کلیات

سیستم‌های قدرت وظیفه تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز برای مصرف‌کننده‌های الکتریکی را به عهده دارند. این سیستم‌ها، همانند بقیه سیستم‌های مهندسی باید به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن اقتصادی بودن از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشند. بالا بودن قابلیت اطمینان یک سیستم، بدین معنا نیست که در آن هیچ گونه ایرادی به وجود نخواهد آمد بلکه همواره احتمال وقوع حالت‌های ناخواسته و غیر عادی که موجب اختلال در عملکرد سیستم می‌شوند، وجود دارد. در سیستم‌های قدرت نیز حالت‌های بسیاری وجود دارد که می‌تواند باعث قطع تغذیه مصرف‌کننده‌ها، آسیب رسیدن به اجزاء سیستم، آسیب رسیدن به افراد و... شود.

به طور کلی هر حالت غیر عادی که در عملکرد سیستم به وجود می‌آید، خطا نامیده می‌شود. از این حالت‌های غیر عادی می‌توان به وقوع اتصال کوتاه، افزایش و یا کاهش بیش از حد ولتاژ، افزایش و یا کاهش بیش از حد فرکانس، افزایش حرارت تجهیزات در اثر توان عبوری بیش از حد از آن‌ها یا اضافه‌بار، از سنکرون خارج شدن ژنراتورها و... اشاره کرد. اتصال کوتاه‌ها از مهمترین و پراحتمال‌ترین خطاهایی هستند که در یک شبکه به وجود می‌آید. این خطاها ممکن است بر اثر برخورد یک یا دو فاز با زمین، اتصال دو یا سه فاز به یکدیگر و... به وجود آیند که در این حالت جریان زیادی در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر جریان عادی، از شبکه عبور می‌کند. عبور این جریان می‌تواند اثرات مختلف و زیان‌باری روی شبکه داشته باشد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اثرات حرارتی روی تجهیزات اشاره کرد که باعث سوختن و آسیب دیدن عایق آن‌ها می‌شود. این امر ممکن است در زمانی در حدود چند ثانیه صورت گیرد. از این رو رفع خطا در یک سیستم باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن صورت گیرد.

برای تشخیص حالت‌های غیرعادی در یک شبکه و ایزوله کردن بخش معیوب از سایر بخش‌ها از سیستم حفاظت استفاده می‌شود. در اغلب موارد خطاهای به وجود آمده در سیستم قدرت، باعث تغییرات ناخواسته و شدید در اندازه ولتاژ یا جریان می‌شوند. از این رو تقریبا در تمامی خطاها با اندازه‌گیری میزان جریان و ولتاژ، می‌توان وقوع خطا را تشخیص داد. در سیستم‌های حفاظت و در مرحله اول با استفاده از ترانس‌های ولتاژ و جریان، اندازه ولتاژ و جریان کاهش پیدا کرده تا به میزان قابل استفاده برای تجهیزات سیستم حفاظت برسد.

ترانس‌ها یا مبدل‌های جریان، برای کاهش میزان جریان اعمالی به رله‌ها و نیز ایزوله کردن مدارهای قدرت و حفاظت از یکدیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مبدل‌ها از یک سیم‌پیچی به عنوان سیم‌پیچی ثانویه تشکیل شده‌اند که کابل یا شمش حامل جریان را در بر می‌گیرد. در واقع شمش یا کابل نقش سیم‌پیچی اولیه ترانس را دارا می‌باشد. جریان نامی اولیه این ترانس‌ها معمولا شامل مقادیر استانداردی است که با توجه به مشخصات شبکه و جریان عبوری از آن انتخاب می‌شود. در مورد سیم‌پیچ ثانویه نیز میزان جریان نامی آن‌ها معمولا ۱ یا ۵ آمپر است که این مقادیر نیز استاندارد شده هستند.

توان ترانسفورمر جریان (یا ولت آمپر) معمولاً براساس میزان قدرت مورد نیاز رله‌های حفاظتی و مقاومت سیم‌های رابط در طول مسیر و جریان ثانویه ترانسفورمر جریان محاسبه می‌شود. به جز نسبت تبدیل و ولت آمپر در ترانسفورمرهای جریان دو پارامتر دیگر نیز حائز اهمیت هستند:

۱- Accuracy Class یا کلاس دقت: این مشخصه معمولاً با ارقام 5P یا 10P مشخص می‌شوند و میزان خطای ترانسفورمرجریان رانشان می‌دهد.

۲- پارامتر دوم تحت عنوان Acuracy Limit Factor یا ALF بیان می شود. این پارامتر در واقع نسبت جریان اولیه به جریان اسمی اولیه ترانسفورمر جریان بوده که در این محدوده جریانی، خطای اندازه‌گیری جریان در ثانویه کمتر از میزان تعریف شده یعنی ۵٪ برای کلاس 5P و ۱۰٪ برای کلاس 10 P تضمین شده است.

$$ALF = \frac{Ip_i}{Is_n}$$

علاوه بر این میزان خطای جریان و زاویه جابجائی فاز در جریان اسمی ترانسفورمر جریان نیز براساس جدول زیر تعیین می‌شوند

Accuracy Class	Rated Primary Current	Current Error (%)	Phase Displacement Error
0.2	5 20 100 120	0.75 0.35 0.2 0.2	30 15 10 10
0.5	5 20 100 120	1.5 0.75 0.5 0.5	90 45 30 30
1	5 20 100 120	3 1.5 1 1	180 90 60 60
3	50 120	3 3	No Limit
5	50 120	5 5	No limit

یک مثال: یک ترانسفورمر جریان با مشخصات5P10 و 15VA و 100/1A در اختیار است. حداکثر خطای جریان ثانویه چند آمپر می‌تواند باشد؟

$Ip_i = 100A$ جریان اسمی اولیه

$Is_n = 1\ A$ جریان اسمی ثانویه

POWER = 15VA
ACCURACY CLASS = 5P
ALF=10

در این ترانسفورمر براساس جدول حداکثر خطای جریان در شرایط اسمی ۱٪ است پس حداکثر خطای ثانویه در جریان اسمی

$$\text{حداکثر خطا} = 1A \times 1\% = \pm 0.01A$$

و براساس تعریف حداکثر خطای ثانویه در ۱۰ برابر جریان اسمی ۵٪ است.

$$\text{حداکثر نیم آمپر} \quad 1A \times 10 \times 5\% = \pm 0.5A$$

ترانس‌ها یا مبدل‌های ولتاژ، برای کاهش میزان ولتاژ اعمالی به رله‌ها و نیز ایزوله کردن مدارهای قدرت و کنترل از یکدیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختمان و مشخصات فنی این ترانس‌ها با ترانس‌های

قدرت و تئوری آن‌ها هماهنگی داشته و در واقع یک سری ترانس با امپدانس ورودی بالا هستند به گونه‌ای که از نظر مداری، مدارباز یا Open Circuit در نظر گرفته می‌شوند. این امر باعث می‌شود تا نصب ترانس ولتاژ، تأثیر چندانی روی مدارهای قدرت نداشته باشد.

در ساختمان این ترانس‌ها از یک سیم‌پیچی به عنوان اولیه و یک یا چند سیم‌پیچی به عنوان ثانویه استفاده شده است. ولتاژ نامی سیم‌پیچی اولیه معمولا دارای مقادیر استاندارد شده‌ای است که بر اساس ولتاژ شبکه انتخاب می‌شود. در مورد سم‌پیچی‌های ثانویه نیز بر طبق استاندارد معمولا ولتاژ نامی برابر ۱۰۰ یا ۱۱۰ ولت برای ولتاژهای بین دو فاز است.

نظر به اینکه ولتاژ شبکه ممکن است دستخوش تغییراتی شود (مخصوصاً در موارد اتصال کوتاه در شبکه) ترانسفورمر ولتاژ باید قادر به تحمل ضریبی از ولتاژ اولیه اسمی خود برای یک پریود زمانی معین باشد. این ضریب که Rated Voltage Factor نامیده می‌شود تابع شرایط و نحوه اتصال زمین شبکه و همچنین نحوه اتصال اولیه ترانسفورمر ولتاژ به شبکه است و براساس استاندارد مطابق این جدول محاسبه می‌شود.

Rated Voltage Factor	Rated Time	Primary Winding Connection Method	Network Earthing System
1.2	Continuous	Phase To Phase	Any
1.2	Continuous	Between The Neutral Point OF A Star Transformer And Earth	Any
1.2 1.5	Continuous 30 S	Phase To Earth	Direct Earthed Neutral
1.2 1.9	Continuous 30 S	Phase To Earth	Limiting Resistance Earthing With Automatic Earth Fault Clearance
1.2 1.9	Continuous 8 H	Phase To Earth	Earthed Neutral Without Automatic Earth Fault Clearance
1.2 1.9	Continuous 8 h	Phase To Earth	Tuned Limiting Reactance (Or Petersen Coil) Earthing Without Automatic Earth Fault Clearance

رله‌ها، در واقع هسته اصلی سیستم حفاظت و مغز متفکر آن هستند. این تجهیزات از روی ورودی‌هایی که از شبکه دریافت می‌کنند وقوع خطا را تشخیص می‌دهند. به طور معمول هر رله برای تشخیص نوع خاصی از خطا ساخته شده و تنها قادر به تشخیص آن خطا می‌باشد. به عنوان مثال برای تشخیص جریان‌های زیاد ناشی از اتصال کوتاه در شبکه از رله اضافه جریان یا Over current، برای تشخیص اتصال کوتاه با زمین از رله خطای زمین یا Earth Fault، برای تشخیص افزایش توان عبوری از دستگاه یا افزایش حرارت آن از رله Over Load، برای تشخیص افزایش ولتاژ از رله Over Voltage و برای تشخیص افت ولتاژ از رله Under Voltage استفاده می‌شود.

طبق استاندارد ANSI یا American National Standard Institute، هر یک از این رله‌ها دارای یک کد یا عدد به خصوص هستند که در اغلب موارد، در نقشه‌ها، Manualها، دیتاشیت‌ها و... به جای نوشتن نام آن‌ها، از کد آن‌ها استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای فانکشن حفاظتی یا رله حفاظت در برابر افت ولتاژ، عدد ۲۷ در نظر گرفته شده است. در مواردی نیز ممکن است از حروف به همراه اعداد برای معرفی یک فانکشن استفاده شده باشد. به عنوان مثال حرف G به همراه کد رله، بیانگر این است که رله مورد نظر مربوط به زمین است و حرف N بیانگر این است که رله مورد نظر به سیم نول یا Neutral متصل است. مثلا حفاظت در برابر اضافه‌جریان با تأخیر یا Time Over Current را با کد ۵۱ نشان می‌دهند و در صورتی که این رله برای حفاظت در برابر اتصال کوتاه با زمین به کار رود با کد 51G نشان داده می‌شود. کلیه کدهای استفاده شده توسط استاندارد ANSI برای معرفی رله‌ها، در انتهای متن موجود بوده و برای کسب اطلاعات تکمیلی می‌توان به آن مراجعه کرد.

معمولا هر رله برای حفاظت محدوده مشخصی از شبکه در برابر خطا در نظر گرفته می‌شود. به این محدوده Zone حفاظتی رله گفته می‌شود. رله تنها قادر به تشخیص خطا در Zone حفاظتی خود بوده و خطاهای خارج از Zone برای رله غیر قابل تشخیص است. این امر باعث می‌شود تا در هنگام وقوع یک خطا، تنها بخش معیوب از شبکه جدا شده و بخش‌های سالم سیستم به کار خود ادامه دهند.

به عنوان مثال برای حفاظت یک موتور الکتریکی در برابر جریان‌های زیاد ناشی از اتصال کوتاه ممکن است از رله اضافه جریان استفاده شود. در این صورت این رله تنها در مواقعی که در داخل موتور اتصال کوتاهی

رخ داده باشد، وقوع خطا را تشخیص داده و قادر نیست وقوع اتصال کوتاه در بقیه بخش‌های شبکه را تشخیص دهد.

در اغلب موارد برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم حفاظت، علاوه بر رله اصلی که برای حفاظت یک بخش استفاده شده است، از رله‌های دیگری نیز به صورت موازی استفاده شده که به رله‌های Backup معروفند. در صورتی که رله اصلی به هر دلیلی وظیفه خود را انجام ندهد، رله Backup وارد عمل شده و سیستم را حفاظت می‌کند. به عنوان مثال در حفاظت ژنراتورها، ممکن است از یک رله اضافه جریان برای حفاظت در برابر جریان‌های زیاد ناشی از اتصال کوتاه و یک رله اتصال زمین برای حفاظت در برابر اتصال کوتاه سیم‌پیچی‌ها با زمین استفاده شده باشد. در این حالت در خطاهای زمین، یکی از این رله‌ها نقش حفاظت اصلی یا Primary و دیگری نقش حفاظت Backup را دارد.

پس از تشخیص خطا توسط رله، فرمان قطع برای کلیدها صادر می‌شود. در این حالت به اصطلاح گفته می‌شود که رله تریپ داده است. صدور فرمان تریپ ، معمولا با بسته یا باز شدن یک یا چند کنتاکت در داخل رله صورت می‌گیرد. با عملکرد این کنتاکت‌ها، کلیدهای مورد نظر توسط سیستم کنترل قطع شده تا ضمن جدا کردن بخش معیوب از شبکه، از گسترش خطا جلوگیری به عمل آمده باشد. بسیاری از شرایط غیر عادی در شبکه قدرت، می‌تواند طی زمان بسیار کوتاهی منجر به خسارات سنگینی شود و از این رو تشخیص سریع خطا، صدور سریع فرمان تریپ و قطع سریع کلید از اهمیت به سزایی بر خوردار است. حداکثر زمان مجاز برای این امر در بعضی از موارد ممکن است در حد چند ده میلی‌ثانیه باشد.

رله‌ها نیز مانند سایر تجهیزات سیر تکاملی خاصی را پشت سر گذاشته‌اند. اولین نسل از رله‌ها، رله‌های الکترومکانیکی بودند که در ساختمان آن‌ها در اغلب موارد از یک سیم‌پیچ مغناطیس کننده استفاده شده بود. با عبور جریان زیاد از این سیم‌پیچ، بر اثر نیروی الکترومغناطیسی ایجاد شده، کنتاکتی بسته یا باز شده و از این امر برای تشخیص خطا استفاده می‌شد. پس از آن رله‌های الکترونیکی به بازار عرضه شد. در این رله‌ها فانکشن‌های حفاظتی توسط مدارهای الکترونیکی طراحی و پیاده‌سازی شده بود. این رله‌ها برای مدت زمان کوتاهی مورد استفاده قرار گرفتند ولی بنا به پاره‌ای از دلایل از جمله آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر گرما، میدان‌های مغناطیسی، تولید نسل جدید رله‌ها و... کنار گذاشته شدند.

با به وجود آمدن علم دیجیتال و پیشرفت آن، رله‌هایی به وجود آمدند که با نمونه‌گیری از کمیت‌های مختلف الکتریکی نظیر ولتاژ و جریان و محاسبه اندازه و فاز آن‌ها وقوع خطا را تشخیص می‌دهند. به این رله‌ها رله‌های دیجیتال یا ماکروپروسسوری گفته می‌شود. رله‌های دیجیتال در واقع کامپیوترهای کوچک هستند که قابلیت برنامه‌ریزی و کنترل توسط نرم‌افزار را دارا می‌باشند. این رله‌ها قابلیت‌های بسیاری را دارا هستند که از بارزترین آن‌ها قدرت پردازش اطلاعات است. در این رله‌ها می‌توان از الگوریتم‌های پیشرفته و پیچیده برای حفاظت یک وسیله و تشخیص وقوع خطا استفاده کرد. از دیگر مزایای رله‌های دیجیتال خاصیت Self Checking در آن‌هاست. این خاصیت باعث می‌شود تا رله وضعیت خود را مانیتور کرده و در صورت وقوع ایراد در کارکرد خود، آن را اطلاع دهد.

در استفاده از رله‌های الکترومکانیکی برای هر نوع حفاظت از رله خاصی استفاده می‌شد که با توجه به اندازه هر رله، حجم بسیار زیادی از تابلو به رله‌ها اختصاص داده می‌شد. در رله‌های دیجیتال می‌توان عملکرد بسیاری از رله‌ها را در داخل یک رله تعریف کرد و به این ترتیب حجم فضای مورد استفاده برای رله‌ها و نیز حجم سیم‌کشی‌های لازم را کاهش داد. دراین صورت یک رله، وظیفه چند رله را در شبکه به عهده می‌گیرد. از این رو با ظهور رله‌های دیجیتال، مفهوم رله‌های حفاظتی به فانکشن‌های حفاظتی تغییر کرد. بدین صورت که یک رله، می‌تواند دارای چند فانکشن حفاظتی باشد. از دیگر مزایای رله‌های دیجیتال را می‌توان ارتباط با سایر رله‌ها، انتقال و ذخیره‌سازی اطلاعات و اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی دانست. عملکرد این رله‌ها در تشخیص خطا بسیار سریع‌تر از رله‌های الکترومکانیکی بوده و تنظیمات آن‌ها بسیار دقیق‌تر و کامل‌تر است. رله‌های الکترومکانیکی به دلیل داشتن اجزاء متحرک، از عمر کمتری نسبت به رله‌های دیجیتال برخوردار بوده و معمولا قیمت به کار گرفتن و نصب آن‌ها بیشتر از رله‌های دیجیتال است. مجموعه این عوامل باعث شده تا امروزه رله‌های الکترومکانیکی جای خود را به رله‌های دیجیتال بدهند.

فیوزها

فیوزها ساده‌ترین و ابتدائی‌ترین تجهیزاتی هستند که به منظور حفاظت دستگاه‌های الکتریکی ساخته شده و تا به امروز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی‌که جریان در قسمتی از شبکه برق از حد مجاز بالاتر رود، اگر در یک نقطه از مسیر، سطح مقطع سیم بسیار نازک‌تر از بقیه نقاط باشد، سیم در آن نقطه ذوب شده و جریان مدار را قطع می‌کند. بر همین اساس اولین فیوزهای ساخته شده یک سیم ساده با سطح مقطع نازک بودند که به صورت سری در مدار قرار می‌گرفتند. خسارت ناشی از جریان‌های شدید وارده بر دستگاه، عمدتا به دلیل حرارت ایجاد شده است. این حرارت طبق رابطه زیر به میزان جریان و زمان عبور آن بستگی دارد.

$$Q=KRI^2T$$

بدین صورت که هرچه میزان جریان و زمان آن بیشتر باشد، حرارت ایجاد شده و در نتیجه خسارت وارده به دستگاه بیشتر خواهد بود. به همین دلیل برای حفاظت تجهیزات، جریان‌های بزرگتر باید در زمان‌های کوتاه‌تر قطع شود. از طرفی حرارت ایجاد شده در فیوز نیز طبق همین رابطه می‌باشد و هرچه جریان بیشتر باشد فیوز زودتر می‌سوزد. این امر باعث می‌شود تا فیوز محافظ خوبی برای حفاظت دستگاه‌های الکتریکی در مقابل جریان‌های بیش ازحد باشد. برای فیوزها معمولا یک منحنی عملکرد جریان-زمان تعریف می‌گردد که به صورت معکوس بوده و مشخص می‌کند که فیوز یک جریان مشخص را در چه زمانی قطع می‌کند. از آنجا که فیوزها در جریان‌های بسیار زیاد، خیلی سریع عمل می‌کنند، معمولا برای حفاظت در برابر اتصال کوتاه استفاده می‌شوند. در واقع فیوزها هم عامل تشخیص جریان اتصال کوتاه و هم عامل قطع جریان اتصال کوتاه هستند.

تقسیم‌بندی نوع ساختمان فیوزها، معمولا براساس جریان اسمی آن‌ها صورت می‌گیرد. به عنوان مثال درسطح Low Voltage، معمولاً سازنده‌ها نوع فیوزهای استوانه‌ای یا Ferrule را تا حدود 125 آمپر طراحی می‌کنند. معمولا برای جریان‌های بیشتر و تا حدود ۶۰۰ آمپر، از فیوزهای کاردی و برای جریان‌های بزرگتر و تا حدود ۶۰۰۰ آمپر، از فیوزهای مخصوص که توسط پیچ به پایه وصل می‌شوند، استفاده می‌شود.

فیوزها از نظر نحوه عملکرد و منحنی‌های جریان – زمان نیز برای کاربری های مختلف ساخته می‌شوند. به عنوان مثال برای مصارف عمومی شامل کابل و یا سیستم های روشنائی، فیوز با منحنی عملکرد نرمال ساخته شده که معمولاً در مشخصه آنها به نوعی حرف G قید می‌شود. منحنی عملکرد این نوع از فیوزها به گونه‌ای است که دستگاه را علاوه بر اتصال کوتاه در مقابل اضافه بار یا Over Loadهای چند برابر جریان اسمی نیز حفاظت می‌کنند.

نوع دیگری از فیوزها، مخصوص حفاظت الکتروموتورها می‌باشند و در مشخصه آنها معمولاً حرف M به نوعی قید می‌شود. منحنی عملکرد این فیوزها به گونه‌ای است که اضافه بارهای تا چند برابر جریان اسمی را تحمل می‌نمایند. به همین دلیل این نوع از فیوزها برای حفاظت در مقابل اتصال کوتاه به کار رفته و نمی‌توانند تجهیزات را در برابر اضافه‌بار محافظت کنند.

برای مقایسه، می‌توان عملکرد دو نوع فیوز G وM، برای جریان‌های نامی مشابه و یک سازنده مشخص را مورد بررسی قرار داد. مشاهده می‌شود که فیوزهای نوع M به راحتی قادر به تحمل جریان راه‌اندازی الکتروموتورها بوده و از طرفی با توجه به شیب زیاد منحنی جریان- زمان، می‌توانند جریان‌های اتصال کوتاه را نیز در زمان کوتاه و مناسب قطع کنند.

امروزه انواع مختلف فیوزها در شکل‌ها، اندازه‌ها و عملکردهای متفاوت و با تکنولوژی های مختلف ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند.

رله اضافه‌بار

معمولا هر مصرف‌کننده الکتریکی دارای توان مشخص و نامی است که توسط سازنده تعیین می‌گردد. در صورتی که توان مصرفی یک مصرف‌کننده بیشتر از توان نامی آن باشد، اصطلاحا دچار اضافه‌بار یا Overload می‌شود. در این حالت دستگاه جریانی بیشتر از جریان نامی خود از شبکه می‌کشد که این امر باعث گرم شدن بیش از حد آن می‌شود. به عنوان نمونه در موتورهای آسنکرون که بیش از ۹۰ درصد موتورهای موجود در صنایع را تشکیل می‌دهند، بر طبق منحنی جریان – سرعت آن‌ها، چنانچه بر اثر اضافه بار مکانیکی دور موتور کاهش یابد، جریان استاتور افزایش یافته و حتی تا چند برابر جریان اسمی موتور نیز می‌رسد. از این رو شرایط اضافه بار برای موتورها بسیار خطرناک بوده و می‌تواند موجب گرم شدن بیش از حد سیم‌پیچ استاتور و روتور و در نتیجه سوختن آن‌ها شود.

تجهیزات مختلف مانند ژنراتورها، ترانسفورماتورها و به ویژه الکتروموتورها را معمولا توسط رله‌های Overload که در استاندارد ANSI با کد شماره ۴۹ مشخص می‌شود، حفاظت می‌کنند. حرارت ایجاد شده در تجهیزات به میزان جریان بستگی دارد و از طرفی هر چه جریان اضافه بار بیشتر باشد الکتروموتور زودتر آسیب می‌بیند. از این رو منحنی عملکرد جریان-زمان رله‌های Overload، از نوع معکوس بوده تا در جریان های بیشتر زودتر عمل نموده و عملا از ایجاد گرمای زیاد در دستگاه جلوگیری شود. این منحنی عملکرد باید دارای مشخصات زیر باشد:

۱- جریان نامی دستگاه در قسمت سمت چپ خط مجانب عمودی این منحنی قرار گیرد زیرا در غیر اینصورت رله در شرایط کار عادی دستگاه نیز عمل خواهد کرد.

۲- در مورد الکتروموتورها، منحنی عملکرد مربوطه باید اجازه راه اندازی الکترو موتور را بدهد. یعنی زمان عملکرد رله براساس جریان راه اندازی الکتروموتور از زمان استارت موتور بیشتر باشد. به عنوان مثال چنانچه الکتروموتوری در هنگام راه اندازی ۶ برابر جریان نامی را برای مدت ۴ ثانیه از شبکه می‌گیرد، در منحنی عملکرد رله حفاظتی، زمان معادل ۶ برابر جریان نامی از ۴ ثانیه بیشتر باشد.

معمولاً رله های Overload به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در جریانی حدود ۱۱۰٪ جریان تنظیمی شروع به زمان گرفتن یا Pick Up کند. در موارد خاص که الکتروموتور دارای جریان استارت زیاد یا زمان راه‌اندازی طولانی می‌باشد ممکن است از رله ها با منحنی‌های عملکرد خاص استفاده شود.

در رله های Overload اولیه از یک نوار بی‌متال استفاده شده که این نوار در اثر حرارت خم شده و باعث عملکرد کنتاکت‌های مربوطه می‌شود. عملکرد این کنتاکت‌ها موجب ظهور آلارم و یا اعمال تریپ به موتور یا دستگاه مورد نظر می‌گردد. امروزه رله های Overload را با منحنی عملکرد معکوس از طریق مدارهای الکترونیکی یا Plc شبیه‌سازی می‌کنند. این رله ها قابلیت ارائه چندین منحنی را داشته و کاربر با توجه به مشخصه دستگاه مورد حفاظت، قادر به انتخاب منحنی مناسب خواهد بود. این منحنی ها را منحنی‌های هم خانواده یا Family Curves می‌نامند و توسط مختصات یک نقطه که معمولا ۶ برابر جریان نامی می‌باشد مشخص و توسط تنظیم زمان مورد نظر انتخاب می‌گردند.

رله اضافه جریان

حفاظت یک شبکه الکتریکی در برابر جریان‌های زیاد یا Over current، یکی از اولیه‌ترین حفاظت‌ها در شبکه است. باید توجه داشت که حفاظت در برابر اضافه جریان با حفاظت در برابر اضافه‌بار یا Overload متفاوت است. در اضافه‌جریان‌ها که ناشی از وقوع اتصال کوتاه بین یک یا دو فاز با زمین، اتصال بین دو فاز و... هستند، جریان به مراتب بیشتری نسبت به حالت‌های اضافه‌بار از شبکه می‌گذرد که این جریان باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن تشخیص داده شده و قطع شود.

برای حفاظت در برابر اضافه جریان از رله Over current که دراستاندارد ANSI با کد شماره ۵۰ یا ۵۱ مشخص شده است، استفاده می‌شود. کد شماره ۵۰، برای زمان عملکرد لحظه‌ای و کد ۵۱ برای عملکرد با تأخیر زمانی است. در حالت عملکرد لحظه‌ای یا Instantaneous، پس از این که جریان از میزان تنظیم‌شده برای رله بیشتر شد، رله آن را تشخیص داده و بلافاصله تریپ می‌دهد. در عملکرد با تأخیر زمانی، پس از رسیدن جریان به میزان تنظیم شده، رله پس از مدت زمانی که به میزان جریان بستگی دارد، دستور تریپ را صادر می‌کند. در این حالت معمولا از منحنی‌های معکوس با شکل و شیب متفاوت استفاده می‌شود.

رله‌های ولتاژی

معمولا تجهیزات مورد استفاده در یک شبکه الکتریکی برای کار در یک ولتاژ مشخصی طراحی شده‌اند. از این رو نباید ولتاژ اعمالی به آن‌ها از حد مشخصی کمتر و یا بیشتر شود. محدوده این تغییرات به نوع دستگاه بستگی دارد. برای حفاظت شبکه‌های الکتریکی در برابر تغییرات ولتاژ، از دو نوع رله به نام رله Under Voltage و رله Over Voltage استفاده می‌شود.

رله Under Voltage که در استاندارد ANSI با کد شماره ۲۷ مشخص شده است، برای حفاظت تجهیزاتی که در اثر افت ولتاژ آسیب می‌بینند مانند الکتروموتورها به کار برده می‌شود. این رله معمولا دارای یک تنظیم ولتاژی و یک تنظیم زمانی است و در صورت افت ولتاژ شبکه تا حد تنظیم‌شده و پس از طی زمان تنظیم‌شده عمل می‌کند. تنظیمات این رله به نوع وسیله مورد حفاظت بستگی دارد. به عنوان مثال در مورد موتورهای الکتریکی، تنظیم ولتاژی این رله در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد ولتاژ نامی و تنظیم زمانی آن در حدود چند ثانیه است.

رله Over voltage که با کد شماره ۵۹ مشخص می‌شود، برای حفاظت شبکه در برابر اضافه ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولا دارای دو تنظیم زمانی و ولتاژی است. در صورت افزایش بیش از حد ولتاژ شبکه و رسیدن به حد تنظیم شده، در زمان تنظیم شده عمل می‌کنند. تنظیم ولتاژی این رله در حدود ۱۲۰ درصد ولتاژ نامی و تنظیم زمانی آن در حدود چند ثانیه است. این رله معمولا در خروجی ژنراتورها و روی باس‌بار اصلی شبکه نصب می‌شود.

رله خطای زمین

در شبکه‌های زمین شده یعنی شبکه‌هایی که نقطه نول یا Neutral ترانسفورماتورها و یا ژنراتورهای آن‌ها به صورت مستقیم و یا با استفاده از یک مقاومت به زمین متصل شده‌اند، اتصال یک فاز با زمین همراه با عبور جریان از نقطه زمین شده خواهد بود. به عنوان مثال چنانچه سیم‌پیچ یک الکتروموتور به بدنه موتور اتصال پیدا کند، جریان از طریق فاز مربوطه وارد بدنه موتور و از آنجا وارد زمین شده و از طریق نقطه نول ترانسفورمر یا ژنراتور مسیر خود را می‌بندد و بدین ترتیب مسیر بسته‌ای برای عبور جریان ایجاد می‌گردد. در سیستم‌های سه‌فاز ایده‌ال به دلیل متقارن بودن ولتاژها و جریان‌ها، جمع برداری جریان‌های عبوری از سه‌فاز برابر صفر خواهد بود. در شرایط اتصال‌کوتاه یک یا دو فاز به زمین، تعادل جریان‌های عبوری از فازهای مختلف به هم خورده و از این رو جمع برداری جریان‌های سه‌فاز برابر با صفر نخواهد بود. بدین ترتیب با اندازه‌گیری جمع برداری جریان‌های سه فاز، می‌توان وقوع اتصال‌کوتاه‌های یک یا دوفاز با زمین را تشخیص داد.

برای اندازه‌گیری جمع جریان‌های سه‌فاز و به عبارتی دیگر آشکارسازی خطای زمین از رله اتصال زمین یا Earth Fault relay استفاده می‌شود. برای آشکارسازی این خطا سه روش وجود دارد که به این شرح است:

۱- *استفاده از سه ترانس جریان بر روی هر فاز:*

در این روش با استفاده از سه ترانس جریان که بر روی فازهای مختلف قرار گرفته‌اند، مقدار جریان هر فاز اندازه‌گیری می‌شود. این ترانس ها به صورت موازی با یکدیگر اتصال پیدا کرده‌اند به گونه‌ای که در خروجی آن‌ها، جمع جریان‌های سه‌فاز ظاهر می‌شود. جمع این سه‌جریان به یک رله جریانی وارد شده و در صورتی که مقدار آن از حد مشخص و آستانه‌ای بیشتر شد، رله، خطای زمین را تشخیص داده و دستور تریپ را صادر می‌کند. باید توجه داشت که اگر در مصرف‌کننده از سیم نول یا خنثی استفاده شده‌باشد، جریان این سیم نیز باید در محاسبات لحاظ شده و از این رو یک ترانس جریان دیگر باید روی سیم نول قرار گیرد. در واقع در این حالت جمع برداری جریان‌های سه‌فاز و نیز جریان سیم نول باید برابر صفر باشد.

از مزایای این روش را می‌توان قابل اجرا بودن آن در اغلب محل‌ها دانست. تریپ کاذب در برخی از موارد یکی از معایب این روش است.عدم هماهنگی ترانس‌های جریان و احتمال خطای آن‌ها در اندازه‌گیری به خصوص در جریان‌های بالا و نیز اشباع شدن آن‌ها باعث می‌شود تا در برخی از موارد جمع برداری جریان‌ها را غیر صفر تشخیص داده و باعث تریپ بی‌مورد و اشتباه سیستم شود.

۲- *استفاده از یک ترانس جریان بر روی سه‌فاز:*

در این روش به جای نصب سه دستگاه ترانسفورمر جریان و اتصال خروجی آنها به یکدیگر، یک دستگاه ترانسفورمر جریان روی هر سه فاز مصرف‌کننده قرار داده شده و به یک رله جریانی وصل می‌شود. همچنین در صورتی که در مصرف‌کننده از سیم نول استفاده شده باشد، این سیم نیز باید از داخل ترانس جریان عبور داده شود. در این روش نیز در حالت عادی جریانی از رله عبور نمی‌کند لیکن در مواردی که در مصرف کننده اتصال زمین رخ داده باشد، عملاً جمع جریان‌های سه فاز صفر نشده و باعث عمل کردن رله می‌شود. این گونه ترانسفورمرهای جریان Core Balance Ct نامیده می‌شوند.

باید توجه داشت که این روش همواره قابل اجرا نیست و فقط در مواردی که مصرف‌کننده توسط تعداد محدودی کابل تغذیه می‌شود، قابل انجام است و در غیر این صورت ممکن است فضای کافی برای عبور کابل‌ها یا باس‌بارها از داخل CT وجود نداشته باشد.

۳- *استفاده از یک ترانس جریان بر روی نقطه نول:*

همان‌گونه که گفته شد، جریان خطای اتصال زمین در طول مسیر خود الزاماً از نول ترانسفورمر تغذیه یا ژنراتور شبکه می‌گذرد. پس بنابر این چنانچه یک دستگاه ترانسفورمر جریان روی نقطه نول ترانس یا ژنراتور قرار دهیم و خروجی آن را به یک رله جریانی وصل کنیم، می‌توانیم خطای اتصال زمین را در نقاط تحت تغذیه این ترانس یا ژنراتور مشخص کنیم. معمولاً از این روش برای آشکارسازی اتصال زمین در سطح شبکه اصلی استفاده می‌شود و برای حفاظت مصرف‌کننده‌ها در مقابل اتصال زمین، حفاظت‌های جداگانه‌ای طراحی می‌شود.

در استاندارد ANSI، رله‌های حفاظت در برابر خطای زمین را براساس نحوه اتصال و زمان عملکرد، با شماره‌های 51N، 51G، 50N یا 50G نمایش داده می‌شوند.

رله دیفرانسیل

رله حفاظتی دیفرانسیل که در استاندارد ANSI با کد ۸۷ مشخص می‌شود، براساس مقایسه جریان ورودی و خروجی منطقه مورد حفاظت عمل می‌کند. در شرایط عادی یعنی در حالتی که خطایی در منطقه یا بخش مورد حفاظت روی نداده باشد، جریان‌های ورودی و خروجی با هم برابر بوده ولی در صورت وقوع خطایی نظیر اتصال با زمین، این جریان‌ها با هم برابر نبوده و اختلاف این دو جریان به عنوان جریان خطا تلقی می‌شود. رله دیفرانسیل این جریان را اندازه‌گیری کرده و در صورتی که از حد تنظیم شده بیشتر باشد، عمل کرده و تریپ می‌دهد.

جریان‌های ورودی و خروجی، توسط CTها اندازه‌گیری شده و به رله اعمال می‌شود. مدار اتصال ثانویه CTها به گونه‌ای است که جهت جریان در ثانویه آن‌ها معکوس یکدیگر بوده و در حالت عادی جریان ثانویه C.T ورودی و خروجی، یکدیگر را خنثی می‌کند. در نتیجه جریان اندازه‌گیری شده در شاخه وسط، درشرایط نرمال یعنی در موقعی که اتصال کوتاه در منطقه بین دو CT وجود نداشته باشد صفر می‌باشد. در شرایطی که در منطقه مورد حفاظت خطائی رخ دهد، جریانی متناسب با جریان خطا از شاخه وسط عبور می‌کند که این جریان مبنای تصمیم‌گیری رله قرار داده می‌شود. در صورتی که حفاظت دیفرانسیل را برای سه فاز یک مصرف کننده طراحی کنیم، این رله می‌تواند اتصال کوتاه‌های بین فازها و یا فاز به زمین را آشکار کند.

به منظور تشخیص اتصالی‌های حلقه به حلقه در ژنراتورها و... معمولا سیم‌پیچی‌های هر فاز را به صورت دو سیم‌پیچی موازی با هم ساخته و روی یکی از شاخه‌ها، ترانس جریان نصب می‌شود. این جریان با کل جریان خروجی از دو شاخه موازی سیم‌پیچی مقایسه می‌شود. در صورتی که اتصال حلقه به حلقه در یکی از شاخه‌های موازی روی‌دهد، جریان در هر دو شاخه دستخوش تغییرات شده و باعث می‌شود تا رله دیفرانسیل وقوع خطا را تشخیص داده و عمل کند. این روش را می توان بر روی تمامی فازها اعمال کرد تا سیم‌پیچی‌های هر سه‌فاز در برابر خطای اتصال بین حلقه‌ها محافظت شود.

در حفاظت دیفرانسیل، تشابه CTهای استفاده شده از نظر نسبت تبدیل، جریان نامی خروجی،کلاس دقت و... از اهمیت خاصی برخوردار است. در غیر این صورت ممکن است در شرایط عادی نیز اختلاف جریانی در خروجی CTها مشاهده شده و باعث تریپ کاذب رله شود. در صورتی که حفاظت دیفرانسیل برای

محافظت از ترانس‌های قدرت استفاده شود، از آن‌جا که جریان اولیه و ثانویه ترانس قدرت، در شرایط عادی با هم متفاوت است، نسبت تبدیل این CTها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که در خروجی آن‌ها در شرایط عادی جریان‌های یکسانی عبور کند. در واقع انتخاب CTها باید بر اساس نسبت تبدیل ترانس قدرت صورت گیرد.

رله زمین محدود شده

چنانچه فقط حفاظت در مقابل اتصال زمین در یک منطقه محدود مثلا سیم‌پیچی یک ژنراتور، مد نظر باشد، از رله خطای زمین محدود شده استفاده می‌شود. این حفاظت که یک نوع حفاظت دیفرانسیلی برای آشکار سازی خطای اتصال زمین است، با کد 87N نشان داده می‌شود. در مواردی نیز حفاظت Restricted Earth Fault نیز نامیده می‌شود و با شماره 64 REF مشخص می‌گردد.

در این حفاظت از سه ترانس جریان در ورودی منطقه مورد حفاظت و سه ترانس جریان در خروجی آن استفاده می‌شود. این ترانس‌ها به گونه‌ای به هم اتصال داده می‌شوند که جمع برداری جریان‌های ورودی با جمع برداری جریان‌های خروجی با هم مقایسه شود. در حالت عادی جمع برداری جریان‌های ورودی و نیز جمع برداری جریان‌های خروجی صفر بوده و در نتیجه اختلاف آن‌ها نیز برابر صفر است و رله عمل نمی‌کند. در مواقعی که خطایی در خارج از محدوده اتفاق افتد، هر چند جمع برداری سه جریان ورودی و نیز سه جریان خروجی صفر نیست ولی اندازه آن‌ها با هم برابر بوده و در نتیجه اختلاف آن‌ها برابر صفر خواهد بود. از این رو این رله در خطاهای بیرون از محدوده مورد حفاظت نیز عمل نمی‌کند. ولی در مواقعی که خطا در داخل محدوده روی دهد، جمع برداری جریان‌های ورودی و خروجی و نیز اختلاف آن‌ها مخالف صفر بوده و در نتیجه رله، وقوع خطا را تشخیص داده و عمل می‌کند.

چنانچه محدوده مورد حفاظت، سیم‌پیچی‌های یک ژنراتور یا ترانسفورمر با نوترال زمین شده باشد، می‌توان به جای سه ترانس جریان، از یک ترانس که روی نوترال قرار داده شده، استفاده کرد. در این حالت مقدار این جریان با جمع برداری جریان‌های خروجی از ژنراتور یا ترانس که توسط سه ترانس جریان اندازه‌گیری شده، مقایسه گردیده و در صورت لزوم فرمان تریپ صادر می‌شود.

رله‌های فرکانسی

در یک شبکه الکتریکی تغییرات فرکانس می‌تواند تأثیرات نامطلوبی روی برخی از اجزاء شبکه داشته باشد. به عنوان مثال ژنراتورها با افزایش و یا کاهش بیش از حد فرکانس، پایداری خود را از دست داده و از حالت سنکرون خارج می‌شوند. همچنین تغییرات فرکانس می‌تواند روی دور موتورهای القایی و سنکرون و نیز در عملکرد برخی از تجهیزات الکترونیکی شبکه نیز تأثیر گذار باشد.

رله‌های فرکانسی رله‌هایی هستند که فرکانس شبکه را مونیتور کرده و شبکه را در برابر تغییرات ناخواسته آن محافظت می‌کنند. این رله‌ها در اغلب موارد با استفاده از ترانس‌های ولتاژ، از ولتاژ شبکه نمونه‌برداری کرده و فرکانس آن را مبنای تصمیم‌گیری خود قرار می‌دهند.

رله‌های فرکانسی را می‌توان دو رله حفاظتی در برابر افزایش بیش از حد فرکانس و نیز کاهش بیش از حد آن در نظر گرفت. رله حفاظت در برابر کاهش فرکانس که به آن Under Frequency Relay نیز گفته می‌شود، در استاندارد ANSI با کد 81L و رله حفاظت در برابر افزایش ولتاژ یا Over Frequency Relay با کد 81H مشخص می‌شود. افزایش و کاهش فرکانس در یک شبکه می‌تواند دلائل متعددی داشته باشد که مهمترین آن‌ها عدم تعادل در میزان تولید و بار شبکه است. به این صورت که با افزایش بار یا کاهش تولید، فرکانس شبکه کاهش یافته و با کاهش بار یا افزایش تولید، فرکانس شبکه نیز افزایش می‌یابد.

یکی از کاربردهای مهم رله‌های فرکانسی و به طور خاص رله Under Frequency، در سیستم‌های Load Shedding است. در این سیستم‌ها در صورت افزایش بار مصرفی یک شبکه نسبت به توان تولید شده، فرکانس افت پیدا کرده و رله فرکانسی در یک یا چند مرحله بارهای اضافی و کم اهمیت شبکه را قطع کرده و بدین ترتیب فرکانس شبکه اصلاح می‌شود.

رله بر گشت توان

این نوع رله حفاظتی که با کد 32P مشخص می‌شود، به منظور آشکارسازی تعویض جهت انتقال توان اکتیو در شبکه به کار برده می‌شود. به طور خاص موارد زیر را می‌توان برای کاربردهای این رله ذکر کرد:

۱. در واحدهای صنعتی که از نیروگاه داخلی استفاده می‌کنند، برای جلوگیری از تغذیه شبکه برق شهری توسط نیروگاه داخلی از این رله استفاده می‌کنند. این مورد بسیار با اهمیت بوده، زیرا چنانچه یک شبکه بزرگ خارج از یک واحد صنعتی، توسط نیروگاه داخلی تغذیه شود احتمال Over Load شدن ژنراتورها وجود دارد. ضمن اینکه در همین فاصله چنانچه خطائی در شبکه پیش آید عملکرد رله‌های حفاظتی نیز با مشکل مواجه خواهد شد. رله حفاظتی Reverse Power در واقع توان از شبکه به واحد صنعتی را محاسبه کرده و چنانچه توانی بیشتر از حد تنظیمی و درجهت منفی عبور نماید سیستم را Trip می‌دهد. در این مورد معمولا رله روی مقدار حدود ۱٪ تا ۲٪ توان اسمی، تنظیم شده و عملکرد آن با تأخیر زمانی همراه خواهد بود.

۲. چنانچه در شبکه‌ای موتور سنکرون وجود داشته و منبع تغذیه آن قطع شود، موتور سنکرون با اینرسی بار مربوطه به حرکت خود ادامه داده و مانند یک ژنراتور شبکه را تغذیه می‌کند. در این حالت چنانچه برق مجدداً وصل شود، امکان آسیب دیدن الکتروموتور وجود دارد. در این حالت نیز رله Reverse Power الکتروموتور را به موقع از سرویس خارج کرده و ازکار کرد ژنراتوری آن جلوگیری می‌نماید. در این حالت معمولاً تنظیم رله روی حدود ۵٪ قدرت اسمی و با زمان تأخیر حدود یک ثانیه انجام می‌شود.

۳. در مواقع بروز اشکال در دیزل یا توربین محرک ژنراتور، احتمال کارکرد ژنراتور به صورت موتور وجود داشته و می‌تواند موجب آسیب رسیدن به محرک ژنراتور شود. در این شرایط رله Reverse Power توان برگشتی را محاسبه کرده و اگر از یک حد تنظیمی بیشتر شد دستور تریپ را صادر می‌کند. معمولاً تنظیم رله Reverse Power در این حالت حدود ۵ تا ۲۰ درصد توان اسمی برای محرک‌های دیزل و ۱ تا ۵ درصد توان اسمی برای توربین‌ها با تأخیر زمانی، در حدود یک ثانیه یا بیشتر خواهد بود.

رله حفاظت در برابر بار نامتقارن

این رله حفاظتی که با کد ۴۶ مشخص می‌شود، به منظور حفاظت ماشین‌های دوار شامل موتورها و ژنراتورها در مقابل جریان‌های نامتعادل به کار می رود. مهم ترین علل به وجود آمدن عدم تعادل در جریان‌های سه فاز را می‌توان به این صورت نام برد:

۱- ولتاژهای نامتعادل: چنانچه ژنراتور یا ترانسفورمر تأمین کننده ولتاژ شبکه، ولتاژ متقارن سه فاز تولید نکند، جریان‌های عبوری از سه‌فاز نیز نامتعادل خواهند شد. برای مصرف کننده‌های موتوری تقریباً هر یک درصد عدم تعادل در ولتاژ موجب هفت درصد عدم تعادل در جریان می‌گردد.

۲- بارهای نامتعادل: چنانچه مصرف کننده‌های موجود در یک شبکه در مجموع بار نامتعادلی را به ژنراتور تحمیل کنند جریان‌های سه‌فاز ژنراتور متعادل نخواهد بود. به عنوان مثال الکتروموتوری که به صورت دو فاز کار می‌کند، مصرف‌کننده‌های تک‌فازی که به شبکه سه‌فاز متصل شده‌اند و نیز موتورهای با قدرت بالا در لحظه استارت، از منابع ایجاد عدم تعادل در جریان‌های سه‌فاز هستند. عدم اتصال صحیح فازها و عدم رعایت ترتیب آنها در موقع اتصال که معمولا پس از انجام کارهای تعمیراتی محتمل است، نیز می‌تواند باعث عدم تعادل در جریان‌ها شود.

جریان‌های نامتعادل سه‌فاز دارای مولفه Negative Sequence بوده و تمایل این مولفه به ایجاد کوپل معکوس موجب افزایش حرارت و تلفات در روتور می‌گردد. از این رو رله حفاظتی Negative Phase Sequence با عملکرد به موقع، از افزایش دمای ماشین جلوگیری می‌کند. رله‌های حفاظتی میزان مولفهNegative Phase Sequence را طبق رابطه زیر حساب کرده

$$I_{NPS} = \frac{1}{3}(I_1 + a^2 I_2 + a I_3)$$

که در آن I_1، I_2 و I_3 جریان فازهای مختلف و a بردار شیفت دهنده به اندازه ۱۲۰ درجه است. در حفاظت موتورهای الکتریکی، از آن جا که در هنگام راه‌اندازی، اندازه مؤلفه NPS به حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد جریان نامی آن‌ها می‌رسد، بهتر است تنظیمات رله دارای دو مرحله باشد. مرحله اول حدود 20% جریان اسمی و با تنظیم زمانی حدود چند ثانیه‌ای بیشتر اززمان راه اندازی الکتروموتور و مرحله دوم یا تنظیم جریانی حدود 40% جریان اسمی و زمان کم در حدود ۰,۵ ثانیه. در برخی از رله‌ها امکان تنظیم و

انتخاب منحنی معکوس نیز برای حفاظت وجود دارد که در این مورد نیز باید شرایط راه اندازی الکتروموتور دیده شده و منحنی معکوس مربوطه با شرایط راه اندازی موتور هماهنگ باشد.

درخصوص تنظیم رله N.P.S برای ژنراتورها، بهتر است از منحنی معکوس و با تنظیم آستانه جریان در حدود 15% جریان اسمی ژنراتور استفاده شود.

رله حفاظتی Instability

در ژنراتورهای سنکرون، توانی که ژنراتور به شبکه تحویل می‌دهد با اندازه ولتاژ داخلی ژنراتور، اندازه ولتاژ باس باری که ژنراتور به آن متصل است و زاویه بین میدان‌های مغناطیسی استاتور و روتور بستگی دارد. با افزایش بار ژنراتور، زاویه بین میدان‌های استاتور و روتور افزایش پیدا کرده و پس از تغییرات لحظه‌ای روی یک مقدار، ثابت می‌شود. در صورت افزایش بیش از حد بار روی ژنراتور، زاویه بین میدان‌های مغناطیسی روتور و استاتور به یک مقدار پایدار نرسیده و مرتبا نوسان می‌کند. در این حالت این دو میدان نمی‌توانند به صورت همزمان و یا سنکرون با هم حرکت کنند و در نتیجه ژنراتور از حالت سنکرون خارج شده و ناپایدار می‌شود. در مورد موتورهای سنکرون نیز افزایش بیش از حد بار مکانیکی روی محور موتور می‌تواند باعث ناپایداری موتور سنکرون و از سنکرون خارج شدن آن شود.

رله Instablity مقادیر جریان و ولتاژ ژنراتور یا موتور سنکرون را گرفته و عملاً با توجه به تنظیماتی که روی آن انجام می‌شود، شرایط پایداری ژنراتور را کنترل و چنانچه نقطه کار در محدوده تعریف شده براساس تنظیمات ناپایداری قرار گیرد با ظهور آلارم یا اعمال تریپ سیستم را از سرویس خارج می‌نماید.

رله حفاظتی در برابر زمان استارت طولانی

این رله حفاظتی که با کد 51LR مشخص می‌شود، مخصوص الکتروموتورها بوده و عمدتاً برای حفاظت الکتروموتورهای Medium Voltage مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رله معمولا دارای دو فانکشن حفاظتی است، یکی حفاظت در برابر زمین استارت طولانی و دیگری حفاظت در برابر قفل شدن روتور در حین کار دستگاه.

در حالت عادی هنگامی که الکتروموتوری استارت می‌شود، جریان استارت پس از گذشت زمانی معادل زمان استارت الکتروموتور کاهش پیدا کرده و به میزان نرمال خود می رسد. اگر جریان استارت پس از گذشت زمان مورد نظر کاهش پیدا نکند، حاکی از وجود اشکال در سیستم می باشد و رله حفاظت در مقابل زمان استارت طولانی در این شرایط عمل نموده و مانع آسیب رسیدن به الکتروموتور می‌شود. تنظیم جریانی این رله معمولاً میزان ۵۰٪ جریان استارت می‌باشد، به شرطی که از ۱,۳ برابر جریان نامی کمتر نباشد. در جریان‌های کمتر از این مقدار رله عمل نکرده و حفاظت موتور به عهده رله اضافه‌بار گذاشته می‌شود. تنظیم زمانی این رله باید چند ثانیه ای بیشتر از زمان استارت در نظر گرفته شود.

از دیگر فانکشن‌های این رله حفاظت در برابر روتور قفل‌شده است. روتور الکتروموتورها در موقع کار عادی خود ممکن است بنا به دلائلی که عمدتا مکانیکی هستند قفل شده یعنی حرکت آن‌ها در داخل استاتور به سختی صورت گیرد. از جمله دلائل این امر را می‌توان جام کردن پمپ متصل به موتور، ایرادهای پروسسی، خراب شدن بیرینگ موتور و... را نام برد. در این حالت الکتروموتور جریان زیادی از شبکه می‌کشد که می‌تواند باعث آسیب دیدن آن شود.

معمولا تنظیمات جریانی این رله برای حفاظت در برابر روتور قفل شده، حدود ۵۰٪ جریان استارت موتور یا حداقل ۱,۳ برابر جریان نامی آن است. تنظیم زمانی آن نیز معمولا در حدود نیم تا ۱ ثانیه بوده که این میزان کمتر از مقدار در نظر گرفته شده برای حفاظت در برابر زمان استارت طولانی است.

رله حفاظتی در برابر تعداد استارت مکرر

موتورهای الکتریکی به ویژه موتورهای القایی درلحظه راه‌اندازی خود جریان بسیار زیادی در حدود ۶ تا ۸ برابر جریان نامی خود از شبکه دریافت می‌کنند. از این رو استارت‌های مکرر و پشت سرهم یک موتور می‌تواند باعث افزایش دمای آن شده و به سیم‌پیچی‌های موتور آسیب برسد. همچنین در لحظه استارت، شوک مکانیکی شدیدی به سیستم کوپلینگ مکانیکی وارد شده که از این لحاظ نیز استارت‌های مکرر می‌تواند مضر باشد.

استارت‌های مکرر یک الکتروموتور ممکن است بدلایل زیر صورت گیرد:

۱- اشکال در کار سیستم‌های اتوماتیک استارت

۲- استارت مکرر الکتروموتور توسط اپراتور به عنوان یک عملکرد اشتباه

۳-در اثر عملکرد سیستم‌های Auto Reclosing شبکه در مواقع بروز خطا

سیستم‌های حفاظتی جدید توسط رله مربوطه که با کد ANSIی ۶۶ شناخته می‌شود، قادر به کنترل و شمارش تعداد استارت الکتروموتور در یک زمان معین بوده و الکترو موتورها را بخوبی محافظت میکنند.

اصول عملکرد این سیستم حفاظتی بر این اساس است که معمولاً برای یک ساعت، تعداد کل استارت و تعداد استارت‌های گرم تعریف می‌شود. استارت گرم به استارتی گفته می‌شود که در هنگام بالا بودن دمای موتور از حد مشخصی که به موتور بستگی دارد، صورت می‌گیرد. از تقسیم عدد ۶۰ دقیقه بر تعداد کل استارت یک پریود زمانی بدست می‌آید که با T نشان می‌دهیم. حال اگر تعداد کل استارت‌ها یا تعداد استارهای گرم در یک زمان کوتاه انجام شود سیستم حفاظتی از استارت بعدی جلوگیری می‌کند. یعنی تا وقتی که زمان T از اولین استارت گرم، یا زمان 60 دقیقه از اولین استارت نگذشته باشد، اجازه استارت بعدی را نمی‌دهد. به عنوان مثال اگر تعداد کل استارت را ۵ و تعداد استارت گرم را ۳ فرض کنیم زمان T طبق رابطه زیر

$$T = \frac{60}{5} = 12$$

به میزان ۱۲ دقیقه حساب می‌شود. در این حالت چنانچه فرض کنیم در فاصله‌ای کمتر از ۱۲ دقیقه سه مورد استارت گرم داشته باشیم مجوز استارت چهارم صادر نمی‌شود مگر اینکه ۱۲ دقیقه از اولین استارت گرم یا یک ساعت از اولین استارت بگذرد.

رله بوخهلتز

اکثر خطاهائی که در داخل ترانسفورمرهای با عایق روغن اتفاق می‌افتد همراه با تولید گاز در روغن می‌باشد. به همین دلیل از این پدیده استفاده شده و رله‌هائی ساخته شده‌اند که تشکیل گاز را به عنوان یک عامل برای اعلام وجود خطا و اعمال تریپ به سیستم‌های کنترلی تلقی می‌کند. قدیم ترین و مشهورترین این رله‌ها، رله بوخهلس است.

رله بوخهلس از یک محفظه روغن و دو عدد شناور که مجهز به میکروسویچ جیوه‌ای هستند تشکیل شده است. این نوع رله الزاماً برای ترانسفورمرهایی که مجهز به مخزن روغن یا Conservator هستند قابل استفاده است. محفظه روغن رله در مسیر لوله ارتباطی بین مخزن ذخیره و مخزن اصلی ترانسفورمر قرار می‌گیرد. لوله ارتباطی باید نسبتاً بلند و مستقیم و کمی شیبدار باشد. در اثر خطاهایی که در سیم‌پیچ داخل ترانسفورمر اتفاق می‌افتد، در داخل روغن گاز تشکیل شده که این گازها در محل محفظه رله محبوس می‌شود.

شناور اول در قسمت بالای محفظه قرار گرفته و از کنتاکت آن برای ظهور آلارم استفاده می‌شود. این شناور زمانی عمل می‌کند که مقدار معینی گاز در محفظه رله جمع شده باشد که این امر معمولاً در موارد زیر صورت می‌گیرد:

۱- گرمای تدریجی یک قسمت از سیم‌پیچ

۲- اتصالات بد در داخل سیم‌پیچ‌های اصلی و Tap Changer مانند Lose Connection یا اتصال غیر محکم که باعث افزایش دمای آن بخش می‌شود.

۳- ضعف عایقی سیم‌پیچی‌ها در اثرتخلیه جزئی و یا عبور جریان بیش از حد از عایق و گرم شدن آن

۴- ضعف عایقی لایه‌های فلزی هسته که باعث افزایش تلفات فوکو در هسته و گرم شدن آن می‌شود.

در کلیه موارد فوق در صورتی که به آلارم آمده توجه نشود، میزان گاز در محفظه رله افزایش یافته و پس از مدتی باعث می‌شود تا شناور دوم عمل کرده و تریپ اعمال شود. در مواردی نیزکه روغن بین مخزن اصلی و مخزن ذخیره ترانس سریعا جابجا شود، شناور دوم سریعا و بدون تأخیر عمل می‌کند. جابجایی سریع روغن می‌تواند دلائل متعددی داشته باشد که پاره‌ای ازآن‌ها به این شرح است:

۱- وقوع خطای اتصال زمین در داخل ترانسفورمر

۲- وقوع اتصال کوتاه در سیم‌پیچ ترانسفورمر

۳- اختلال در عملکرد بوشینگ‌ها مانند آرک زدن

عملکرد شناور دوم در این گونه موارد به صورت لحظه‌ای است. قابل ذکر است که هر دو شناور در موقع کاهش سطح تدریجی روغن ترانسفورمر در اثر نشتی روغن، انقباض شدید و... نیز عمل می‌کنند. با توجه به سطح روغن ابتدا شناور اول به عنوان آلارم عمل نموده و در صورت ادامه کاهش سطح روغن و یا افت سریع سطح آن، شناور دوم نیز عمل کرده و سیستم را Trip می‌دهد.

رله Lockout

در سیستم‌های حفاظتی، ممکن است تریپ بسیاری از رله‌ها مستقیما باعث قطع کلید نشود بلکه این تریپ، باعث عملکرد و تریپ رله دیگری به نام رله Lock out شود و کلید از طریق رله Lock out قطع شود. وجود این رله در سیستم می‌تواند به دلائل زیر باشد:

۱- تعداد کنتاکت‌های موجود در یک رله، به اندازه کافی نبوده و از این رو از رله Lockout برای افزایش تعداد کنتاکت‌ها استفاده شود. این کنتاکت‌ها همزمان با تریپ رله عمل کرده و در مدارهای کنترل و حفاظت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- جریان عبوری از کنتاکت‌های رله به اندازه‌ای نبوده که بتواند باعث تریپ کلید شود. از این رو برای افزایش این جریان ممکن است از رله Lockout استفاده شود.

۳- عملکرد رله Lockout باعث Lock شدن پاره‌ای از کلیدها و تجهیزات شده و باعث می‌شود تا نتوان آن‌ها را قبل از ریست کردن دستی رله Lockout در مدار قرار داد. این امر برای ایمنی بیشتر در نظر گرفته شده است.

۴- عملکرد بسیاری از رله‌ها ممکن است باعث قطع یک کلید مشخص در شبکه شود. از این رو در بسیاری از موارد، تریپ این رله‌ها توسط رله Lockout به کلید منتقل شده و کلید توسط رله Lockout قطع می‌شود.

رله Lockout در استاندارد ANSI با کد شماره ۸۶ مشخص شده است.

رله‌های Lockout معمولا به روش‌های الکترومکانیکی یا الکتریکی، کلیه فرامین تریپ رله‌های یک فیدر را گرفته و در هر مرحله Lock می‌شوند.

محدودکننده‌های جریان اتصال کوتاه

در شبکه‌هائی که جریان اتصال کوتاه به دلایل مختلف بالا بوده و از میزان جریان قابل قطع توسط کلیدهای موجود بیشتر باشد معمولاً از محدودکننده‌های جریان اتصال کوتاه استفاده می‌شود. در شبکه های الکتریکی که بعد از طراحی اولیه به دلایلی ژنراتور یا ترانسفورمر تغذیه‌کننده به شبکه اضافه شده است، سطح جریان اتصال کوتاه بالا رفته و ممکن است از میزان قابل قطع توسط کلیدها بیشتر باشد. از این رو در این گونه موارد نیز ممکن است از محدودکننده‌های جریان اتصال کوتاه استفاده شود. با توجه به عملکرد این تجهیزات، شاید نتوان آن‌ها را جزء تجهیزات حفاظتی به حساب آورد ولی از آن‌جا که به نوعی در امر حفاظت مشارکت دارند، به بیان مختصری از معمول‌ترین انوع آن‌ها پرداخته می‌شود:

۱- راکتورهای محدود کننده جریان: این تجهیزات در واقع کویل‌هائی هستند که به صورت سری در مدار قرار می‌گیرند. این تجهیزات در عین حال که افت ولتاژ کمی در حالت نرمال به شبکه اعمال می‌کنند و لیکن راه حل خوبی برای کاهش سطح اتصال کوتاه شبکه در نقاط مورد نظر به شمار می‌آیند.

۲- Is limiter: این تجهیزات از تکنولوژی نسبتاً بالائی برخوردار بوده و معمولاً برای جداسازی دو قسمت از شبکه و کاهش سریع سطح اتصال کوتاه تا حدی که سوئیچ‌های مربوطه قادر به قطع آن باشند مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس کار Is limiter بدین صورت است که توسط یک CT، جریان خطا سنجیده شده و توسط یک سیستم کنترلی شیب جریان اندازه‌گیری می‌شود. از روی شیب اندازه‌گیری شده سیستم قادر به تشخیص مقدار ماکزیمم جریان و تمایز جریان اتصال کوتاه با جریان نرمال می‌باشد. در شرایطی که سطح اتصال‌کوتاه، از حد معینی بالاتر باشد، با ارسال سیگنال به قسمت اصلی دستگاه موجب عملکرد سیستم انفجاری و قطع جریان در مسیر اصلی شده و مسیر جریان به مدار موازی آن انتقال می‌یابد. در این مسیر یک فیوز با قدرت قطع بالا تعبیه شده که با قطع و سوختن این فیوز جریان اتصال کوتاه در زمانی حدود چند میلی‌ثانیه محدود خواهد شد.

۳- استفاده از Super Conductive Fault Current Limiter: این تجهیزات در واقع مقاومت‌های اهمی متغیری هستند که در جریان‌های عادی شبکه مقاومت کمی داشته و در شرایط

اتصال کوتاه با افزایش جریان، دانسیته جریان در سطح مقطع آن‌ها زیاد شده و باعث افزایش مقاومت آن‌ها به چندین اهم می‌شود. این افزایش مقاومت باعث کاهش جریان اتصال کوتاه و محدود شدن آن می‌شود.

منحنی عملکرد رله‌ها

در خصوص نحوه عملکرد رله‌های حفاظتی مخصوصاً رله‌های جریانی مانند Over Current و Earth Fault دو روش اصلی و متداول در مورد نمودار جریان-زمان آن‌ها وجود دارد:

۱- منحنی Definite Time: در این منحنی یک مقدار برای جریان و یک مقدار برای زمان تعیین و تنظیم می‌گردد. در جریان‌های کمتر از جریان تنظیم‌شده، رله تریپ نمی‌دهد ولی در جریان‌های بالاتر، رله پس از زمان تعیین شده عمل خواهد کرد. در این حالت زمان عملکرد رله ثابت بوده وتابع مقدار جریان خطا نمی‌باشد.

۲- منحنی معکوس یا Inverse Curve: در این نوع منحنی، معمولاً توسط مقادیر تنظیم شده جریان و زمان یک منحنی معکوس تعریف می‌شود یعنی هرچه جریان بیشتر باشد، زمان عملکرد یا تریپ رله کم‌تر خواهد بود. در رله‌های مدرن امروزی، این منحنی از نظر طولی و عرضی و حتی شکل منحنی و شیب معکوس آن قابل تعریف بوده و به کاربر امکان تنظیم و انتخاب هر نوع منحنی را می‌دهند.

در مورد رله‌های Over Load در اکثر موارد منحنی معکوس یا Inverse Curve به کار می‌رود ولی در موارد حفاظتی Over Current یا Earth Fault به طور معمول هر دو منحنی قابل استفاده است.

ترکیب دو رله حفاظتی ساده با نمودارهای Inverse Curve و Definite Time می‌تواند محافظ ساده و خوبی برای دستگاه‌های برقی مخصوصاً الکتروموتورها باشد. بدین ترتیب که در جریانهای کم، منحنی معکوس عمل کرده و برای جریان‌های زیاد عامل حفاظتی دوم با منحنی عملکرد Definite Time فعال می‌شود. این نوع حفاظت ساده از ابتدائی‌ترین نوع حفاظت بوده و مخصوصاً برای الکتروموتورهای سطح Low Voltage مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تست رله‌ها

از آن‌جا که رله‌های حفاظتی، تجهیزاتی هستند که فقط در شرایط غیر عادی شبکه عمل می‌کنند از کارافتادن رله، کاهش دقت آن، به هم خوردن تنظیمات آن و... را تنها در زمان وقوع خطا می‌توان مشاهده کرد که در این صورت با وقوع خطا، رله عملکرد مناسبی نداشته و ممکن است باعث به وجود آمدن خسارات سنگینی به شبکه شود. از این رو لازم است تا در بازه‌های زمانی معین، رله‌ها را تست کرد تا از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شده و در صورت خرابی تعمیر شوند. لازم به ذکر است که رله‌های مدرن امروزی خاصیتی به نام Self Checking دارند که در صورت بروز ایرادی در کار رله، اپراتور را در جریان امر قرار می‌دهند. از این رو این رله‌ها کمتر مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

برای تشخیص صحت عملکرد یک رله، معمولا یک یا چند نقطه از منحنی عملکرد رله را آزمایش می‌کنند. برای این منظور دستگاه‌های مخصوصی وجود دارد که قابلیت تأمین ولتاژ یا جریان با دامنه قابل تنظیم و با زمان مشخص و تنظیم شده را دارا می‌باشند. با اعمال ولتاژ یا جریان مشخص به رله، اندازه‌گیری زمان تریپ آن و مقایسه این زمان با منحنی عملکرد رله می‌توان تشخیص داد که آیا عملکرد رله در ولتاژ یا جریان اعمال شده قابل قبول هست یا نه. در حالت ایده‌آل باید این کار را برای تمامی جریان‌ها و ولتاژهای ممکن انجام داد ولی از آن‌جا که این امر امکان‌پذیر نیست، عملکرد رله برای چند جریان یا ولتاژ مشخص، تست شده و در صورت صحیح بودن زمان تریپ برای این جریان‌ها و ولتاژها، صحت عملکرد رله تأیید می‌شود.

هماهنگی بین رله‌ها

رله‌های حفاظتی earth Fault و Over Current که در Stepهای مختلف یک شبکه شعاعی قرار می‌گیرند، باید از نظر تنظیمات باهم هماهنگی داشته باشند به گونه‌ای که در اثر وقوع خطا و عملکرد رله‌های حفاظتی، کمترین منطقه ممکن از مدار خارج شود. به عنوان مثال در شبکه روبرو، در صورت هماهنگ بودن رله‌ها و وقوع اتصال کوتاه روی باس A، تنها رله شماره یک عمل کرده و فقط باس‌بار A بی‌برق می‌شود. ولی در صورت هماهنگ نبودن رله‌ها ممکن است ابتدا رله شماره ۳ تریپ داده که در این صورت باس‌های A و B بی‌برق خواهند شد.

برای ایجاد هماهنگی بین رله‌ها لازم است تا تنظیمات جریانی و زمانی رله‌های مختلف به طرز صحیح صورت گرفته باشند. برای این منظور روش های مختلفی وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود:

۱- هماهنگی جریانی: هر چه خطای صورت گرفته در یک شبکه به ژنراتور نزدیک‌تر باشد، به دلیل کم بودن امپدانس خطا، شدت جریان عبوری از شبکه بیشتر خواهد بود. از این اصل می‌توان برای ایجاد هماهنگی بین رله‌ها استفاده کرد. بدین صورت که هر چه به منبع تغذیه در یک شبکه شعاعی نزدیک‌تر می‌شویم، رله مورد نظر روی جریان بیشتری تنظیم می‌شود. این روش هماهنگی در عمل دچار پاره‌ای از نواقص است. به عنوان مثال شدت جریان اتصال کوتاه برای رله‌های شماره ۲ و ۳ در شکل روبرو، به دلیل فاصله کم آن‌ها، تفاوت چندانی با هم ندارند و از این رو در عمل تشخیص خطا توسط هر دو رله صورت می‌گیرد.

۲- هماهنگی زمانی: در این روش تنظیم زمانی رله‌ها را از سمت مصرف‌کننده به سمت ژنراتور به ترتیب زیاد می‌کنیم. اشکالی که در این روش وجود دارد این است که در صورت طولانی بودن شبکه و زیاد بودن Stepها، زمان عملکرد رله‌های موجود روی باس‌بارهای اصلی و نزدیک به ژنراتور زیاد خواهد بود و این امر می‌تواند برای شبکه مضر باشد. در این روش خطاهای شدیدتر درزمان‌های طولانی‌تر قطع می‌شود.

۳- هماهنگی جریانی-زمانی: در این روش برای رله‌ها، منحنی‌های معکوس انتخاب می‌شوند و برای هماهنگی بین رله‌ها، منحنی معکوس برای رله‌هایی که در نزدیکی منبع قرار دارند در بالای منحنی مربوط به رله‌های دورتر قرار می‌گیرد. یعنی در یک جریان مشخص، رله پایین دست یا

Downstream زودتر از رله بالادست یا Upstream قطع می‌کند. علاوه بر این هر چه جریان خطا بیشتر باشد، رله سریع‌تر قطع می‌کند. باید توجه داشت که منحنی‌های مربوط به رله‌های Upstream وDown Stream نباید یکدیگر را قطع نمایند و همواره نمودار مربوط به رله Upstream بافاصله زمانی معینی بالاتر از منحنی رله Down Stream قرار گیرد.

در رله‌های جدید امروزی، در صورت وقوع اتصال کوتاه و تشخیص آن توسط یک رله در پایین‌دست، سیگنال‌هایی توسط این رله به رله‌های بالادست داده شده که آن‌ها را Hold می‌کند. بدین طریق از عملکرد رله‌های بالادست و تریپ همزمان آن‌ها جلوگیری می‌شود.

سیستم حفاظت ژنراتور

معمولا گستره و تعداد عوامل حفاظتی که برای یک ژنراتور در نظر گرفته می‌شود، به ظرفیت، اهمیت و حساسیت آن بستگی دارد. هر چه ظرفیت و اهمیت یک ژنراتور بیشتر باشد، سیستم حفاظت کامل‌تری برای آن در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از موارد علاوه بر حفاظت‌های اصلی حفاظت‌های پشتیبان نیز مطرح می‌گردند. برای طراحی یک سیستم حفاظت برای ژنراتور، باید خطاها و حالت‌های غیر عادی که ممکن است در یک ژنراتور به وجود آید را بررسی کرد. این خطاها شامل موارد زیر می‌شود:

۱- Phase Fault یا خطای بین فازها: برای اتصال کوتاه‌های بین فازها، بهترین حفاظت، حفاظت دیفرانسیل است که اتصال‌کوتاه‌های فاز به فاز، سه فاز و دو فاز به زمین را به خوبی تشخیص می‌دهد. در بعضی از موارد و در ژنراتورهای زمین شده با مقاومت، اتصال‌کوتاه یک فاز با زمین نیز توسط رله دیفرانسیل آشکار می‌شود. معمولا حفاظت دیفرانسیل به عنوان حفاظت اصلی یا Primary برای ژنراتور در نظر گرفته می‌شود. رله‌های Over Current با منحنی معکوس که توسط میزان افت ولتاژ کنترل می‌شوند نیز می‌توانند به عنوان رله پشتیبان لحاظ شوند. این نوع رله که با شماره 51V مشخص می‌شود، منحنی عملکرد خود را بر اساس میزان افت ولتاژ ناشی از اتصال‌کوتاه تغییر می‌دهد.

۲- اتصال کوتاه یک فاز با زمین یا Earth Fault: در ژنراتورها، معمولا برای کاهش میزان جریان اتصال کوتاه یک فاز به زمین، نقطه نول آن‌ها را توسط یک مقاومت به زمین متصل می‌کنند. در صورتی که مقاومت متصل شده زیاد باشد، جریان اتصال کوتاه یک فاز با زمین ناچیز بوده و آسیب جدی به سیم‌پیچ ژنراتور وارد نمی‌شود. از طرفی چون ولتاژ نقطه صفر ژنراتور در حالت خطا، افزایش می‌یابد یک رله Over Voltage که روی نول ژنراتور قرار گرفته باشد، قادر به تشخیص این عیب خواهد بود. در ژنراتورهایی که نقطه نول آن‌ها با مقاومت کمی زمین شده باشد، جریان اتصال کوتاه یک فاز با زمین قابل ملاحظه بوده و رله دیفرانسیل قادر به تشخیص آن خواهد بود. همچنین یک رله دیفرانسیل 87N یا همان رله زمین محدود شده نیز قادر خواهد بود با حساسیت بسیار بالا این عیب را تشخیص دهد. رله حفاظتی Back up برای هر دو حالت فوق می‌تواند یک رله زمین از نوع 51N باشد.

۳- قطع جریان تحریک: قطع جریان تحریک ممکن است در اثر اشتباه اپراتور یا اختلال در سیستم تحریک، اتصالی سیم‌های مربوط به میدان یا عوامل دیگر پدید آید. در این شرایط روتور شتاب گرفته و ژنراتور سنکرون به صورت آسنکرون کار می‌کند. در این شرایط ژنراتور باید سریعا از مدار خارج شود. برای حفاظت ژنراتور در این حالت از رله حفاظتی قطع تحریک با کد ANSI شماره ۴۰ استفاده شده و معمولا نیازی به حفاظت BACK UP وجود ندارد. این رله‌ها ممکن است از نوع رله‌های ادمیتانسی، رله‌های فرکانسی، رله‌های جهت‌یاب و یا رله‌های Under Voltage باشند.

۴- افزایش جریان تحریک: افزایش غیر طبیعی جریان تحریک که با افزایش نسبت ولتاژ به فرکانس همراه هست، باعث افزایش بیش از حد فلو یا شار معناطیسی در درون هسته شده و موجب گرم شدن بیش از حد هسته می‌شود. در مواقع استارت یا بستن ژنراتور در صورتی که ژنراتور با فرکانس کمتر از حد معمول کار کند و یا در هنگام قطع بار ناگهانی از ژنراتور، ممکن است افزایش جریان تحریک رخ دهد. برای حفاظت در این حالت از رله‌های مخصوص که با سنجش نسبت ولتاژ به فرکانس کار می‌کنند استفاده می‌شود. این رله‌ها که با کد شماره ۲۴ مشخص می‌شوند، ممکن است از منحنی عملکرد معکوس و یا Definite Time برای حفاظت استفاده کنند.

۵- افزایش ولتاژ: در شرایط قطع بار ژنراتور و یا اشکال در سیستم تحریک، امکان افزایش ولتاژ ژنراتور وجود دارد. این شرایط ممکن است به گونه‌ای باشد که نسبت ولتاژ به فرکانس افزایش پیدا نکند. در این شرایط رله Over Voltage با کد شماره ۵۹، ژنراتور را محافظت می‌کند.

۶- بار نامتعادل: وجود عدم تعادل در جریان‌های سه فاز ژنراتور، باعث ایجاد مؤلفه منفی جریان یا Negative Phase Sequence در ژنراتور شده که وجود این مؤلفه باعث می‌شود تا در روتور جریانی با دو برابر فرکانس عادی القا شود. این امر موجب گرم شدن و آسیب رسیدن به روتور می‌شود. رله جریانی Negative Phase Sequence با کد شماره ۴۶ مولفه منفی جریان را محاسبه کرده و براساس آن و در زمان مناسب ژنراتور را حفاظت می‌کند.

برای یک ژنراتور حفاظت‌های دیگری نیز در نظر گرفته می‌شود که از آن‌ها می‌توان به حفاظت در برابر افزایش و کاهش فرکانس، موتوری کار کردن ژنراتور، اضافه بار، اتصال بین حلقه‌ها، اتصال فیلد ژنراتور با

زمین و از سنکرون خارج شدن ژنراتور اشاره کرد. در جدول زیر انواع حفاظت‌هاي Primary و Backup ژنراتور آمده است.

PROTECTIVE SCHEME		
FAULT CONDITIONS	PRIMARY	BACKUP
Phase Faults (Phase To Phase ; 3-Phase)	87 G	51 V 87u, 46
Ground Faults (Phase To Ground) High Impedance Grounding Low Impedance Grounding	59 N , 27 Tn 87 Gd	50 N/51n , 27/59 50n/51n
Loss Of Excitation	40	
Overvoltage Over Excitation Unbalanced Currents	59 24 46	59 59
Abnormal Frequency Anti-Motoring Dead Machine Energization	81 O/U 32 67	81 O/U 32
Breaker Failure Fails To Trip Pole Flashover	50 B f50 N (Transformer (High Side Neutral	46
System Backup Phase Faults Ground Faults	21 , 51 V 51 N Transformer High Side) (Neutral	46
Field Ground	64 F	

سیستم حفاظت ترانسفورماتور

در ترانسفورماتورها وجود رله بوخهلتس خود به تنهایی حفاظت کاملی در مقابل خطاهای داخل سیم‌پیچی‌ها و نیز مدار ثانویه ترانسفورماتور خواهد بود. اکثر خطاهایی که در داخل یک ترانسفورماتور اتفاق می‌افتد، باعث افزایش دما و ایجاد گاز در داخل روغن و یا حرکت روغن بین مخزن اصلی و مخزن روغن می‌شود که رله بوخهلتس می‌تواند این خطاها را تشخیص دهد. با این وجود معمولا از رله‌های دیگری نیز برای حفاظت ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

در ترانسفورماتورها با قدرت نامی کمتر از ۵۰۰۰ کیلوولت‌آمپر معمولا از فیوزها برای حفاظت استفاده می‌شود در حالی که در ترانسفورماتورهای بزرگتر از این میزان به حفاظت‌های کاملتری احتیاج بوده و از مجموعه‌ای از رله‌ها استفاده می‌شود.

حفاظت دیفرانسیل با شماره 87T یکی از معمول‌ترین حفاظت‌هایی است که برای ترانسفورماتورهای بزرگ در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای حفاظت سیم‌پیچی‌های ترانس در برابر خطاهای زمین نیز ممکن است از رله Restricted Earth Fault با کد شماره 64REF نیز استفاده شود. این دو رله معمولا به عنوان رله اصلی یا Primary در حفاظت ترانسفورماتورها در نظر گرفته می شود.

در ترانسفورماتورهای مثلث به ستاره، در طرف ثانویه معمولا رله‌های حفاظتی Over Current با شماره 51 و نیز رله حفاظتی Earth Fault با شماره 51G نیز در نظر گرفته می‌شوند که این رله‌ها نقش رله Backup یا پشتیبان را دارا می‌باشند.

بر روی اغلب ترانسفورماتورها از دو یا چند Temperature Switch استفاده شده است که دمای روغن ترانس و نیز دمای سیم‌پیچی‌ها را اندازه می‌گیرند. این تجهیزات معمولا روی دو مقدار تنظیم می‌شوند. مقدار اول دمایی است که در آن آلارم داده شده و مقدار دوم، دمایی است که در آن دستور تریپ صادر می‌شود.

برای حفاظت ترانسفورماتور در برابر کاهش سطح روغن نیز معمولا از یک Level Switch استفاده می‌شود. این Switch نیز ممکن است برای ظهور آلارم و یا اعمال تریپ در دو مرحله تنظیم شده باشد.

سیستم حفاظت واحدهای ژنراتور-ترانسفورماتور

معمولا در واحدهای تولیدی با ظرفیت بالاتر از ۵۰ مگاوات، کلید خروجی ژنراتور حذف شده و ژنراتور مستقیماً به ترانسفورمر بالابر وصل می‌شود. در این حالت ژنراتور و ترانسفورماتور به صورت یک واحد تلقی شده و کلید جداکننده این مجموعه در قسمت فشار قوی ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. در این شرایط کلیه تریپ‌های تجهیزات حفاظتی مربوط به ژنراتور، ترانسفورماتور بالابر و ترانسفورماتور کمکی به کلید خروجی ترانسفورماتور اعمال می‌شود.

با توجه به یک پارچه بودن سیستم در بعضی موارد می‌توان از یک فانکشن حفاظتی برای کل سیستم استفاده نمود. در اینجا به شرح دو رله حفاظتی مهم برای سیستم اتصال واحد ژنراتور- ترانسفورماتور می‌پردازیم:

۱- *حفاظت دیفرانسیل:* برای تشخیص خطاهای فاز به فاز و سه فاز به یکدیگر، می‌توان از یک سیستم حفاظت دیفرانسیل واحد برای کل مجموعه استفاده کرد. بدین ترتیب که یک مجموعه از ترانس‌های جریان مربوط به این سیستم، در طرف فشار قوی ترانسفورماتور بالابر و مجموعه دوم روی فازهای ژنراتور و در سمت نول قرار داده می‌شود. بدین ترتیب کل مجموعه ترانسفورماتور، ژنراتور و باس‌بارهای ارتباطی مورد حفاظت دیفرانسیل قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که در صورت استفاده از ترانسفورماتور کمکی، لازم است یک مجموعه ترانس جریان نیز روی فازهای این ترانسفورماتور قرار گیرد. در بعضی موارد به منظور حفاظت کامل‌تر علاوه بر حفاظت فوق، دو مجموعه رله دیفرانسیل به صورت مجزا برای ژنراتور و ترانسفورمر و یا یک مجموعه مستقل برای ژنراتور طراحی می‌شود.

۲- *حفاظت اتصال زمین:* مجموعه ژنراتور، ترانسفورماتور و ترانسفورماتور کمکی متشکل از دو بخش با دو سطح ولتاژ متفاوت هستند که باید به صورت مجزا در برابر اتصال زمین محافظت شوند. برای مجموعه تحت ولتاژ ژنراتور یعنی سیم‌پیچی‌های ژنراتور، سیم‌پیچی‌های اولیه ترانسفورماتور کمکی و نیز سیم‌پیچی‌های طرف فشار ضعیف ترانسفورمر بالابر، تشخیص اتصال زمین با نصب رله اتصال زمین روی نقطه نول ژنراتور قابل انجام است. برای حفاظت سیم‌پیچی‌های فشار قوی ترانسفورماتور و نیز شبکه بعد از آن، از رله حفاظت زمین بر روی نقطه نول سیم‌پیچی‌ها استفاده می‌شود. در

صورتی که فقط حفاظت سیم‌پیچی‌های طرف فشارقوی ترانسفورماتور مد نظر باشد، می‌توان از حفاظت زمین محدود شده یاRestricted Earth Fault استفاده کرد.

سیستم حفاظت موتورهای الکتریکی

برای حفاظت موتورهای الکتریکی در سطح فشار ضعیف در اغلب موارد تنها از حفاظت‌های Over Current و Over Load استفاده می‌شود. در حالی که برای الکتروموتورهای سطح Medium Voltage بدلیل حساسیت و اهمیت آنها از حفاظت‌های بیشتری استفاده می‌شود. این حفاظت‌ها معمولا شامل موارد زیر می‌شود:

۱- رله حفاظتی Over Current با شماره ۵۱

۲- رله حفاظتی Over Load با شماره ۴۹

۳- رله حفاظتی Locked Rotor با شماره 51LR

۴- رله حفاظتی Earth Fault با شماره 51N

۵- رله حفاظتی Negative Phase Sequence با شماره ۴۶ برای حفاظت در مقابل بار نامتعادل.

۶- رله حفاظتی Under Current باشماره ۳۷ برای حفاظت در موارد قطع بار مکانیکی

۷- رله حفاظتی Under Voltage با شماره ۲۷ برای حفاظت در مقابل افت ولتاژ شبکه

۸- رله حفاظتی با شماره ۶۶ برای کنترل تعداد استارت‌های الکتروموتور

۹- رله حفاظتی دیفرانسیل با شماره 87M برای حفاظت سیم‌پیچی‌ها که معمولا برای موتورها با قدرت بالا به کاربرده می‌شود.