران توالی صفرمعروف است. بنابراین سه واحد از واحدهای اندازه گیری دیستانس با ورودی های:

$$[V_a + (I_a + KI_{res})], [V_b, (I_b + KI_{res})], [V_c (I_c + KI_{res})]$$

برای همه سه خطای تکفاز به زمین مورد نیاز است . این واحدها ، واحدهای خطای فاز نامیده می شود.

3-٧-٦-حفاظت کامل یک خط سه فاز :

میتوان نشان داد که واحدهای خطای فاز همچنین برای خطاهای دو فاز به زمین مشابه بکار می رود. در مورد یک خطای سه فاز متعادل همه واحدهای خطای فاز پاسخگو هستند. اثبات این موضوع به خواننده واگذار می شود. بنابراین در همه شش واحد اندازه گیری دیستانس که روی Z_1 تنظیم شده اند، امپدانس توالی مثبت آن بخش از خط برای حفاظت کامل در برابر همه ۱۰ خطای شنت کافیست. چنانچه در شکل ۲۸-٦ می بینید .



شکل ۲۸-۶ حفاظت کامل یک خط سه فاز

۸-٦-علل عدم تشخیص رله دیستانس

در حالت ایده آل علاقه مندیم که تشخیص رله دیستانس روی یک بخش، ۱۰۰٪ تنظیم شود . اما در عمل دقیقاً به تشخیص ۱۰۰٪ نمی رسیم و همواره مقداری عدم اطمینان و ابهام درباره تشخیص واقعی وجود دارد . تعدادی از عوامل مهم برای این ابهام در تشخیص عبارتند :

- عدم صحت در نسبت تبدیل ترانسهای جریان و ولتاژ
- ابهام درمورد پارامترهای خط (پارامترهای خط بندرت اندازه گیری می شود ، آنها از روی اطلاعات خط محاسبه می شوند)
- تغییر پارامترهای خط با شرایط محیطی
- DC offset در جریان خطا
- پاسخ گذارای ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی (CVT)

از میان این عوامل DC offset و پاسخ گذرای CVT منجر به افزایش برد می شوند. بقیه عوامل ممکن است در هر سو ایجاد خطا کنند. بنابراین همیشه امکان افزایش برد وجود دارد. اگر تشخیص رله دیستانس روی۱۰۰٪تنظیم شود آنگاه افزایش برد می تواند منجر به از دست رفتن تمایز با حفاظت دیستانس بخش بعد شود . که از دست رفتن این تمایز در مورد خطوط EHV مجاز نیست. بنابراین در عمل تشخیص حفاظت دیستانس را روی حدود ۸۰٪ تا ۹۰٪ از طول خط تنظیم می کنند . ۱۰ تا ۲۰ درصد از خط بدون حفاظت اصلی باقی می ماند . بنابراین یک طرح جامع از حفاظت دیستانس به به منظور ایجاد حفاظت اصلی بخشی از خط با در نظر گرفتن پشتیبانی برای قسمت بعد (بقیه خط و خط بعدی) توسعه می یابد که در بخش ۹-٦ مورد بحث قرار گرفته است.

۹-٦-حفاظت دیستانس سه مرحله ای

۱-۹-٦-مرحله اول : همانگونه که در بخش ۸-٦ بحث شده عاقلانه نیست که تشخیص حفاظت دیستانس را روی ۱۰۰٪ تنظیم کنیم. بنابراین مرحله اول حفاظت دیستانس تنظیم کردن تا حدود۸۰٪ تا ۹۰٪ طول خط مورد حفاظت رله است . این حفاظت آنی است . بعبارت دیگر هیچ تاخیر زمانی عمدی در کار نیست .

۲-۹-٦-مرحله دوم : این مرحله نیازمند مهیا کردن حفاظت اصلی به ۱۰ تا ۲۰ درصد باقیمانده خط است که در مرحله اول پوشش داده نشده است. بعلاوه تنظیم شدن رله برای پوشش ۵۰٪ از بخش بعدی خط. انگیزه و دلیل پشت این تشخیص توسعه یافته عبارتست از :

۱- باید تعدادی پشتیبانی برای بخش بعدی شامل باس، مهیا شود .

۲- هنگام وقوع بیشترین کاهش برد، باید توانایی پوشش دادن خطاهای باس ، روی باس بین دو خط انتقال را داشته باشد. زمان عملکرد این مرحله باید برای ایجاد تمایز نسبت به مرحله اول تاخیر داشته باشد. بنابراین :

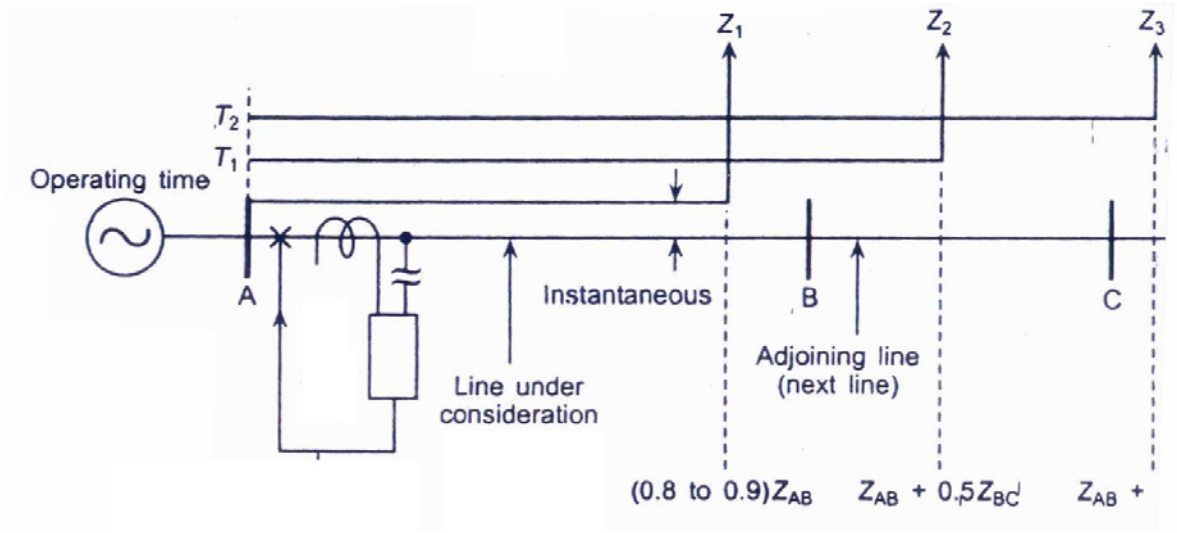
مدت زمان تمایز + زمان عملکرد مرحله اول = زمان عملکرد مرحله دوم

که مدت زمان تمایز برابر است با:

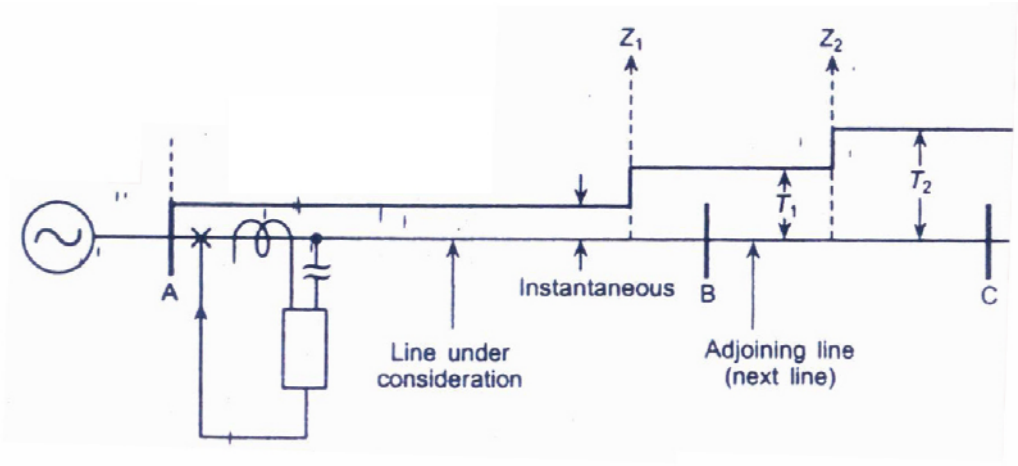
زمان تشخیص رله و دریافت فرمان قطع توسط بریکر + زمان عملکرد بریکر = مدت زمان تمایز

وقتیکه بیشتر از یک خط متصل بهم داریم، مرحله دوم (ناحیه ی دوم) باید تا ۵۰٪ کوتاهترین خط متصل بهم توسعه داده شود. اگر تشخیص مرحله دوم را تا ۵۰٪ از طول بلندترین خط متصل تعیین کنیم، همانطور که در شکل d ۲۹-٦ نشان داده شده است. آنگاه در مرحله دوم در کوتاهترین خط متصل قدری عدم تمایز بوجود می آید. (شکل d ۲۹-٦)

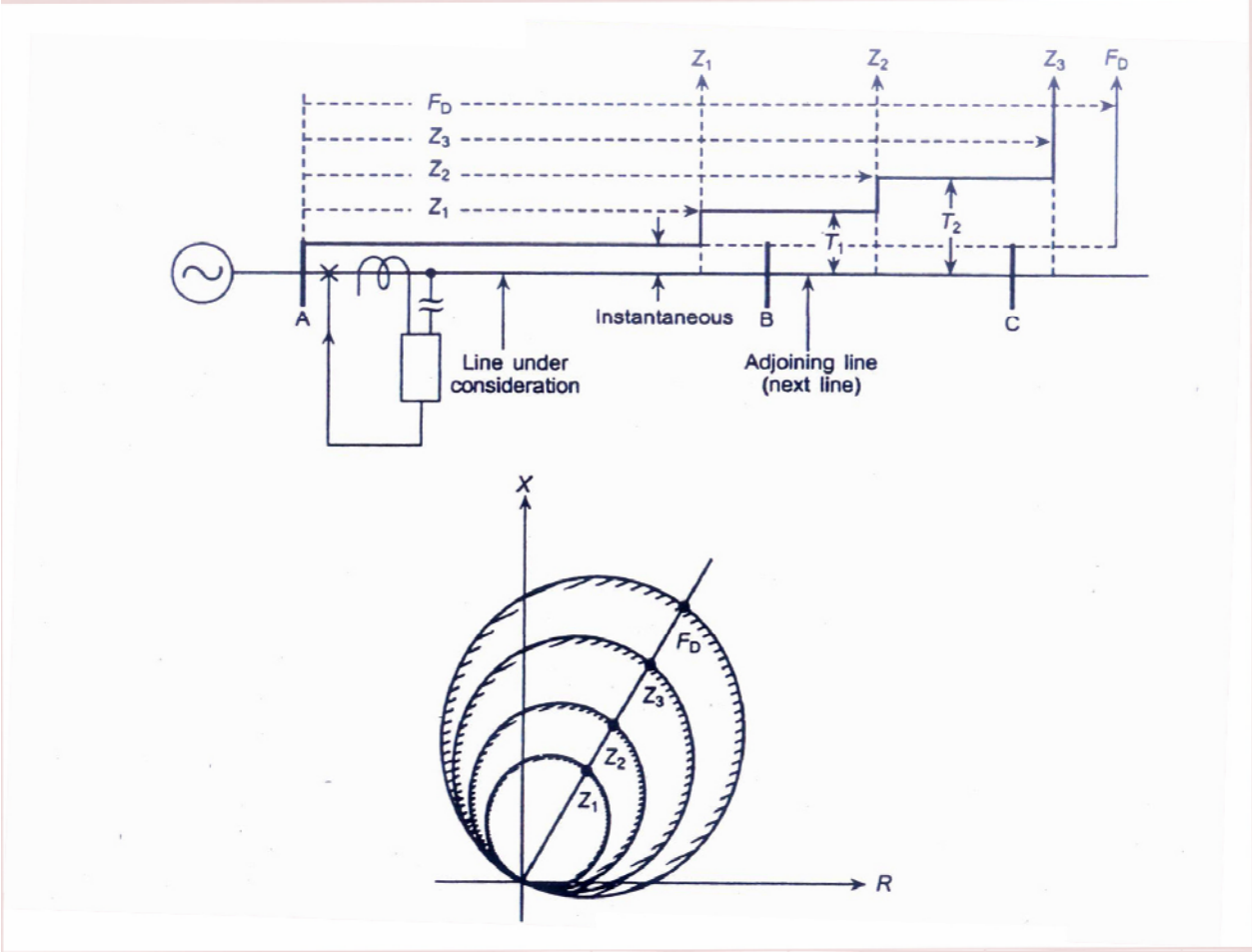
۳-۹-٦-مرحله سوم : مرحله سوم به منظور ایجاد یک پشتیبانی کامل از بخش متصل (خط مجاور) است که علاوه بر تحت نظارت قراردادن قسمت مورد نظر خط، ۱۰۰٪ از تشخیص بخش بعدی خط را هم پوشش می دهد . انگیزه پشت این توسعه تشخیص رله، ارائه پشتیبانی کامل به بخش بعدی خط با وجود ماکزیمم کاهش برد مرحله سوم است. حفاظت سه مرحله ای دیستانس در شکلهای ۲۹-٦ نشان داده شده است. دقت کنید در شکل c ۲۹-٦ تشخیص یک واحد اندازه گیری دیستانس اضافه بعد از تشخیص ناحیه سوم وجود دارد . زمان عملکرد این واحد آنی است . این واحد بعنوان تشخیص دهنده خطا یا واحد شروع کننده شناخته شده است .



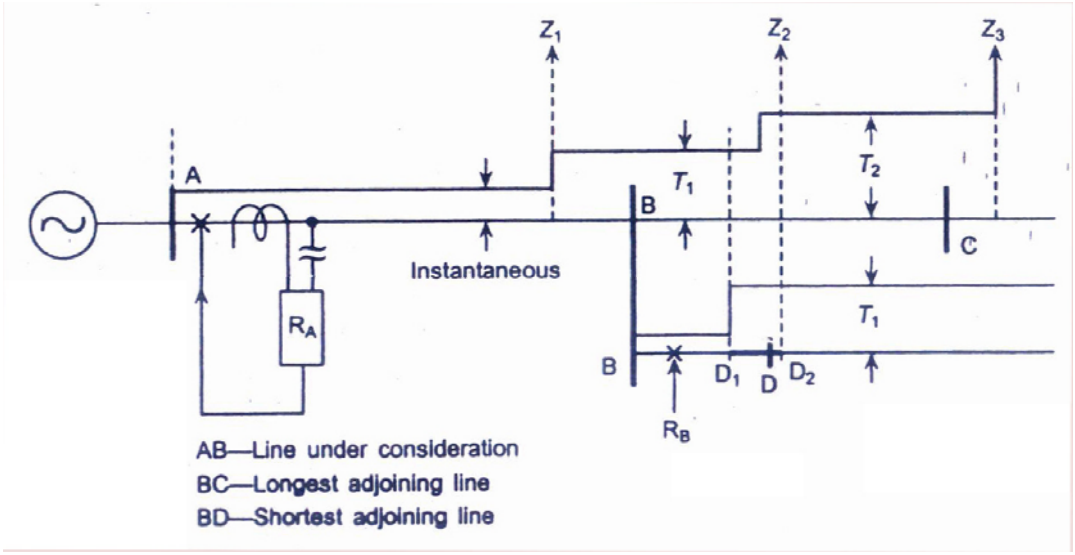
شکل ۲۹a-۶ حفاظت دیستانس سه ناحیه ای



شکل ۲۹a-۶ حفاظت دیستانس سه ناحیه ای



شکل ۲۹c-۶ حفاظت دیستانس سه ناحیه ای با استفاده از رله مهو



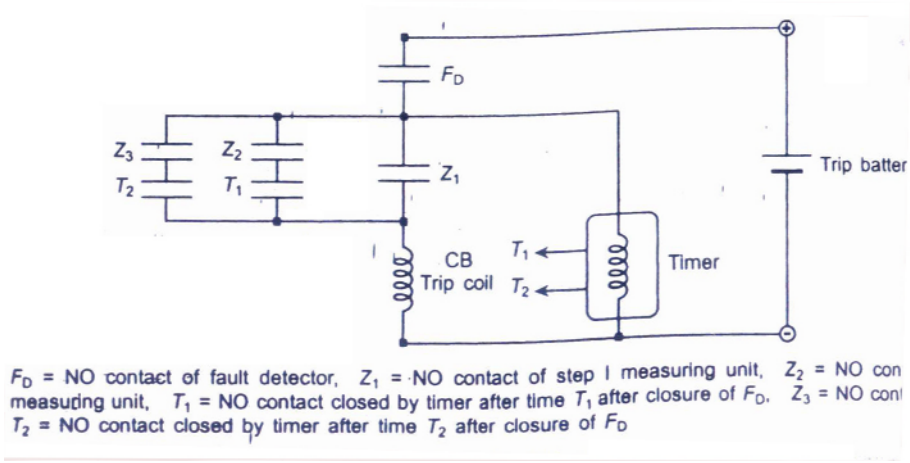
شکل ۲۹d-۶ از دست رفتن قابلیت انتخاب ناحیه دوم رله A و رله B

ملاحظات	زمان عملکرد	برد	هدف	
اجتناب از تداخل با حفاظت ناحیه ی بعد بواسطه ماکزیمم افزایش برد	T_{inst} =آنی یا بدون وقفه داخلی	۸۰٪ تا ۹۰٪ طول خط	حفاظت اصلی	ناحیه اول
ایجاد حفاظت اصلی برای بخش باقیمانده خط در ناحیه اول و حفاظت پشتیبان برای خط بعدی و باسبار. در این مرحله خطوط کوتاه مجاور مدنظر هستند زیرا خطوط بلند باعث از بین رفتن هماهنگی می شوند.	$T_1 = T_{inst}$ + فاصله زمانی	۱۰۰٪ از طول خط تحت نظارت + ۵۰٪ از کوتاهترین خط مجاور	حفاظت اصلی برای ۲۰٪ تا ۱۰٪ باقیمانده خط	ناحیه دوم
ایجاد حفاظت پشتیبان کامل برای خط مجاور در حالت وقوع ماکزیمم کاهش برد. دراین حالت خطوط مجاور بلند مد نظر هستند زیرا اگر خطوط کوتاه در نظر گرفته شود آنگاه برای خطوط بلند مجاور نمی توانحفاظت پشتیبان کامل را ایجاد نمود	$T_1 = T_{inst}$ + فاصله زمانی	۱۰۰٪ از طول خط تحت نظارت + ۱۰۰٪ بزرگترین خط مجاور + ۱۰٪ تا ۲۰٪ خط بعدی	حفاظت پشتیبان	ناحیه سوم

جدول ۳-۶ تئوری حفاظت دیستانس سه ناحیه ای

۱۰-٦- شکل تیغه کنتاکت قطع برای حفاظت دیستانس سه مرحله ای :

مدار تیغه کنتاکت قطع که حفاظت سه مرحله ای دیستانس را نشان می دهد در شکل ۳۰-٦ نشان داده شده است .



شکل ۳۰-۶ مدار فرمان قطع طرح حفاظت دیستانس سه ناحیه ای

تشخیص دهنده خطا در مواردی که وجود خطا را تشخیص می دهد تایمر را به راه می اندازد و تایمر پس از فعال شدن ۲ خروجی صادر می کند. خروجی اول پس از عبور از زمان T_1 و دومی پس از زمان T_2 صادر می شوند. هر دو خروجی ها به منظور بستن تیغه کنتاکت Normally Open هستند . در موردی که خطا در مرحله اول حفاظت دیستانس است، سیم پیچ قطع از طریق تیغه های Z_1 و F_D فعال می شود. بسته به اینکه خطا در مرحله دوم یا سوم باشد سیم پیچ قطع از طریق ترکیبات سری T_1,Z_2 و یا T_2,Z_3 فعال می شود.

۱۱-٦-حفاظت سه مرحله ای خط سه فاز در برابر همه ۱۰ خطای شنت :

قبلاً دیدیم که سه واحد از واحدهای اندازه گیری خطاهای فاز، که توسط ولتاژها و جریانهای دلتا تغذیه می شوند را تحت کنترل دارند و سه واحد دیگر از واحدهای اندازه گیری خطاهای زمین را که توسط ولتاژها و جریانهای فاز جبران شده توسط جریان باقیمانده (جریان مولفه صفر) تغذیه می شوند، کنترل می کنند. بنابراین ٦ واحد برای کنترل خطاها نیاز داریم . تنظیم هر واحد اندازه گیری بر اساس امپدانس توالی مثبت خط است. اکنون بمنظور ایجاد سه ناحیه، ۱۸=٦×۳ واحد اندازه گیری نیاز داریم که پر هزینه است. بنابراین شکلهایی که در تعداد واحدهای اندازه گیری صرفه جویی می کند مطرح می شود. یک ایده معمولی که به Switch Distance Scheme (طرح دیستانس سوئیچینگ) معروف است تنها از سه واحد اندازه گیری استفاده می کند. این واحدها به کمک یک واحد تشخیص دهنده خطا، ورودی ها را سوئیچ می کند. این تعداد

واحدهای اندازه گیری را از ۱۸ واحد به ۹=۳×۳ واحد کاهش می دهد. خوانندگان علاقه مند باید به مقالات در مورد رله گذاری حفاظتی برای بیشتر آموختن این اشکال مراجعه کنند.

۱۲-٦-امپدانس دیده شده از طرف رله

تا کنون ما فرض کردیم که نسبت دور ترانس های ولتاژ و جریان ۱:۱ است. هر چند در عمل این نسبتها بزرگتر از واحد هستند. در چنین شرایطی امپدانس دیده شده از طرف رله چقدر است؟ بعبارت دیگر از طرف ثانویه ترانس های ولتاژ و جریان چقدر است؟

با توجه به شکل ۳۱-٦ داریم :

$$V_R = \frac{V_L}{PTR}, I_R = \frac{I_L}{CTR}$$

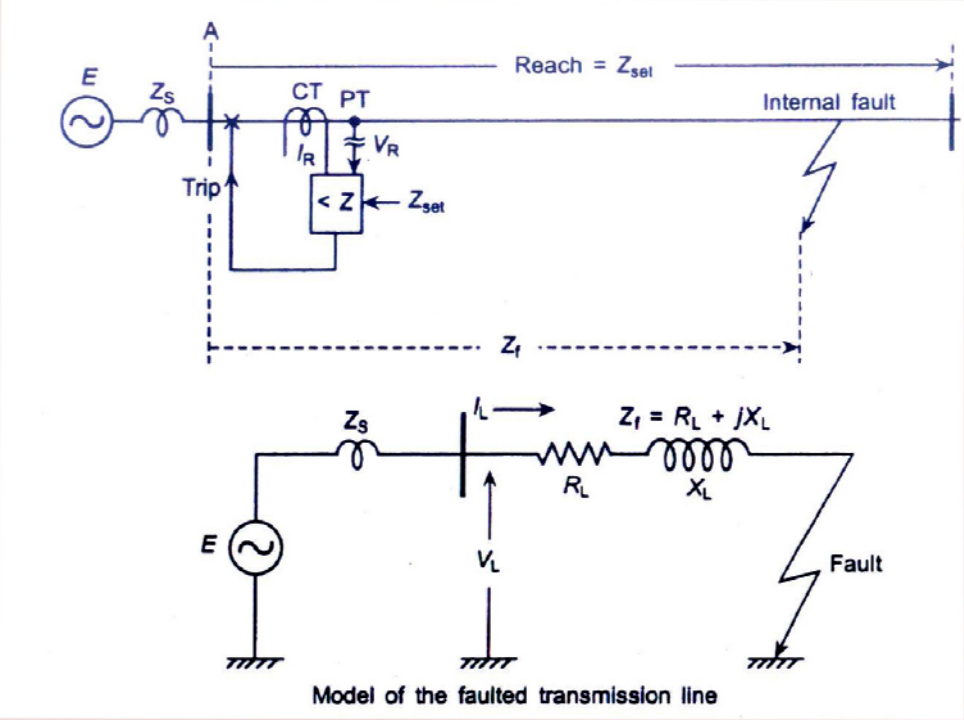
$$Z_{relay} = \frac{V_R}{I_R} = \left[\frac{V_L}{I_L}\right]\left[\frac{CTR}{PTR}\right]$$

که CTR نسبت تبدیل ترانس جریان و PTR نسبت تبدیل ترانس ولتاژ است.

اما امپدانس حقیقی طرف خط برابر $Z_f = \frac{V_L}{I_L}$ است، بنابراین:

$$Z_{relay} = Z_f \frac{CTR}{PTR}$$

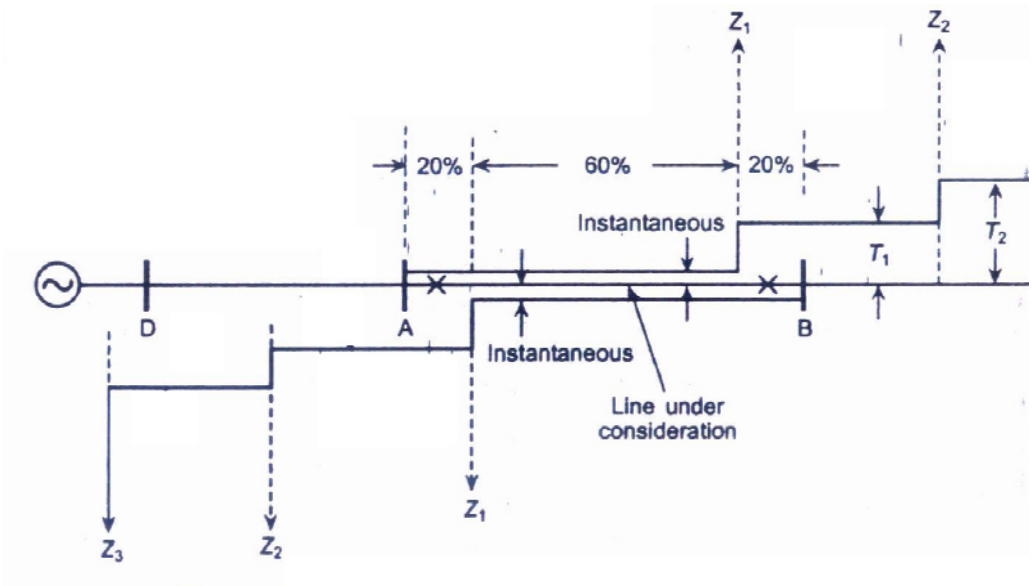
در اینجا Z_f امپدانس خطای دیده شده از طرف خط است.



شکل ۳۱-۶ امپدانس دیده شده در سمت رله

۱۳-٦-حفاظت سه مرحله ای خط از دو سو تغذیه

شکل ۳۲-٦ یک خط از دو سو تغذیه AB را نشان می دهد که در هر دو سو منابع وجود دارند. بنابراین از هر دو سو تغذیه خطای قدرت وجود دارد. در اینجا، مدار شکلهای دیستانس سه مرحله ای باید در هر دو انتهای خط استفاده شود. منحنی های تشخیص و زمان عملکرد برای شکلهای دیستانس سه مرحله ای در هر دو انتها، در شکل ۳۲-٦ نشان داده شده است .



شکل ۳۲-۶ خطی که ۶۰٪ از ان دارای حفاظت دیستانس با سرعت بالا است.

براحتی دیده می شود که تنها ٦۰٪ از خط حفاظت دیستانس پر سرعت دریافت می کند، ٤۰٪ باقیمانده طول خط به مرحله دوم که یک تاخیر زمانی دارد واگذار می شود که مشخصاً شرایط خوبی نیست و نیازمند بهبود بخشیدن زمان عملکرد برای ٤۰٪ باقیمانده خط هستیم .

فرض می کنیم یک خطا در۲۰٪ انتهای خط اتفاق می افتد. این خطا بدون هیچ ابهامی درون ناحیه اول رله های دیستانس واقع در نزدیکترین انتها می افتد. همان خطا وقتیکه از انتهای دیگر دیده می شود ممکن است به خاطر عوامل نامعینی در طرف دیگر باس دیده شود. اگر بتوان به گونه ای اطلاعات خطا را به طرف دیگر خط منتقل نمود، نیازی به سپری شدن زمان T_1 ناحیه دوم طرح رله دیستانس نمی باشد.

این اصل موجبات استفاده از اشکال دیستانس carrier – aided یا سیگنال حامل را که در بخش ۷ مورد بحث قرار گرفته، فراهم می کند.