Digital Protection

Translated by Moravej & shareati

مقدمه

امروزه، بازار به شدت رقابتی انرژی الکتریکی، بازده بالاتری را در تولید برق می طلبد و این امر به خاطر رشد تقاضای برق و به تبع آن سیر تجدید ساختار در بازارها و نیز ورود سرمایه گذاران بخش خصوصی می‌باشد. از این رو دغدغه اصلی که صنعت برق با آن مواجه است، قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. تضمین یک منبع انرژی با قابلیت اطمینان بالا به معنی تأمین و رساندن برق تمامی مشتریان بدون قطعی و وقفه می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، تمامی پنج ناحیه حفاظتی یک سیستم قدرت مدرن (بخش ۱-۱) باید به درستی و به طور مؤثر حفاظت گردند.

۱-۱- ساختار یک سیستم حفاظتی

یک سیستم حفاظتی مدرن یک شبکه پیچیده به هم پیوسته است که مشتمل بر پنج ناحیه حفاظتی ذکر شده در زیر می‌باشد:

۱. **مولد ها** : از ضروری ترین اجزاء یک سیستم قدرت می باشند که ولتاژ تولیدی آن هادر محدوده ی ۱۱ تا ۳۳ کیلوولت است. واحد های تولیدی مدرن امروزی از روش تحریک بدون جاروبک استفاده می‌کنند که این قابلیت را در اختیار مولد می‌گذارد که انرژی الکتریکی را با ولتاژ ۳۳ کیلوولت تولید نماید و این درحالی است که در مدل‌های قدیمی سطح ولتاژ تولید در حد ۱۱ کیلو ولت محدود بود. قدرت خروجی واحد های بخار در حد ۵۰ تا ۱۵۰۰ مگاوات می‌باشد. این واحدها برای تولید با فرکانس ۶۰ هرتز در سرعت ۳۶۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه کار می‌کنند در حالیکه سرعت کاری آن‌ها برای فرکانس ۵۰ هرتز ۳۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. بنابراین بخاطر این سرعت بالا باید روتور آن‌ها به صورت استوانه‌ای باشد. در توربین های مدل آبی، سرعت به مراتب پایین‌تر بوده و این به خاطر نیروی پایین‌تر آب نسبت به بخار است و به همین دلیل این نوع مولدها به صورت قطب برجسته می‌باشند.

۲. **ترانسفورماتورها:** این تجهیزات برای بالا بردن ولتاژ در ابتدای خط و بالتبع پایین آوردن این سطح ولتاژ در پایان خط در شبکه بکار گرفته می شوند. عموماً به خاطر مسائل عایقی و اجرایی بودن طراحی صورت گرفته، حداکثر ولتاژ تولیدی بین ۱۱ تا ۳۳ کیلوولت می‌باشد. در یک شبکه قدرت مدرن، برای انتقال توان تولیدی از ژنراتور به مصرف‌کننده نهایی به چهار تا پنج تغییر در سطح ولتاژ نیاز است.

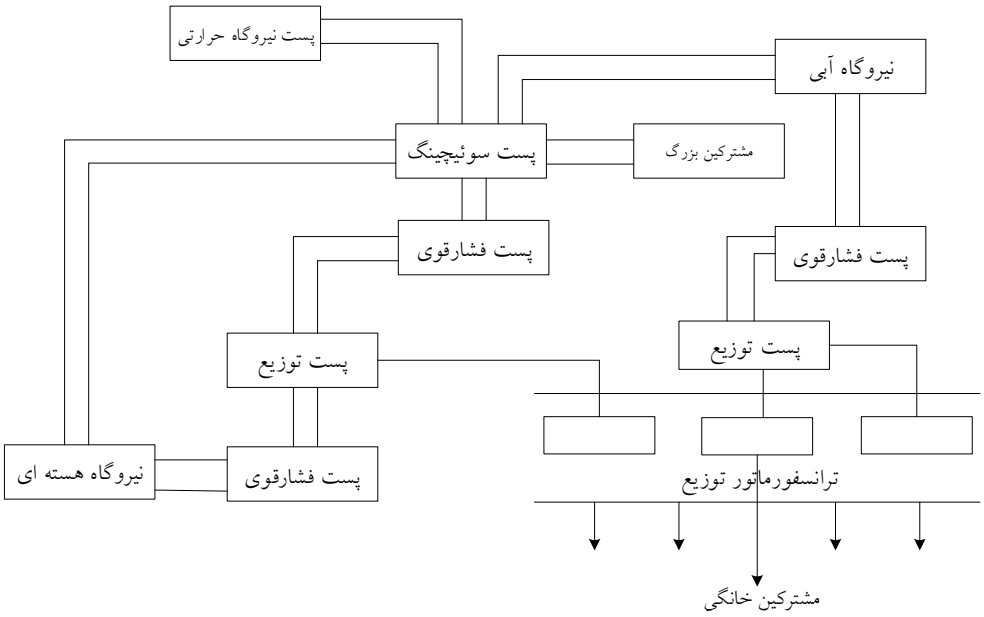
۳. **خطوط فوق توزیع و توزیع:** همان بخشی از سیستم قدرت است که ولتاژ شبکه در بالاترین حد خود است. به دلایل اقتصادی، ولتاژ تولیدی توسط مولدها باید به مقدار زیادی بالا رود که در برخی موارد به بالاتر از ۱۰۰۰

کیلوولت نیز می‌رسد. معمولاً محدوده ولتاژ در سطح فوق توزیع از ۳۳/٦٦ تا ۱۳۲ کیلوولت می‌باشد. به منظور حفظ سطح ولتاژ خطوط انتقال در محدوده مجاز، بانک‌های خازنی و سلفی در پست‌ها نصب می‌شود. در بیشتر موارد، توان مورد نیاز صنایع بزرگ نیز از شبکه فوق توزیع تأمین می‌شود.

۴. **سیستم توزیع:** بخشی از شبکه قدرت است که پست های توزیع را به مصرف‌کننده‌ها مرتبط می سازد. خطوط توزیع اولیه[1] در سطح ولتاژ ۱۱ تا ۳۳ کیلوولت می‌باشند. شبکه توزیع ثانویه به منظور فراهم کردن امکان استفاده مشتریان تجاری و خانگی، ولتاژ را تا سطح ۲۳۰/٤۰۰ ولت کاهش می‌دهند. صنایع کوچک ممکن است در برخی موارد به صورت مستقیم از فیدرهای شبکه توزیع اولیه (۱۱ تا ۳۳ کیلوولت) تغذیه گردند.

۵. **بار:** مصرف اصلی در یک شبکه قدرت را بارهای خانگی، اداری و صنعتی تشکیل می‌دهند. مصارف خانگی و اداری اکثرا شامل روشنایی، گرمایش و سرمایش می‌باشند. این گونه بارها مستقل از فرکانس بوده و مقدار توان راکتیو مصرفی آن‌ها ناچیز می‌باشد. ولی بارهای صنعتی هر دو نوع مصرف توان حقیقی و غیرحقیقی را تواماً دارند.

نمایی از اتصالات درونی یک شبکه قدرت در زیر نمایش داده شده است



شکل (۱-۱): اجزای اصلی یک شبکه قدرت به هم پیوسته

[1] . Primary distribution lines

۲-۱- برای حفاظت از یک سیستم قدرت به چه نیاز داریم؟

شبکه قدرت در هر کشور و یا حتی منطقه‌ای ستون فقرات و پایه پیشرفت اقتصادی آن بوده و عاملی تعیین‌کننده در ارتقاء سطح کیفی زندگی افراد آن جامعه می باشد. از این رو نیاز به عملکرد مؤثر، قابل اطمینان و کارآمد سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد. به دلایل اقتصادی تجهیزات یک سیستم قدرت همچون مولدها، ترانسفورماتورها، راکتورها، مدارشکن ها، باسبارها، خطوط انتقال، خطوط توزیع و ... برای کارکرد در شرایط عادی شبکه طراحی شده‌اند. در طی بروز هرگونه شرایط غیرعادی در هر بخش از شبکه، ضروریست که بخش حادثه دیده از سایر بخش های سالم جدا گردد و اگر این مهم تحقق نیابد، اضافه ولتاژ و اضافه جریان در شبکه پخش شده و باعث خسارت رساندن به بخش های سالم دیگر شده و حتی می تواند خاموشی های وسیعی را به همراه داشته باشد.

از این رو اگر هر نوع خطایی در هر قسمت از شبکه رخ دهد، باید تجهیز یا تجهیزات حادثه دیده سریعاً از شبکه خارج شوند تا سایر بخش‌های سالم بتوانند توان مورد نظر را تأمین کنند. جداسازی تجهیزات حادثه دیده، بر اساس طرح‌های حفاظتی بوده که توسط رله‌ها و سوئیچ‌گیرها یا همان مدارشکن‌ها انجام می‌پذیرد. بنابراین ضروری است که برای حفاظت از سیستم قدرت مذکور یک طرح حفاظتی مطلوب و کارآمد استفاده گردد. اولین وظیفه یک رله این است که تنها در صورت بروز خطا عملکرد داشته باشد و در حالت عادی عملی نکند. یک رله در هنگام بروز خطا آن را تشخیص داده و پس از تعیین محل خطا، سیگنال فرمان را به مدارشکن مناسب (تجهیزی برای قطع مدار که با تحریک سیم‌پیچ قطع[1] آن عمل می‌کند) ارسال نماید تا بخش حادثه دیده از شبکه جدا گردد.

درحالت بروز شرایط غیرعادی، تغییراتی در برخی پارامترها نظیر جریان، ولتاژ، فرکانس و یا حتی زاویه بوجود می‌آید. به منظور تشخیص شرایط غیرعادی در هر بخش از سیستم قدرت، رله از یک و یا تعداد بیشتری از پارامترهای مذکور استفاده می‌کند. شرایط غیرعادی در یک سیستم قدرت عبارتند از:

- اتصال کوتاه در خطوط توزیع و یا انتقال
- اضافه ولتاژ در طی کلیدزنی یا صاعقه
- اضافه سرعت در ژنراتورها و یا موتورها
- قطع تحریک ماشین‌ها
- اضافه حرارت در استاتور و روتور ماشین‌ها

[1] . Trip coil

- شکست عایقی بین سیم‌پیچ‌های داخلی
- سطح روغن پایین در ترانسفورماتورها و مدارشکن‌ها

بنابراین واضح است که اگر حتی تمامی روش های پیشگیرانه در سیستم قدرت اتخاذ شود، همچنان نیاز است که سیستم حفاظتی طوری طراحی گردد که به سرعت از وقوع شرایط غیر قابل تحمل و ناخواسته که مواردی از آن در بالا اشاره شد، جلوگیری کند. علاوه بر این، سیستم حفاظتی طراحی شده باید سیستمی با قابلیت اطمینان بالا و سریع باشد و علاوه بر آن قابل تعمیر و نگهداری نیز باشد.

۳-۱- سیر پیشرفت حفاظت

در ابتدا ژنراتورهای کوچک به همراه شبکه‌های قدرت کوچک استفاده می‌شدند و برای حفاظت خودکار آن‌ها و جداسازی بخش حادثه دیده از فیوز استفاده می‌شد. اما پس از حادثه به منظور بازیابی منبع تولیدی و امکان استفاده از توان سیستم باید فیوز عوض می‌شد. این مشکل نیز در سال ۱۹۰۲ با استفاده از رله الکترومغناطیسی نوع آرمیچر جذبی حل گردید. این گونه رله ها عملکردشان برپایه تشخیص اضافه جریان می‌باشد. با گسترش و به کارگیری رله‌ها، حال این نیاز احساس می‌شد که در طرح های حفاظتی باید از قابلیت انتخابگری برخوردار بود (بدین معنا که با قطع حداقل نواحی حادثه دیده بتوان بیشترین مناطق سالم را در شبکه حفظ کرد تا سیستم به کار خود همچنان ادامه دهد). برای دستیابی به این مهم، درسال ۱۹۰۹ رله های القایی با دیسک چرخان که دارای مشخصه معکوس با زمان بودند به کار گرفته شدند. مفهوم جهتی در این رله ها بیان می‌کند که خطای رخ داده در کدام سمت از رله اتفاق افتاده است. سیم های پایلوت نیز برای انتقال اطلاعات بین تجهیزات حفاظتی دو انتهای خط به کار گرفته می‌شدند. عرضه‌ی رله های دیستانس برای جایگزینی با رله های امپدانسی در سال ۱۹۲۳ صورت پذیرفت و پس از آن رله های مهو مدل القایی که دارای ویژگی‌های منحصر به فرد بسیاری بودند به کار گرفته شدند. سپس رله‌های پلاریزه جریان مستقیم با دقت و حساسیت بالاتر، در سال ۱۹۳۹عرضه شدند.

اولین رله های استاتیکی که مجهز به لامپ‌های خلأ[1] بود در اوایل دهه ٤٠ عرضه گردید. با معرفی ترانزیستور، مسیر جدیدی در پیش روی حفاظت باز شد و طرح‌های حفاظتی جدیدی همچون مقایسه فاز، مقایسه قله[2]، مقایسه میانگین[3]

[1]. Thermionic valves
[2]. Block spike comparator
[3]. Block average comparator

و غیره توسعه پیدا کرد. مقایسه‌گرهایی با ورودی‌های متعدد و با مشخصه‌های چهارگوش[1] نیز در سال ۱۹۶۰ ابداع شد. اختراع و بکارگیری رله های استاتیکی مزایای فراوانی از جمله کم کردن بار مصرفی ترانس های جریان[2] و ترانس های ولتاژ[3] را به همراه داشت. عملکرد سریع، طول عمر بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری پایین به دلیل حذف تجهیزات متحرک مکانیکی و رفع مشکلات ناشی از آسیب دیدن و سوراخ شدن تیغه‌ها از سایر مزایای رله‌های استاتیک می‌باشند.

پس از ابداع رایانه‌های دیجیتال و پیشرفت در بحث نمونه گیری و نگهداری داده های[4] ولتاژ و جریان، بکارگیری روش های دیجیتال (عددی) در حفاظت امکان‌پذیر شد.

روش‌های عددی محاسبه امپدانس برای پیاده‌سازی تکنیک‌های دیجیتال در حفاظت خطوط انتقال مفید هستند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، بکارگیری طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده[5] با جایگزینی رایانه‌های دیجیتال آغاز گردید. هر چند که مفاهیم محاسبات دیجیتال ثابت مانده است اما خطوط انتقال با ولتاژ بسیار/ فوق‌العاده بالای[6] کنونی نیازمند استفاده از طرح‌های حفاظتی مطمئن و با سرعت عملکرد بالا هستند. برای دستیابی به این هدف، تقریباً تمامی رله‌های دیستانس الکترومغناطیسی با نوع دیجیتالی خود جایگزین شدند. سمت و سوی پیشرفت و تحول امروزی در زمینه توسعه رله‌ها در جهت بکارگیری سیستم‌های حفاظتی تطبیق‌پذیر و طرح‌های حفاظتی مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم موجک می‌باشد.

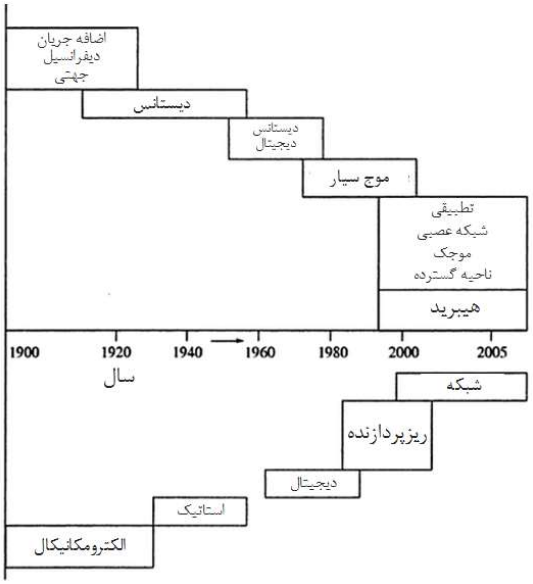
۱-۳-۱- پیشرفت های اخیر

به طور معمول در سطوح پایین ولتاژ، حفاظت براساس اندازه‌گیری مؤلفه‌های فرکانس قدرت صورت می‌پذیرد. روش‌های جدیدی نیز برای تحقق طرح‌های حفاظتی دیجیتال اقتباس شده‌اند. امروزه برای حفاظت با سرعت بسیار بالا[7]، طرح‌های حفاظتی مبتنی بر امواج گذرا متداول شده‌اند. طرح‌های حفاظتی تطبیقی نیز به دلیل پایداری بهتر به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی[8] و تبدیل موجک نیز عملکرد سیستم حفاظتی را بهبود می‌دهند. بنابراین روش‌های حفاظت متعددی بر مبنای مفاهیم مختلف ارائه شده‌اند. در هر مرحله از پیشرفت

---

[1] . Quadrilateral characteristics
[2] CTs
[3] PTs
[4] Sampling-and-holding
[5] . Microprocessor
[6] Extra\Ultra High Voltage (EHV\UHV)
[7] Ultra-high-speed protection
[8] Artificial Inteligence (AI)

حفاظت سیستم‌های قدرت باید تعادل و مصالحه‌ای بین موضوع‌هایی چون عملکرد مناسب و اقتصادی بودن، قابلیت اعتماد[1] و امنیت[2]، سادگی و پیچیدگی سیستم حفاظتی، دقت و سرعت و نیز قابل اطمینان بودن[3] و دارا بودن قابلیت پیاده‌سازی[4] صورت گیرد. بدیهی است هر چه خطا سریع‌تر رفع شود، اختلال و اغتشاش کمتری بر شبکه قدرت تحمیل می‌شود. سیر پیشرفت طرح های حفاظتی در شکل (۲-۱) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۱): سیر تحول مفاهیم رله‌گذاری حفاظتی و پیشرفت فن آوری رله‌ها

امروزه تشخیص خطا با استفاده از رله‌های عددی صورت می‌گیرد که در بسیاری از موارد شامل یک پردازنده سیگنال دیجیتال[5] به همراه مدارات اندازه‌گیری و مدارات خروجی می‌باشند. بنابراین با افزایش سرعت پردازشگرها و قدرت محاسباتی آن‌ها در آینده می‌توان به بهبود روزافزون طرح‌های حفاظتی امید داشت.

۲-۳-۱- رله های حفاظتی به چه صورت عمل می کنند؟

برای هر مکان و یا هر نوع از حفاظت، در هنگام بروز خطا، در یک یا چند مورد از کمیت‌های زیر اختلاف مشهودی وجود خواهد داشت:

---

[1] . Dependability
[2] . Security
[3] . Credibility
[4] . Conceivability
[5]. Digital Signal Processing (DSP)

- اندازه
- فرکانس
- دوره زمانی
- زاویه
- نرخ تغییرات
- میزان تغییرات
- شکل موج

بنابراین رله از هر نوعی که باشد، به راحتی یکی از انواع تغییرات مذکور را حس کرده و بسته به میزان تغییر، عملکرد خواهد داشت.

۴-۱- فلسفه اصلی یک طرح حفاظتی

سه حالت اصلی که سیستم حفاظتی بر مبنای آن‌ها تحلیل می‌شود، در زیر توضیح داده شده است:

الف) عملکرد عادی بدین معناست که هیچ خطایی در تجهیزات و یا اشتباهی توسط پرسنل صورت نگرفته است. همچنین بدین معناست که هیچ اثری ناشی از بلایای طبیعی نیز در سیستم قدرت رخ نداده است.

ب) پیشگیری از خطاهای الکتریکی به معنای در نظر گرفتن ویژگی‌هایی در طراحی سیستم قدرت است که باعث پیشگیری از وقوع خطا گردد. ویژگی‌های یاد شده شامل در نظر گرفتن سطح عایقی لازم و مناسب، هماهنگی عایقی مطابق با ظرفیت برقگیرها، استفاده از سیم زمین (گارد) در خطوط هوایی و مقاومت کم (پای برج) فونداسیون دکل‌های برق و نیز به کارگیری فرآیندهای مناسب تعمیرات و نگهداری سیستم قدرت می‌باشد.

ج) کاهش اثرات خطای الکتریکی رخ داده در شبکه که در صورت بروز این حالت باید تمهیدات حفاظتی پیش بینی شده وارد عمل شود. این تمهیدات حفاظتی شامل محدود کردن میزان جریان اتصال کوتاه، جداسازی خیلی سریع بخش حادثه دیده از شبکه و نیز تمهیداتی که وجود خطاهای ابتدایی[1] را بررسی کرده و درصورت وقوع آن اعلام هشدار نماید.

[1] . Incipient Fault

وظیفه اصلی یک سیستم حفاظتی اینست که به سرعت بخش حادثه دیده را از سایر بخش های سیستم حفاظتی جدا سازد. شرایط خطا به صورت های زیر می باشد:

- خطای متعادل سه فاز
- انواع خطاهای غیر متعادل که سبب می‌شوند سیستم در یک حالت غیر عادی عمل کند.

وظایف ثانویه ای که حفاظت باید انجام دهد عبارتند از:

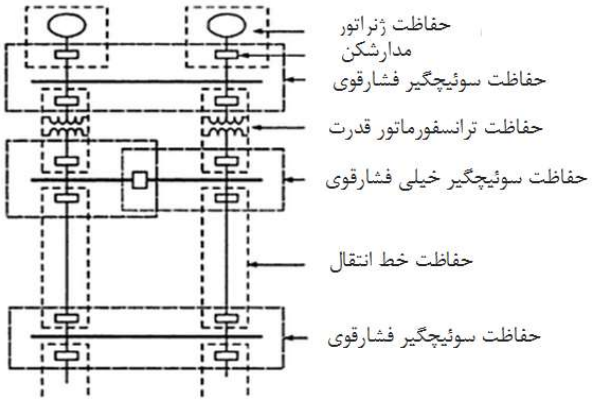
- گردآوری اطلاعات در رابطه با محل و نوع خطا. این اطلاعات به تسریع تعمیرات کمک خواهد کرد.
- تشخیص درست و دقیق منطقه سالم و حادثه دیده از یکدیگر.

۱-۴-۱- نواحی[1] حفاظتی

یک سیستم قدرت شامل انواع مختلف تجهیزات و ادوات جانبی نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها، انتقال اولیه[2]، انتقال ثانویه، توزیع اولیه[3]، توزیع ثانویه، پست‌ها و غیره می‌باشد. نوع حفاظت بسته به نوع و ماهیت تجهیز حفاظت شده انتخاب می‌گردد. بنابراین منطقی است که یک سیستم قدرت به نواحی حفاظتی مختلفی تقسیم شود و به همین دلیل است که حفاظت سیستم قدرت به حفاظت ژنراتور، حفاظت ترانسفورماتور، حفاظت خطوط انتقال، حفاظت موتور، حفاظت باسبار و غیره تقسیم بندی می‌شود. نواحی حفاظتی طوری در نظر گرفته می شوند که در مجموع و در کنار هم بتوانند کل شبکه قدرت را تحت پوشش قرار دهند. همپوشانی نواحی حفاظتی به منظور جلوگیری از ایجاد نواحی حفاظت نشده یا اصطلاحاً کور صورت می‌گیرد. حال اگر ناحیه‌ای حفاظت نشده باشد، بدین معناست که اگر در آن خطایی رخ دهد، دیده نشده و رفع نخواهد شد که به این نقاط اصطلاحا نقاط کور[4] گفته می‌شود. در مورد خطاهایی که در محدوده همپوشانی دو ناحیه حفاظتی رخ می‌دهد، مدارشکن‌ها در هر دو یا چند ناحیه باید وارد عمل شده و بخش حادثه دیده را از سایر قسمت‌های شبکه جدا کنند. نواحی حفاظتی یک سیستم قدرت نمونه در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. همپوشانی نواحی حفاظتی سبب می‌شود در صورت بروز خطا حتی در ناحیه مقابل، تمامی مدارشکن‌های موجود در هر دو ناحیه عمل کنند.

---

[1]. Zones
[2]. Primary Transmission
[3]. Primary Distribution
[4]. Blind spot



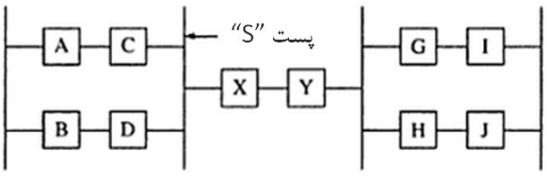
شکل (۳-۱): نواحی حفاظتی یک سیستم قدرت

۲-۴-۱- حفاظت اولیه

حفاظت اولیه یا همان حفاظت اصلی، لایه اصلی حفاظت است. همانطور که در شکل (۳-۱) مشاهده می شود، مدارشکن در نقطه اتصال به هر تجهیزی قرار داده شده است. بنابراین برای جداسازی ناحیه‌ای که خطا در آن رخ داده است، باید نزدیکترین مدارشکن به خطا را قطع نمود. در مواردی که دو ناحیه مجاور همپوشانی دارند، اگر خطایی رخ دهد ممکن است مدارشکن هر دو ناحیه عمل کند (در حالیکه صرفا عملکرد در یک ناحیه کافی بوده است). البته این امر برای تضمین سطح بالایی از قابلیت اطمینان اجتناب ناپذیر است. این امر از این روست که از عدم وجود نقطه کور حفاظتی در شبکه اطمینان حاصل شود. از آنجا که طرح‌های حفاظتی به منظور حفاظت سیستم در تمامی شرایط محتمل در نظر گرفته شده است باید قابلیت اطمینان آن‌ها نزدیک به ۱۰۰٪ باشد و اگر ۱۰۰٪ نباشد به طور قطع نباید کمتر از ۹۵٪ باشد. سطح مطلوب قابلیت اطمینان می‌تواند با طراحی صحیح سیستم و حصول اطمینان از نصب صحیح و تعمیرات و نگهداری مناسب مدارشکن، رله‌ها، مکانیزم قطع، ترانسفورماتورها، سیم‌بندی و سایر عناصر به دست آید.

۳-۴-۱- حفاظت پشتیبان

در صورتی که حفاظت اولیه به هر دلیلی موفق به قطع مدارشکن نشود، حفاظت پشتیبان به عنوان لایه دوم حفاظتی وارد عمل می شود. البته حفاظت پشتیبان با یک تأخیر زمانی مناسب وارد عمل خواهد شد که این زمان برای عملکرد حفاظت اصلی کافی می باشد. حفاظت پشتیبان برای خط انتقال XY در شکل (٤-١) نمایش داده شده است.



شکل (٤-١): نمایش حفاظت پشتیبان برای خط انتقال (بخش XY)

اگر خطایی در پست S رخ دهد، رله‌های موجود در موقعیت‌های A، B و Y حفاظت پشتیبان برای این ناحیه را تأمین می‌کنند. به طریق مشابه، رله های موجود در موقعیت‌های A و Y یک حفاظت پشتیبان برای خطای حادث در خط DB را فراهم می‌آورند. در هنگام عملکرد حفاظت پشتیبان در مقایسه با شرایطی که حفاظت اصلی به درستی عمل کند، ناحیه بزرگ‌تری از شبکه قدرت جدا خواهد شد. این امر از آنجا ناشی می‌شود که عملکرد حفاظت پشتیبان مستقل از پارامترهایی است که موجب اشتباه حفاظت اصلی و عدم عملکرد آن می‌شود. حفاظت پشتیبان باید با یک تاخیر زمانی مناسب وارد عمل گردد تا اگر حفاظت اصلی قادر به رفع خطا بود زمان کافی برای عملکرد در اختیار داشته باشد.

یک مجموعه از رله پشتیبان، حفاظت مداری که مدارشکن آن توسط آن رله‌ها کنترل می‌شود را فراهم می‌نماید. رله‌های پشتیبان شامل سه نوع زیر می‌باشند:

۱. *پشتیبانی توسط رله دیگر:* یک طرح پشتیبان محلی می‌باشد که در آن از هر کدام از تجهیزات حفاظتی از جمله رله اصلی، ترانس جریان، ترانس ولتاژ و مبدل[1] دو نمونه وجود داشته باشد و یکی پشتیبان دیگری باشد.
۲. *پشتیبان مدارشکن:* در شرایطی که چندین مدارشکن به یک باسبار متصل است، استفاده از مدارشکن پشتیبان امری ضروریست. در این نوع از حفاظت، یک رله با تاخیر زمانی به عنوان بخشی از حفاظت اصلی عمل خواهد کرد. عملکرد آن بدین صورت است که اگر در زمان تعیین شده مدارشکن مورد نظر به درستی عمل نکند، سایر مدارشکن‌ها قطع نمایند.
۳. *پشتیبانی از راه دور[2]:* رله‌های پشیتبان که در پست مجاور قرار داده شده‌اند از کل مجموعه طرح حفاظتی از جمله رله و سایر المان‌ها پشتیبانی به عمل می‌آورند. این نوع پشتیبان به عنوان ارزان ترین نوع حفاظت پشتیبان عمدتاً مورد استفاده قرار می گیرد.

۴-۴-۱- نیازهای کیفی یک سیستم قدرت

قابلیت انتخاب (تشخیص)، قابلیت اطمینان، حساسیت، پایداری و سرعت که از پارامترهای مهم و اساسی در یک طرح حفاظتی است که باید در یک سیستم حفاظتی تامین گردد. این موارد در ادامه مورد بحث قرار گرفته‌اند.

---
[1] . Transducer
[2]. Remote Backup

قابلیت انتخاب (تشخیص)

یک ویژگی سیستم حفاظتی است که آن را قادر می‌سازد شرایطی را که نیازمند عملکرد فوری است از شرایطی که نیاز به عملکرد نداشته و یا عملکرد آن همراه با تأخیر است تشخیص دهد. به عنوان مثال، رله باید توانایی تشخیص شرایط خطا و اضافه بار را داشته باشد. جریان مغناطیس کننده هجومی ترانسفورماتور نیز ممکن است مشابه با جریان خطا باشد و رله باید این دو را از یکدیگر تشخیص داده و در مقابل جریان هجومی عملکرد نداشته باشد. نوسان توان در یک سیستم به هم پیوسته نیز باید توسط رله‌های دیستانس خط انتقال چشم پوشی شود. رله‌های دیستانس بر مبنای فاصله بین ترانسفورماتور جریان تغذیه کننده رله و محل خطا عمل می‌کنند.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان احتمال وقوع خطا را نشان می دهد. اگر سیستم حفاظتی عملکردی صحیح نداشته باشد، بسیاری از طرح‌های وابسته به آن نیز بی اثر خواهند شد. بنابراین ضروری است که طرح حفاظتی ذاتاً قابلیت اطمینان بالایی داشته باشد.

حفظ سیستم‌های حفاظتی در شرایط مناسب با نگهداری دقیق سوابق تمامی المان‌ها شامل رله‌ها، ترانس جریان، ترانس ولتاژ، مبدل‌ها، باتری و سیم بندی و سایر اقدامات امکان پذیر خواهد بود. سادگی و در عین حال مقاوم[1] بودن تجهیزات حفاظتی نیز قابلیت اطمینان آن‌ها را در شرایط نامناسب محیط و سیستم تضمین می‌کند. به طور معمول قابلیت اطمینان یک سیستم حفاظتی نباید پایین تر از ۹۵ درصد باشد.

بنابراین می‌توان گفت که اطمینان از فرآیند تولید و انجام تست، اطمینان از صحت تجهیزات، انجام صحیح و به موقع تست های دوره ای تجهیزات حفاظتی و نیز به کارگیری نیروهای کارآزموده و مجرب، همه و همه باعث می‌شوند که سیستم حفاظتی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد.

حساسیت

حداقل جریان خطا که به ازای آن رله عملکرد خواهد داشت جریان تحریک[2] نامیده می شود و معیار تعیین سطح حساسیت سیستم حفاظتی می‌باشد. تنظیمات خطا به اولیه ترانسدیوسر باز می گردد. حساسیت رله بر حسب توان ظاهری بیان می گردد و به معنای میزان ولت آمپر لازم برای عملکرد رله می باشد و بدین معناست که یک رله ۱

---

[1] . Robust
[2]. Pick-up

ولت‌آمپری حساس تر از یک رله ۲ ولت‌آمپری می‌باشد. حساسیت در یک سیستم حفاظتی به حساسیت رله به کار برده شده در سیستم حفاظتی باز می‌گردد.

یک رله خوب باید آنقدر حساس باشد که در صورت افزایش جریان از میزان جریان تحریک[1] عمل کند و در جریان های پایین تر از جریان تحریک نباید عملکرد داشته باشد.

پایداری

پایداری قابلیتی از سیستم حفاظتی است که باعث می گردد حتی در صورت جاری شدن یک جریان شدید ناشی از وقوع یک خطا در خارج ناحیه حفاظتی، سیستم همچنان پایدار بماند. در این حالت فرض بر این است که مدارشکن مربوط به هر ناحیه، خطای آن ناحیه را رفع می‌کند.

سرعت

هدف اصلی یک بخش حفاظتی اینست که در هنگام بروز خطا، ناحیه حادثه دیده را در کمترین زمان ممکن از شبکه جدا نماید. هرچه تجهیزات حفاظتی سرعت بالاتری داشته باشند، خسارت کمتری به تجهیزات و شبکه وارد خواهد شد. معمولا، زمان عملکرد رله یک سیکل در فرکانس پایه (۶۰/۵۰) هرتز می‌باشد. برخی رله‌های مورد استفاده نیز در بازه نیم سیکل عمل می کنند. مزایای رفع سریع خطا به شرح ذیل است:

- کمک به جلوگیری از وارد شدن صدمات دائمی به تجهیزات و قطعات آن‌ها.
- کاهش احتمال بروز سوانح همچون آتش سوزی
- کاهش احتمال به خطر افتادن زندگی کارکنان
- تضمین تداوم برق رسانی شبکه
- بازگشت هرچه سریع تر سیستم قدرت به حالت عادی
- بالا بردن حد پایداری حالت گذار در شبکه قدرت

۵-۱- دسته بندی انواع رله براساس ساختار آن‌ها

یک روش برای دسته بندی رله، دسته بندی بر اساس ساختار آن ها می باشد که عبارتند از:

[1] . Pick up current

- رله های الکترومکانیکی
- رله های حرارتی
- رله های مبدل
- رله های یک سو ساز[1]
- رله های الکترونیکی
- رله های استاتیکی
- رله های دیجیتال
- رله های میکروپروسسوری (ریزپردازنده)
- رله های تحت شبکه

این رله ها در ادامه همراه با جزئیات تشریح می‌شوند.

۶-۱- رله های الکترو مکانیکی

در رله های نوع الکترومکانیکی، هنگامی که کمیت محرک از مقدار مقاوم تعیین شده برای رله بیشتر می‌شود، یک گشتاور محرک در رله شکل گرفته و باعث به حرکت درآمدن و بسته شدن مجموعه‌ای از کنتاکت‌ها به منظور تغذیه سیم‌پیچ قطع مدارشکن می‌شود. انواع متفاوت رله های الکترومکانیکی بر حسب ساختار آنها به شرح ذیل است:

- آرمیچر جذبی
- القایی با دیسک گردان
- القایی فنجانی شکل[2]
- القایی با دیسک چاپی[3]
- القایی با سیم‌پیچ متحرک[4]
- هسته متحرک پلاریزه شده[5]

هر یک از رله های بالا در ادامه توصیح داده شده اند.

[1]Rectifier bridge releys
[2]Induction cup type
[3] Printed disc type
[4] Moving coil type
[5] Polarized moving iron type

۱-۶-۱- رله های آرمیچر جذبی

این نوع رله از طریق یک آرمیچر که به سمت قطب‌های یک آهنربای الکتریکی جذب می‌شود و یا یک پیستون که به داخل یک سولونوئید کشیده می‌شود پیاده‌سازی می‌شود. این نوع رله در هر دو حالت جریان مستقیم و متناوب کاربرد دارد. جریان مستقیم یک گشتاور یکنواخت به وجود می‌آورد اما اگر از جریان متناوب استفاده گردد، نیروی الکترومغناطیسی اعمال شده به بخش متحرک، یعنی آرمیچر و یا پیستون، متناسب با مجذور شار فاصله هوایی می‌باشد. اگر از اثر اشباع صرفنظر کنیم، نیروی تحریک کلی می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$F = K_1 I^2 - K_2$$

که:

F: نیروی خالص

K_1: ثابت تبدیل نیرو

I: مقدار موثر جریان سیم‌پیچ محرک

K_2: نیروی مقاوم شامل اصطکاک

در آستانه تحریک رله، نیروی خالص برابر صفر است چون نیروی تولید شده توسط کمیت محرک برابر با نیروی مقاوم می‌باشد. بنابراین مشخصه عملکرد عبارت است از:

$$K_1 I^2 = K_2$$

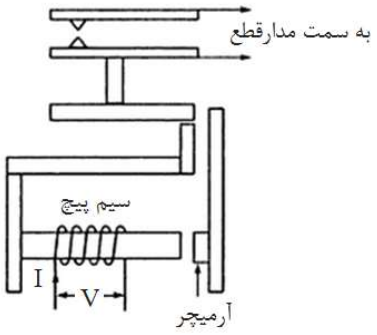
$$\mathrm{I} = \sqrt{\frac{\mathrm{K_2}}{\mathrm{K_1}}} = \text{عددثابت}$$

برای جریان های خطای بالاتر، جریان تحریک رله به نسبت کمتر از جریان تحریک در هنگام رخ داد خطاهای کوچک‌تر است. این امر در زیر شرح داده شده است:

هنگامی که اندازه جریان محرک (I) از میزان تنظیمی رله بالاتر رود، نیروی برآیند باعث حرکت بخش‌های متحرک رله می‌گردد. درهنگام عملکرد رله، فاصله هوایی کوتاه می‌شود. بنابراین در مقایسه با تحریک اولیه که رله در آستانه حرکت است، جریان کمتری به منظور حفظ رله در حالت تحریک مورد نیاز است. این عمل در رله‌های جریان مستقیم بیشتر

نمایان می‌شود. جریان بازنشانی[1] معمولا برای رله های جریان متناوب به میزان ۹۰ تا ۹۵ درصد جریان تحریک و برای رله های جریان مستقیم حدود ٦۰ تا ۹۰ درصد جریان تحریک تعریف می‌گردد. تنظیم میزان فاصله هوایی اولیه در رله، تنظیم جریان تحریک را امکان‌پذیر می‌سازد. کالیبراسیون رله با جریان تحریک بالاتر، معمولاً نسبت بازنشانی به تحریک کمتری را در پی خواهد داشت. در هر حال، در صورتی که مدارشکن در لحظه عبور از صفر جریان خطا عمل کند، میزان بازنشانی تأثیری ندارد. رله های پیستونی و یا آرمیچر جذبی قابلیت کنترل جهتی را ندارند. بنابراین در حفاظت های جهتی از آن‌ها استفاده نمی‌شود.

از آنجا که این رله‌ها بسیار سریع عمل می‌کنند، صرفنظر از اینکه با جریان مستقیم و یا جریان متناوب تحریک شوند، تحت تأثیر پدیده‌های گذرا قرار می‌گیرند. این اثر باید زمانی که تنظیمات رله تعیین می‌شود در نظر گرفته شود. زمان عملکرد برای رله های نسل جدید کمتر از ۵ میلی ثانیه است که این میزان از مقدار مشابه برای رله های دیسکی القایی و القایی مدل فنجانی به مراتب کمتر می‌باشد، علاوه بر این، رله‌های مدرن کوچکتر، مقاوم‌تر و مطمئن‌تر نیز می‌باشند. با در نظر گرفتن یک کنتاکت، بار این نوع رله حدود ۰/۰۸ وات در زمان تحریک می‌باشد. در شکل ۵-۱ یک نمونه از ساختار رله آرمیچر جذبی نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱): رله مدل آرمیچر جذبی

۲-۶-۱- رله القایی دیسکی

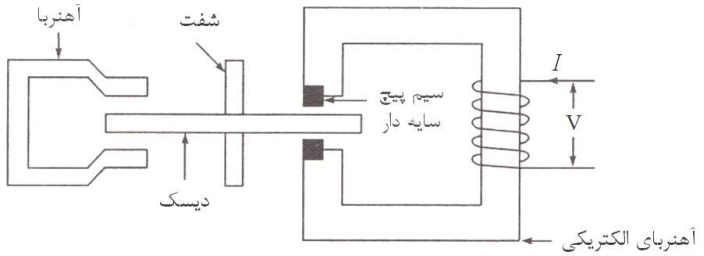
عملکرد این نوع رله بر مبنای اصول اولیه القای الکترومغناطیسی می باشد. رله های القایی تنها در جریان متناوب عملکرد دارند. دیسک چرخان، بخش متحرک رله القایی دیسکی می باشد. رله هایی از این دست دارای دو ساختار می‌باشند:

[1] . Reset

- ساختار قطب سایه دار[1](با حلقه اتصال کوتاه کننده)
- ساختار وات متری[2]

ساختار قطب سایه دار

در این ساختار، دیسک چرخان که همان بخش متحرک رله می باشد، بین دو قطب سایه دار و بدون سایه(عادی)، بر روی یک شفت، قرار می گیرد. این دیسک چرخان از جنس آلومینیوم بوده و به دلیل سبکی دارای اینرسی کمی بوده و از این رو گشتاور محرک کمی برای حرکت نیاز دارد. همچنین این رله دارای یک هسته مغناطیسی می‌باشد که سیم پیچ تحریک/عملکرد را حمل می‌کند. سیم‌پیچ تحریک به وسیله جریانی متناسب با جریان شبکه تغذیه می گردد. حلقه اتصال کوتاه کننده مسی، شار تولید شده در فاصله هوایی را به دو مؤلفه غیر همفاز تبدیل می‌کند. اساس کار کرد این گونه از رله ها دقیقا مشابه عملکرد موتورهای القایی قطب سایه دار (قطب چاک دار) می‌باشد. شارش جریان در سیم پیچ تحریک رله، یک گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می کند که به نوبه خود دیسک بین دو قطب را به حرکت وا می‌دارد. دیسک چرخان دو کنتاکت رله را به هم متصل کرده و سیم‌پیچ قطع مدارشکن را تغذیه می‌کند. به منظور تولید یک نیروی بازدارنده، یک فنر و یا در برخی موارد یک وزنه به دیسک متصل می گردد که با حرکت دیسک مخالفت می‌کند. بنابراین دیسک تنها در زمانی می تواند حرکت کند که گشتاور محرک، از گشتاور مقاوم اعمالی بر آن بیشتر گردد. شکل (٦-١) یک رله القایی دیسکی از نوع قطب سایه دار را نمایش می دهد.



شکل (٦-١): رله القایی دیسکی با قطب سایه دار

این ساختار، ساختاری مقاوم و در عین حال مطمئن می‌باشد و برای حفاظت اضافه جریان به کار برده می‌شود. این رله مشخصه زمان معکوس را ارائه می‌دهد. این رله از نوع آرمیچر جذبی و رله القایی مدل فنجانی، کندتر می باشد. میزان

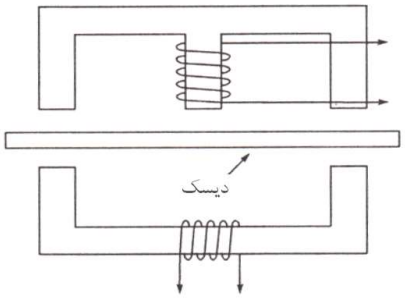
[1] Shaded Pole Structure
[2]Wattmetric Structure

بار مصرفی این نوع رله در حدود ۲/۵ ولت آمپر می‌باشد که وابسته به هر کاربرد می‌تواند متفاوت باشد. در نوعی از رله که تنها یک سیگنال تحریک وجود دارد، گشتاور با مجذور جریان تحریک متناسب است.

تئوری تولید گشتاور در یک رله القایی مشابه اصولی است که در رله های القایی دیسکی و فنجانی مطرح می‌گردد؛ این تئوری در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود.

ساختار وات متری

این رله نیز ساختاری مشابه با ساختار کنتورهای وات–ساعت دارد. در این ساختار، دو سیم پیچ مجزا بر روی دو هسته با مدار مغناطیسی متفاوت قرار دارد که هر کدام از این دو، گشتاور القایی مورد نیاز برای حرکت دیسک را فراهم می‌کنند. شکل (۷–۱) ساختار یک رله مدل وات متری را به نمایش در آورده است.



شکل (۷–۱): رله دیسکی القایی مدل وات متری

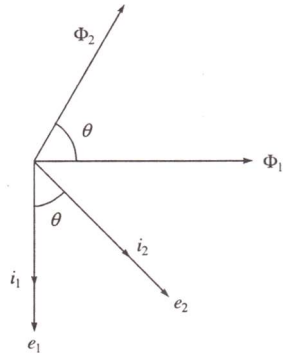
گشتاور القایی در رله های القایی

هنگامی که دو شار، که از لحاظ مکانی و زمانی اختلاف فاز دارند، همدیگر را قطع کنند، یک گشتاور ایجاد می گردد. اگر شار Φ_1 توسط قطب سایه دار تولید شده باشد و شار Φ_2 توسط قطب بدون سایه ایجاد شده باشد، فاز شار قطب سایه دار از شار قطب بدون سایه عقب افتاده و این اختلاف فاز به مقدار θ درجه می باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\Phi_1 = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\Phi_2 = \Phi'_m \sin(\omega t + \theta)$$

شار Φ_1 و Φ_2 بر اساس قاعده القاء، ولتاژ e_1 و e_2 را در دیسک القاء می کنند. ولتاژ e_1 و e_2 سبب جاری شدن جریان گردابی در دیسک می‌شوند. اگر از اثر القائی دیسک صرفنظر گردد، جریان گردابی با ولتاژ به وجود آمده از جریان، هم فاز خواهد بود. دیاگرام فازوری این مطلب در شکل (۸–۱) نمایش داده شده است.



شکل (۸-۱): دیاگرام فازوری رله القایی

داریم:

$$e_1 \propto \frac{d\Phi_1}{dt} \propto \Phi_m \omega \cos \omega t$$

و

$$e_2 \propto \frac{d\Phi_2}{dt} \propto \Phi'_m \omega \cos(\omega t + \theta)$$

اگر مقدار مقاومت را ثابت در نظر بگیریم، جریان گردابی نسبت مستقیمی با ولتاژ دارد، یعنی:

$$i_1 \propto e_1 \propto \Phi_m \omega \cos \omega t$$

و

$$i_2 \propto e_2 \propto \Phi'_m \omega \cos(\omega t + \theta)$$

گشتاور حاصله با اختلاف $(\Phi_2 i_1 - \Phi_1 i_2)$ متناسب است چون شار Φ_1 جریان گردابی i_2 و شار Φ_2 جریان گردابی i_1 را قطع می‌کند. شار Φ_2 نسبت به Φ_1 پیش فاز بوده و بنابراین گشتاور ناشی از Φ_2 و i_1 مثبت بوده و گشتاور ناشی از Φ_1 و i_2 مقداری منفی خواهد بود.

$$\begin{aligned} T &\propto (\Phi_2 i_1 - \Phi_1 i_2) \\ &\propto [\{\Phi'_m \sin(\omega t + \theta).\Phi_m \omega \cos \omega t\} - \{\Phi_m \sin \omega t.\Phi'_m \omega \cos(\omega t + \theta) \\ &\propto \Phi_m \Phi'_m \sin \theta \end{aligned}$$

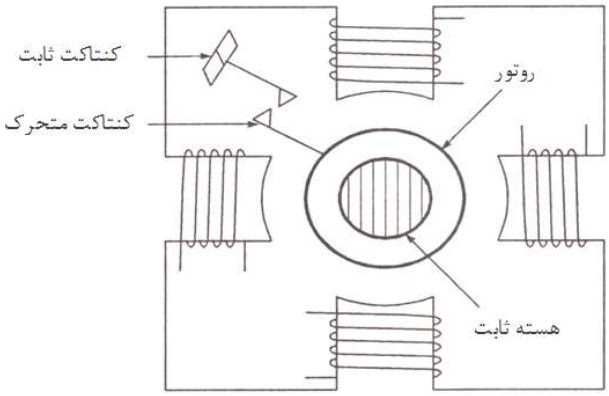
هنگامی که زاویه بین Φ_1 و ۹۰$_2$ Φ درجه باشد، گشتاور به مقدار حداکثری خود خواهد رسید. از آنجا که Φ_2 نسبت به Φ_1 پیشفاز است، چرخش دیسک از قطب بدون سایه به سمت قطب سایه‌دار می‌باشد. گشتاور حداکثر اندازه ثابتی دارد و بنابراین احتمال لرزش وجود ندارد.

یک فولاد با خاصیت آهنربایی دائم با قدرت بالا برای ایجاد گشتاور میرایی استفاده می‌شود. حرکت دیسک چرخان به وسیله تعیین محل این آهنربا تنظیم می گردد. آمپر- دور مورد نیاز طوری طراحی می گردد که بتواند حداقل گشتاور مورد نیاز برای به حرکت درآوردن دیسک را تعیین کند.

۳-۶-۱- رله القایی مدل فنجانی

ساختار رله القایی مدل فنجانی مشابه موتورهای القایی است با این تفاوت که روتور آهنی آن ثابت بوده و تنها هادی روتور اجازه حرکت دارد. بازده این ساختار در تولید گشتاور نسبت به نوع قطب سایه‌دار و یا مدل وات متری بیشتر می‌باشد چون این ساختار نشت مغناطیسی در مدار مغناطیسی را به حداقل می‌رساند. یک رله القایی مدل فنجانی از رله القایی نوع دیسکی حساسیت بیشتری دارد و به همین خاطر است که برای طرح‌های حفاظتی بسیار سریع مناسب می‌باشد. زمان عملکرد این رله در حدود ۰/۰۱ ثانیه می باشد.

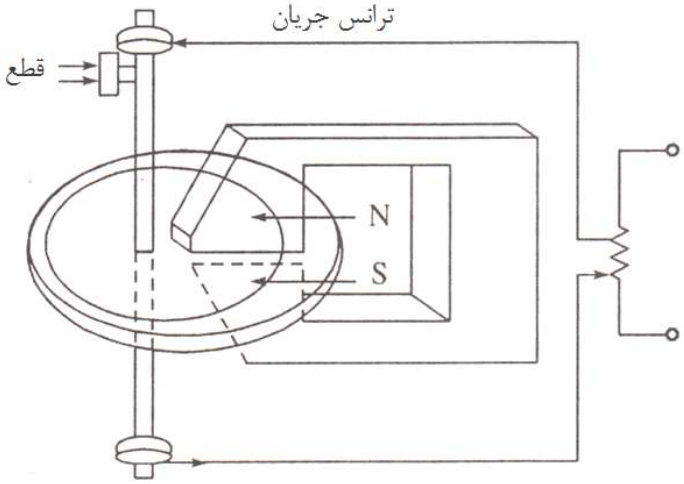
در این نوع رله، هسته آهنی ثابت، بین چهار و یا تعداد بیشتری آهنربای الکتریکی قرار گرفته است. روتور به صورت یک سیلندر فنجانی شکل تو خالیست که به راحتی و آزادانه می تواند بین هسته آهنی ثابت و آهنرباهای الکتریکی به چرخش درآید. پس از تغذیه رله، آهنرباهای الکتریکی در روتور فنجانی ولتاژ القا کرده و در پی آن، جریان گردابی جاری می‌شود. جریان گردابی ناشی از شار یک قطب با شار تولید شده توسط سایر قطب‌ها برهمکنش داشته و این برهمکنش باعث ایجاد گشتاور محرکه برای عملکرد رله می شود. نسبت بازنشانی به تحریک رله القایی مدل فنجانی از ۹۵ تا ۱۰۰ درصد متغیر است. بدلیل اصطکاک و جبران ناقص گشتاور فنر کنترل، نسبت بازنشانی به عملکرد رله القایی فنجانی ممکن است مقدار ۱۰۰ درصد نباشد. شکل (۹-۱) ساختار یک رله القایی مدل فنجانی را به نمایش می گذارد. به دلیل وزن کم روتور و نیز مدار مغناطیسی پربازده، بار مصرفی در این نوع رله حدود سه برابر کمتر از مدل القایی دیسک چرخان بوده و این گونه از رله بیشتر در حفاظت جهتی و دیستانس بکار گرفته می‌شود.



شکل (۹-۱): رله القایی فنجانی

۴-۶-۱- رله دیسک چاپی

عملکرد یک رله دیسک چاپی مشابه با اساس کار تجهیزات اندازه‌گیری دینامومتر[1] می‌باشد. یک آهنربای دائم به منظور تولید میدان مغناطیسی در رله مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان خروجی ترانس جریان ابتدا از یکسوساز عبور کرده و سپس به دیسک چاپی اعمال می گردد. ساختار رله دیسک چاپی نیز در شکل (۱۰-۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱۰-۱): رله دیسک چاپی

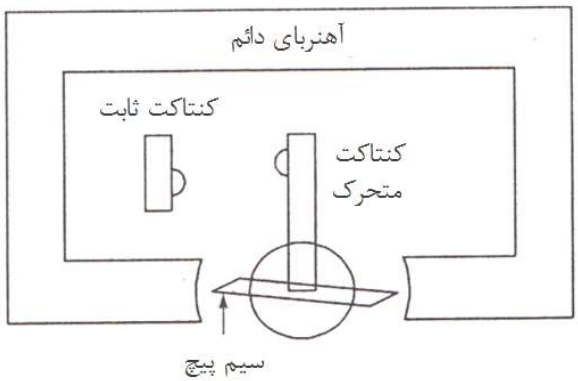
رله دیسک چاپی معمولاً ۵۰ تا ۱۰۰ برابر پر بازده‌تر از رله القایی با ساختار دیسک چرخان می باشد. اساس عملکرد این نوع رله بر این مبناست که قرارگرفتن یک هادی حامل جریان در میدان مغناطیسی منجر به تولید گشتاور می‌شود. با بکارگیری یک شبکه غیر خطی بین مدارچاپی روی دیسک و جریان یکسو شده ورودی، کاربرد این نوع رله گسترش یافته است.

---

[1]. Dynamometer

۵-۶-۱- رله بوبین متحرک

این رله تنها به محرک جریان مستقیم پاسخ می دهد و به همین خاطر از این رله با نام های سیم‌پیچ متحرک جریان مستقیم و یا رله سیم‌پیچ متحرک با جریان مستقیم پلاریزه شده نیز یاد می شود. رله ای بسیار حساس بوده و این حساسیت به حدود ۰/۱ میلی وات می رسد. شکل (۱۱-۱) ساختار این رله هسته متحرک را نشان می دهد. اجزای اصلی این نوع رله شامل سیم‌پیچی پیچیده شده بر روی یک قاب غیر مغناطیسی (از جنس آلومینیوم)، یک آهن ربای دائم، هسته آهنی، یاتاقان های آبکاری شده، محور متحرک و فنر پیچشی از جنس فسفر- برونز می‌باشد.



شکل (۱۱-۱): رله بوبین متحرک

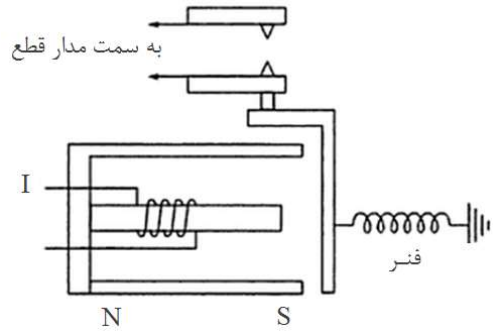
گشتاور محرک از برهمکنش میان میدان های حاصله از آهن ربای دائم و سیم پیچ مغناطیسی ایجاد می گردد. بدنه آلومینیومی به منظور تأمین میرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان عملکرد این رله در حدود دو سیکل می باشد. رله سیم‌پیچ متحرک مشخصه زمان – جریانی معکوس داشته و گشتاور محرک آن متناسب با جریان سیم پیچ می باشد. این رله به عنوان یک رله فرعی [1] با مقایسه گر پل یکسوساز استفاده می‌شود.

۶-۶-۱- رله هسته متحرک پلاریزه

در این رله، یک آهن ربای دائم برای پلاریزاسیون به کار گرفته می شود که این امر حساسیت رله را نیز بالا می برد. این ساختار صرفاً برای جریان مستقیم استفاده می‌گردد. حساسیت این رله را می توان با استفاده از تقویت کننده‌های ترانزیستوری تا حد یک میکرو وات بالا برد. این رله نیز به صورت یک رله Slave برای مقایسه گر پل یکسوساز استفاده می‌شود. آهنربای دائم شاری علاوه بر شار اصلی ایجاد می کند. از آنجا که سیم پیچ حامل جریان در رله هسته

[1]. Slave

متحرک پلاریزه ثابت است، این نوع رله از رله سیم‌پیچ متحرک مقاوم‌تر می‌باشد. زمان عملکرد این رله در حد۱۰ میلی ثانیه می باشد. یک رله هسته متحرک پلاریزه در شکل (۱۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۱) رله هسته اهنی پلاریزه

۷-۶-۱- معایب رله های الکترومکانیکی

داشتن قطعات متحرک و کنتاکت در این نوع از رله ها امری غیرقابل اجتناب بوده که این خود معایبی را به همراه دارد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

الف) لرزش های اعمالی بر رله از فضای بیرون می تواند بر عملکرد رله تاثیر سوء داشته باشد

ب) اینرسی قطعات متحرک گاهی اوقات می تواند باعث اختلال در عملکرد تیغه متحرک شده و این امر باعث بر هم خوردن تنظیم رله پس از عملکرد شود.

ج) فرسودگی کنتاکت متحرک منجر به بارگذاری زیاد بر روی ترانس‌های جریان و ولتاژ می‌شود.

د) سوراخ شدن کنتاکت نیز (در اثر جرقه حاصل از برخورد) سبب به هم خوردن شکل و تنظیم کنتاکت شده و عملکرد نادرست رله را به همراه خواهد داشت.

ه) به خاطر اینرسی قطعات متحرک در این رله ها، زمان عملکرد بالاست.

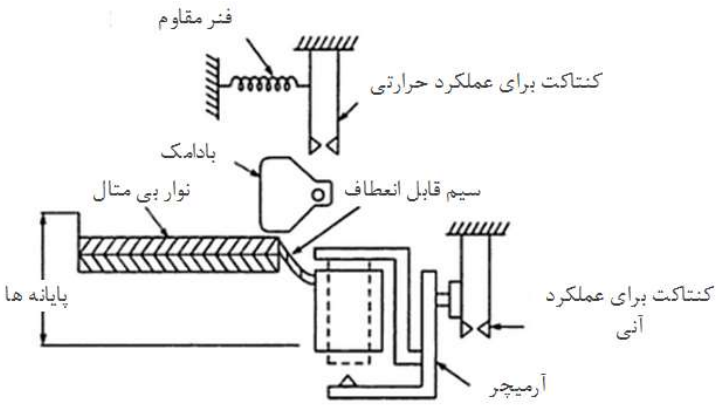
و) کهنگی و فرسودگی قطعات متحرک، بازدید و تعمیرات دوره‌ای منظم این رله را ضروری می‌سازد.

۷-۱- رله های حرارتی

این گونه از رله ها بیشتر برای حفاظت تجهیزات استفاده می شود. این رله‌ها بر اساس اندازه‌گیری غیر مستقیم حرارت کار می‌کنند. هنگامی که جریان غیر عادی بسیار بالا از مدار عبور می‌کند، جریان باعث بالا رفتن حرارت تجهیز طبق

رابطه Ri^2 می گردد. قسمت اصلی این رله یک نوار بی متال[1] است که جریان خطا از آن می‌گذرد و در اثر عبور جریان از آن شروع به خم شدن می‌کند. نوار بی متال متشکل از دو نوار فلزی به هم چسبیده است که دو فلز دارای ضریب انبساطی متفاوت می باشند. هنگامی که دمای این نوار بهم متصل شده در اثر عبور جریان از آن بالا می رود، تیغه شروع به خم‌شدن می کند و با این کار دو کنتاکت را بهم متصل می‌کند. رله های حرارتی به اندازه رله های القایی فنجانی حساس نیستند و در ضمن به دلیل ظرفیت حرارتی بالای فلز آن بازنشانی طولانی مدتی دارند. شکل (۱۳-۱) ساختار یک رله حرارتی را نشان می دهد.

نوار بی متال در یک انتهای خود ثابت شده است و گرم شدن در اثر عبور جریان خطا سبب انبساط غیریکسان نوار در انتهای دیگر می‌شود. انبساط غیریکسان نوار سبب خم شدن آن به سمت بالا شده و منجر به منحرف شدن دندانه[2] می‌شود. جابجایی بادامک سبب عملکرد رله می‌شود. رله‌های حرارتی در حفاظت موتورها، ترانسفورماتورها و غیره کاربرد دارند.



شکل (۱۳-۱): رله حرارتی

۸-۱- رله مبدل[3] (تراندیوسر)

این رله براساس تغییر در اندوکتانس کار می‌کند. هسته اشباع نشده سیم‌پیچ، امپدانس بسیار بالایی را از خود نشان می‌دهد و این در حالی است که هسته اشباع شده در مدار همانند اتصال کوتاه رفتار می کند. بنابراین، منحنی غیرخطی B-H برای عملکرد این رله استفاده می شود.

---

[1] . Bimetal
[2] . Cam
[3]. Transductor relay

۹-۱- رله با پل یکسوساز

به منظو ر ایجاد یک گشتاور برای عملکرد رله، در رله لکترو مغناطیسی از یک پل یکسوساز استفاده می‌شود. پس از یکسوسازی تمام موج، سیگنال به سیم‌پیچ رله اعمال می‌گردد. این رله به دو شکل مقایسه گر دامنه و فاز استفاده می‌شود.

۱۰-۱- رله های الکترونیکی

این رله از قطعات الکترونیکی تشکیل می شود و قطعه متحرکی ندارد. این رله ها در دهه ۱۹٤۰ معرفی شدند و به دلیل اینکه قطعه متحرکی ندارند تمامی معایب یک رله الکترومکانیکی را مرتفع کرده‌اند.

۱۱-۱- طبقه بندی رله ها براساس عملکرد آنها

روش دیگر دسته بندی رله ها، دسته بندی بر اساس عملکرد آنها به صورت زیر می باشد:

- رله اضافه جریان
- رله کاهش ولتاژ[۱]
- رله کاهش فرکانس[۲]
- رله جهتی
- رله حرارتی
- رله توالی فازی[۳] مانند توالی منفی و یا توالی صفر
- رله دیفرانسیلی همچون رله های درصدی
- رله های دیستانس همچون رله امپدانسی، رله راکتانسی، رله مهو، افست رله و رله محدود شده[۴]
- رله پایلوت[۵] همچون رله‌های پایلوت سیمی، رله‌های پایلوت کانال حامل، رله‌های مبتنی بر فیبر نوری و رله-های پایلوت ریزموج
- رله تطبیقی[۶]

---

[1]. Undervoltage relay
[2]. Underfrequencey relay
[3]. Phase sequence relay
[4]. Restricted relay
[5]Pilot relay
[6] Adaptive relay

- رله مبتنی بر شبکه عصبی
- رله مبتنی بر موجک[1]
- رله ناحیه گسترده[2]
- رله ترکیبی[3]

این رله ها برای حفاظت از تجهیزات شبکه قدرت همچون باسبار، ترانسفورماتور، ژنراتور، موتور و نیز خطوط انتقال استفاده می شوند. این رله‌ها در فصل‌های بعدی به تفضیل توضیح داده شده‌اند.

۱۲-۱- ترانس های جریان (CTs)

ترانس جریان به منظور کاهش سطح جریان خطا (که گاهی در حد ۱۰۰ آمپر و یا بیشتر می‌باشد) به مقداری کمتر از ۵ آمپر استفاده می‌شود. جریان کاهش یافته در ثانویه ترانس جریان جهت مقاصد اندازه گیری و حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، ترانس جریان رله را از مدار ولتاژ بالا اولیه جدا می‌کند. ترانس‌های جریانی که برای امر حفاظت استفاده می‌شوند طوری طراحی می‌شوند که حتی در جریانی چند برابر جریان نامی اولیه دقت نسبت تبدیل خود را حفظ کنند. اما ترانس های جریانی که برای اندازه گیری و ابزار دقیق استفاده می شوند لازم است دقت نسبت تبدیل را در رنج نامی خود حفظ کنند.

سطح دقت یک رله با معیاری به نام *نسبت خطا* بیان می گردد بدین صورت که

$$\text{درصد نسبی خطا} = \frac{NI_S - I_P}{I_P} \times 100$$

که داریم:

N = نسبت تبدیل جریان نامی (نبست جریان نامی اولیه به جریان نامی ثانویه)

I_S = جریان ثانویه

I_P = جریان اولیه

[1]. Wavelet-Based relay
[2]Wide area-based relay
[3]Hybrid-based relay

نسبت خطای ترانس جریان به جریان تحریک هسته آن بستگی داشته و دقت مورد انتظار از ترانس جریان (خطای نسبت تبدیل) در حد ۲ تا ۳ درصد می باشد. بار ترانس جریان باری است که به ثانویه ترانس جریان متصل است که به صورت ولت آمپر بیان می گردد.

۱۳-۱- ترانس ولتاژ (PTs)

ترانس ولتاژ باید سطح ولتاژ شبکه را تا حدی پایین بیاورد که برای استفاده تجهیزات اندازه گیری و رله های حفاظتی مناسب باشد. ولتاژ رله های حفاظتی معمولاً ۱۱۰ ولت و درصد خطای نسبی آن نیز به شکل زیر بیان می شود:

$$\text{درصد خطای نسبی} = \frac{KV_S - V_P}{V_P} \times 100$$

K = نسبت تبدیل ولتاژ نامی (نسبت ولتاژ نامی اولیه به ولتاژ نامی ثانویه)

VS = ولتاژ ثانویه

VP = ولتاژ اولیه

درصد نسبی خطای مطلوب برای ترانس ولتاژ $\pm 3\%$ است.

۱۴-۱- ترانس جمع کننده[1]

ترانس جمع کننده در شرایطی که استخراج کمیت تکفاز از جریان خطا یا ولتاژ سه فاز ورودی مورد نیاز باشد به کار برده می‌شود. در برخی موارد و یا در برخی شرایط خطا، جریان خروجی ترانس جمع کننده مقداری بسیار کوچک و قابل اغماض در حد صفر دارد. به منظور رفع این عیب، انواع خاصی از فیلترهای توالی استفاده می‌شوند.

۱۵-۱- شبکه جداکننده جریان توالی-فاز

شبکه جداکننده جریان توالی-فاز یک مدار فیلتر توالی فاز است که خروجی این مدار بسیار شبیه به تجهیز جمع کننده همچون ترانس جمع کننده است. جریان خروجی این مدار را می توان به شکل زیر نمایش داد:

$$I_{output} = K_0 I_0 + K_1 I_1 + K_2 I_2$$

[1] Summation trans

در این رابطه ثابت های K_0 و K_1 و K_2 به تجهیزی بستگی دارند که در آن استخراج یک کمیت تک فاز از یک کمیت سه فاز مورد نیاز است.

۱۶-۱- تست های دوره ای برای عملکرد امن و حفظ حساسیت

مجموعه‌ای از تست های میدانی که در هنگام نصب تجهیز و یا بازرسی‌های دوره‌ای باید به کار گرفته شوند به شرح ذیل است:

تست ترانسفورماتورهای جریان/ولتاژ

الف) مقادیر ولتاژ و جریان در ثانویه ترانس‌های ولتاژ و جریان که توسط رله دریافت شده‌اند بررسی شده و تأیید صحت آن‌ها از طریق مقایسه نسبت تبدیل بدست آمده برای ترانس‌های ولتاژ و جریان با مقادیر نامی نوشته شده بر روی پلاک مشخصات آن‌ها انجام می‌شود.

ب) عملکرد فیوز نقطه خنثی ترانس ولتاژ سبب جابجایی نقطه خنثی در هنگام بروز خطای زمین می‌شود. وجود نقطه خنثی شناور به رله اجازه نمی‌دهد در برابر جریان توالی صفر عملکرد داشته باشد. بنابراین بررسی عدم وجود فیوز نقطه خنثی در مدار ترانس ولتاژ حائز اهمیت می‌باشد.

ج) اتصال به زمین ترانس‌های جریان و ولتاژ باید فقط در یک نقطه انجام شود. اتصال به زمین در چند نقطه سبب بروز خطا در اندازه‌گیری جریان توالی صفر خواهد شد.

د) توالی فاز و نیز گردش فاز صحیح در مدار ترانس ولتاژ و جریان باید مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی ولتاژ و جریان قابل تحمل

نا متعادلی بار و یا سیستم می‌تواند سبب بروز خطا در تجهیزات اندازه‌گیری شود. بنابراین، اندازه گیری ولتاژ و جریان توالی منفی و صفر باید در شرایط عادی بار انجام شود و تعادل فاز ترانس جریان و ولتاژ نیز باید در نظر گرفته شده و تأیید شود.

تست مقایسه با پست مجاور

صحت مقادیر توان اکتیو و راکتیو مصرفی (مگاوات و مگاوار) تجهیزاتی که به تازگی نصب شده‌اند باید با مقایسه با مقادیر قرائت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد تأیید در پست‌های مجاور بررسی شود.

بررسی ساختار خط

آرایش متفاوت در خطوط سبب تفاوت در دامنه جریان توالی منفی و صفر در شرایط عادی بار می‌شود. در این شرایط، تنظیمات رله باید طوری صورت گیرد که نامتعادلی ناشی از آرایش نامتعادل خطوط را اصلاح کند.

تحلیل گزارشات خطا

اطلاعات ذخیره شده در گزارشات حوادث باید دائماً و به طور منظم تحلیل شوند. تحلیل اطلاعات به این صورت، ارزشمند، کم هزینه و مفید خواهد بود.

تحلیل عملکرد هر ریزپردازنده

عملکرد هر کدام از رله های مبتنی بر ریزپردازنده باید مورد تحلیل قرار گیرد تا بتوان اطمینان حاصل کرد که سیستم حفاظتی ایمن و قابل اعتماد است. ریشه‌یابی هر مشکل، مسأله و یا عدم قطعیت و یا حتی مرور دقیق عملکردهای به ظاهر عادی امری ضروری می‌باشد چون این موارد غالباً سرنخ‌هایی در اختیار قرار می‌دهند که می‌تواند برای جلوگیری از مشکلات آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۱۷-۱- تعاریف پایه

در این بخش تعدادی از عبارات متداول که مورد استفاده خوانندگان و مهندسان می‌باشد ارائه شده است. به منظور درک شفاف و هر چه بهتر این عبارات، توضیح فنی آن‌ها در ادامه آورده شده است.

تجهیزات حفاظتی

شامل رله‌های حفاظتی، ترانس‌های ولتاژ و جریان و تجهیزات جانبی مورد استفاده در سیستم‌های حفاظتی می‌باشد.

سیستم حفاظتی

یک سیستم حفاظتی شامل تجهیزات حفاظتی است که یا المان حادثه دیده را به صورت ایمن جدا کرده، یا یک پیام هشدار صادر می‌کند و یا هر دوی این اعمال را به طور همزمان انجام می‌دهد.

طرح حفاظتی

یک طرح که می‌تواند شامل چندین سیستم حفاظتی بوده و برای حفاظت یک یا چند المان از سیستم قدرت طراحی شده است به عنوان یک طرح حفاظتی شناخته می‌شود.

رله

یک رله یک دستگاه خودکار است که به وسیله آن یک مدار الکتریکی به طور غیرمستقیم کنترل (باز و یا بسته) می‌شود و توسط تغییر در همان مدار و یا مدار الکتریکی دیگر کنترل می‌شود.

رله حفاظتی

یک رله حفاظتی یک دستگاه خودکار است که وجود شرایط غیرعادی در یک مدار الکتریکی را تشخیص داده و سبب می‌شود که مدارشکن تجهیز حادثه دیده را از سیستم جدا کند. در برخی موارد، ممکن است رله یک پیغام صوتی هشدار و یا یک نشانگر را به منظور هشدار به پرسنل فعال کند.

ناحیه حفاظتی

یک شبکه قدرت از دیدگاه حفاظتی به تعدادی ناحیه تبدیل می‌شود که دارای طرح‌های حفاظتی جداگانه می‌باشند. یک رله ناحیه حفاظتی مخصوص به خود را دارد.

گشتاور/نیروی عامل

نیرو یا گشتاور تولیدی توسط سیم‌پیچ رله که سبب می‌شود کنتاکت‌های رله بسته شوند.

گشتاور/نیروی مقاوم

نیرو یا گشتاوری که با نیروی عامل مخالفت می‌کند.

تحریک[1]

حداقل مقدار کمیت محرک (جریان، ولتاژ، فرکانس و ...) که برای مقادیر بالاتر از آن رله شروع به عملکرد می‌کند.

زمان بازشانی

فاصله زمانی از لحظه‌ای که کمیت محرک از مقدار بازنشانی کمتر شده تا زمانی که رله به موقعیت عادی (اولیه) بر می‌گردد.

آزاد کردن[2]

مقدار آستانه کمیت محرک (جریان، ولتاژ، فرکانس و ...) که به ازای مقادیر کمتر از آن رله به موقعیت یا شرایط عادی خود برمی‌گردد.

زمان عملکرد

فاصله زمانی از لحظه‌ای که کمیت محرک از مقدار تحریک رله بیشتر شده تا زمانی که رله کنتاکت‌هایش را می‌بندد.

تنظیمات

مقداری از کمیت محرک که به ازای آن رله عمل می‌کند.

برد[3]

برد نشان دهنده حداکثر طولی از خط انتقال است که رله می‌تواند تا آن نقطه را تحت پوشش قرار دهد. برد رله معمولاً متناسب با فاصله (یا مؤلفه‌ای از امپدانس) دیده شده توسط رله است. برد رله معمولاً کمتر از یک مقدار از پیش تعیین شده است.

---

1 . Pick up
2 . Drop-out
3 . Reach

کاهش برد

وقتی که رله حتی برای خطایی که در محدوده برد آن است (اما نزدیک به انتهای دیگر خط است) عمل نکند دچار کاهش برد شده است.

افزایش برد

وقتی که یک رله به ازای خطایی که فراتر از برد از پیش تعیین شده آن است عمل کند، دچار اضافه برد شده است.

رله کمکی (Seal-in relay)

یک رله کمکی است که به وسیله کنتاکت‌های رله اصلی تغذیه می‌شود. کنتاکت‌های این رله موازی با کنتاکت‌های رله اصلی بوده و با در مدار آمدن آن‌ها، جریان از آن‌ها عبور کرده و کنتاکت‌های رله اصلی از مدار خارج می‌شوند. رله تقویت کننده[1] (کمکی) به منظور نگهداشتن یک سیگنال صادر شده از رله اصلی برای یک بازه زمانی طولانی استفاده می‌شود. از آنجا که کنتاکت‌های رله اصلی به اندازه کافی مقاوم نیستند، صرفاً برای یک مدت کوتاه بسته می‌شوند. اما یک رله Seal-in به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند تا زمان عملکرد مدارشکن در مدار باشد.

رله پشتیبان

در صورتی که رله اصلی نتواند عمل کند، رله پشتیبان پس از یک تأخیر کوتاه عمل می‌کند.

حفاظت اولیه

حفاظت اولیه به عنوان خط اول دفاع عمل می‌کند و برای رفع خطا بدون هیچ‌گونه تأخیر طراحی می‌شود.

حفاظت پشتیبان

حفاظت پشتیبان به عنوان دومین خط دفاع عمل می‌کند و برای رفع خطا در صورتی که حفاظت اولیه عملکرد موفقی نداشته باشد طراحی شده است.

نشانگر پرچم[2]

پرچم وسیله‌ای است که یک نشانگر بصری به منظور تشخیص عملکرد یا عدم عملکرد رله در اتاق کنترل ایجاد می‌کند.

---

[1] . Reinforcing relay
[2] . Flag indicator

رله اندازه‌گیری

این رله مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها را به منظور تشخیص شرایط غیرعادی سیستم که نیاز به حفاظت دارد انجام می‌دهد. این رله به عنوان رله حفاظتی اصلی در یک طرح حفاظتی می‌باشد که کمیت‌های محرک آن را تغذیه می‌کنند.

رله‌های کمکی

کمک به رله‌های حفاظتی اصلی در اجرای فرامین توسط رله‌های کمکی انجام می‌شود. آن‌ها عملکرد رله‌های حفاظتی، کلیدهای کنترلی و غیره را تقویت کرده و برخی وظایف رله‌های حفاظتی نظیر قطع کردن، ایجاد تأخیر زمانی، ارسال هشدار و غیره را بر عهده می‌گیرند. این رله‌ها می‌توانند آنی یا همراه با تأخیر باشند.

رله‌های الکترومکانیکی

این رله‌ها بر مبنای اصول الکترومغناطیس عمل می‌کنند. به عنوان نمونه می‌توان از رله‌های هسته متحرک، سیم‌پیچ متحرک، آرمیچر جذبی، القایی دیسکی و القایی مدل فنجانی نام برد.

رله‌های استاتیک

این نوع شامل رله‌های حالت جامد بوده و از اجزایی از جمله دیودهای نیمه رسانا، ترانزیستورها، تریستورها، گیت‌های منطقی، مدرات مجتمع و غیره تشکیل شده است. در این رله‌ها هیچ بخش متحرکی وجود ندارد.

رله مبتنی بر ریزپردازنده

یک ریزپردازنده به منظور اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی، مقایسه، انجام محاسبات و صدور فرمان قطع استفاده می‌شود. بنابراین یک طرح حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده برای تحقق همه انواع مشخصه‌های حفاظتی از ریزپردازنده استفاده می‌کند.

رله اضافه جریان

رله‌ای که هنگام افزایش جریان محرک از مقدار از پیش تعیین شده عمل می‌کند رله اضافه جریان نام دارد.

رله کاهش ولتاژ

این رله هنگامی که ولتاژ سیستم از مقدار از پیش تعیین شده کمتر می‌شود عمل می‌کند.

رله پلاریزه

رله‌ای که عملکرد آن وابسته به جهت ولتاژ و یا جریان است، رله پلاریزه نام دارد.

رله جهتی و یا توان معکوس

یک رله جهتی، جهت شارش توان را حس کرده و تشخیص می‌دهد که محل خطا در جلو و یا پشت محل رله می‌باشد.

رله تأخیر زمانی

این رله پس از یک تأخیر از پیش تعیین شده عمل می‌کند. این تأخیر می‌تواند در اثر وجود یک المان تأخیر زمانی و یا به واسطه ویژگی‌های ذاتی طراحی رله باشد. با وجود این رله، هماهنگی زمانی طرح حفاظتی امکان‌پذیر بوده و بنابراین برای مدارهای کنترلی و هشدار مفید می‌باشد.

رله آنی

این رله بدون هیچ‌گونه تأخیر ذاتی عمل می‌کند و عملکرد آن در بازه زمانی ۰/۱ ثانیه و یا کمتر از آن می‌باشد.

رله معکوس زمانی

در این رله، زمان عملکرد با دامنه جریان نسبت عکس دارد.

رله معکوس زمانی با حداقل زمان معین

این رله برای جریان‌های پایین یک مشخصه معکوس با زمان و برای جریان‌های بالاتر یک مشخصه زمان معین ارائه می‌کند.

رله القایی

رله‌های القایی که شامل رله القایی دیسکی، رله القایی مدل فنجانی و غیره می‌باشد بر مبنای اصول القای الکترومغناطیسی عمل می‌کنند.

رله سیم‌پیچ متحرک

این رله که رله سیم‌پیچ متحرک جریان مستقیم با آهنربای دائم نیز نامیده می‌شود دارای یک آهنربای دائم و یک سیم‌پیچ متحرک می‌باشد. جریان محرک از سیم‌پیچ متحرک می‌گذرد.

رله هسته متحرک

یک رله پلاریزه جریان مستقیم می‌باشد که شامل یک آهنربای الکتریکی، یک آهنربای دائم و یک آرمیچر متحرک می‌باشد.

مقایسه‌گر

نام دیگر رله است.

مقایسه‌گر فاز

این رله فقط زاویه بین کمیت‌های ورودی را مقایسه می‌کند.

مقایسه‌گر دامنه

این رله دامنه کمیت‌های ورودی را مقایسه می‌کند.

مقایسه‌گر آنی

این رله تنها مقادیر لحظه‌ای سیگنال‌های ورودی را مقایسه می‌کند.

مقایسه‌گر با دو ورودی

این مقایسه‌گر دارای دو ورودی می‌باشد.

مقایسه‌گر با چند ورودی

این مقایسه‌گر بیش از دو ورودی دارد.

رله دیسک چاپی

این رله بر مبنای اصول یک دینامومتر عمل می‌کند. در این رله، یک آهنربای دائمی و یا الکتریکی به همراه یک دیسک چاپی وجود دارد. جریان مستقیم، مدار چاپی دیسک را تغذیه می‌کند.

رله حرارتی

برای عملکرد رله حرارتی از اثرات الکتروترمال جریان محرک استفاده می‌شود. این رله در اثر بروز یک دمای از پیش تعیین شده در تجهیز حفاظت شده عمل می‌کند.

رله دیستانس

یک رله دیستانس، امپدانس یا مؤلفه‌ای از امپدانس بین محل رله تا محل خطا را اندازه‌گیری می‌کند. این رله خطوط انتقال را حفاظت می‌کند.

رله امپدانسی

یک رله امپدانسی راکتانس بین محل رله تا محل خطا را اندازه‌گیری می‌کند. این رله نوعی از رله دیستانس است.

رله امپدانسی اصلاح شده[1]

این نوع رله یک رله امپدانسی با مشخصه جابجا شده است. در این رله، سیم‌پیچ ولتاژ شامل درصدی از بایاس جریان می‌باشد.

رله راکتانسی

این رله راکتانس بین محل رله تا محل خطا را اندازه‌گیری می‌کند. این رله نوعی از رله دیستانس است.

رله موهو (ادمیتانس)

این رله که یک رله جهتی می‌باشد در طرح حفاظتی دیستانس نیز استفاده می‌شود. این رله، یک مؤلفه خاص از امپدانس را به منظور جابجایی مشخصه موهو در صفحه R-X اندازه‌گیری می‌کند. مشخصه این رله در صفحه R-X دایره‌ای است که از مبدأ مختصات می‌گذرد. این رله با نام رله ادمیتانسی نیز نامیده می‌شود.

رله کاندوکتانس

مانند یک رله موهو است که قطر آن از مبدأ مختصات گذشته و منطبق بر محور R است.

---

[1] . Modified impedance relay

مشخصه آفست موهو

در یک رله آفست موهو، مشخصه در صفحه R-X به نحوی جابجا می‌شود که مبدأ مختصات را شامل شود.

رله اهمی

مشخصه این رله یک خط مستقیم است که تحت یک زاویه مشخص هر دو محور صفحه مختصات R-X را قطع می‌کند.

رله چهارضلعی

این نوع رله برای حفاظت دیستانس استفاده می‌شود و در صفحه R-X یک مشخصه شبیه یک چهارضلعی دارد.

رله بیضوی

رله بیضوی نوع دیگری از رله دیستانس است و مشخصه آن در صفحه R-X شبیه بیضی می‌باشد.

رله حساس به فرکانس

این رله در یک فرکانس از پیش تعیین شده عمل می‌کند و می‌تواند از نوع افزایش فرکانس و یا کاهش فرکانس باشد. رله کاهش فرکانس در صورتی که فرکانس سیستم از یک مقدار مشخص کمتر شود عمل خواهد کرد در حالیکه رله افزایش فرکانس به ازای فرکانس‌های بالاتر از یک مقدار تعیین شده عمل خواهد کرد.

رله دیفرانسیل

این رله در پاسخ به اختلاف دو کمیت ورودی عمل می‌کند.

رله خطای زمین

رله‌ای که برای محافظت از یک المان سیستم قدرت در مقابل خطای زمین به کار می‌رود به عنوان رله خطای زمین شناخته می‌شود.

رله خطای فاز

رله‌ای که برای محافظت از یک المان سیستم قدرت در مقابل خطای فاز به کار می‌رود به عنوان رله خطای فاز شناخته می‌شود.

رله توالی منفی

کمیت محرک این رله جریان توالی فاز منفی می‌باشد. این رله برای حفاظت ماشین‌های الکتریکی در مقابل افزایش بیش از حد حرارت ناشی از جریان‌های نامتعادل استفاده می‌شود.

رله توالی صفر

کمیت محرک این رله جریان توالی فاز صفر می‌باشد. این نوع از رله برای حفاظت خطای زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آشکارکننده خطا یا رله شروع کننده[1]

این رله شرایط غیرعادی را تشخیص داده و سبب شروع عملکرد سایر المان‌های طرح حفاظتی می‌شود.

Notching Relay

این رله در پاسخ به تعداد مشخصی از ضربه‌های[2] اعمالی عمل می‌کند.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک سیستم حفاظتی، توانایی آن سیستم برای عملکرد بدون خطا یا خرابی می‌باشد. قابلیت اطمینان یک رله حفاظتی باید بسیار بالا باشد و یک مقدار نوعی برای این شاخص ۹۵٪ یا بیشتر می‌باشد.

حساسیت

حساسیت معیاری از میزان اثربخشی یک رله حفاظتی است. یک رله باید به میزان کافی حساس باشد تا به محض افزایش کمیت محرک از مقدار تحریک عمل کند.

انتخابگری یا تشخیص

توانایی رله برای تشخیص شرایط خطا از شرایط عادی شبکه و یا تشخیص خطا در بخش حفاظت شده و خارج ناحیه حفاظت شده تحت عنوان انتخابگری شناخته می‌شود.

---

[1] . Fault detector or starting relay
[2] . Impulse

پایداری

پایداری عبارت از توانایی سیستم حفاظتی به منظور عمل نکردن تحت شرایط عادی بار و نیز در مقابل خطاهای خارج از ناحیه حفاظت شده می‌باشد. رله در مقابل خطاهای خارجی باید پایدار بوده و تحت تأثیر قرار نگیرد.

سد کردن (قفل کردن)[1]

سد کردن عبارت از جلوگیری از صدور فرمان قطع توسط رله می‌باشد که این کار می‌تواند به واسطه عملکرد رله‌های اضافی و یا بواسطه مشخصه خود رله باشد.

کور کننده[2]

یک کورکننده، سبب می‌شود رله در مقابل مجموعه‌ای از خطاهای خاص عملکرد نداشته باشد.

بار مصرفی[3]

توان مصرفی توسط مدارات رله در جریان نامی تحت عنوان بار شاخته می‌شود.

سیستم حفاظتی واحد

سیستمی است که فقط توانایی تشخیص و پاسخگویی به وقوع خطا در ناحیه حفاظتی خود را داشته و ناحیه حفاظتی آن تنها یک محدوده مشخص را شامل می‌شود. از جمله سیستم‌های حفاظتی واحد می‌توان از حفاظت دیفرانسیل ژنراتورها، ترانسفورماتورها و یا باسبارها، حفاظت نشت از محدوده[4]، حفاظت پایلوت سیمی و حفاظت جریان حامل[5] نام برد.

---

[1] . Blocking
[2] . Blinder
[3] . Burden
[4] . Frame Leakage Protection
[5] . Carrier current

سیستم حفاظتی غیر واحد

این سیستم حفاظتی تنها محدود به یک ناحیه مشخص نمی‌شود. در این سیستم، ممکن است تمام رله‌ها به یک خطای مفروض پاسخ دهند. به عنوان مثال، حفاظت دیستانس نمونه‌ای از یک سیستم حفاظتی غیرواحد است که می‌تواند تنظیم شده بر حسب زمان[1]، تنظیم شده بر حسب جریان[2] و یا هر دوی آن‌ها باشد.

حفاظت خطای زمین محدود شده

در این نوع حفاظت، ناحیه حفاظت شده تنها محدود به سیم‌پیچ‌های ژنراتور و یا ترانسفورماتور می‌شود. این نوع حفاظت تنها به خطاهای درون ناحیه حفاظت شده پاسخ می‌دهد.

جریان باقی‌مانده

جمع جبری جریان‌ها در یک سیستم چند فازه که با I_{res} نمایش داده می‌شود تحت عنوان جریان باقی‌مانده شناخته می‌شود. در یک سیستم سه فازه داریم: $I_{res}=I_A+I_B+I_C$

مبدل جریان به ولتاژ[3]

یک سیم‌پیچ با هسته هوا است که سیگنال جریان را به ولتاژ تبدیل می‌کند.

مبدل[4]

وسیله‌ای است که سیگنال قابل استفاده برای رله را از سیستم قدرت تولید می‌کند.

کنتاکت معمولاً بسته

کنتاکت‌هایی هستند که در حالت عادی بسته می‌باشند.

کنتاکت معمولاً باز

کنتاکت‌هایی که به طور معمول باز می‌باشند.

---

[1] . Time-graded
[2] . Current-graded
[3] . Transactor
[4] . Transducer

کنتاکت‌های کمکی

به کنتاکت‌های غیر از کنتاکت اصلی در مدارشکن، کنتاکت کمکی می‌گویند.

عملکرد مرزی

به این معناست که خطا در نقطه تعادل رله مانند انتهای ناحیه برد رله رخ داده و رله مورد نظر برای رفع آن عمل کرده است.

تمرین

۱- ماهیت، دلایل و آثار خطا در یک سیستم قدرت را شرح دهید.

۲- انواع متفاوت خطا را بر حسب شدت آن‌ها توضیح دهید.

۳- فلسفه اساسی یک طرح حفاظتی را به طور مختصر بیان کنید.

۴- نقش رله‌های حفاظتی در یک سیستم قدرت مدرن را به طور مختصر بیان کنید.

۵- کمیت‌های مورد نیاز برای یک رله حفاظتی را بیان کنید.

۶- این عبارت را تفسیر کنید: رله حفاظتی یک دستگاه حساس است.

۷- این عبارت را تفسیر کنید: رله حفاظتی یک مقایسه‌گر است.

۸- نواحی حفاظتی یک شبکه قدرت را مورد بحث قرار دهید.

۹- از حفاظت اولیه و پشتیبان چه می‌دانید؟ نقش حفاظت پشتیبان چیست؟ روش‌های مختلف ایجاد حفاظت پشتیبان کدام‌اند؟

۱۰- مقدار تحریک و بازنشانی یک کمیت به چه معناست؟

۱۱- پایداری و انتخابگری یک رله حفاظتی را توضیح دهید.

۱۲- تفاوت‌های اساسی ترانس جریان مورد استفاده برای مقاصد حفاظتی با ترانس جریان اندازه‌گیری را توضیح دهید.

۱۳- مفهوم ترانس جمع‌کننده را توضیح داده و موارد کاربرد آن را بیان کنید.

۱۴- چگونگی تأثیر اشباع بر دقت ترانس جریان را توضیح دهید.

۱۵- یک تزویج‌کننده خطی چیست و چه کاربردی دارد.

۱۶- انواع مختلف ترانس‌های جریان و محدوده کاربرد آن‌ها را بیان کنید.

۱۷- بار مصرفی یک ترانس جریان چگونه مشخص می‌شود.

۱۸- عبارات زیر را تعریف کنید:

- افزایش برد و کاهش برد
- نقطه تعادل
- کورکننده
- نشانه پرچم
- بار مصرفی
- عملکرد مرزی
- رله Seal-in
- تحریک
- آزادکردن رله

۱۹- عملکرد یک مدارشکن را بررسی کنید. انواع مختلف مدارشکن‌هایی که می‌شناسید را نام ببرید. کاربرد انواع مختلف آن را در یک جدول نشان دهید.

۲۰- به اختصار توضیح دهید:

ترانس‌های جریان

بار مصرفی ترانس جریان

ترانس ولتاژ

ترانسفورماتور جمع

فیلتر توالی فاز

۲۱- معایب رله‌های الکترومکانیکی را تشریح کنید.

طرح‌های حفاظتی

۲-۱- حفاظت اضافه جریان

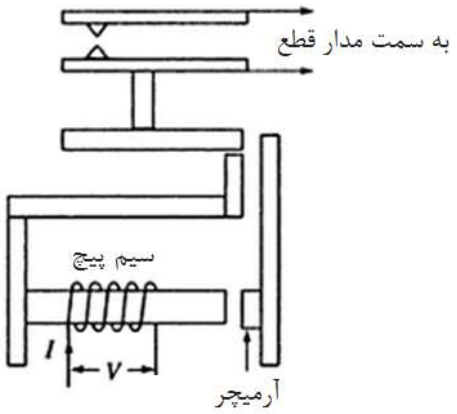
۱-۱-۲- رله اضافه جریان لحظه‌ای

این نوع رله عملکردی بدون تأخیر و به صورت آنی داشته و برای این منظور از رله های الکترومغناطیسی با ساختار آرمیچرجذبی استفاده می گردد. در این ساختار، آرمیچر که از جنس آهن می باشد، در میدانی که توسط یک سیم پیچ ایجاد می‌گردد، شروع به حرکت می‌کند. سیم‌پیچ محرک به دور یک هسته آهنی که خود بر روی یک پایه ی آهنی نصب شده است، پیچیده می‌شود. آرمیچر توسط یک پین به بدنه متصل شده است تا بتواند به راحتی در راستای میدان مغناطیسی حرکت کند. کنتاکت متحرک به همراه آرمیچر حرکت می‌کند و به کنتاکت انتهایی (کنتاکت میدان) متصل می‌گردد. به این ترتیب، در این آرایش تاخیر زمانی وجود ندارد.

در منبع تغذیه متناوب، در هر نیم سیکل با معکوس شدن پلاریته و نیز عبور از صفر مواجه می‌شویم. از این رو، شار در میدان آرمیچر جذبی نیز در هر نیم سیکل از صفر عبور کرده و در نتیجه آرمیچر دائماً به قطب جذب شده و مجدداً به جای خود باز می‌گردد. برای رفع این معضل یک حلقه مسی با مقاومت بسیار پایین در بخشی از قطب قرار داده می‌شود (ایجاد قطب چاکدار اتصال کوتاه شده) و بدین ترتیب اثر عبور از صفر میدان آرمیچر در هر نیم سیکل خنثی می‌گردد.

جریان گردابی القاء شده در حلقه، باعث می‌شود شاری که از این حلقه عبور می کند در مقایسه با شار بقیه قسمت ها پس فاز شود. این امر سبب می‌شود شار روی سطح قطب از صفر عبور نکند و در نتیجه نیرو الکترومغناطیسی تولیدی نیز صفر نشود. به عبارت دیگر، سطح قطب از لحاظ شار الکترومغناطیسی دارای دو بخش می‌باشد و بخشی از آن (بخش سایه دار) نسبت به بخش دیگر اختلاف فاز خواهد داشت. در طی فرایند طراحی، این نکته را باید در نظر داشت که حساسیت رله به گونه‌ای باشد که در مقابل حالت های گذرا و نیز تکان های شدید مکانیکی وارده بر رله، عملکرد اشتباهی رخ ندهد.

این نوع رله برای اطمینان از حفاظت فیدر، در حالتی که تنظیم جریانی امکان‌پذیر باشد، مناسب است. همچنین این رله‌ها برای حفاظت تجهیزات الکتریکی در مقابل اتصال کوتاه، به خصوص در اتصال کوتاه هایی با سطح جریان خطای بالا، مناسب خواهد بود. ساختار رله‌ی الکترومغناطیسی مدل آرمیچر جذبی در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۲): ساختار رله مدل آرمیچر جذبی

۲-۱-۲- رله های اضافه جریان با تأخیر زمانی

برای دستیابی به قابلیت انتخابگری و حفاظت پشتیبان، وجود یک تأخیر زمانی در عملکرد رله مورد نیاز می‌باشد. در این طرح حفاظتی یک سیستم هماهنگ شده زمانی[1] مورد نیاز می‌باشد. تنظیم زمان- جریان بدین معنی است که زمان عملکرد رله با عکس جریان خطا متناسب است. هرچه جریان خطا بیشتر باشد رله باید عملکرد سریعتری داشته باشد تا بتواند سیستم را با حداقل تأخیر و کمترین خسارت حفاظت کند.

رابطه کلی تأخیر زمانی عبارت است از:

$$T = \frac{k}{((PSM)^n - 1)}$$

T: زمان عملکرد رله

PSM: ضریب تنظیم جریان (نسبت "جریان خطا" به "جریان تحریک[2]")

K,n: ثابت هایی بر اساس مشخصات رله

[1] . Time-graded
[2] . Pick up

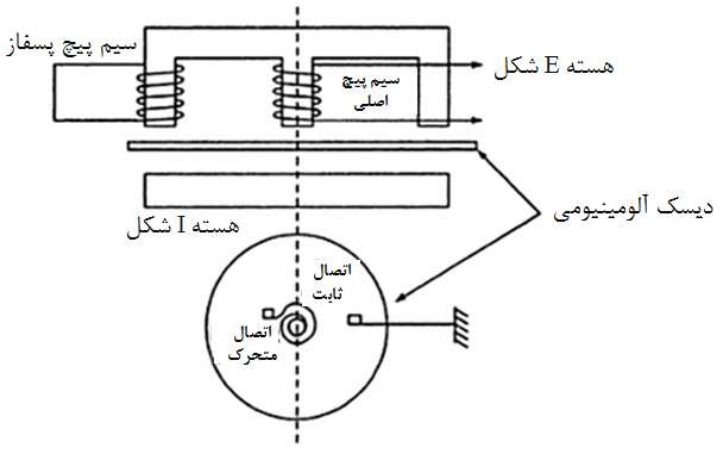
۳-۱-۲- رله های اضافه جریان زمان معین

در این رله مقدار از پیش تنظیم شده جریان خطا به عنوان جریان تحریک مورد استفاده قرار می گیرد. رله پس از طی مدت زمان تعیین شده عمل می‌کند. هر گونه تأخیر زمانی در این رله توسط یک مدار الکتریکی که به عنوان "واحد زمانی" شناخته می‌شود، تعیین می‌گردد. این واحد زمانی می تواند شامل دستگاه‌هایی با عملکرد مغناطیسی مجهز به میراکننده مکانیکی، دستگاه‌های موتوری، دستگاه‌های حرارتی، مدارهای الکتریکی شامل راکتانس و امپدانس غیر خطی، مدارهای الکترونیکی و یا مدارات نیمه رسانا باشد.

این رله ها برای حفاظت فیدرهای شعاعی مفید می‌باشند. همچنین این رله‌ها به منظور صدور هشدار اضافه بار برای ژنراتورها و یا اطمینان از حفاظت صحیح موتورهای القایی، استفاده می‌شوند. مشخصه این رله‌ها در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

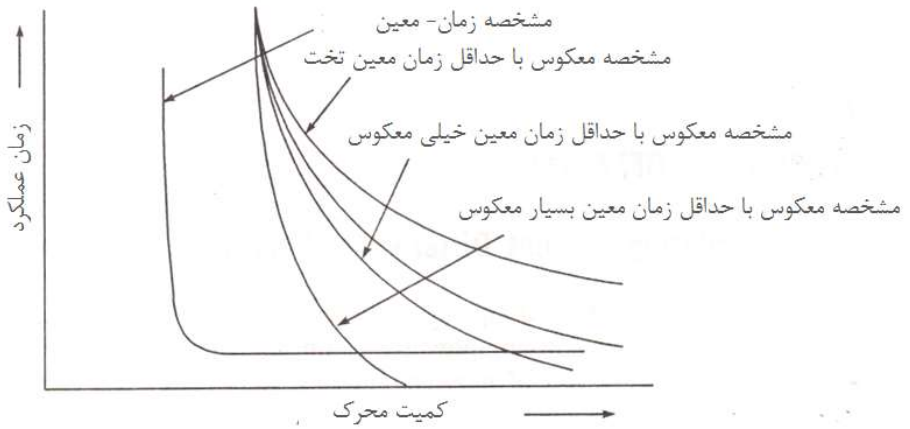
۴-۱-۲- رله های اضافه جریان زمان معکوس

زمان عملکرد رله اضافه جریان زمان معکوس متناسب با عکس جریان خطای عبوری از سیم پیچ رله می‌باشد. در این رله‌ها، هسته E شکل بوده که ساق وسط آن دارای یک سیم پیچ عملکرد با جریان پلکانی می باشد و ساق (و یا ساق های) جانبی نیز دارای یک سیم پیچ (اتصال کوتاه شده) با میدان پس‌فاز می‌باشد. کنتاکت متحرک رله به دیسک آلومینیومی که نیروی مقاوم شفت آن توسط یک فنر مارپیچی تامین می‌گردد، چسبیده است. هنگامی که گشتاور الکترومغناطیسی حاصل از جریان خطا بر گشتاور مقاوم حاصل از فنر مقاوم غلبه کند، دیسک شروع به چرخش می‌کند تا زمانی که کنتاکت ها به هم متصل گردند. یک رله الکترومغناطیسی دیسکی با مشخصه زمان- جریان معکوس در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۲): رله الکترومغناطیسی از نوع دیسکی القایی با مشخصه اضافه جریان زمان معکوس

گشتاور محرک در این رله بر اثر برهمکنش متقابل دو شار مغناطیسی متناوب که با یکدیگر چه از لحاظ فازی و چه از لحاظ مکانی اختلاف دارند تولید می‌شود. این دو شار را می توان توسط یک منبع انرژی، یعنی یک جریان و بوسیله یک سیم‌پیچ با شار متعامد و یا سیم پیچ اتصال کوتاه شده‌ی پس فاز، ایجاد کرد. ایجاد شکاف در قطب و قرار دادن یک حلقه ی امپدانس پایین مسی برای ایجاد یک قطب سایه دار نیز می تواند به دستیابی به این هدف کمک کند. تنظیم جریانی رله را نیز می توان با تغییر تعداد دور سیم پیچ عملگر کنترل نمود. چون رله به ازای یک مقدار معین آمپر- دور سیم پیچ عمل می‌کند، بنابراین با تغییر تعداد دور، جریان عملکرد نیز تغییر می‌کند.



شکل (۳-۲): مشخصه مدل‌های مختلف رله اضافه جریان

تنظیم رله توسط تعداد دور سیم‌پیچ تعیین می‌شود، که رابطه عکس با نسبت جریان عبوری از رله به جریان تنظیمی دارد. رله‌ها عموماً هفت مقدار تنظیمی دارند و محدوده‌ی جریانی ٤:١ (٤ به ١) را پوشش می دهند. هر پله (تپ) توسط وارد کردن یک پین به یکی از هفت حالت تنظیم می‌گردد. سرعت دیسک نیز توسط سیستم ترمزی که به کمک جریان گردابی میراکننده ناشی از آهنربای دائم ایجاد می‌شود، کنترل می‌گردد. این عمل با عبور دیسک چرخان از بین دو مغناطیس دائم نعل اسبی صورت می‌پذیرد.

به منظور تسهیل در حفاظت اضافه جریان هماهنگ شده زمانی، از رله‌های القایی دیسکی با مشخصه‌ی زمان- جریان معکوس استفاده می‌شود. طراحی دیسک به شکلی مناسب (کمی به شکل بیضی گون) می تواند به حفظ سرعت ثابت در طی حرکت دیسک کمک کند. معمولا دیسک های دایروی شکل در این رله ها استفاده نمی شود چون گشتاور فنر در زوایای متفاوت تغییر خواهد کرد و این امر باعث می گردد که گشتاور موثر اعمالی باعث کاهش سرعت دیسک گردد.

۵-۱-۲- رله‌های اضافه جریان معکوس با حداقل زمان معین[1]

در این رله برای مقادیر ضرایب تنظیم جریان[2] کمتر از ۱۰، یک مشخصه زمان معکوس بدست می‌آید و مشخصه‌های IDMT در مقادیر کمتر جریان خطا حاصل می‌شوند. رله‌های IDMT برای اطمینان از حفاظت خطوط توزیع به کار گرفته می‌شوند. بعضی از رله‌ها نیز مشخصه‌های معکوس با قابلیت انتخابگری بهتری نسبت به رله‌های زمان معکوس عادی (معمولی) در اختیار کاربر قرار می دهند. به هر حال در برخی شرایط، هم رله IDMT معمولی[3] و هم رله IDMT معکوس[4] در انتخاب ناحیه خطا[5] دچار اشتباه می‌شوند. در این موارد، رله های IDMT با مشخصه فوق العاده معکوس[6] به کار گرفته می شوند که برای حفاظت ماشین های سنگین در مقابل اضافه حرارت به کار برده می‌شوند. همچنین این رله‌ها برای بکارگیری در بازیابی بار نیز مناسب می‌باشند.

۲-۲- حفاظت دیفرانسیل (تفاضلی)

۱-۲-۲- رله دیفرانسیل جریان گردشی

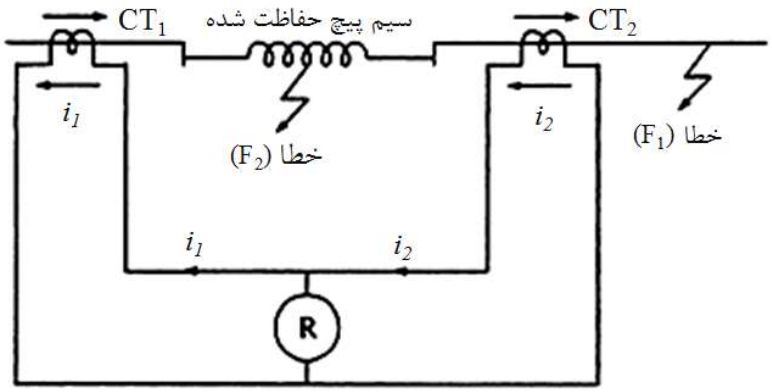
در این طرح حفاظتی، جریان تحریک معادل با تفاضل جریان های اعمالی به سیم پیچ عملگر می‌باشد و اساس عملکرد آن بوسیله قانون جریان کرشهف قابل تشریح می‌باشد. این روش شامل مقایسه جریان‌های ورودی به تجهیز و خروجی از آن می‌باشد. همانطور که در شکل (٤-۲) مشاهده می شود، اگر جریان‌های ورودی به تجهیز و خروجی از آن برابر نباشند، اختلاف جریان از شاخه سوم عبور می کند و بیانگر وقوع خطا می باشد. این جریان تفاضلی که متناسب با جریان خطا می باشد از سیم پیچ عملگر رله عبور می کند و اگر از مقدار تنظیمی بیشتر باشد، رله عمل خواهد کرد.

اگر به مدار رله نشان داده شده در شکل (٤-۲) با دقت نگاه کنید، متوجه می شوید که برای یک خطای خارجی به عنوان مثال در F_1، جریان‌های ورودی و خروجی از سیم‌پیچ محافظت شده، دامنه و فاز مشابهی دارند. این امر به این معناست که مقدار لحظه‌ای جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور جریان، i_1 و i_2، در تمام لحظات یکسان هستند. بنابراین اختلاف (i_1-i_2) صفر خواهد بود و رله عمل نمی‌کند. ولی اگر خطا در داخل ناحیه حفاظتی رخ دهد، به عنوان مثال در F_2، باعث ایجاد جریان های نابرابر i_1 و i_2

---

[1]. Inverse Definite Minimum Time (IDMT)
[2] . Plug Setting Multiplier (PSM)
[3] . Plain IDMT
[4] . Inverse IDMT
[5] . Selectivity
[6] . Extremely inverse

خواهد شد که اختلاف این جریان ها ($i_1 - i_2$) از سیم پیچ عملگر عبور کرده و اگر از حد تنظیمی بیشتر باشد سبب عملکرد رله و جداسازی تجهیز حفاظت شده از سیستم می‌شود.



شکل (٤-٢): مدار رله دیفرانسیل جریان گردشی

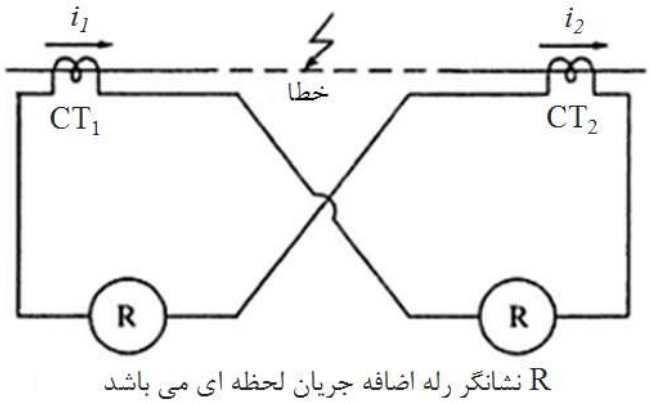
در این روش باید به اتصال صحیح پلاریته ی ترانسفورماتورهای جریان دقت شود در غیر این صورت جریان شاخه دوم به جای $(i_1 - i_2)$ مقدار (i_2+i_1) خواهد شد.

حفاظت دیفرانسیل با جریان چرخشی برای حفاظت ژنراتورها، حفاظت خطای زمین محدود شده[1] ترانسفورماتورها، حفاظت دیفرانسیل شینه‌ها (باسبارها) و نیز در حفاظت موتورها، کاربرد دارد.

۲-۲-۲- رله دیفرانسیل با ولتاژ مخالف

این طرح در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. در این طرح، ولتاژ القایی در سیم پیچ ثانویه ترانس جریان CT_1 متناسب با جریان i_1 بوده و ولتاژ القایی در سیم پیچ ثانویه ی ترانس جریان CT_2 متناسب با جریان i_2 می باشد. بنابراین جریانی متناسب با اختلاف جریان i_1 و i_2، $(i_1 - i_2)$ از سیم پیچ عملگر عبور خواهد کرد.

[1] . Restricted Earth Fault



شکل (۵-۲): رله دیفرانسیل ولتاژ مخالف

از آنجایی که هر دو ترانس جریان در طرفین تجهیز یکسان می باشند، هنگام وقوع خطاهای خارجی و یا در شرایط عادی عملکرد، جریان‌های ثانویه هر دو ترانس جریان مخالف یکدیگر می‌باشند. در نتیجه اختلاف ولتاژهای القایی که به سیم‌پیچ عمل‌کننده اعمال می‌شود، صفر خواهد شد.

هنگام وقوع یک خطای داخلی، جریانی متناسب با $(i_1 - i_2)$ از سیم‌پیچ عملگر عبور می‌کند. البته در صورتی که خطا در هر یک از پایانه‌ها رخ دهد، این جریان متناسب با (i_2+i_1) می باشد. اگر جریان عبوری از سیم‌پیچ عملگر از جریان تنظیمی فراتر رود باعث صدور فرمان قطع توسط رله و جداسازی تجهیز حادثه دیده از بقیه بخش‌های سیستم خواهد شد. در این نوع از حفاظت، در حالت عملکرد عادی، جریانی از ثانویه‌ی ترانس های جریان عبور نخواهد کرد و این امر باعث می شود که بتوان از حفاظت دیفرانسیل در حفاظت از فیدرها و خطوط انتقال کوتاه نیز استفاده کرد. از آنجا که در شرایط عادی جریان ثانویه‌ی ترانس های جریان صفر است، تمام آمپر دور اولیه برای تحریک ترانس استفاده خواهد شد.

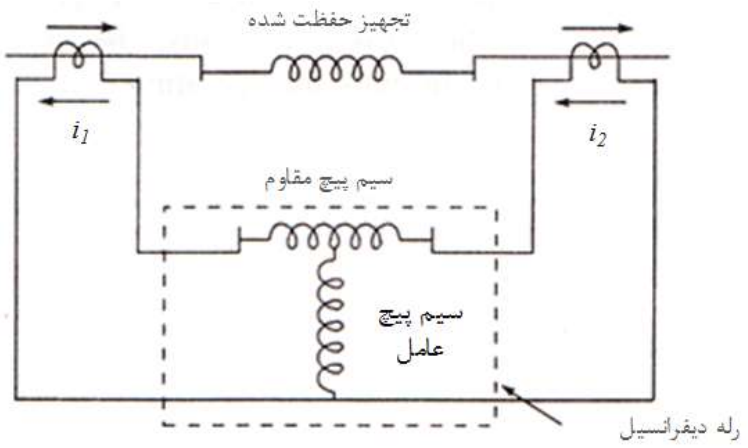
۳-۲-۲- حفاظت دیفرانسیلی درصدی (بایاس شده)

در حفاظت دیفرانسیل جریان گردشی به دلیل یکسان بودن هر دو ترانس جریان (از لحاظ تئوری) و دارا بودن مشخصه اشباع یکسان، تشخیص دقیق خطا تضمین می‌شود. اما در عمل دو ترانس جریان حتی اگر محصول یک تولید کننده باشند، مشخصه کاملا یکسانی نخواهند داشت.

این اختلاف در مشخصه دو ترانس جریان سبب می‌شود حتی در شرایطی که هیچ نوع خطای داخلی رخ نداده باشد، یک جریان گردشی در مدار رله جاری شود. اگر جریان گردشی ناشی از عدم تشابه مشخصات دو ترانس جریان از حد تنظیمی فراتر رود، می تواند باعث عملکرد ناخواسته رله گردد.

رله‌ی دیفرانسیل درصدی دو سیم پیچ دارد که یک سیم پیچ بایاس (جهت دار) به عنوان سیم پیچ تنظیم و دیگری سیم پیچ عامل می‌باشد. رله هنگامی فرمان قطع صادر می‌کند که گشتاور تولیدی توسط سیم پیچ عامل از گشتاور مقاوم بیشتر گردد. این شرایط نیز زمانی اتفاق خواهد افتاد که خطای خارجی بزرگی رخ دهد. از این رو رله طوری بایاس می‌شود که برای خطاهای ناخواسته عملکرد اشتباهی نداشته باشد. بایاس کردن نیز به این صورت است که سیم پیچ عامل به نقطه وسط سیم پیچ تنظیم، همانطور که در شکل (٦-٢) نمایش داده شده است، متصل گردد. تنظیم بایاس بر اساس نسبت حداقل جریان عبوری از سیم پیچ عامل به متوسط جریان مقاوم، صورت می پذیرد.

$$\%Bias = \frac{(i_1 - i_2)}{(i_1 + i_2)/2} \times 100$$



شکل (٦-٢): رله دیفرانسیل (درصدی) بایاس شده

شرط عملکرد برای رله این است که:

$$\frac{(i_1 - i_2)}{(i_1 + i_2)/2} > \text{جریان بایاس از پیش تعیین شده}$$

$$(i_1 - i_2) > \text{جریان تنظیمی پایه}$$

این نوع حفاظت برای مولدها و ترانسفورماتورهای بزرگ نیز استفاده می‌گردد.

۳-۲- حفاظت جهت‌دار[1]

۱-۳-۲- تئوری عملکرد

رله‌ی جهت دار از دو منبع مستقل متفاوت (جریان- جریان و ولتاژ- جریان) تغذیه می‌شود. مقدار پلاریزه کننده رله جهتی یکی از شارها را ایجاد خواهد کرد و این شار به عنوان مرجع برای مقایسه و تعیین فاز سایر مقادیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، زاویه‌ی یک کمیت ثابت نگه داشته می‌شود در حالیکه زاویه‌ی کمیت‌های دیگر تغییر می‌کند.

زاویه ی θ در رابطه کلی حاکم بر رله ($F = \phi_1\phi_2 sin\theta$) توسط منبع محرک مستقلی که رله از آن تغذیه می‌شود تغییر خواهد کرد. رله های متفاوت، با ساختارهایی چون وات ساعتی(کنتوری)[2]، القایی مدل فنجانی[3]، دوحلقه‌ی القایی[4] و تک حلقه‌ی القایی[5] در حفاظت جهتی استفاده می‌شوند. دو نوع تحریک مورد استفاده برای این مدل رله تحریک جریان- جریان و تحریک جریان- ولتاژ می‌باشند.

در یک حفاظت جهتی مدل جریان- جریان مقادیر جریان محرک رله از دو ترانس جریان مجزا حاصل می‌شود. با فرض اینکه اشباعی وجود نداشته باشد، با جایگزین کردن مقادیر جریان (مثلاً I_1 و I_2) با مقادیر شار، معادله‌ی زیر بیانگر گشتاور عملگر در رله می باشد:

$$T = K_1 I_1 I_2 Sin\theta - K_2$$

که در آن

θ: زاویه بین شارهای گردان ناشی از جریان های I_1 و I_2

I_1 و I_2: مقادیر موثر جریان‌های محرک

K_1 و K_2: ضرایب ثابت معادله

به دلیل ساختار متقارن رله، زاویه θ در معادله‌ی فوق را می‌توان زاویه ی بین I_1 و I_2 در نظر گرفت. دیاگرام فازی برای رله جهتی مدل جریان- جریان در شکل (۷-۲) نمایش داده شده است. واضح است که حداکثر گشتاور زمانی به دست می‌آید که زاویه‌ی

---

[1] . Directional
[2] . Watthourmeter
[3] . Induction cup
[4] . Double induction loop
[5] . Single induction loop

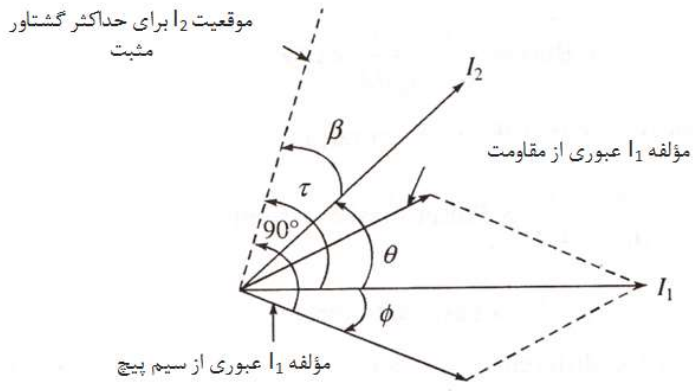
بین جریان های سیم‌پیچ ۹۰ درجه باشد. اما اگر گشتاور بر حسب جریان‌های تغذیه شده از منبع محرک بیان شود، در زاویه‌ای غیر از ۹۰ درجه گشتاور حداکثری به دست می‌آید. حال، جریان I_1 جریانی است که از طریق منبع به سیم پیچ و مقاومت موازی با آن اعمال می گردد.

گشتاور محرک از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = K_1 I_1 I_2 Sin(\theta - \phi) - K_2$$

در این رابطه، اگر جریان I_2 نسبت به جریان I_1 پیش‌فاز باشد، زاویه‌ی θ مقداری مثبت اختیار خواهد کرد و اگر مؤلفه I_1 عبوری از سیم‌پیچ نسبت به جریان I_1 پس فاز باشد، زاویه ی ϕ منفی خواهد بود. برای مثال اگر $\theta = 60^\circ$ باشد و $\phi = -25^\circ$ باشد، برای گشتاور خواهیم داشت:

$$T = K_1 I_1 I_2 Sin(85) - K_2$$



شکل (۲-۷): دیاگرام فازوری جریان- جریان در رله جهتی

زاویه τ به عنوان زاویه گشتاور حداکثر شناخته می‌شود و برابر مقداری از θ است که به ازای آن حداکثر گشتاور مثبت تولید می‌شود. به همین خاطر است که در طراحی تمام رله‌ها به جای ϕ از τ استفاده می‌شود. این روش تقریباً برای اکثر رله ها قابل استفاده است، صرف نظر از اینکه متقارن باشد یا نباشد. بنابراین، معادله کلی گشتاور برای رله جهتی را می توان به شکل زیر بیان کرد:

$$T = K_1 I_1 I_2 Cos(\theta - \tau) - K_2$$
$$T = K_1 I_1 I_2 Sin(\beta) - K_2$$
$$\beta = \tau - \theta$$

در طرح حفاظت جهتی ولتاژ- جریان، یک مقدار محرک از طریق ترانس ولتاژ تأمین شده و مقدار دیگر توسط ترانس جریان تامین می شود. از این رو، رابطه گشتاور عملکرد بر حسب مقادیر محرک ولتاژ و جریان به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$T = K_1 VICos(\theta - \tau) - K_2$$

در این رابطه

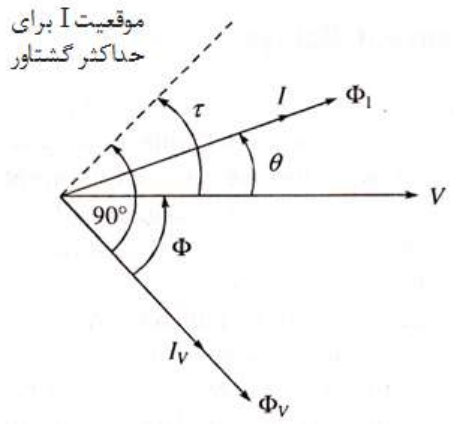
θ: زاویه بین V و I

τ: زاویه گشتاور حداکثر

V: ولتاژ (مقدار مؤثر) اعمالی بر مدار سیم‌پیچ ولتاژ

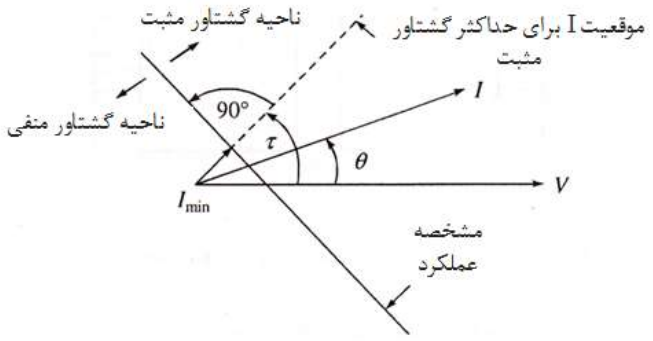
I: جریان (مقدار موثر) سیم‌پیچ جریان

زوایای θ و τ صرفنظر از ماهیت رابطه ی بین V و I، مقادیر مثبتی هستند. دیاگرام فازی برای گشتاور حداکثری در یک رله جهتی ولتاژ- جریان در شکل (۸-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۸-۲): دیاگرام فازوری رله جهتی ولتاژ- جریان

اگر هیچ امپدانسی به طور سری با سیم پیچ ولتاژ متصل نشده باشد، زاویه τ عموما ۲۰ تا ۳۰ درجه پیش‌فاز خواهد بود در حالیکه زاویه ϕ برای بیشتر سیم‌پیچ‌های ولتاژ حدود ٦٠ تا ۷۰ درجه می‌باشد. قرار دادن مقاومت و خازن سری در مسیر سیم پیچ ولتاژ می‌تواند به تغییر زاویه بین ولتاژ V و Iv کمک کند. شکل (۹-۲) مشخصه‌های عملکردی یک رله جهتی ولتاژ- جریان را نشان می دهد.



شکل (۹-۲): مشخصه‌های عملکردی رله جهتی ولتاژ- جریان

در شکل (۹-۲)، چون ولتاژ کمیت پلاریزه کننده می‌باشد به عنوان مرجع رله‌ی جهتی ولتاژ- جریان تعیین شده است و مقدارش نیز باید ثابت در نظر گرفته شود. مشخصه‌ی عملکردی رله به صورت یک خط مستقیم نشان داده شده است و برای مقادیر متفاوت دامنه ولتاژ مرجع، مشخصه‌های عملکردی با خطوط مستقیم موازی با خط نشان داده شده در شکل (۹-۲) نمایش داده می‌شود. مشخصه عملکردی این خط موازی را می‌توان با این معادله بیان کرد:

$VI_{min}=$ ثابت

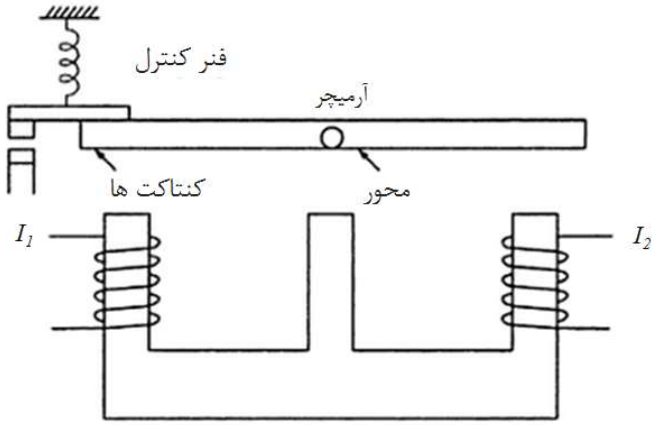
I_{min} حداقل جریان تحریک می باشد. البته باید توجه داشت که مقدار جریان تحریک در عمل، باید کمی بیشتر از مقدار جریان بیان شده در حالت تئوری باشد که فرمان قطع توسط رله صادر شود. مشخصه‌های عملکردی باید با یک سری از اعداد نمایش داده شوند که هر کدام از آن‌ها مقادیر ممکن برای ولتاژ مرجع را نشان دهد.

۲-۳-۲- رله اضافه جریان جهتی

در این ساختار تلفیقی از ساختار رله‌ی اضافه جریان و رله جهتی را در کنار هم خواهیم داشت. در این ساختار همچنین می توان از رله های اضافه جریان با مشخصه معکوس و رله اضافه جریانی آنی نیز استفاده کرد. یکی از این ترکیب ها که با نام رله تعادل جریان الاکلنگی[1] شناخته می شود در شکل (۱۰-۲) نمایش داده شده است. در این حالت دو نوع گشتاور محرکه به وجود می‌آید که یکی به عنوان گشتاور نوع "اضافه جریان" و دیگری با نام گشتاور "جهتی" شناخته می شود.

[1] . Balanced- Beam

برای داشتن مشخصه جهتی در رله، بخش اضافه جریانی تا زمانی که بخش جهتی عمل نکند، وارد عمل نخواهد شد. این امر نیز با اتصال سری کنتاکت های واحد جهتی با مدار سیم پیچ سایه دار[1] حاصل می‌گردد. تیغه‌های (کنتاکت) واحد جهتی می‌تواند به یکی از دو مدار تولید شار در مدار بخش اضافه جریانی متصل گردد.



شکل (۱۰-۲): رله تعادل جریان الاکلنگی

اگر از اثر گشتاور منفی بر روی فنر کنترلی صرفنظر شود، گشتاور محرک را می‌توان به صورت معادله‌ی زیر نمایش داد:

$$T = (K_1 I_1^2 - K_2 I_2^2)$$

در آستانه تحریک رله، گشتاور مقاوم با گشتاور محرک برابر خواهد بود و برآیند گشتاور خالص صفر خواهد بود، بنابراین:

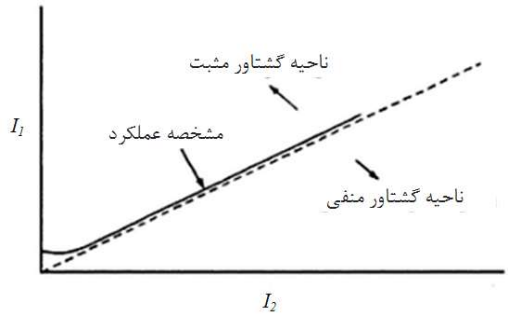
$$K_1 I_1^2 = K_2 I_2^2$$

از این رو، مشخصه های عملکرد از معادله ی زیر حاصل خواهد شد:

$$\frac{I_1}{I_2} = \sqrt{K_2/K_1} = \text{ثابت}$$

مشخصه های عملکردی یک رله‌ی تعادل جریان در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است. اثر فنر کنترل‌کننده نیز در این مشخصه لحاظ شده است بدین معنا که حتی وقتی جریان I_2 صفر است، به یک مقدار حداقل I_1 برای تحریک رله نیاز است. هر چه مقدار جریان افزایش پیدا کند، اثر فنر رفته رفته کمتر خواهد شد و رله برای مقادیری از I_1 و I_2 فرمان قطع صادر می‌کند که در بالای خط مشخصه‌ی عملکرد رله باشند.

[1] . Shaded coil



شکل (۱۱-۲): مشخصه عملکردی یک رله تعادل جریان

وقتی نسبت یکی از جریان‌ها به دیگری از یک مقدار موثر بالاتر رود، رله تعادل جریانی به طور ذاتی یک حفاظت انتخابگر را در هنگام وقوع اتصال کوتاه در هر کدام از مدارها، ارائه می کند.

معمولاً پیشنهاد می شود که به دلیل سهولت در اعمال تنظیمات، رله‌های جهتی و اضافه جریان به صورت مجزا نصب گردند. البته باید توجه داشت که نصب این دو رله به طور مجزا باعث افزایش حجم تجهیزات خواهد شد و علاوه بر این بار بیشتری بر روی ترانس جریان اعمال خواهد شد.

۳-۳-۲- تنظیمات رله اضافه جریان جهتی

برای عملکرد مناسب رله اضافه جریان جهتی در مواجهه با خطای فاز، سه نوع تنظیم مورد نیاز است که شامل تنظیمات بخش آنی، تنظیمات جریان تحریک و نیز تنظیم زمان عملکرد می‌باشد.

تنظیم آنی برای حالتی که حداکثر میزان جریان خطا به سیستم اعمال می‌گردد، مورد نیاز است و مقدار آن در حدود ۱/۲ تا ۱/۳ برابر جریان عملکرد خواهد بود. ضریب (۱/۲ تا ۱/۳) برابر جریان نامی به منظور جلوگیری از افزایش برد رله که می‌تواند باعث وقفه در برق رسانی به مشتریان شود، ضروری می‌باشد.

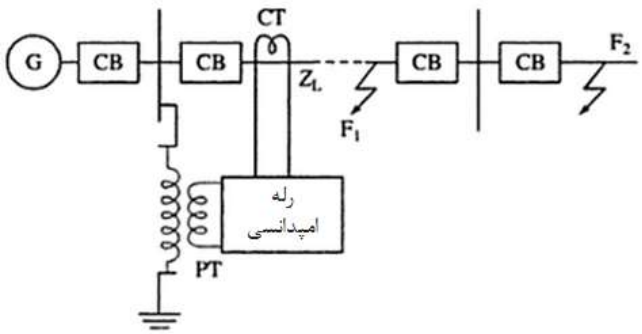
تنظیم جریان تحریک با در نظر گرفتن امکان انتخاب گام (تپ) جریان رله توسط کاربر در محدوده مشخص انجام می‌شود. حد پایین این محدوده پس از در نظر گرفتن اثر اضافه بار و نوسان توان تعیین می‌شود. این حد پایین را می‌توان معادل با ۱/۳ تا ۱/۲ برابر حداکثر جریان بار در نظر گرفت. حد بالا را نیز می‌توان به صورت ضریبی از حداقل جریان خطای خط به خط در نظر گرفت که معمولاً این ضریب برابر ۰/۵ تا ۰/٦ در نظر گرفته می‌شود. این ضریب به رفع خطا در ناحیه پشتیبان نیز کمک می‌کند. تنظیم زمان نیز بر طبق نیاز عملکردی هر کدام از رله‌های اضافه جریان انجام می‌شود.

۲-۴- رله های دیستانس

رله های اضافه جریان، دیفرانسیل و یا جهتی بر طبق این اصول که جریان و یا توان از مقدار عادی و مشخص خود فراتر رود عملکرد خواهند داشت. اما در رله دیستانس عملکرد بر مبنای نسبت ولتاژ به جریان اعمالی به رله صورت می پذیرد. رله‌های دیستانس شامل رله‌های امپدانسی، رله‌های راکتانسی و رله های مهو می‌باشند. طرح حفاظت دیستانس مستلزم استفاده از یک مقایسه‌گر با دو ورودی می‌باشد و همانطور که در بالا اشاره شده، بر اساس گشتاور عملکردی که توسط سیم پیچ ولتاژ و سیم پیچ جریان حاصل می‌گردد، عمل می‌کند. به عنوان مثال، یک رله امپدانسی هنگامی که نسبت V/I آن از یک حد مشخص کمتر گردد، عمل می کند. سیم پیچ جریان رله، جریان خط را دریافت می‌کند و این در حالی است که سیم پیچ ولتاژ، با ولتاژ باس تغذیه می گردد. محدوده حفاظتی رله دیستانس نمی‌تواند به وسیله عملکرد کلیدزنی یا تغییر در ظرفیت تولید و یا نوع خطا انتقال یافته و جابجا شود. رله دیستانس فازی که برای تشخیص خطاهای شامل دو و یا چند فاز به کار گرفته می‌شود، از ولتاژ مثلث و جریان مثلث (جریان و ولتاژ خط) تغذیه می‌گردد. برای خطای خط به زمین، رله با جریان ستاره و ولتاژ ستاره، یعنی ولتاژ فاز و جریان فاز، تغذیه می گردد.

۱-۲-۴- کاربرد رله دیستانس

شکل (۱۲-۲) کاربردی ساده از یک رله امپدانسی در خط انتقال را نمایش می‌دهد. امپدانس ناحیه‌ی حفاظت شده Z_L بوده و اگر به عنوان مثال خطایی در نقطه F_1 رخ دهد، در داخل ناحیه حفاظتی رخ داده است. رله امپدانسی میزان امپدانس بین محل وقوع خطا (نقطه F_1) و محل نصب رله را اندازه‌گیری می‌کند ($Z_F = \frac{V}{I}$). اگر $Z_F < Z_L$ باشد رله عمل خواهد کرد. اما رله برای خطاهایی که خارج از ناحیه حفاظتی رخ می دهند عملکردی نخواهد داشت چون در این شرایط $Z_F < Z_L$ می‌باشد.

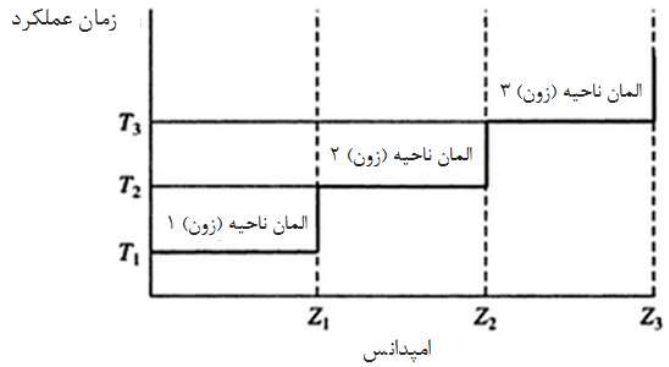


شکل (۱۲-۲): کاربرد رله امپدانسی در خط انتقال

رله دیستانس به عنوان حفاظت اصلی و نیز حفاظت پشتیبان به کار برده می‌شود. رله‌های دیستانس دو نوع کلی دارند: رله‌های مسافت مشخص[1] که برای خطای حادث در مسافت معین از محل رله عملکردی آنی دارند و نوع دیگر رله های مسافت زمانی [2] هستند که در آن‌ها زمان عملکرد رله متناسب با فاصله محل خطا از محل رله می‌باشد. رله های مسافت زمانی در مواجهه با خطاهای نزدیک به رله نسبت به خطاهایی که در مسافت های دورتر نسبت به رله رخ می‌دهد عملکردی سریعتر دارند. هر رله که به محل خطا نزدیک‌تر باشد به عنوان رله‌ی اصلی عمل کرده و در صورتی که عمل نکند، رله‌ی دورتر به عنوان حفاظت پشتیبان عمل می‌کند.

به طور کلی یک محدوده حفاظت شده به سه ناحیه[3] حفاظتی تقسیم می‌گردد و از این رو سه واحد رله امپدانسی برای حفاظت ناحیه مشخص شده مورد نیاز خواهد بود. نمایش پلکانی سه ناحیه‌ی حفاظتی اشاره شده در شکل (۱۳-۲) نشان داده شده است. بخش حفاظت شده توسط واحد اول تحت عنوان "ناحیه اول حفاظتی" شناخته می شود و ترجیح داده می‌شود که تنها ۸۰ تا ۹۰ درصد از طول خط اول را در برگیرد. این قاعده به منظور جلوگیری از افزایش برد ناخواسته صورت می‌پذیرد. در این ناحیه حفاظت آنی بوده و فرمان قطع در طی یک و یا دو سیکل صادر می‌شود.

ناحیه دوم حفاظتی بخش باقیمانده از خط حفاظت شده به همراه بخشی از ناحیه خارج از ناحیه حفاظتی اول را تحت پوشش قرار می‌دهد. تنظیم ناحیه دوم به گونه ای صورت می پذیرد که برای خطاهای ناشی از صاعقه و خطاهای گذرا در انتهای ناحیه اول عمل کند. ناحیه دوم معمولا تا ۵۰ درصد از کوتاه‌ترین خط متصل به انتهای خط اول تعیین می‌گردد. سیستم حفاظتی در ناحیه دوم با یک تأخیر زمانی تعیین شده در حد ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه عمل می‌کند.



[1] . Definite distance
[2]. Time Distance
[3]. Zone

شکل (۱۳-۲): مشخصه عملکرد امپدانس/زمان یک رله دیستانس امپدانسی

ناحیه سوم حفاظتی به عنوان حفاظت پشتیبان برای خطوط متصل خواهد بود. تنظیمات ناحیه‌ی سوم به گونه‌ای است که تمامی خط اول و دوم بعلاوه ۲۵٪ از خط سوم را شامل شود. مدت زمان تأخیر برای عملکرد در این ناحیه معمولاً ۰/٤ تا ۱ ثانیه می‌باشد. رله‌های امپدانسی برای حفاظت از خطوط کوتاه استفاده می‌شوند.

۲-۴-۲- کاربرد رله راکتانسی

در حقیقت رله راکتانسی متشکل از یک المان اضافه جریان و یک المان جهتی جریان- ولتاژ به ترتیب به منظور تولید گشتاور مثبت و منفی می‌باشد. بخش جهتی رله طوری طراحی شده است که حداکثر گشتاور منفی را هنگامی که جریان نسبت به ولتاژ ۹۰ درجه پس فاز باشد، تولید کند. ساختارهای رله القایی فنجانی و نیز دو حلقه‌ای القایی برای ساخت رله های راکتانسی استفاده می‌شود.

معادله گشتاور برای رله ی راکتانسی به شکل زیر است:

$$T = K_1 I^2 - K_2 VI\ Sin\theta - K_3$$

در این رابطه، اگر جریان I نسبت به V پس فاز باشد، θ مثبت خواهد بود و ($-K_3$) نیز اثر فنر را مدل می کند. در نقطه تعادل، گشتاور خالص صفر خواهد بود و بنابراین:

$$K_1 I^2 = K_2 VI\ Sin\theta + K_3$$

با تقسیم دو طرف بر I^2 خواهیم داشت:

$$K_1 = K_2 \frac{V}{I}\ Sin\theta + \frac{K_3}{I^2} \ \Rightarrow\ \frac{V}{I}\ Sin\theta = Z\ Sin\theta = X = \left({}^{K_1}/_{K_2}\right) - \left({}^{K_3}/_{K_2 I^2}\right)$$

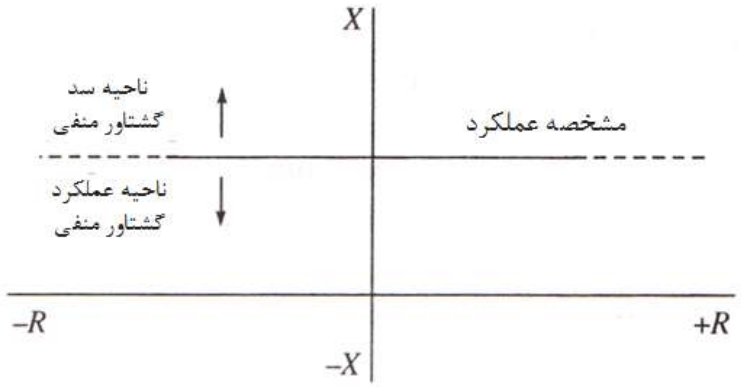
با صرفنظر کردن از اثر فنر کنترل، داریم:

$$X = \left({}^{K_1}/_{K_2}\right) = \text{ثابت} = K$$

شرط عملکرد رله $X < K$ خواهد بود.

این مطلب بیانگر این است که مشخصه‌ی عملکرد رله راکتانسی به گونه‌ای است که تمام فازورهایی که انتهای آن‌ها بر روی این مشخصه قرار می‌گیرد دارای مؤلفه راکتانس (X) ثابتی هستند. واضح است که X به صورت یک خط راست در نمودار R-X

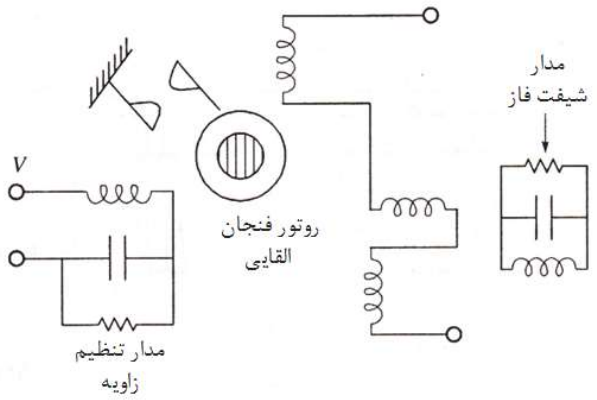
خواهد بود. مؤلفه مقاومت اهمی امپدانس تاثیری بر عملکرد این رله نخواهد داشت. مشخصه عملکردی رله‌ی راکتانسی در شکل (۲-۱٤) نمایش داده شده است. در این نوع رله نیز مانند رله های امپدانسی، برای حفاظت یک خط نیز سه واحد رله راکتانسی استفاده می‌شود. رله‌های راکتانسی برای حفاظت خطوط متوسط به کار برده می‌شوند. یک واحد پرسرعت که قادر به حفاظت ۸۰ تا ۹۰ درصد خط اول می‌باشد به عنوان واحد I برای حفاظت ناحیه اول به کار برده می‌شود. در این بخش، رله عملکردی آنی در طی یک یا دو سیکل خواهد داشت. واحد II برای حفاظت از بقیه خط استفاده می شود و ناحیه تحت حفاظت آن تا ۵۰ درصد از طول خط بعدی را نیز شامل می‌شود. عملکرد در این ناحیه با تأخیری مشخص در حد ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه همراه می‌باشد. واحد III نیز به عنوان حفاظت پشتیبان خط مجاور به کار برده می‌شود و تاخیر عملکرد آن در حد ۰/٤ تا ۱ ثانیه می‌باشد. مشخصه زمان- فاصله رله ی راکتانسی برای سه ناحیه حفاظتی مشابه مشخصه‌ای است که برای رله ی امپدانسی در شکل (۱۳-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱٤-۲): مشخصه عملکردی یک رله راکتانسی

نمایی از ساختار رله القایی فنجانی که به عنوان رله‌ی راکتانسی استفاده می‌شود در شکل (۱۵-۲) نمایش داده شده است. جریانی که در قطب های بالایی و پایینی سیم‌پیچ جاری می‌شود شار پلاریزه‌کننده تولید می‌کند. علاوه بر این، جریان محرک نیز شاری در قطب سمت راست تولید می‌کند. سیم پیچ دوم قطب سمت راست نیز به یک مدار جابجاکننده فاز[1] متصل شده است و به همین دلیل است که شار قطب سمت راست با شار قطب های بالایی و پایینی همیشه اختلاف فاز دارد.

[1] . Phase shifting circuit



شکل (۱۵-۲): نمایی از رله راکتانسی

در اثر برهمنکش شار پلاریزه کننده با شار قطب سمت راست، گشتاور محرکه ی K_1I^2 حاصل خواهد شد. گشتاور مقاوم [1] نیز از برهمکنش میان شارهای پلاریزه کننده با شارهای حاصل از قطب سمت چپ حاصل می شود. این گشتاور مقاوم متناسب با $VI\ Cos(90-\phi)$ می باشد. مدار جابجاکننده فاز نیز به طور سری با سیم پیچ ولتاژ متصل شده است.

۳-۴-۲- کاربرد رله مهو

رله ی مهو معمولا از نوع رله های الکترومغناطیسی القایی چهار قطبی به صورت القایی فنجانی می‌باشد. سیم پیچ ولتاژ، قطب‌های بالایی و پایینی را برای تولید شار پلاریزه کننده تغذیه می‌کند. جریان محرک نیز سیم پیچ سمت چپ را تغذیه می‌کند.

سیم پیچ سمت راست نیز توسط ولتاژ تغذیه می‌گردد. تنظیم امپدانس نیز توسط تنظیم‌کننده‌ها [2] انجام می گیرد که ممکن است با تنظیم کننده A و یا تنظیم کننده B، این کار انجام پذیرد. یکی از این تنظیم‌کننده ها بر روی تپ های سیم پیچ اولیه ترانس جریان داخلی قرار گرفته در حالیکه تنظیم‌کننده دیگر بر روی سیم پیچ ثانویه ی ترانس جریان داخلی قرار گرفته است. تنظیم ناحیه حفاظتی دوم و سوم رله با قطع و وصل کردن مقاومت‌هایی که به طور سری به سیم‌پیچ مقاوم متصل هستند کنترل می‌شود. شکل (۲-۱۶) رله ی مهو نوع القایی فنجانی را نمایش می دهد.

مشخصه ی گشتاور یک رله ی مهو توسط معادله ی زیر بیان می گردد:

$$T = K_1VI\cos(\phi-\alpha) - K_2V^2 - K_3$$

[1]. Restraining Torque
[2] . Adjusters

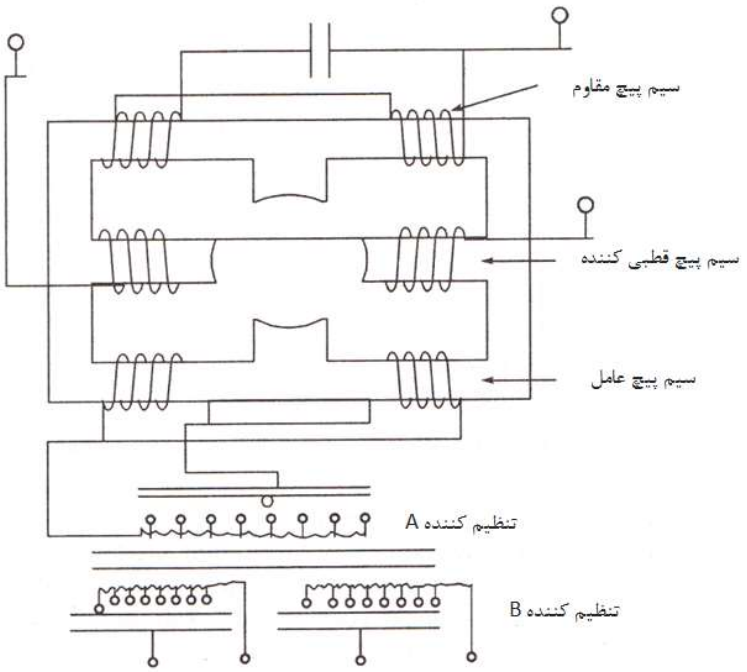
از برهمکنش شار منتجه از جریان I با شار پلاریزه‌کننده، گشتاور محرک مطابق رابطه $K_1VI\cos(\phi-\alpha)$ پدید می‌آید. مدار جابجا کننده فاز[1] که متشکل از یک مقاومت متغیر بوده نیز بر روی سیم پیچ سمت چپ نصب شده است و به تنظیم زاویه α کمک می‌کند.

از برهمکنش شارهای حاصله از قطب سمت راست با شارهای پلاریزه کننده، گشتاور مقاوم K_2V^2 بدست می‌آید. عبارت $-K_3$ نیز بیانگر اثر فنر بوده و شرط عملکرد رله با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$K_1VI\cos(\phi-\alpha) > K_2V^2$$

یا

$$(\frac{I}{V})\cos(\phi-\alpha) > (\frac{K_2}{K_1})$$



شکل (۱۶-۲): یک رله موهو

$$Y\cos(\phi-\alpha) > (\frac{K_2}{K_1})$$

یا

[1] . Phase shifting circuit

$$\frac{1}{\mathrm{Y}\,\mathrm{Cos}(\phi-\alpha)} < K$$

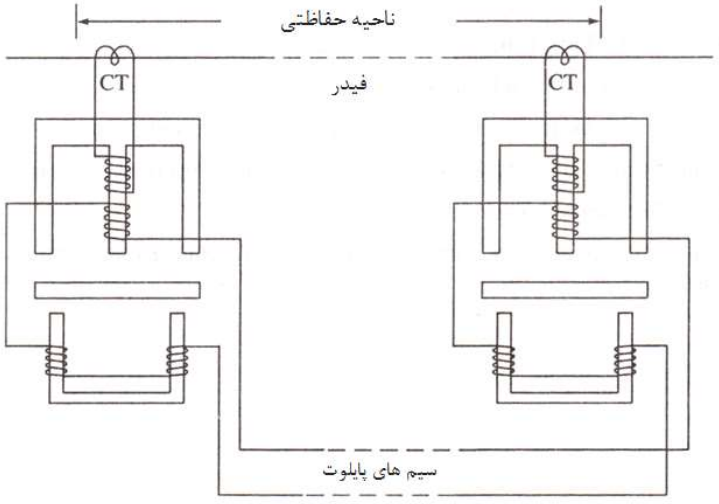
در این رابطه، Y ادمیتانس و K نسبت K_1 به K_2 می باشد. معادله فوق را بر حسب امپدانس نیز می‌توان بازنویسی کرد:

$$\frac{Z}{\mathrm{Cos}(\phi-\alpha)} < K$$

همچون رله‌های امپدانسی، سه واحد رله مهو برای حفاظت از یک خط استفاده می‌شود. رله های مهو معمولا برای حفاظت از خط های بلند مورد استفاده قرار می گیرند. بخش فوق سریع برای حفاظت ۸۰ تا ۹۰ درصد خط اول، یعنی همان ناحیه اول حفاظتی، به کار گرفته می‌شود. این بخش به طور آنی و در طی یک و یا دو سیکل عمل می‌کند. بخش دوم همچون تعریفی که در قبل ارائه شد، کل خط اول و ۵۰ درصد از خط بعدی را شامل می‌شود. عملکرد این بخش با یک تأخیر زمانی ثابت بین ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه همراه است. بخش سوم به عنوان حفاظت پشتیبان برای خطوط مجاور به کار برده می‌شود. تأخیر زمانی عملکرد این بخش معمولاً ۰/٤ تا ۱ ثانیه می‌باشد. مشخصه زمان- فاصله پله‌ای رله موهو برای سه ناحیه حفاظتی مشابه مشخصه‌ای است که برای رله‌ی امپدانسی در شکل (۱۳-۲) نشان داده شده است.

۲.۵ حفاظت Translay

حفاظت Translay حالت اصلاح شده رله دیفرانسیل تعادل ولتاژ می‌باشد که کم و بیش بر اساس قواعد حاکم بر آن عمل می‌کند. در این روش، ولتاژ حاصل از ثانویه دو ترانس جریان که در انتهای فیدر قرار گرفته اند، مقایسه می‌شود. از آنجا که ترانس‌های جریان بکار گرفته شده در این روش تنها باید یک سیم پیچ از رله را تغذیه کنند، دارای طراحی عادی و بدون فاصله هوایی می‌باشند. رله Translay جهت استفاده در یک سیستم تک فاز در شکل (۱۷-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱۷-۲): رله Translay اعمال شده به یک سیستم تک فاز

آهنربای شنت بالایی همچون یک ترانسفورماتور مربعی[1] عمل کرده و ولتاژ پایانه (ترمینال) متصل به سیم پایلوت را تولید می‌کند. ولتاژ پایانه با جریان اولیه تغییر خواهد کرد. اگر جریان در دو پایانه با هم برابر باشند به دلیل اینکه ولتاژهای القاء شده نیز برابر خواهند بود، جریانی در سیم پایلوت جاری نخواهد شد. به عبارت دیگر، می توان گفت که در شرایط عادی سیستم که خطایی وجود ندارد جریان تغذیه شده در دو انتهای فیدر تحت حفاظت یکسان بوده و جریان عبوری از سیم‌پیچ های اولیه رله نیز یکسان می‌باشند. به همین دلیل طرح حفاظتی مذکور عمل نخواهد کرد.

اما اگر خطایی در طول فیدر تحت حفاظت رخ دهد، جریان خروجی با جریان ورودی فیدر یکسان نبوده و بنابراین ولتاژ القا شده در ثانویه‌ی رله نیز یکسان نخواهد بود. در نتیجه جریانی گردشی بین دو سیم پیچ به چرخش در می‌آید که همین جریان، گشتاور محرک برای حرکت دیسک چرخان را فراهم می‌کند. گشتاور محرک تولید شده به نوع خطا و محل وقوع آن بستگی دارد و در شرایط خطا حداقل یک المان از رله‌های موجود در دو انتهای خط عمل خواهد کرد.

[1] . Quadrature transformer

تمرین

۱. به کمک یک دیاگرام، ساختار و نحوه عملکرد یک طرح حفاظتی اضافه جریان غیرجهتی را بیان کنید.

۲. جزئیات ساختاری یک رله دیفرانسیل را تشریح کنید.

۳. اصول عملکرد یک رله دیفرانسیل درصدی را به کمک دیاگرام توضیح داده و مشخصه‌های مربوطه را تشریح کنید.

۴. حداقل زمان معین در یک رله IDMT به چه معناست؟ وظیفه حلقه سایه‌دار در رله IDMT را توضیح دهید.

۵. اصول عملکرد رله دیستانس را بیان کنید.

۶. طرح حفاظتی Translay را توضیح دهید.

۷. اصول عملکرد رله جهتی را توضیح دهید.

۸. نحوه اتصالات یک رله مهو را رسم کرده و توضیح دهید.

۹. رله راکتانسی را تشریح کنید.

۱۰. رله‌های امپدانسی، راکتانسی و مهو را با یکدیگر مقایسه کنید.

۳- رله های دیجیتالی مبتنی بر ریزپردازنده

۱-۳- مقدمه

پس از فیوزها، رله های الکترومکانیکی جزء اولین و قدیمی ترین ادوات حفاظتی سیستم های قدرت بوده‌اند. به هرحال، استفاده از رله های الکترومکانیکی فرآیندی زمان‌بر می‌باشد چون این رله‌ها ساختاری پیچیده داشته و نیاز به تعمیر و نگهداری زیادی دارند. رله‌های مبتنی بر ریزپردازنده در موارد بسیاری از جمله قیمت، طراحی مهندسی و نیز نگهداری نسبت به رله های الکترومکانیکی برتری دارند.

ظهور مدارهای مجتمع در مقیاس انبوه منجر به توسعه ریزپردازنده‌های پیچیده و کارآمد شد. این ریزپردازنده‌ها که از فن‌آوری بالایی برخوردار بودند به مقبولیت طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده که در کشورهای در حال توسعه جایگزین طرح‌های حفاظتی متداول می‌شوند، کمک می‌کنند. کشورهای در حال توسعه در حال حاضر به تدریج در حال جایگزینی رله های مبتنی بر ریزپردازنده با رله های قدیمی متداول خود هستند.

مزایا

موارد زیر برتری‌های حفاظت توسط رله‌های دیجیتالی مبتنی بر ریزپردازنده نسبت به حفاظت توسط رله‌های متداول می‌باشد:

۱. این رله ها کم حجم و منعطف بوده و فضای کمتری در تابلو اشغال خواهند کرد.
۲. ویژگی برنامه پذیر بودن آن ها را بیش از پیش کاربردی کرده است.
۳. بار کمتری بر ترانس جریان (CT) و ترانس ولتاژ (PT) تحمیل می‌کنند و بدین ترتیب می‌توان رله را برای کاربردهایی با حساسیت بالاتر به کار گرفت.
۴. قابلیت پردازش و نمایش سیگنال به صورت کارآمدتر، دقیق‌تر و بدون تاخیر زمانی را دارا می باشند.
۵. ویژگی چندکاره بودن آن‌ها باعث می‌گردد که بتوان برای حفاظت چندین سیستم حفاظتی به کار گرفته شوند.
۶. نسبت به رله های دیگر حساس تر بوده و از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار هستند.
۷. به کاهش تعداد تجهیزاتی که در یک سیستم حفاظتی بکار گرفته می‌شوند کمک شایانی می کند. به طور کلی، اگر هزینه های یک سیستم حفاظتی به وسیله رله‌های الکترومکانیکی ۱ واحد باشد، هزینه های حفاظت با

استفاده از رله‌های میکروپروسسوری ۰/۳۵ واحد خواهد بود و حتی با احتساب هزینه های نصب نیز این رقم به ۰/۵ واحد خواهد رسید.

۸. طراحی و سیم بندی این رله ها به مراتب راحت تر و ارزان تر از انواع دیگر است.

۹. هزینه نصب و نیاز به تعمیرات دوره ای و تست در این گونه از رله ها به مراتب بسیار پایین تر می باشد.

۱۰. استفاده از این رله‌ها شناخت شبکه قدرت و درک قابلیت اطمینان آن را بهتر و راحت تر کرده است. طرح حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده می‌تواند خطای رخ داده در سیستم را گزارش کرده و وقوع خطا را تایید کند، افت ولتاژ را تحلیل کند و محل خطا را تشخیص دهد.

۱۱. حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده این قابلیت را داراست که با سایر تجهیزات شبکه هماهنگ[1] گردد.

۱۲. این طرح های حفاظتی تمامی اطلاعات تجهیزات را برای ما بیان می کند.

۱۳. وجود یک اتصال زمین دیگر در فیدر خارج پست، یک مسیر برگشتی از طریق نوترال فیدر ایجاد میکند. این جریان توسط ترانسفورماتور جریان نصب شده در فیدر زمین شده به صورت جریان ورودی به باس دیده میشود.در این شرایط جریان خطا دو برابر مقدار واقعی دیده میشود و عدم تعادل جریان سبب عملکرد رله دیفرانسیل نیز میشود.بنابراین فرمان قطع سریع روی باس سبب حذف مسیر زمین ناخواسته در ناحیه حفاظتی دیفرانسیل باس میشود.

۱۴. حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده عمل پایش[2] سیم پیچ تریپ را تسهیل کرده و در صورتی که ولتاژ رله قطع گردد و یا خطایی در تست خودی[3] رله رخ دهد، هشدار خواهد داد.

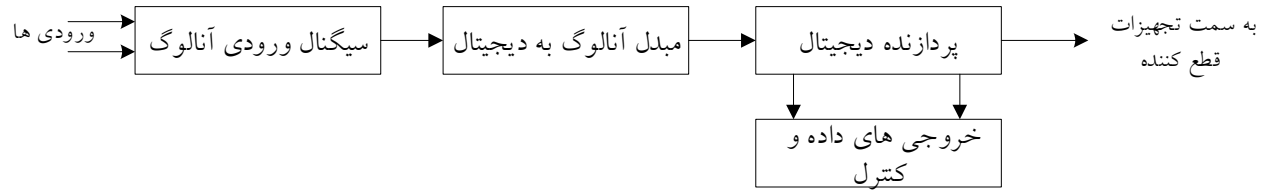
۱۵. رله مبتنی بر ریزپردازنده این قابلیت را داراست که عملکرد حفاظتی خود را تقویت کند و این عمل از طریق قابلیت تغییر در تنظیمات اضافه جریان، تغییر سطح آستانه عملکرد، حفاظت خرابی در مدارشکن[4]، حذف بار در برابر کاهش فرکانس و ... امکان‌پذیر است.

۱۶. یک ریزپردازنده با اتصال خروجی رله فیدر به ورودی رله باسبار می تواند ارتباط را تسهیل نماید. هنگامیکه یک رله فیدر تشخیص می‌دهد خطایی در نزدیکی آن رخ داده است، با رله باسبار ارتباط برقرار کرده و از تحریک رله لاک اوت[5] توسط المان زمان معین رله باسبار جلوگیری می‌کند.

---

[1] . Co-ordinate
[2] . Monitoring
[3] . Self-test
[4] . Circuit Breaker Failure (CBF)
[5] . Lock out

در حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده، مقادیر متغیر سه فاز سیستم قدرت توسط ترانس‌های ولتاژ و جریان دریافت شده و به طور همزمان و یا به ترتیب در بازه های زمانی مشخص و یکسان نمونه گیری می شوند. (٤ تا ٣٢ نمونه در هر سیکل). سپس این سیگنال‌های آنالوگ توسط مبدل های آنالوگ به دیجیتال (A/D) به سیگنال های دیجیتالی تبدیل می‌گردند. پس از تبدیل به فرم دیجیتال، سیگنال ها به پردازشگر دیجیتالی منتقل می گردند. سیگنال های دیجیتال به شکل پالس‌های مربعی کد شده درآمده و داده‌های گسسته را نشان می‌دهند. این سیگنال‌ها به صورت باینری می‌باشند. پردازشگر دیجیتالی ورودی‌ها را با مقادیر از پیش تعیین شده مقایسه کرده و تصمیم می گیرد که سیگنال هشدار تولید کند و در صورت نیاز نیز فرمان قطع تجهیز خروجی را صادر کند. بلوک دیاگرام یک طرح حفاظتی براساس رله‌های دیجیتالی مبتنی بر ریزپردازنده در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۳) : بلوک دیاگرام یک طرح حفاظتی دیجیتال مبتنی بر ریزپردازنده

ریزپردازنده‌ها باید در محیطی تمیز نگهداری شده و از عوامل خارجی همچون حرارت و آلودگی محافظت گردند. همچنین زمین سیستمی که ولتاژ کنترلی از آن دریافت می‌شود نیز باید به درستی اجرا شود.

۲-۳- ارتباط منطقی دیجیتال

ارتباط دیجیتالی لازمه ارتباط بین دو رله می باشد. در حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده، وضعیت منطقی هر نقطه توسط یک مقدار منطقی یا باینری (۰ و ۱) بیان می گردد. وضعیت منطقی یک رله می‌تواند دارای سه حالت باشد:

۱. رله می تواند در وضعیت تحریک و یا قطع تحریک[1] باشد.
۲. کنتاکت خروجی می تواند بسته و یا باز باشد.
۳. ورودی‌های کنترل می توانند مشخص یا نامشخص باشند.

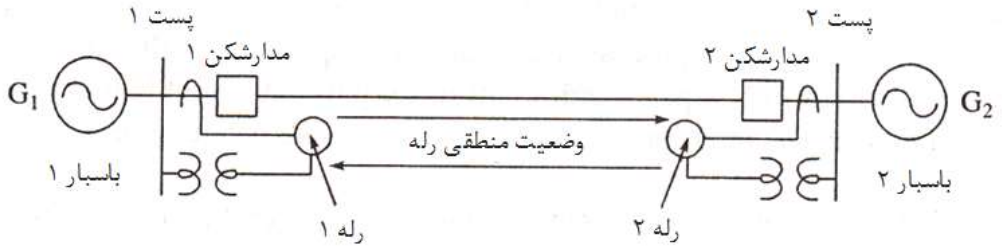
[1] . Dropped out

مثال

ارتباط منطقی بین رله‌ها این اطمینان را فراهم می سازد که هماهنگی مناسبی با پست‌های دور وجود دارد. به اشتراک گذاشتن وضعیت منطقی رله‌ها بین طرح‌های حفاظتی مختلف، رله‌های دیستانس و اضافه جریان جهتی در دو انتهای خط انتقال را قادر می‌سازد که برای رفع خطا در هر نقطه ناحیه حفاظت شده، فرمان قطع را با تأخیر کم و یا حتی بدون تأخیر صادر کنند. همچنین تبادل اطلاعات منطقی بین رله‌ها، پایه و اساس تشکیل طرح‌های حفاظتی زیر می‌باشد:

۱. طرح قطع مجاز[1]
۲. طرح قطع متقابل[2]
۳. طرح ممانعت از قطع[3]

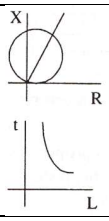
شکل (۲-۳) نحوه به اشتراک گذاشتن وضعیت منطقی رله‌ها در طرح حفاظتی پایلوت را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳): به اشتراک گذاشتن وضعیت منطقی توسط رله‌ها در ارتباط منطقی پایلوت

حالت های منطقی بخش‌های مختلف رله در جدول (۱-۳) نمایش داده شده است.

جدول (۱-۳): وضعیت منطقی رله، کنتاکت و ورودی

رها شده [۰]	تحریک شده [۱]	المان‌های رله	

[1] . Permissive tripping
[2] . Inter-tripping
[3] . Block tripping scheme

باز [۰]	بسته [۱]	کنتاکت‌های خروجی	
آزادنشده [۰]	آزاد شده [۱]	ورودی‌های کنترل	

طرح‌های حفاظتی ساده تنها نیاز دارند یک نقطه منطقی به اشتراک بگذارند در حالیکه طرح‌های پیچیده مستلزم به اشتراک گذاشتن چندین نقطه می‌باشند.

به غیر از سه طرح حفاظتی که در بالا ذکر شد (طرح قطع مجاز، طرح قطع متقابل، طرح ممانعت از قطع) سایر روش-های حفاظتی مورد استفاده عبارتند از:

۱. حفاظت با اقدام اصلاحی
۲. حفاظت به وسیله پایش وضعیت
۳. حفاظت به روش کنترل از راه دور

۳-۳- ارتباط منطقی مستقیم بین دو رله

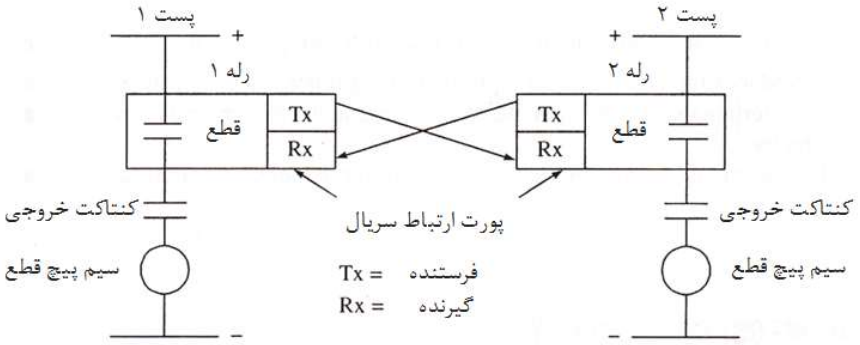
میزان توانایی پردازش دیجیتال منطقی وابسته به ظرفیت ارتباطی حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده بوده و این قابلیت برای توسعه طرح‌های حفاظتی که وضعیت منطقی رله‌ها را با یکدیگر مبادله می‌کنند، استفاده می‌گردد. هر رله مبتنی بر ریزپردازنده دارای یک درگاه ارتباطی[1] است که قادر به ارسال و دریافت پیام های دیجیتالی می‌باشد. علاوه براین، رله مبتنی بر ریزپردازنده می تواند اطلاعات دیجیتالی که وضعیت واحدهای اندازه‌گیری رله و ورودی‌ها و خروجی‌های کنترل را نشان می‌دهد، پردازش کند. ترکیب این دو توانمندی در ریزپردازنده‌های پیشرفته باعث می‌گردد که ارتباط منطقی مستقیم بین دو رله بیش از پیش تسهیل گردد.

ارسال وضعیت المان‌های داخلی قابل برنامه‌ریزی رله (که در یک پیام دیجیتال کد شده‌اند) به سایر رله‌ها با استفاده از درگاههای سریال(برای مثال پورت ارتباطی سریال EIA-232) امکان پذیر می باشد.

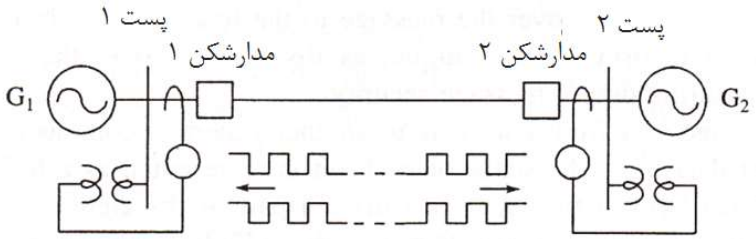
هر رله توسط کانال های ارتباطی به دیگر رله‌ها متصل است و این روش ارتباط منطقی مستقیم رله به رله، هشت خروجی مجازی برای هر رله ایجاد می‌کند که متناظر با هشت ورودی قابل کنترل بر روی سایر رله‌ها می‌باشد.

[1] . Communication port

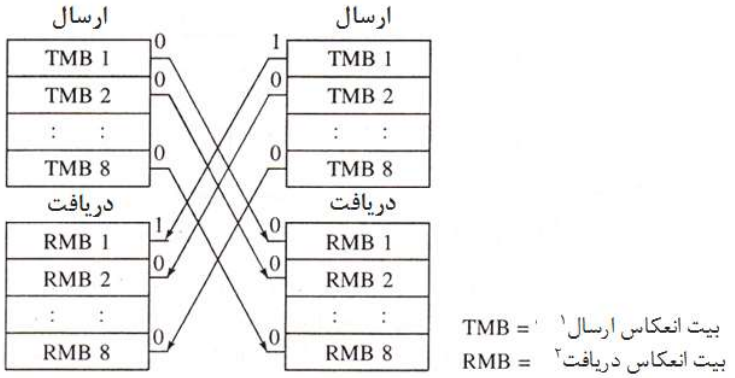
المان‌های داخلی رله که از RMB1 تا RMB8 را شامل می شوند، هشت ورودی قابل کنترل مجازی را تشکیل می‌دهند. این ورودی‌های مجازی از وضعیت خروجی مجازی مختص به خود در رله فرستنده که عبارت از TMB1 تا TMB8 می‌باشند، پیروی می‌کنند. این فرآیند در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳-۳): الف) اتصال سخت‌افزاری برای ارتباط منطقی مستقیم رله به رله ب) دیاگرام تک خطی مدار ارتباط منطقی دیجیتال رله به رله ج) تبدیل بیت‌های منطقی در ارتباط رله به رله

[1] . Transmit Mirror Bit (TMB)
[2] . Receive Mirror BIT (RMB)

هر تغییر منطقی از "۰" به "۱" در وضعیت TMB1 رله ۲ در پست ۲ سبب تغییر وضعیت RMB1 رله ۱ در پست ۱ از "۰" به "۱" می‌شود. این عمل رابطه مجازی بین دو رله ایجاد می‌کند به طوری که بیت انعکاس دریافت (RMB) از بیت انعکاس ارسال (TMB) مختص به خود که از رله دیگر فرستاده شده است، پیروی می‌کند. در برنامه‌نویسی، هر بیت انعکاس دریافتی (RMB) به یک تابع ورودی کنترل که شامل فرمان قطع مجاز، فرمان جلوگیری از قطع و ... می‌باشد اختصاص پیدا می‌کند.

هر بیت انعکاس ارسال (TMB) طوری برنامه‌ریزی شده است که توسط یک معادله منطقی که وضعیت یک المان داخلی رله، ورودی کنترلی، کنتاکت خروجی و یا هر ترکیبی از این المان‌ها را نشان می‌دهد، به یک کنتاکت خروجی اختصاص یابد.

روش ارتباط دیجیتالی رله به رله، مزایای زیر را به همراه دارد:

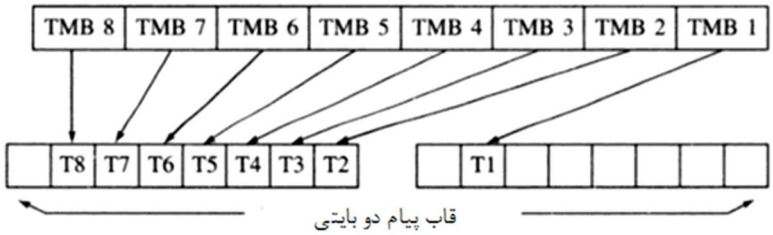
۱- ارتباط مستقیم بین رله‌ها در این روش معادل با هشت کانال ارتباطی بین رله‌ها به صورت سنتی می‌باشد که افزایش توانایی عملکرد سیستم را به همراه داشته و سبب می‌شود این روش مقرون به صرفه باشد.
۲- در این روش نیازی به تجهیزات ارتباطی گران قیمت مرسوم نمی‌باشد.

۳-۴- امنیت پیام دیجیتالی

در روش های متداول، قبل از این که پیام به رله تحویل داده شود، بررسی‌های ضروری جهت تعیین صحت سیگنال توسط تجهیزات مخابراتی انجام می‌شود. اما در روش ارتباط مستقیم منطقی رله به رله، همانطور که پیش تر بیان شد، رله خود وظیفه دارد از امنیت و صحت پیام اطمینان حاصل کند.

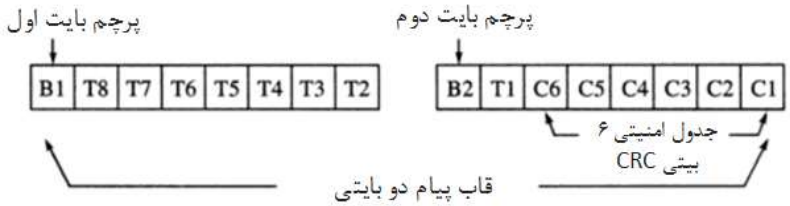
یک پیام دیجیتال که از رله ای به رله دیگر ارسال می‌گردد معمولا دارای دو بایت می باشد که هر بایت متشکل از هشت بیت داده خواهد بود. در یک پیام دیجیتال، وضعیت هر بیت به صورت "۰" یا "۱" منطقی نمایش داده می‌شود. هر بایت از پیام نیز از یک دسته هشت تایی شامل بیت های وضعیت منطقی رله تشکیل شده که نماینده بیت‌های انعکاس ارسال برنامه‌ریزی شده می باشند. موقعیت بیت‌های وضعیت نسبت به یکدیگر در یک قاب[1] پیام در (٤-۳) نشان داده شده است.

[1] .Frame

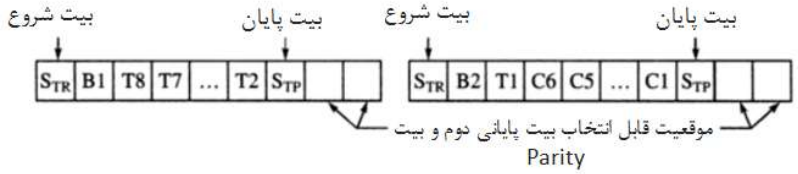


شکل (٤-٣) الف: بیت‌های وضعیت منطقی رله در یک قاب دیجیتال

به منظور اطمینان از ارسال بایت شامل وضعیت منطقی رله‌ها از یک رله به رله دیگر با ترتیب صحیح، معیارهای امنیتی متعددی مورد نیاز است. در این طرح، هر بایت از یک پیام دو بایتی، دارای یک بیت پرچم به منظور نمایش صحت ترتیب بیت‌ها می‌باشد. بایت دوم پیام دارای شش بیت CRC می‌باشد که با استفاده از هشت بیت وضعیت محاسبه شده‌اند. این مطلب در شکل (٤-٣ب) نشان داده شده است.



شکل (٤-٣) ب: پرچم بایت و بیت‌های امنیتی CRC در یک فریم پیام



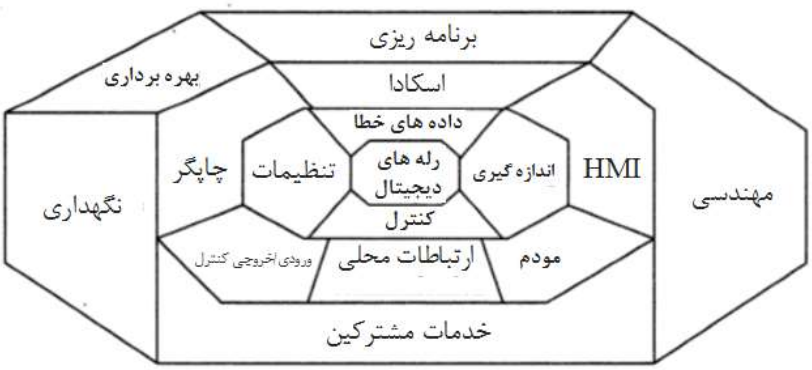
شکل (٤-٣) ج: بیت‌های در قالب‌بندی پیام غیرهمزمان

رله در صورتی پیام‌ها را بررسی خواهد کرد که بیت پرچم در وضعیت صحیح خود قرار داشته باشند. رله از بیت‌های پیام دریافتی مقدار CRC را محاسبه کرده و آن را با مقدار CRC دریافت شده مقایسه می‌کند. همچنین رله نحوه قرارگرفتن بیت‌ها در یک قاب پیام را بررسی می‌کند تا از صحت بیت‌های شروع، پایان و بیت زوجیت نیز اطمینان حاصل کند. سپس رله پیام را از لحاظ زمانی نیز بررسی می‌کند تا مطمئن شود در ازای هر پیام ارسالی، پیامی دریافت شده است یا خیر. حتی اگر نتیجه یکی از بررسی‌های انجام شده صحیح نباشد، پیام مردود خواهد شد. هر بایت از پیام

غیرهمزمان توسط یک بیت آغاز شروع شده و در انتها نیز سه بیت دیگر خواهد داشت که یک یا دو بیت مربوط به بیت توقف و یک بیت نیز مربوط به بیت زوجیت می‌باشد. این مطلب در شکل (٤-٣)ج نمایش داده شده است.

۳-۵- واسط رله با شبکه

رله‌های مبتنی بر ریزپردازنده علاوه بر اجرای توابع حفاظتی، داده‌های اندازه‌گیری، اطلاعات وضعیت عملکرد و محل وقوع خطا را نیز ارائه می‌دهند. این اطلاعات از طریق درگاه‌های[1] ارتباطی رله، نمایشگرهای محلی و یا سایر واسط‌های کاربری انسان و ماشین[2] (HMI) در دسترس کارمندان سازمان‌های مربوط قرار می‌گیرد و آن‌ها نیز از این اطلاعات برای اهداف خاص خود استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، مهندسین برنامه‌ریزی نیاز دارند اطلاعات مربوط به میزان تقاضای بار که توسط رله ثبت گردیده است را تحلیل کنند در حالیکه بهره‌براران نیاز دارند از محل وقوع خطا آگاهی یابند. مهندسین حفاظت نیز به منظور روشن شدن علت خطا روی خط مورد نظر نیازمند تحلیل گزارش حادثه می‌باشند. یک نما با محوریت رله در شکل (۵-۳) نمایش داده شده است.



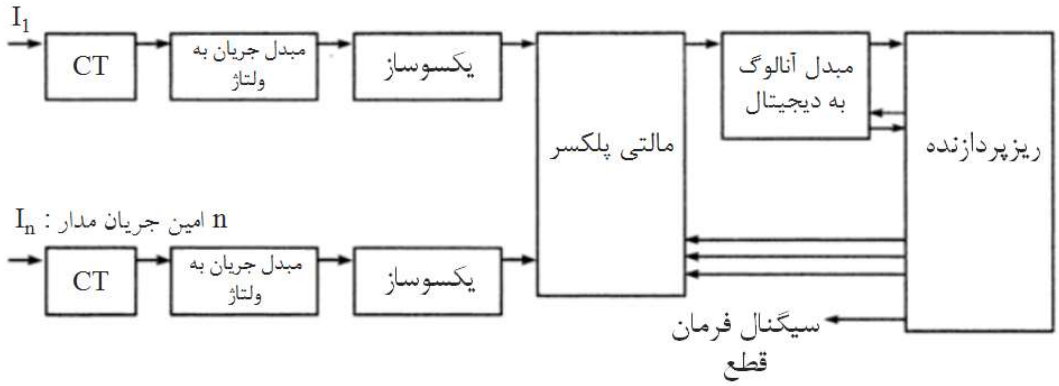
شکل (۵-۳): واسط ارتباطی رله با تجهیزات

۳-۶- رله های اضافه جریان مبتنی بر ریزپردازنده

رله های مبتنی بر ریزپردازنده به طور گسترده در صنعت برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رله‌ها هنگامی که جریان مدار از مقدار از پیش تعیین شده برای رله فراتر رود، عمل خواهند کرد. در حالتی که چندین مدار و زیر مدار برای ارسال جریان به رله وجود داشته باشد، رله از مالتی پلکسر برای انتخاب جریان خطا استفاده خواهد کرد. لازم به ذکر است که رله مبتنی بر ریزپردازنده، سیگنال را به صورت ولتاژ دریافت می‌کند و از این روست که باید جریان خروجی از

[1] . Port
[2] . Human-Machine Interface (HMI)

ترانس جریان(CT) به سیگنال معادل از جنس ولتاژ تبدیل گشته و سپس به یکسوساز، مالتی پلکسر، مبدل آنالوگ به دیجیتال و در انتها به ریزپردازنده اعمال گردد. بلوک دیاگرام برای این ساختار در شکل (٦-٣) نمایش داده شده است.



شکل (٦-٣): بلوک دیاگرام یک رله اضافه جریان بر پایه ریزپردازنده

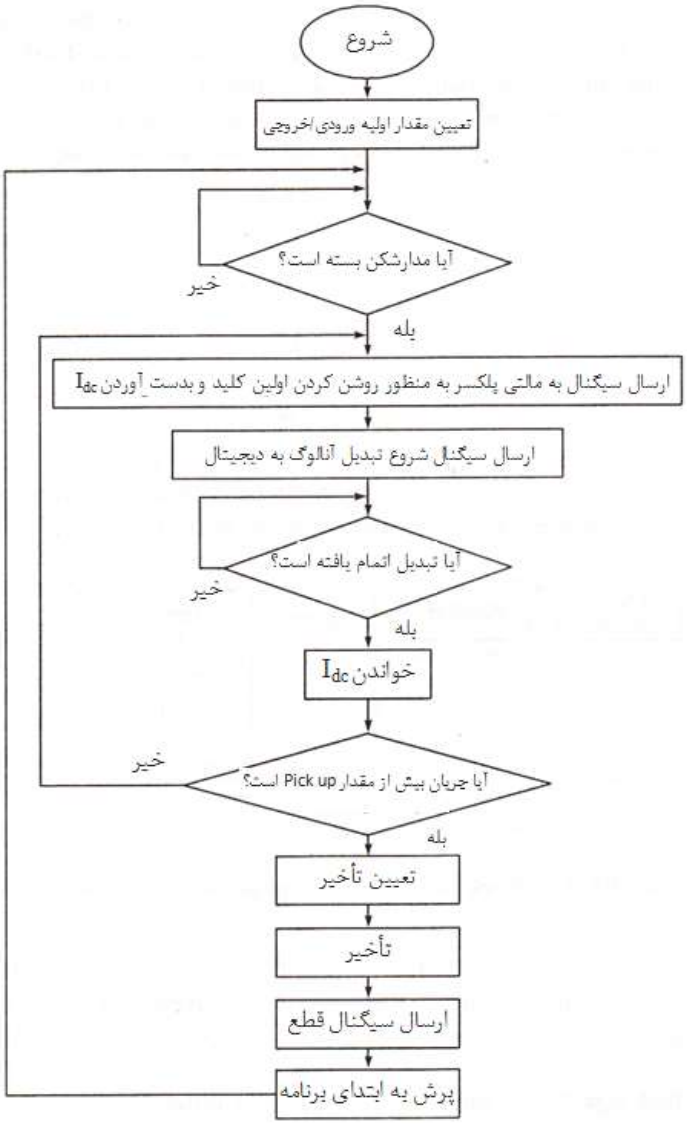
خروجی سیگنال‌های ولتاژ یکسو شده به مالتی پلکسر اعمال می‌شود و سپس ریزپردازنده فرمان روشن شدن کانال مورد نظر در مالتی پلکسر را به منظور دریافت ولتاژ یکسو شده در مدار مورد نظر صادر می کند.

سپس، به دلیل نیاز ریزپردازنده به سیگنال دیجیتال، خروجی مالتی پلکسر به مبدل سیگنال آنالوگ به دیجیتال (A/D) اعمال می‌گردد. پس از آن نیز ریزپردازنده سیگنالی را به مبدل آنالوگ به دیجیتال به منظور شروع تبدیل ارسال می‌کند و در عین حال انتهای سیگنال تبدیل شده را به منظور تشخیص اتمام عملیات بررسی می کند. سپس ریزپردازنده سیگنال تبدیل شده را با مقدار تحریک از پیش تعیین شده مقایسه می‌کند. فلوچارت یک رله اضافه جریان در شکل (٧-٣) نمایش داده شده است.

٣-٣- رله امپدانسی مبتنی بر ریزپردازنده

نسبت ولتاژ (V) به جریان (I) بیانگر امپدانس خط انتقال و یا خط توزیع بین محل نصب رله تا محل وقوع خطا می‌باشد. از این رو مشخصه رله امپدانسی با مقایسه جریان و ولتاژ در محل رله محقق خواهد شد. در حفاظت امپدانسی مبتنی بر ریزپردازنده، برای مقایسه ولتاژ و جریان، از مقادیر DC آن‌ها در محل رله جهت تسهیل در مقایسه استفاده می‌شود. ولتاژ و جریان خطای متناوب (AC) در محل رله یکسو می‌شوند تا اعمال آن‌ها به ریزپردازنده امکان‌پذیر باشد. شرط لازم برای عملکرد رله به صورت زیر بیان می گردد:

$$K_1 V_{dc} < K_2 I_{dc}$$



شکل (۷-۳): فلوچارت یک رله اضافه جریان مبتنی بر ریزپردازنده

یا

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} < \frac{K_2}{V_1}$$

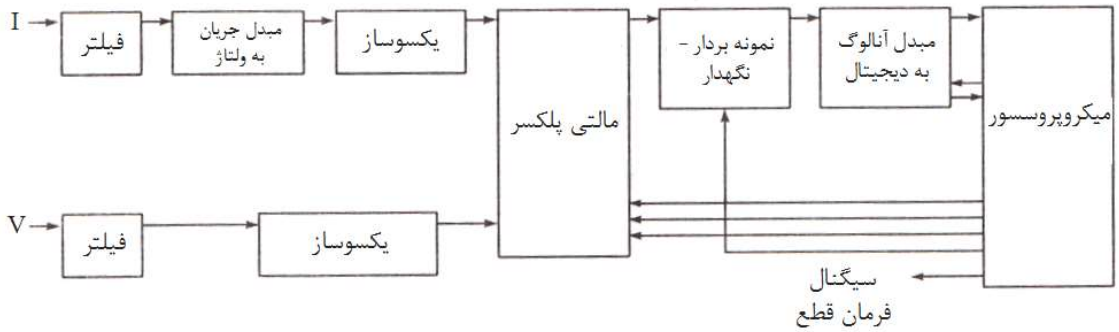
یا

$$\frac{V}{I} < K$$

یا

$$Z < K$$

در این روابط K_1 و K_2 و K ثابت‌های معادلات هستند. برای دستیابی به مشخصات مناسب و مطلوب، مقادیر K برای نواحی حفاظتی متفاوت محاسبه شده و در حافظه رله ذخیره می شوند. یک بلوک دیاگرام برای این نوع حفاظت در شکل (۸-۳) نمایش داده شده است.

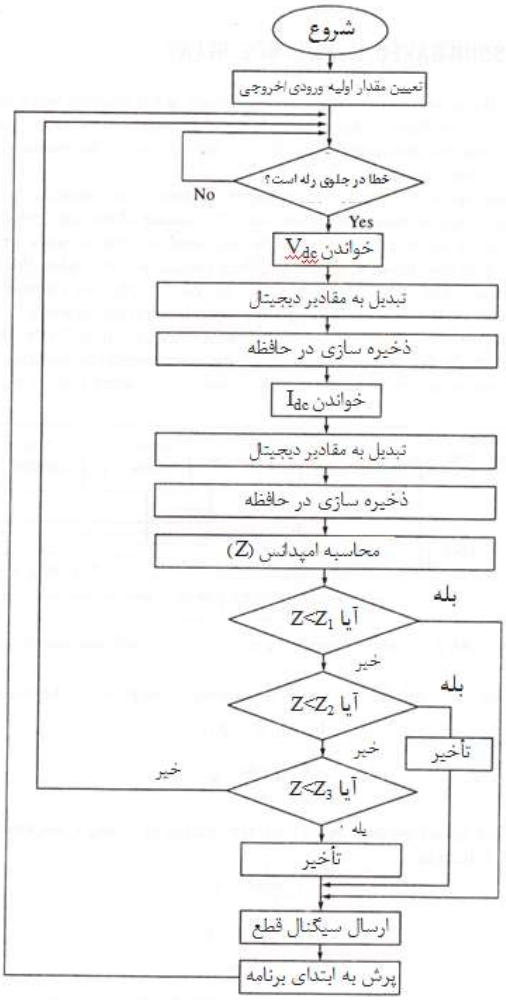


شکل (۸-۳): بلوک دیاگرام یک رله امپدانسی مبتنی بر ریزپردازنده

به کمک ترانس‌های ولتاژ و جریان، مقادیر ولتاژ و جریان خطا به سطح مناسب کاهش پیدا کرده و سیگنال جریان به سیگنال ولتاژ متناسب با آن تبدیل می‌شود. پس از آن، یک یکسوساز دقیق، سیگنال‌ها را یکسو می‌کند. پس از این مرحله، سیگنال‌های یکسو شده به دو کانال متفاوت از مالتی پلکسر که توسط فرمان ارسالی از سوی ریزپردازنده به طور متوالی در مدار قرار می‌گیرند، اعمال می‌شوند. خروجی مالتی پلکسر نیز از طریق یک مدار نمونه‌بردار- نگهدار[1] و یک سیستم جمع آوری داده به مبدل آنالوگ به دیجیتال اعمال می‌گردد.

ریزپردازنده ولتاژ و جریان یکسو شده (V_{dc} , I_{dc}) را دریافت کرده و مقدار امپدانس (Z) دیده شده توسط رله را محاسبه می‌کند. سپس امپدانس محاسبه شده برای با امپدانس تنظیمی برای نواحی ۱، ۲ و ۳ که به ترتیب با Z_1، Z_2 و Z_3 نشان داده شده‌اند، مقایسه می‌شود. فلوچارت برنامه ی رله امپدانسی در شکل (۹-۳) نمایش داده شده است.

[1]. Sample & Hold



شکل (۹-۳): فلوچارت رله امپدانسی بر پایه ریزپردازنده

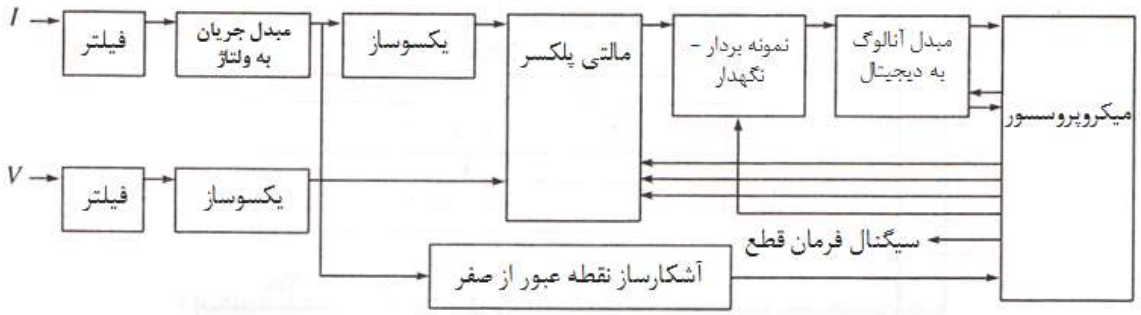
۴-۳- رله راکتانسی مبتنی بر ریزپردازنده

در این نوع از رله، از مقایسه مقادیر لحظه‌ای ولتاژ در لحظه‌ای که جریان خطا از مقدار صفر خود در حال عبور است، برای تشخیص استفاده می‌شود. بنابراین، مشخصه رله راکتانسی با مقایسه مقادیر لحظه‌ای ولتاژ در لحظه عبور جریان از صفر محقق می‌شود.

بلوک دیاگرام مورد استفاده برای پیاده‌سازی رله راکتانسی مبتنی بر ریزپردازنده در شکل (۱۰-۳) نشان داده شده است. خروجی آشکارساز نقطه عبور از صفر[1] توسط ریزپردازنده بررسی می‌گردد و بدین ترتیب مشخص می‌شود که در چه زمانی جریان خطا از مقدار صفر خود عبور کرده است. هنگامی که جریان خطا از مقدار صفر عبور کند، ریزپردازنده

[1]. Zero crossing

دستور در مدار قرار گرفتن یک کانال ورودی را به مالتی پلکسر ارسال می‌کند. به این ترتیب رله مقدار لحظه‌ای ولتاژ در آن لحظه را پس از عبور از مبدل آنالوگ به دیجیتال دریافت خواهد کرد. سپس ریزپردازنده فرمان در مدار قرار گرفتن یک کانال ورودی را به مالتی پلکسر صادر کرده و به این ترتیب مقدار لحظه‌ای جریان خطای یکسو شده بدست می‌آید. پس از آن ریزپردازنده راکتانس X را محاسبه می‌کند. مقدار لحظه‌ای ولتاژ در لحظه‌ای که جریان صفر است برابر با $V_m \sin\varphi$ می‌باشد.



شکل (۱۰-۳): بلوک دیاگرام رله راکتانسی بر پایه ریزپردازنده

شرط لازم برای عملکرد رله در معادله زیر بیان شده است:

$$V_m \sin \phi < K_1 I_{dc}$$

یا

$$\frac{V_m \sin \phi}{I_{dc}} < K_1$$

از آنجا که مقادیر V_m و I_{dc} با مقدار موثر V و I متناسب هستند، می توان رابطه بالا را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{V \sin \phi}{I} < K$$

یا

$$Z \sin \phi < K$$

یا

$$X < K$$

ریزپردازنده مقدار X دیده شده توسط رله را محاسبه کرده و آن را با مقدار X_1 که همان مقدار راکتانس ناحیه اول حفاظتی است، مقایسه می کند. حال اگر مقدار راکتانس محاسبه شده یعنی X از مقدار تنظیمی راکتانس برای ناحیه اول حفاظتی یعنی X_1 کمتر باشد، فرمان قطع برای مدارشکن ارسال خواهد شد. اگر مقدار X از مقدار X_1 بیشتر و از مقدار X_2 کمتر باشد، پس از یک تأخیر از پیش تعیین شده، فرمان قطع صادر می‌شود. در حالتی که X از مقدار X_2 بیشتر باشد ولی در جهت ناحیه حفاظتی باشد، فرمان قطع پس از یک تأخیر بیشتر ارسال خواهد شد. فلوچارت برنامه رله راکتانسی مبتنی بر ریزپردازنده در شکل (۱۱-۳) نمایش داده شده است.

۳-۵- رله مهو مبتنی بر ریزپردازنده

رله مهو به طور ذاتی جهتی بوده و تنها خطاهایی که در جلوی رله رخ دهد را تشخیص می‌دهد. مشخصه این رله در صفحه (R-X) به شکل دایره‌ای می‌باشد که از مرکز نمودار عبور می کند. این مشخصه به گونه‌ای است که حداقل فضای ممکن را بر روی نمودار R-X اشغال می‌کند و از این رو از نوسانات و اغتشاشات سیستم قدرت کمترین تأثیرپذیری را دارد. همین قابلیت، باعث گردیده که رله مهو بهترین و ایده آل ترین انتخاب برای حفاظت در خط های بلند به حساب بیاید. محدوده قطع رله مهو را حتی می توان با استفاده از یک محدودکننده که اصطلاحا با نام "کورکننده[1]" ها از آن‌ها یاد می شود، بیش از پیش محدود کرد.

پیاده‌سازی مشخصه این نوع رله از طریق مقایسه مقدار لحظه‌ای جریان هنگامی که ولتاژ حداکثر است با جریان یکسو شده انجام می‌شود. مقدار لحظه‌ای جریان هنگامی که ولتاژ به مقدار پیک خود می‌رسد برابر با $I_m \cos\phi$ می باشد. معادله زیر شرط لازم برای عملکرد رله امپدانسی را بیان می کند:

$$I_m \cos\phi > K_1 V_{dc}$$

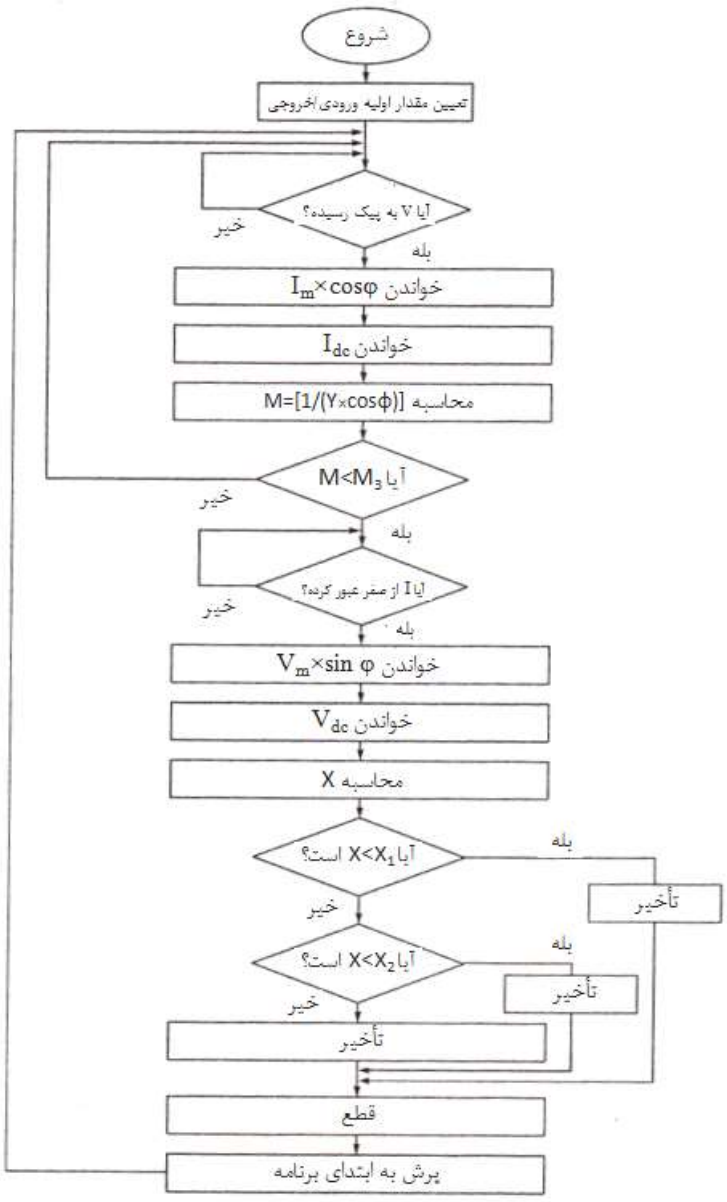
یا

$$\frac{I_m \cos\phi}{V_{dc}} < K_1$$

از آن جا که مقادیر I_m و V_{dc} با مقادیر مؤثر جریان و ولتاژ (I و V) متناسب هستند، معادلات بالا را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{I \cos\phi}{V} < K_2$$

[1] . Blinder



شکل (۱۱-۳): فلوچارت یک رله راکتانسی بر پایه ریزپردازنده

یا

$$Y\cos\phi > K_2$$

یا

$$\frac{1}{Y\cos\phi} < \frac{1}{K_2}$$

یا

$$M < K$$

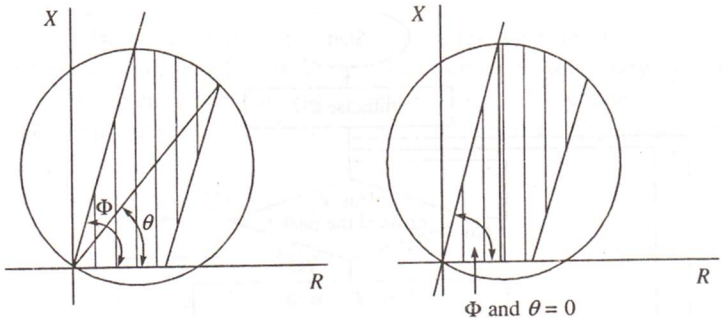
در این روابط K_1 ، K_2 و K ضرایب تناسب بوده و مقادیر ثابت هستند.

با معرفی زاویه θ به عنوان زاویه طراحی رله، می توان معادله را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\left[\frac{1}{Y\cos(\phi-\theta)}\right] < K$$

تغییر زاویه θ می‌تواند منجر به جابجایی مشخصه رله مهو به سمت محور R (مقاومت) شده و میزان پایداری رله در مواجهه با مقاومت قوس[1] را افزایش می‌دهد. به منظور پایداری مناسب در مواجهه با مقاومت قوس به خصوص برای خطاهایی که نزدیک باس رخ می دهد، زاویه θ ترجیحاً باید کمتر از ۷۵ درجه باشد.

شکل (۱۲-۳) اثر زاویه θ و میزان پایداری در مقابل مقاومت قوس را نشان می‌دهد. نحوه پیاده‌سازی مشخصه رله مهو در بلوک دیاگرام شکل (۱۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۳): مشخصه‌های رله موهو به ازای مقادیر مختلف زاویه θ

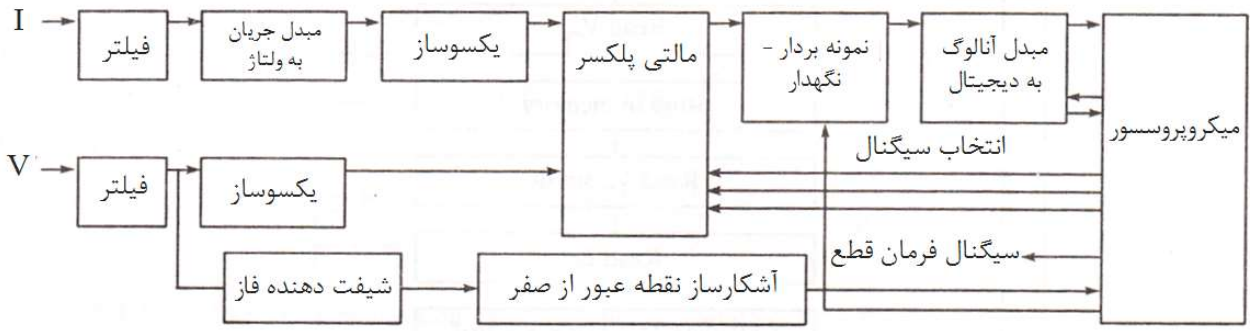
یک جابجاکننده فاز[2] برای تغییر زاویه فاز به مقدار ۹۰ درجه، مورد نیاز است. خروجی جابجاکننده فاز، به مدار تشخیص عبور از صفر اعمال می‌گردد تا به محض تشخیص عبور از صفر، سیگنال پالس خروجی به ریزپردازنده ارسال گردد.

ریزپردازنده خروجی مدار تشخیص عبور از صفر را بررسی کرده و عبور ولتاژ از مقدار حداکثر را تشخیص می‌دهد. هنگامی که ولتاژ از مقدار حداکثر عبور کند، یک سیگنال فرمان برای در مدار قرار دادن یک کانال ورودی به مالتی پلکسر ارسال می شود. بدین ترتیب مقدار لحظه‌ای جریان در زمانی که ولتاژ در مقدار حداکثر قرار دارد بدست می‌آید.

---

[1] . Arc resistance
[2]. Phase Shifter

حال این مقدار لحظه ای جریان به مبدل آنالوگ به دیجیتال ارسال گشته و خروجی آن نیز در حافظه ذخیره خواهد شد. شکل (۱٤-۳) فلوچارت برنامه رله مهو را نمایش می‌دهد.

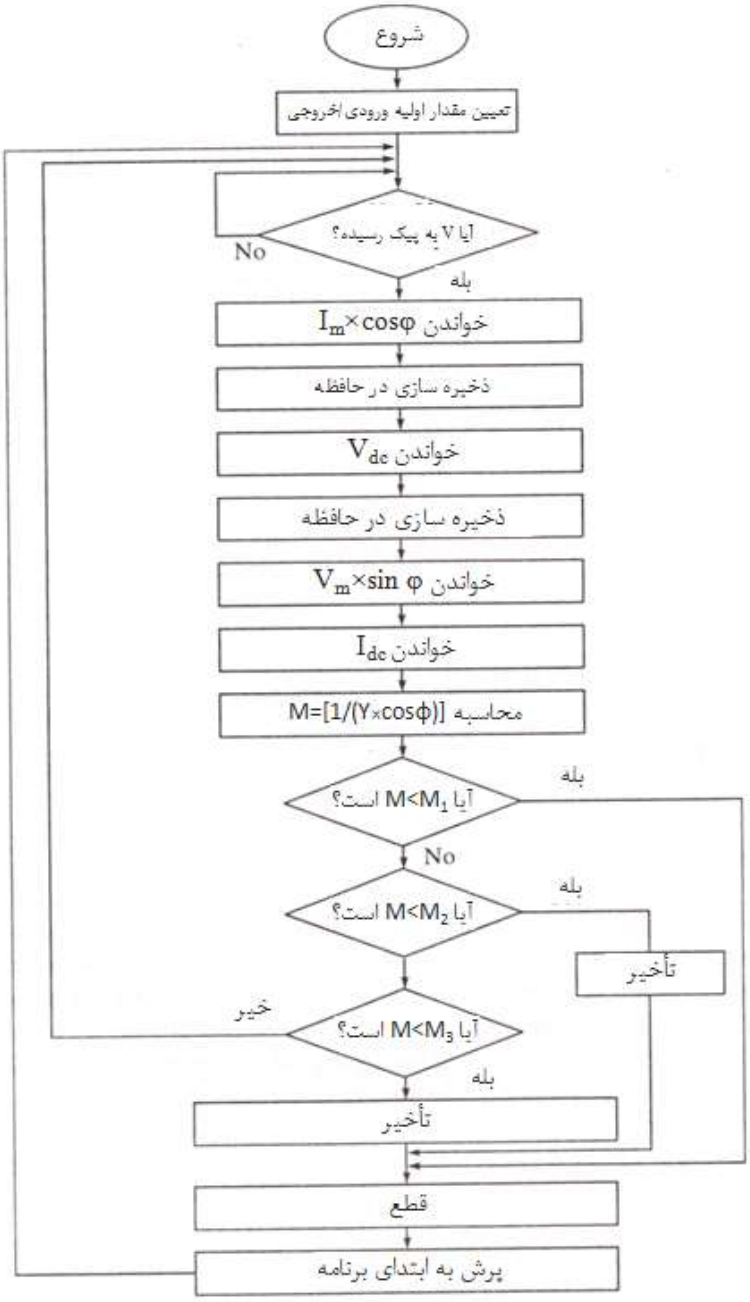


شکل(۱۳-۳): بلوک دیاگرام یک رله موهو بر پایه میکروپروسسور

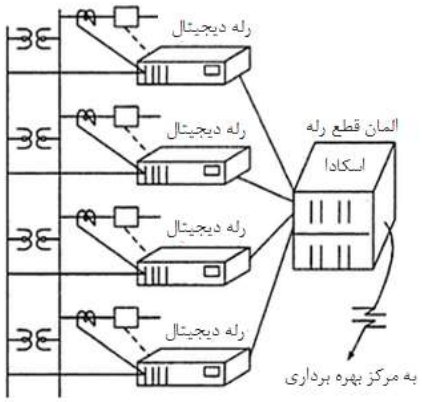
۳-۶- اندازه‌گیری و ارتباط توسط SCADA

برای بهره‌برداری سیستم، اطلاعات زمان واقعی ولتاژ، جریان، توان حقیقی و راکتیو مورد نیاز است. بیشتر مراکز بهره‌برداری و دیسپاچینگ به این اطلاعات و نیز اطلاعات محل خطا نیاز دارند. ظهور رله‌های دیجیتال با قابلیت تعیین محل خطا، دستیابی به این اطلاعات را امکان پذیر ساخته است.

بیشتر واحدهای قطع رله‌های مدرن امروزی بر اساس اصول دیجیتال عمل می‌کنند که امکان دستیابی مستقیم به داده‌های دیجیتال را فراهم می‌کنند. به همین خاطر ارتباط مستقیم بین رله‌های دیجیتال و واحدهای قطع رله امکان‌پذیر می‌شود. به منظور دستیابی به نتایج بهتر و مقرون به صرفه تر و نیز امنیت، دقت و بازده بیشتر، معمولا ذخیره کردن و نگهداری اطلاعات رله‌ها به صورت اطلاعات دیجیتالی توصیه می‌گردد. سایر نیازهایی که بوسیله داده‌های دیجیتال برآورده می‌شوند به المان‌های رله، پیشینه حوادث، اطلاعات وقفه‌های مدارشکن، تنظیمات رله و وضعیت تست خودی رله وابسته است.



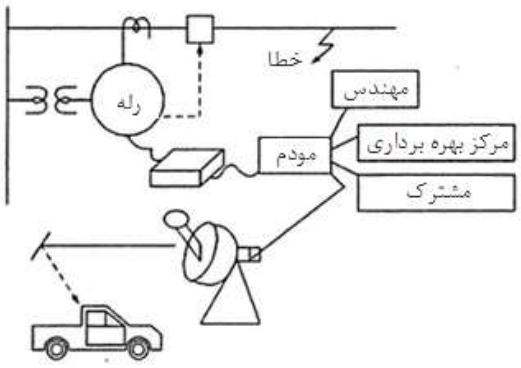
شکل (۱٤-۳): فلوچارت برنامه یک رله موهو



شکل (۱۵-۳): واسط ارتباطی بین رله‌های دیجیتال و واحد قطع با ورودی‌های متعدد

شکل (۱۵-۳) واسط ارتباطی بین رله‌های دیجیتال و یک واحد قطع با چندین ورودی را نشان می‌دهد. تعیین محل وقوع خطا در فیدرهای توزیع با دقت محدودی امکان‌پذیر است. اما اطلاعات محل وقوع خطا برای تعیین بخشی از خط که خطا در آن رخ داده است و ارسال سریع تیم تعمیرات مفید می‌باشد.

یک خط توزیع ایده‌آل، یک خط هوایی است که می‌توان فرض کرد در تمام طول خود از یک نوع هادی با قطر یکسان استفاده کرده است. این خط توسط سیگنال‌های ناخواسته از طریق بانک ترانسفورماتور زمین شده، خازن ها، ژنراتورها و یا دیگر منابع تغذیه نمی‌شود. شکل (۱۶-۳) نشان می‌دهد که چگونه مهندسین، بهره‌برداران و نیز مشترکین می‌توانند از راه دور و توسط مودم به رله دسترسی داشته باشند. سیستم SCADA با جزئیات بیشتر در فصل ۱۲ (رله‌های شبکه) شرح داده شده است.



شکل (۱۶-۳): دسترسی از راه دور به یک رله به منظور تبادل داده

۳-۷- نحوه تست رله

تست رله به دو نوع تقسیم می‌شود:

- تست حین نصب
- تست های دوره ای

تست‌های حین نصب به منظور اطمینان از صحت تنظیمات رله انجام می‌شود که به نوبه خود حصول اطمینان از درستی طرح حفاظتی برای کاربرد موردنظر را در بر خواهد داشت. در یک طرح حفاظتی که به وسیله رله های الکترومکانیکی طراحی شده است، لازم است که هر رله بطور جداگانه تست شده و کالیبره گردد. مراحلی که برای انجام تست رله باید دنبال شود به شرح زیر است:

۱. هر رله باید به تجهیز تست متصل گردد.
۲. تنظیمات متفاوتی باید صورت پذیرد.
۳. هررله باید همانطور که در ابتدا تست شده است در فواصل زمانی مشخص مورد تست قرار گیرد.

به هر جهت، فرآیند کالیبراسیون، فرآیندی بسیار زمان‌بر می‌باشد.

مرحله بعدی تست کردن رله شامل "تست قطع[1]" بوده که برای اطمینان از صحت سیم‌بندی‌ها و مدارات قطع می‌باشد. از آنجا که چندین تجهیز به صورت مجزا در این طرح حفاظتی استفاده شده‌اند، این نوع تست واقعاً زمان‌بر خواهد بود به خصوص زمانی که بر اثر طراحی اشتباه و یا خطا در سیم‌بندی ، پیدا کردن خطا واقعاً مشکل‌زا بوده و ممکن است رفع آن ساعت‌ها به طول انجامد. طرح حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری عمل می‌کند که تست و تعیین محل خطا در این طرح حفاظتی را تسهیل می‌کند.

تست‌های زمان نصب برای طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده باید طوری طراحی شوند که از صحت تنظیمات وارد شده اطمینان حاصل شود. تحریک رله در نقاط بحرانی نیز باید تست شود. استفاده از یک فرمان نرم‌افزاری به منظور بستن خروجی رله ساده‌تر از اتصال منابع تست ولتاژ و جریان به رله به منظور شبیه سازی خطا و تست عملکرد رله می‌باشد. پس از اینکه رله به طور کامل مورد تست قرار گرفت، نرم افزاری که مشخصه عملکردی رله را تعریف

[1] . Trip-check

می‌کند باید مورد تأیید قرار گیرد. بنابراین، اگر رله‌ها از یک نوع و مدل بوده و مشخصه کاملا یکسانی داشته باشند لازم نیست که هر کدام از رله ها به طور کامل و با تمام جزییات تست شوند.

تست های دوره ای برای این صورت می پذیرد که از عملکرد صحیح رله مطابق با مشخصات زمان نصب اطمینان حاصل شود. تست های دوره ای برای رله های الکترومکانیکی در بازه های یک تا سه ساله انجام می پذیرد و ماهیت این تست ها کم و بیش مشابه تست‌های زمان نصب است. تست‌های دوره‌ای به منظور اطمینان از اینکه تمامی اجزای داخلی رله در محدوده دقت مشخص شده عمل می‌کنند، انجام می‌شوند. همچنین این تست‌ها به منظور حصول اطمینان از عملکرد صحیح اتصالات و مدارات خارجی انجام می‌شود.

عملکرد صحیح رله این مفهوم را می‌رساند که الگوریتم تعریف شده برای آن نیز به درستی عمل می‌کند. تست‌های دوره‌ای در حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده شامل بررسی عملکرد سیستم جمع‌آوری اطلاعات به همراه ورودی‌ها و خروجی‌ها مطابق با مشخصات فنی زمان نصب می‌باشد. اگر بخش "تست خودی[1]" رله نشان دهد که رله جریان‌ها و ولتاژهای آنالوگ را به طور صحیح و درست اندازه‌گیری می‌کند، بدین معناست که رله صحیح عمل می کند. تست‌های دیگری نیز برای بررسی کنتاکت های خروجی و ورودی های منطقی مورد نیاز است.

۸-۳- کابرد رله های مبتنی بر ریزپردازنده

حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده دارای مزایایی است که در رله‌های الکترومکانیکی قابل دست یافتن نیست. ویژگی‌هایی چون تعیین محل خطا، اندازه‌گیری پیشرفته، قابلیت‌های کنترلی و گزارش حوادث از جمله ویژگی‌های حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده است. علاوه بر این، برای هر نوع سیستم حفاظتی که قبلاً توسط رله های الکترومکانیکی حفاظت می شد، می توان از رله‌های مبتنی بر ریزپردازنده استفاده کرد.

در زیر کاربردهای حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده آورده شده است:

۱. حفاظت مبتنی بر ریزپردازنده نسبت به حفاظت الکترومکانیکی بسیار مقرون به صرفه‌تر است و این امر باعث می‌گردد که این نوع حفاظت جایگزین بسیار خوبی برای سیستم‌های حفاظتی قدیمی باشد. توانایی تعیین محل خطا، ویژگی منحصر به فردیست که این رله‌ها از آن برخوردار هستند. اطلاعات محل خطا، نه تنها می تواند به کاهش هزینه و زمان گشت‌زنی کمک کند بلکه ارزیابی و تعیین مشکلات شبکه قدرت را نیز تسهیل می‌کند.

[1] . Self-check

۲. مقرون به صرفه بودن این رله ها سبب شده که استفاده از آن‌ها در ساخت پست‌ها و احداث خطوط انتقال جدید توجیه‌پذیر باشد.

۳. در بیشتر موارد، رله‌های مبتنی بر ریزپردازنده تمامی مدارات منطقی مورد نیاز برای برقراری ارتباط در طرح‌های مبتنی بر انتقال داده را دارا هستند، بنابراین به رله های کمکی[1] خارجی نیاز ندارند که این امر به نوبه خود به کاهش هزینه طراحی و هزینه تجهیزات کمک می‌کند.

۴. برای یک رله مبتنی بر ریزپردازنده می توان یک دسته از ضرایب تنظیم، تعریف کرد. این نوع رله ها این امکان را فراهم می‌کنند که تعدادی تنظیمات مستقل برای کاربردهای مختلف به عنوان نمونه برای مدارشکن باس های اصلی[2] ایجاد شود. این عمل معادل اینست که در یک رله، چندین رله وجود دارد.

۵. در این گونه از رله ها که تنظیمات گروهی چندگانه دارند، ممکن است تنظیمات رله از پست مرکزی و بدون اعزام یک تکنیسین و یا اپراتور، عوض شود.

۶. با نصب یک سیستم حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده، کاربردهای گسترده سیستم حفاظتی امکان‌پذیر می‌شود چون این رله‌ها انواع متفاوتی از طرح‌ها، روش‌ها و المان‌های حفاظتی را ارائه می‌دهند و در سطوح ولتاژ متفاوت به کار گرفته می‌شوند.

۷. بیشتر طرح های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده شرایط سیستم را در هنگام عملکرد تجهیزات حفاظتی ذخیره می‌کنند. این اطلاعات ذخیره شده برای بررسی و تحلیل عملکرد سیستم بسیار مفید خواهند بود. همچنین اطلاعات ذخیره سازی شده امکان مرور و تحلیل داده‌ها و اطلاعات حوادث را فراهم می‌کند که خود ابزاری بسیار با ارزش در تعمیر و نگهداری سیستم است. علاوه بر این، آنالیز صورت گرفته بر اساس این اطلاعات ذخیره شده بسیار دقیق تر و مفید تر از پاسخ حاصل از شبیه‌سازی‌ها می باشد چون اطلاعات ذخیره شده توسط رله در حالت عملکرد واقعی سیستم ذخیره شده است.

بنابراین با توجه به مزایا و توانایی‌های رله‌های مبتنی بر ریزپردازنده و نیز ویژگی‌های منحصر به فرد و ابداعات به کار برده شده در آن‌ها، حفاظت توسط این گونه از رله‌ها رواج پیدا کرده است.

---

[1]. Auxiliary Relays
[2]. Bus-tie Breakers

تمرین

۱. مزایای طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده را بیان کنید.
۲. کاربردهای طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده را بیان کنید.
۳. با نمایش اتصال سخت‌افزاری، ارتباط منطقی دیجیتال رله به رله را بیان کنید.
۴. چگونگی پیاده‌سازی یک رله اضافه جریان با استفاده از ریزپردازنده را توضیح دهید.
۵. چگونگی پیاده‌سازی یک رله امپدانسی با استفاده از ریزپردازنده را توضیح دهید.
۶. چگونگی پیاده‌سازی یک رله راکتانسی با استفاده از ریزپردازنده را توضیح دهید.
۷. چگونگی پیاده‌سازی یک رله موهو با استفاده از ریزپردازنده را توضیح دهید.
۸. اندازه‌گیری و ارتباط با استفاده از اسکادا را به طور مختصر توضیح دهید.
۹. امنیت پیام دیجیتال را به طور مختصر توضیح دهید.
۱۰. اهمیت و نیازمندی‌های تست رله مبتنی بر ریزپردازنده را بیان کنید.
۱۱. نحوه ارتباط رله مبتنی بر ریزپردازنده با شبکه را به طور مختصر توضیح دهید.

۴- رله های استاتیکی

۴-۱- معرفی

عملکرد رله که شامل تشخیص خطا و نیز جدا کردن بخش های حادثه دیده از دیگر بخش های سالم سیستم می‌باشد این امکان را فراهم می‌کند که بخش های سالم سیستم با کمترین وقفه در تأمین توان مورد نیاز به عملکرد خود ادامه دهند. رفع سریع خطا شبکه قدرت را قادر می سازد تا توان زیادی را بدون از دست رفتن همزمانی و پایداری سیستم، به مصرف کنندگان انتقال دهند. در حقیقت، تکامل رله‌های استاتیکی با دارا بون ویژگی‌هایی چون رفع سریع خطا، به حداکثر رساندن ظرفیت انتقال خطوط، دقت و قابلیت اطمینان محقق شده است.

در ابتدا، در سال ۱۹٤۰ که نخستین گام‌ها برای توسعه رله‌های استاتیکی برداشته شد، لامپ‌های خلأ[1] مورد استفاده قرار می‌گرفتند. سپس رله‌ها پیشرفت کرده و دیگر با نام رله‌های الکترونیکی شناخته می شدند. پس از اختراع ترانزیستور و سایر تجهیزات الکترونیکی در طی دهه های ۵۰ و ٦۰، این تجهیزات در رله های استاتیکی به خدمت گرفته شدند. رله‌های حالت جامد (استاتیک) تازه توسعه یافته، علاوه بر مزایای رله های الکترونیکی، مزایایی جدید را به همراه داشتند که در ادامه به آنها اشاره می گردد.

مزایای رله های استاتیکی

۱. رله های استاتیکی میزان بار[2] کمتری بر ترانس جریان (CT) و ترانس ولتاژ (PT) اعمال کرده که این کاهش ولت آمپر مصرفی باعث کاهش ابعاد ترانس جریان و ولتاژ شده و کاهش قیمت تجهیزات را نیز در پی دارد.
۲. کمتر بودن ولت آمپر نامی ترانس جریان بدین معناست که در یک جریان یکسان، سطح ولتاژ باید کمتر نگاه داشته شود. بنابراین نیاز است که عملکرد ترانس جریان در بخش پایینی مشخصه‌ی خطی باشد که خود به جلوگیری از اشباع ترانس جریان کمک شایانی کرده و در نتیجه بهبود دقت عملکرد ترانس جریان و ترانس ولتاژ را امکان‌پذیر خواهد کرد.
۳. برخلاف رله های الکترومغناطیسی، رله های استاتیکی بخش متحرک ندارند و این موضوع خود به حذف مشکلاتی چون فرسایش‌تیغه‌ها، لرزش کنتاکت‌ها، لرزش و ضربه، خشکی تیغه‌ها، مقاومت و خم خوردگی فنر و از این دست مسائل منجر می‌شود که به نوبه خود باعث بالاتر رفتن بازده‌ی رله استاتیک خواهد شد.

---

[1] . Thermionic Valve (British)/ Vacuum Tube or Electron Tube (North America)
[2] . Burden

۴. رله‌های استاتیکی به دلیل عدم وجود اصطکاک، گشتاور مؤثر بسیار بالایی دارند که به بهبود پاسخ رله کمک می‌کند.

۵. عدم وجود قطعات متحرک در رله‌های استاتیک، سطح دقت مشخصه را افزایش می‌دهد.

۶. افزایش امکانات رله‌های استاتیکی، سبب افزایش حساسیت آن‌ها شده است.

۷. در دسترس بودن مدارات مجتمع[1] کوچک و کارآمد، کاهش اندازه رله‌های استاتیکی را امکان‌پذیر ساخته است و سبب می‌شود فضای کمتری در تابلوی محل نصب مورد نیاز باشد.

۸. حذف بخش های متحرک، وقوع فرسایش و استهلاک در این رله‌ها را کاهش داده و نیاز به نگهداری رله را پایین می‌آورد.

۹. به خاطر وجود قابلیت‌هایی چون فیلترکردن هارمونیک‌ها، مشتق‌گیری، انتگرال‌گیری و تشخیص مؤلفه توالی فاز منفی ولتاژ و جریان، انعطاف پذیری این رله‌ها بیشتر می‌باشد.

۱۰. رله‌های استاتیکی زمان بازنشانی بسیار کوچکی دارند که عملکرد وصل مجدد[2] مدارشکن را تسهیل می‌کند. این زمان بازنشانی به انتخاب صحیح ناحیه خطا کمک می‌کند.

۱۱. رله‌های استاتیکی نسبت قطع تحریک به تحریک[3] بالا، افزایش برد گذاری[4] پایین و فراجهش[5]کمی دارند.

محدودیت های رله های استاتیکی

۱. گذراهای ولتاژ عمدتاً به واسطه دلایلی از جمله برخورد صاعقه و عملکرد مدارشکن ایجاد می‌شود. وقتی که این امواج ولتاژ بر روی سیگنال‌های خطاهای و یا شرایط عادی ایجاد می‌شود سبب عملکرد نادرست رله‌های استاتیک می‌شود. امواج شدید و یا ضربه‌های ولتاژی ممکن است به اجزای الکترونیکی آسیب برساند.

۲. تجهیزات حالت جامد نظیر رله‌های استاتیکی به شدت از تغییر دمای محیط تاثیر می‌پذیرند.

۳. رله‌های استاتیکی از اجزای متفاوتی از جمله مقاومت‌ها، خازن‌ها، ترانزیستورها و غیره... تشکیل شده‌اند. قابلیت اطمینان کلی رله‌های استاتیکی به قابلیت اطمینان همین اجزا وابسته می‌باشد. از این رو، برای حصول قابلیت اطمینان بالا در رله‌ها، هر کدام از اجزا باید به دقت و با ظرفیت صحیح انتخاب شوند. اتصالات و لحیم‌کاری‌ها نیز باید با دقت و نظارت بالایی صورت پذیرد.

---

1. Integrated Circuits (IC)
2. Reclose
3. drop-off to pick-up ratio
4. Transient over-reach
5. Overshoot

۴. رله‌های استاتیکی برای عملکرد خود نیاز به منبع تغذیه کمکی پشتیبان[1] دارند که این مهم نیز باید تامین گردد.

۲-۴- اجزای رله های استاتیکی

فهرستی از قطعات مورد استفاده در ساخت یک رله استاتیکی در زیر آورده شده است. در این جا فرض بر این است که دانشجو در دروس قبلی خود همچون الکترونیک پایه، الکترونیک آنالوگ، مدار مجتمع، الکترونیک دیجیتال و الکترونیک قدرت، با این قطعات آشنا شده است.

۱- دیود معمولی و دیود زنر
۲- ترانزیستور
۳- تایریستور
۴- یکسوساز
۵- مدار یکسوساز ولتاژ
۶- مدارات هموارکننده[2]
۷- تقویت کننده ترانزیستوری
۸- مدارات فیلترینگ
۹- مدارات منطقی (OR,AND,NOR,…)
۱۰- نوسان‌سازها (تک پایدار[3]، ..)
۱۱- مدارات تفاضلی
۱۲- مدارات مجتمع
۱۳- تقویت کننده‌های عملیاتی
۱۴- آشکارساز سطح
۱۵- مدارات تأخیر زمانی
۱۶- مدارات خروجی
۱۷- مدارات تغذیه کمکی
۱۸- برقگیر
۱۹- مقایسه‌گرها

---
1. Backup
2. Smoother circuit
3. Mono stable

۳-۴- مقایسه گرها

اساس عملکرد رله بر این است که دو پارامتر عملکردی را با یکدیگر مقایسه می‌کند (یکی کمیت عمل کننده و دیگری کمیت بازدارنده است). کمیت‌هایی که باید با یکدیگر مقایسه شوند می توانند دامنه و یا فاز باشند. روابط دامنه و فاز، توابعی از وضعیت سیستم هستند. مقایسه گر، که قلب رله است، مشخصه‌های عملکردی آن را تعیین می‌کند. یک مقایسه‌گر می‌تواند به عنوان وسیله‌ای که این مقایسه‌ها را انجام می‌دهد شناخته شود. مقایسه‌گرها را از حیث عملکرد، می‌توان به دو دسته تقسیم نمود:

- مقایسه گرهای دامنه
- مقایسه گرهای فاز

۱-۳-۴. مقایسه گرهای دامنه

مقایسه‌گر دامنه، اندازه دو کمیت را با یکدیگر مقایسه می کند و این بدین معناست که صرف‌نظر از مقدار فاز، اندازه کمیت عمل کننده و بازدارنده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هنگامیکه اندازه کمیت عمل کننده از اندازه کمیت بازدارنده بیشتر گردد، رله این حالت را تشخیص داده و فرمان قطع را به مدارشکن ارسال می‌کند.

سه نوع مقایسه‌گر دامنه وجود دارد که عبارتند از:

۱- مقایسه گر تجمعی دامنه[۱]
۲- مقایسه گر لحظه‌ای دامنه
۳- مقایسه گر دامنه نمونه‌گیر[۲]

مقایسه‌گر تجمعی دامنه

این گونه از رله ها به دو دسته جریان چرخشی[۳] و ولتاژ مخالف[۴]، تقسیم می‌شوند.

نوع جریان چرخشی به دو روش پیاده‌سازی می‌شود. روش اول به وسیله پل یکسوساز به همراه یک رله‌ی فرعی[۵] و روش دوم به وسیله پل یکسوساز با تجهیزات خروجی استاتیک پیاده‌سازی می‌شود. یک پل یکسوساز به همراه یک

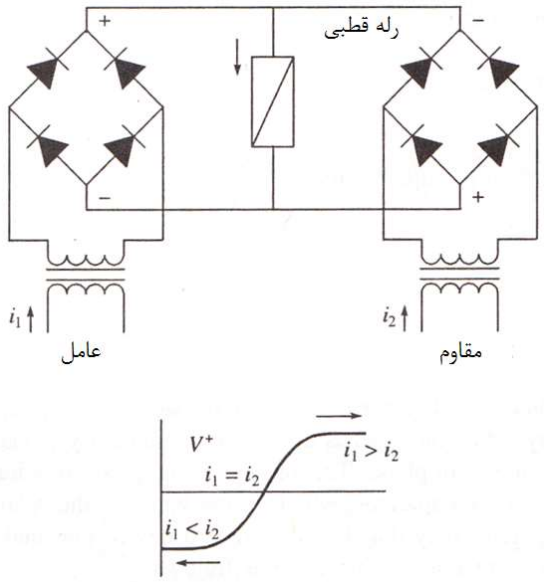
---

[1]. Integrating
[2] . Sampling amplitude comparator
[3]. Circulating current
[4]. Opposed Voltage
[5]. Slave

رله فرعی در شکل (۱-٤) نشان داده شده است. در این رله، سیگنال‌های ورودی شامل سیگنال عمل کننده (عامل) و سیگنال بازدارنده (مقاوم) بوده که به ترتیب عبارت از $S_1=Ki_1$ و $S_2=Ki_2$ می‌باشند. رله هنگامی عملکرد خواهد داشت که شرط $S_1>S_2$ برقرار باشد. بنابراین دو پل یکسوساز تمام موج نیاز خواهد بود، که یکی برای کمیت عمل کننده و دیگری برای کمیت بازدارنده استفاده شود. خروجی این رله‌ها به رله فرعی که یک رله قطبی شده جریان مستقیم است اعمال می‌شود.

یک پل یکسوساز به همراه تجهیزات خروجی الکترونیکی که در آن از رله پلاریزه استفاده نشده است نیز می‌تواند یک مقایسه‌گر تجمعی دامنه را تشکیل دهد. این مقایسه‌گر، از یک مدار به منظور تعیین متوسط اختلاف جریان‌های یکسو شده (i_1-i_2) به همراه یک مدار تشخیص دهنده پلاریته تشکیل شده است که در شکل (۲-٤) نمایش داده شده است. این رله در صورتی که میانگین مقدار خروجی مثبت باشد، عمل خواهد کرد.

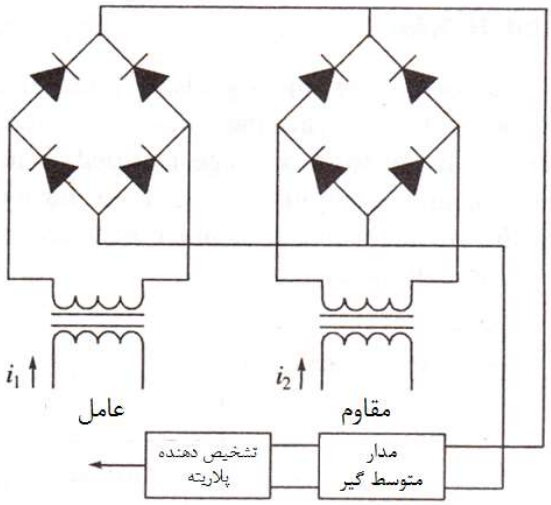
مقایسه گر ولتاژ مخالف نیز بر اساس متوسط‌گیری اختلاف ولتاژهای یکسوشده عمل می‌کند. بلوک دیاگرام این مقایسه‌گر در شکل (۳-٤) نمایش داده شده است. پل یکسوساز در این نوع رله در ورودی‌های پایین و ضعیف از حساسیت بالایی برخوردار نمی‌باشد و هیچ نوع محدودسازی بر روی تجهیزات خروجی ولتاژ و جریان ندارد.



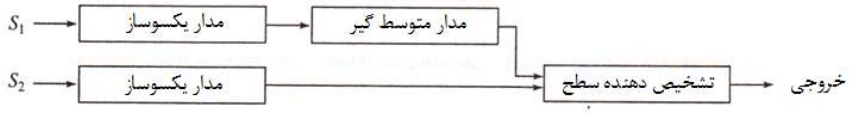
شکل (۱-٤): مقایسه‌گر پل یکسوساز با رله فرعی

مقایسه‌گر لحظه‌ای دامنه

بلوک دیاگرام این نوع مقایسه گر رله در شکل (٤-٤) نمایش داده شده است. اساس این مقایسه گر بسیار شبیه به مدل مقایسه گر ولتاژ مخالف می باشد. مقایسه گر آنی دامنه دارای دو نوع مدل متوسط‌گیر و جداکننده ی فاز می‌باشد.

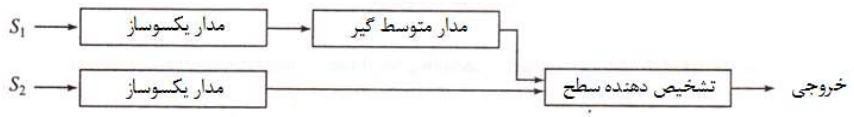


شکل (٢-٤): مقایسه‌گر پل یکسوساز تجمعی



شکل (٣-٤): بلوک دیاگرام مقایسه‌گر ولتاژ مخالف

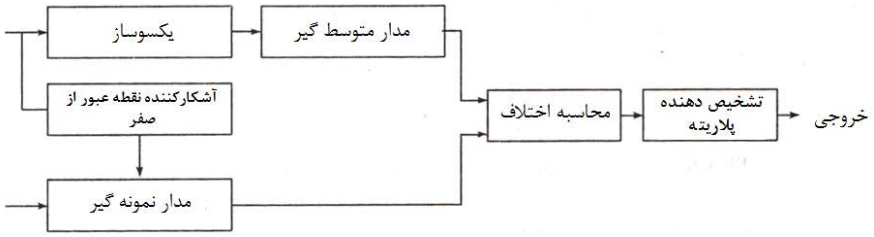
به منظور داشتن یک سطح بازدارنده ثابت، ابتدا سیگنال بازدارنده بوسیله مدار متوسط‌گیر در مقایسه‌گر لحظه‌ای دامنه، یکسو شده و سپس کاملاً بدون نویز و یکنواخت می‌گردد. ولی این سیگنال تا هنگامیکه کاملا یکسو نشده، کاملا یکنواخت نخواهد شد. به منظور رسیدن به شرایط عملیاتی، مقدار پیک سیگنال عمل کننده باید بیشتر از سطح بازدارنده شود. در این گونه از رله ها، هموارسازی سیگنال عموماً به کمک خازن انجام می شود که این امر سبب تأخیر در عملکرد رله می‌گردد. از همین روست که مقایسه‌گر مقسم فازی نسبت به مقایسه‌گر دامنه ارجحیت دارد. در مقایسه گر مقسم فازی، تقسیم فاز قبل از یکسوسازی انجام می‌پذیرد. یک سیگنال خروجی پیوسته از طریق هموارسازی هر دو ورودی عمل کننده و بازدارنده بدست می‌آید. سیگنال‌های عمل کننده و بازدارنده قبل از مقایسه، هموار می‌شوند.



شکل (٤-٤): بلوک دیاگرام مقایسه‌گر لحظه‌ای دامنه

مقایسه گر دامنه نمونه‌گیر

در این مقایسه‌گر، همانطور که از نامش پیداست، سیگنال قبل از اینکه مقایسه گردد در بازه های زمانی ثابت یا متفاوت نمونه برداری می شود. برای نمونه‌گیری از یک سیگنال، سیگنال متناسب با مقدار میانگین یکسو شده با مقدار نمونه‌گیری شده مقایسه می‌شود. بلوک دیاگرام مقایسه‌گر دامنه نمونه‌گیر برای یک رله راکتانسی در شکل (٤-٥) نمایش داده شده است. در این رله، سیگنال ولتاژ در لحظه عبور از صفر جریان، نمونه‌گیری شده و با مقدار متوسط جریان مقایسه می‌گردد.



شکل (٥-٤): بلوک دیاگرام مقایسه‌گر نمونه‌گیر دامنه برای رله راکتانسی

فرض کنید که مقدار لحظه‌ای ولتاژ در هنگامیکه جریان از مقدار صفر خود عبور می کند، $V\sin\Phi$ باشد که Φ زاویه ضریب توان خواهد بود. هنگامیکه راکتانس (X) دیده شده توسط رله از مقدار راکتانس طراحی سیستم (K) کمتر شود، رله راکتانسی عمل خواهد کرد.

۲-۳-۴- مقایسه‌گر فاز

این مقایسه گر در اصل عمل مقایسه فاز بین دو سیگنال ورودی S_1 و S_2 را امکان‌پذیر می‌سازد. هرگاه رابطه ی بین S_1 و S_2 از یک حد مجاز تعریف شده فراتر رود، رله عملکرد خواهد داشت. به عنوان نمونه، اگر θ زاویه بین S_1 و S_2 باشد در حالی که S_1 نسبت به S_2 پسفاز باشد، شرط عملکرد رله به شکل زیر خواهند بود:

$$-\alpha_1 \leq \theta \leq \alpha_2$$

در صورتی که $\alpha_1 = 0$ و $\alpha_2 = 180$ باشد، مقایسه گر از نوع سینوسی خواهد بود و اگر هر دو α_1, α_1 مقدارشان ۹۰ درجه باشد، مقایسه گر از نوع کسینوسی خواهد بود. دو نوع رایج و پرکاربرد مقایسه گر فاز عبارتند از :

- مقایسه گر فازی نوع تطابقی[1]
- مقایسه گر فازی نوع ضرب برداری[2]

مقایسه‌گر نوع تطابقی به روش های زیر ساخته می شود:

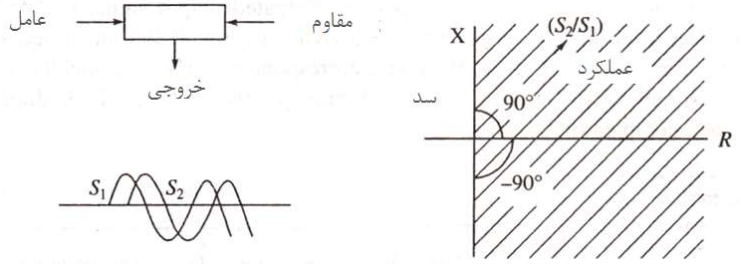
- مقایسه فاز ضربه[3]
- روش تقسیم فاز
- مقایسه فاز تجمعی
- مقایسه فاز با پل یکسوساز

مقایسه فاز ضربه

این مقایسه‌گر نوعی از مقایسه‌گر تطابقی می‌باشد و بر اساس اندازه‌گیری بازه تطابق عمل می‌کند. فرض کنید که α اختلاف فاز بین دو سیگنال بوده و بازه تطابق آن‌ها نیز $\Psi = (180 - \alpha)$ باشد. اگر عملکرد مطلوب برای زاویه α کمتر از ۹۰+ درجه باشد، بازه تطابق از ۹۰ درجه بیشتر خواهد بود. حال با این شرط، زاویه عملکرد برابر است با:

$$-90^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$$

در مقایسه فاز ضربه، یک ورودی به یک ضربه تبدیل شده و ورودی دیگر در لحظه ای که سیگنال از صفر و یا از مقدار ماکزیمم خود عبور می‌کند، به موج مربعی تبدیل می گردد. خروجی مقایسه‌گر فازی در شکل (٦-٤) نمایش داده شده است.



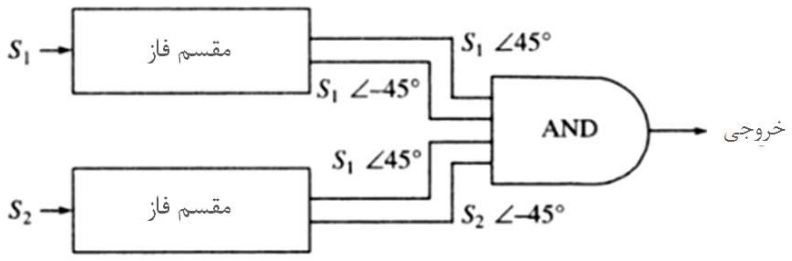
شکل (٦-٤): نمایش خروجی مقایسه‌گر فاز در شرایطی که زاویه عملکرد بین ۹۰- تا ۹۰+ درجه است

[1]. Coincidence type phase comparator
[2]. Vector product type phase comparator
[3]. Block spike phase comparison

به منظور بدست آوردن میزان تطابق، دو سیگنال ضربه و موج مربعی به یک گیت AND اعمال می شوند. در اینجا لازم است که رله در مقابل اثرات تمامی مدارات الکتریکی و مغناطیسی محافظت شده باشد تا از هرگونه تداخل و امواج ضربه ناخواسته ناشی از هر گونه تداخل خارجی و یا فرآیند کلیدزنی مصون باشد.

مقایسه گر شکست فاز

در مقایسه گر شکست فازی، هر دو سیگنال ورودی به دو بخش مجزا تقسیم می گردند. بخش های تقسیم فاز شده به اندازه ٤٥ درجه نسبت به سیگنال اصلی (مرجع) جابجا[1] می شوند. حال، این چهار مؤلفه مطابق شکل (۷-٤) به عنوان ورودی به یک گیت منطقی AND اعمال می گردند. هنگامی که تمام ورودی‌ها به طور همزمان مثبت باشند، گیت منطقی AND خروجی خواهد داشت.



شکل (۷-٤): بلوک دیاگرام مقایسه‌گر شکست فاز

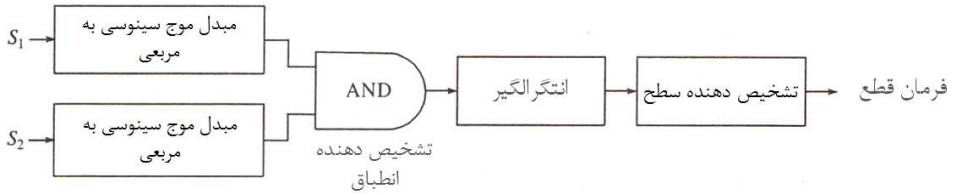
مزیت اصلی این مقایسه‌گر این است که از امواج ضربه ناخواسته ناشی از هر گونه تداخل خارجی و یا فرآیند کلیدزنی اثر نمی‌پذیرد. از آنجا که عمل جابجایی فاز زمان‌بر است، در این نوع مقایسه‌گر اندکی تأخیر بوجود می‌آید که سبب می‌شود از مقایسه‌گر نوع ضربه کندتر باشد. بنابراین گیت منطقی AND برای شرایطی که $-90^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$ باشد خروجی خواهد داشت.

مقایسه گر فاز تجمعی[2]

در مقایسه‌گر فاز تجمعی، اندازه‌گیری بازه تطابق دو سیگنال S_1 و S_2، پس از انتگرال‌گیری از آن‌ها صورت می‌پذیرد. انتگرال این دو سیگنال از طریق اعمال آن‌ها به یک گیت منطقی AND ، که به عنوان واحد آشکارساز تطابق نیز شناخته می‌شود، صورت می‌پذیرد. ابتدا نیاز است که هر دو سیگنال سینوسی به موج مربعی تبدیل گشته و پس از آن به گیت منطقی AND اعمال گردند. خروجی گیت منطقیAND به یک مدار انتگرال‌گیر اعمال می‌شود و سیگنال انتگرال‌گیری شده خروجی توسط آشکارساز سطح تشخیص داده می‌شود. بخش تعیین سطح عمدتاً از یک

[1]. Shift
[2]. Integrated

مدار تریستوری تشکیل می‌شود. حال اگر سطح سیگنال خروجی انتگرال‌گیر از میزان از پیش تعیین شده بالاتر رود، بدین معنی است که دو سیگنال به اندازه مورد نظر با یکدیگر تطابق دارند. بنابراین رله به مدارشکن فرمان قطع ارسال می‌کند. شکل (۸-٤) ساختار یک مقایسه گر فاز تجمعی را نشان می دهد.



شکل (۸-٤): بلوک دیاگرام مقایسه‌گر فاز تجمعی

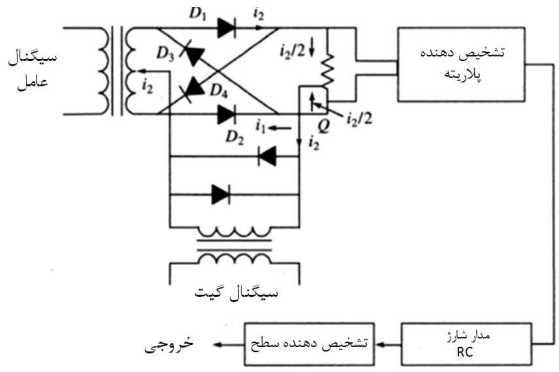
مقایسه گر فاز پل یکسوساز[1]

این دسته از مقایسه‌گرها به طور گسترده در حفاظت دیستانس مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور پیاده‌سازی بهتر مشخصه‌های رله دیستانس، بکارگیری یکسوسازهای دقیق ترجیح داده می‌شود. ساختار مقایسه‌گر فاز پل یکسوساز در شکل (۹-٤) نشان داده شده است. اگر جریان معکوس از جریان مستقیم کمتر باشد، جریان در هر دو مسیر می‌تواند شارش یابد. یک دیود، تا زمانی که توسط یک جریان مستقیم باز نگه داشته شود، نقش گیت را ایفا می‌کند. سطح جریان عمل کننده در حد نصف جریان گیت[2] نگاه داشته می‌شود و در این حالت i_1 سیگنال عمل کننده و i_2 سیگنال گیت است. در نیم سیکل اول، جریان گیت به اندازه $i_2/2$ از دیودهای D_1 و D_2 عبور می کند. این جریان دیودها را روشن کرده و جریان i_1 از دیود D_1 در جهت مستقیم و از دیود D_2 در جهت معکوس عبور می‌کند. افت ولتاژ دو سر پایانه PQ به واسطه عبور جریان i_1 پلاریته مثبت خواهد داشت در حالیکه افت ولتاژ به واسطه عبور جریان گیت به دلیل اینکه جریان در جهت معکوس عبور می‌کند، صفر خواهد بود.

در نیم سیکل بعدی سیگنال گیت از طریق دیودهای D_3 و D_4 جریان می‌یابد. حال جریان i_1 در جهت معکوس عبور می‌کند و باعث ایجاد پلاریته منفی در خروجی PQ خواهد شد. این خروجی سپس به یک آشکارساز پلاریته، مدار شارژ RC و نیز یک آشکارساز سطح اعمال می‌گردد. بدیهی است در بازه‌ای که ورودی‌ها با یکدیگر مطابقت دارند خروجی مثبت بوده و در بازه‌ای که تطابق ندارند خروجی منفی خواهد بود.

---

[1]. Reactifire Bridge Phase Comparator
[2]. Gatting current



شکل (۹-٤): مقایسه‌گر فاز پل یکسوساز

مقایسه‌گرهای فاز ضرب برداری شامل دو نوع می باشند:

۱- مقایسه گر فاز اثر هال

۲- مقایسه گر فاز مقاومت مغناطیسی

مقایسه گر فاز اثر هال[1]

این دسته از مقایسه گرهای فاز، از نوع مقایسه گرهای برداری محسوب شده و بر اساس اصل اثر هال عمل می‌کند. این اثر توسط E.H.Hall کشف گردید و بر طبق آن، اگر جریانی در راستای X از یک المان هال عبور کند بطوریکه میدانی مغناطیسی در راستای Y بر این قطعه اعمال شده باشد، ولتاژی موسوم به ولتاژ هال در راستای محور Z در لبه های این قطعه القاء خواهد شد. رسانای اینیدیوم آرسنید با علامت اختصاری InAs جزء بهترین مواد دارای اثر هال بوده و ماده دیگر نیز اینیدیوم آنتیموناید (InSb) می باشد.

به هر حال، مقایسه گرهای اثر هال به دلیل نقایصی که دارند، با استقبال عمومی مواجه نشدند. در زیر برخی از این نقایص نام برده شده است:

- بالا رفتن خطای اندازه گیری به واسطه بالا رفتن دما
- خروجی ضعیف
- قیمت بسیار بالا این نوع مقایسه‌گر

مقایسه‌گرهای فاز مقاومت مغناطیسی

این نوع از مقایسه گرها نسبت به نوع قبلی، یعنی اثر هال، عملکرد بهتری داشته و بر پایه اثر گوس عمل می‌کنند. بر پایه این اثر، مقاومت نیمه رسانا در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی بر آن تغییر خواهد کرد. در این تجهیز، به منظور

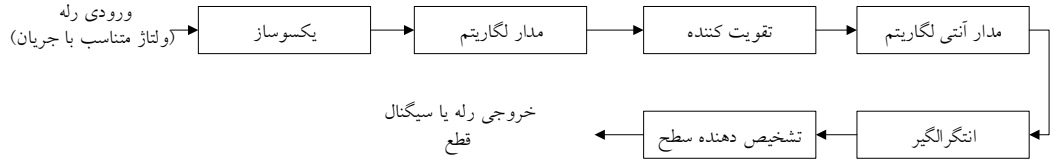
[1]. Hall Effect Phase Comparator

ایجاد یک میدان مغناطیسی، سیگنال ولتاژی مانند V_1 به یک دیسک نیمه رسانا اعمال می‌گردد و سیگنال ولتاژ دیگری مانند V_2 جریانی عمود بر میدان مغناطیسی در دیسک جاری می‌کند. فرض کنید که زاویه بین V_1 و V_2 برابر با φ باشد. در اینصورت، جریانی که در دیسک شارش می‌یابد متناسب با مقدار $V_1V_2cos\varphi$ خواهد بود. این مفهوم برای مقایسه فاز در این نوع مقایسه‌گر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۴- رله های اضافه جریان استاتیکی

رله‌های اضافه جریان معمولاً برای حفاظت قطعات اصلی ماشین آلات در برابر اضافه جریان‌های غیرعادی و ناخواسته مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین به عنوان حفاظت پشتیبان در فیدرها نیز بکار گرفته می‌شوند.

یک رله اضافه جریان استاتیکی بر روی یک جریان مرجع (مقدار از پیش تنظیم شده جریان) تنظیم می‌شود. این جریان در واقع جریان تحریک در ناحیه تحت پوشش رله می‌باشد. باید توجه داشت که رله‌های اضافه جریان استاتیک اصولاً مقایسه‌گرهای تک ورودی و غیر جهتی می باشند. سطح جریان خطا توسط ترانس جریان (CT) کاهش یافته و سپس از یک مدار تحریک[1] عبور می‌کند. اگر مقدار جریان از جریان تنظیم شده برای رله بیشتر گردد، یک پالس ولتاژ تولید شده و به گیت SCR اعمال می‌گردد تا مدار را غیر فعال کرده و یک سیگنال قطع[2] تولید نماید. بلوک دیاگرام یک رله اضافه جریان در شکل (۱۰-٤) نشان داده شده است. در قدم اول، ولتاژ که به طور کلی متناسب با جریان ثانویه ترانس جریان (CT) می باشد توسط پل یکسوساز، یکسو می‌شود. سپس خروجی یکسو شده به یک مدار لگاریتمی اعمال می شود تا مقدار لگاریتمیک آن حاصل گردد.



شکل (۱۰-٤): بلوک دیاگرام رله اضافه جریان استاتیک

در قدم بعدی، سیگنال لگاریتمی تقویت (n برابر) شده و پس از آن از حالت لگاریتمی برگردانده می‌شود. به این روش سیگنال به توان n رسانده می‌شود. سپس یک انتگرال‌گیر از این سیگنال تقویت شده انتگرال می‌گیرد و حاصل

[1]. Triggering Circuit
[2]. Tripping Signal

این سیگنال توسط یک تعیین کننده سطح مورد مقایسه قرار می‌گیرد. هنگامیکه ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر از مقدار از پیش تنظیم شده (مقدار مرجع) فراتر رود، سیگنال قطع در خروجی آشکارساز سطح صادر خواهد شد.

معایب رله های اضافه جریانی استاتیکی

- به دلیل تک ورودی بودن از قابلیت اطمینان پایین تری برخوردار هستند.
- این رله ها غیرجهتی بوده و لازم است که به وسیله یک مدار جهتی تکمیل گردند تا بتوانند نیازهای پیش‌رو را تأمین کنند.
- با تغییر در نوع خطا، ناحیه تحت پوشش توسط رله تغییر می‌یابد که به نوبه خود آشکارسازی سطح خطا را دچار تغییر می‌کند و منجر به اشتباه در صدور فرمان قطع می‌شود.

با توجه به کاستی‌هایی که اشاره شد، رله های اضافه جریان تنها برای حفاظت سیستم ها، فیدرها و خطوط توزیع تا سقف ولتاژ ۳۳ کیلوولت استفاده می شوند.

۴-۵- رله های دیستانس استاتیکی

رله دیستانس استاتیکی مقایسه‌گرهایی با دو ورودی می‌باشند. عملکرد این نوع مقایسه‌گر وابسته به تغییر در نسبت دو کمیت ورودی است. رله های دیستانس به طور گسترده برای حفاظت خطوط انتقال استفاده می شوند. مشخصه آستانه عملکرد یک مقایسه‌گر به کار گرفته شده در رله دیستانس به شکل یک دایره در دستگاه مختصاتی است که محور x و y آن به ترتیب بیانگر مقدار حقیقی و موهومی نسبت دو کمیت ورودی می‌باشد. این دیاگرام دایروی که مشخصه عملکرد رله را نشان می‌دهد تنها در یک سیستم خطی قابل استفاده می‌باشد. دو دسته روابط زیر برای تعیین مشخصه عملکرد این رله مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱- دیاگرام مختلط امپدانسی Z که به عنوان دیاگرام مختلط صفحه β شناخته می شود.

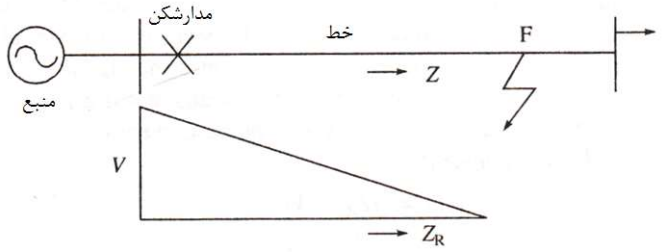
۲- دیاگرام مختلط ادمیتانسی Y که به عنوان دیاگرام مختلط صفحه α شناخته می شود.

۴-۵-۱- رله‌های امپدانسی

رله‌های امپدانسی، امپدانس ابتدای خط تا نقطه خطا را همانطور که در شکل (۱۱-٤) نشان داده شده است اندازه گیری می‌کنند.

$$V=ZI$$

در این رابطه Z امپدانس خط تا نقطه خطای F می‌باشد. خطا از نوع اتصال کوتاه مستقیم و با امپدانس خطای صفر فرض شده است.



شکل (۱۱-٤): نمایش خطا بر روی یک خط

رله امپدانسی بر اساس همان اصول مقایسه‌گر دامنه عمل می‌کند.

فرض کنید:

Z= امپدانس تا نقطه خطا

Z_R= امپدانس تنظیمی رله که یک امپدانس معادل[1] متناسب با امپدانس تنظیمی می‌باشد. (امپدانس خط تا انتهای ناحیه برد رله)

وظیفه این رله پایش مداوم جریان خط (I) و ولتاژ باس (V) به ترتیب از طریق ترانس جریان (CT) و ترانس ولتاژ (PT) می‌باشد. جریان خط از یک مبدل ولتاژ[2] با امپدانسی برابر با Z_R عبور می‌کند. بنابراین تحقق سیگنال IZ_R بوسیله عبور جریان I از یک مبدل ولتاژ که امپدانس آن برابر با Z_R است انجام می‌پذیرد.

در نتیجه هنگامی که رله به عنوان یک مقایسه‌گر دامنه عمل می‌کند، سیگنال عمل کننده رله می‌تواند به صورت زیر نمایش داده شود:

$S_1=IZ_R$

و سیگنال بازدارنده نیز می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$S_2=V=IZ$

با تقسیم دو رابطه بالا بر جریان مشترک I، سیگنال نهایی حاصل به شکل زیر خواهد بود:

$$S_1' = Z_R$$

---

[1]. Replica impedance
[2]. Transactor

$$S_2' = Z$$

محاسبه امپدانس محل رله تا نقطه خطا (Z) و سپس مقایسه آن با مقدار امپدانس تنظیمی رله یعنی مقدار Z_R توسط رله انجام می شود. شرط صدور فرمان قطع نیز می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$Z < Z_R$$

و اگر خطا در انتهای ناحیه تحت پوشش رله رخ دهد، به شکل زیر نمایش داده می شود:

$$Z=Z_R$$

۲-۵-۴- رله های جهتی

اگر سیگنال‌های مورد نیاز مقایسه‌گر دامنه در دسترس باشند، سیگنال‌های لازم برای مقایسه‌گر فاز از حاصل جمع و یا تفریق این سیگنال‌ها بدست خواهند آمد. رله‌های جهتی به منزله دوگانی برای رله امپدانسی هستند. این موضوع بدین معناست که اگر رله امپدانسی یک مقایسه گر دامنه محسوب گردد، رله جهتی را نیز می توان به عنوان یک مقایسه‌گر فاز در نظر گرفت.

بنابراین برای مقایسه‌گر دامنه داریم:

$$S_1 = [IZ_R + V(= IZ)]$$
$$= I[Z_R + Z]$$

یا

$$S_1 \propto [Z_R + Z]$$

و

$$S_2 = [IZ_R - V(= IZ)]$$
$$= I[Z_R - Z]$$

یا

$$S_2 \propto [Z_R - Z]$$

و برای مقایسه‌گر فاز می‌توان نوشت:

$$S_3 = IZ_R$$
$$S_3 \propto Z_R$$

و

$$S_4 = V(=IZ) \propto Z$$

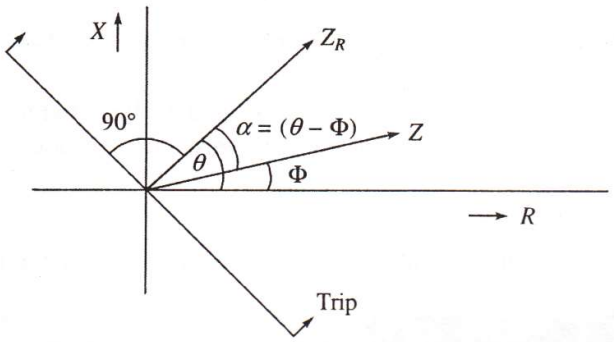
α زاویه فاز بین دو سیگنال S_3 و S_4 است.

رله برای حالتی که زاویه α در محدوده زیر باشد عمل خواهد کرد:

$$-90^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$$

و مرزهای آستانه عملکرد عبارتند از $\alpha=\pm 90$

مشخصه‌های رله توسط خط راستی که از مرکزمحور مختصات عبور می کند نمایش داده می شود. جهت عملکرد رله نیز در شکل نمایش داده شده است:



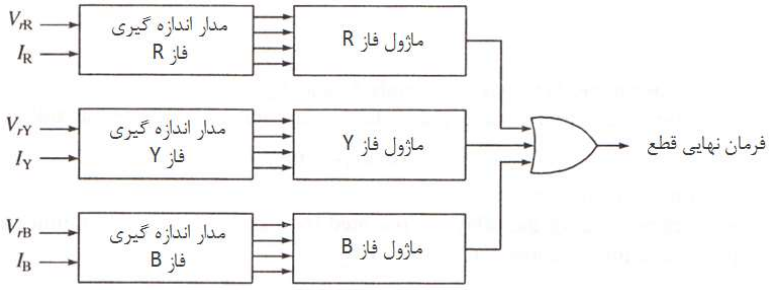
شکل (۱۲-٤): مشخصه‌های رله جهتی

سیگنال های نشان داده شده در بالا در صفحه Z (امپدانس) هستند و سیگنال‌ها در صفحه Y (ادمیتانس) می‌توانند به طور مشابه با تقسیم سیگنال‌های صفحه Z بر Z_R و یا ضرب در Y_R بدست آیند. $\left(Y_R = \frac{1}{Z_R}\right)$

۴-۶- رله های چند فازه استاتیکی

یک رله چند فازه متشکل از حداقل سه رله تک فاز خواهد بود که هر کدام به طور جداگانه برای حفاظت یک فاز مورد استفاده قرار می گیرند. یک رله چند فازه (سه فاز) شامل چند (سه) ماژول برای هر یک از فاز های B,Y و R می باشد. اصولاً ماژول های فازیB,Y و R یک مقایسه گر تک‌فازه می باشند. به منظور اینکه رله بتواند در مقابل انواع مختلف خطا پاسخ دهد، باید سیگنال های ورودی صحیح توسط مدارات اندازه‌گیری مناسب به مقایسه‌گرها اعمال گردند. شکل (۱۳-٤) بلوک دیاگرام این رله را نمایش می‌دهد. خروجی ماژول فازهای B,Y و R به یک گیت منطقی OR اعمال می گردد که سرانجام سیگنال قطع را صادر خواهد کرد.

از آنجا که جریان خطای فازهای I_Y، I_B و I_R متفاوت است، طرح‌های اندازه‌گیری مورد استفاده، در مقابل خطاهای فاز به فاز و فاز به زمین که جریان خطای متفاوت دارند ناحیه درستی را تحت پوشش قرار نمی‌دهند. مدارات اندازه‌گیری تنها در صورتی عملکرد صحیحی خواهند داشت که جریان توالی صفر در نظر گرفته شود. به منظور جبرانسازی این موضوع، باید ولتاژ محل خطا برای ماژول هر فاز تأمین شود.



شکل (۱۳-٤): بلوک دیاگرام رله دیستانس چند فاز (سه فاز)

فرض کنید که ولتاژهای محل خطای جبران شده یعنی V_x ، V_y و V_z با استفاده از ولتاژ فاز به زمین V_{rR} و V_{rY} و V_{rB} بدست آیند. چگونگی محاسبه ولتاژ محل خطای جبران شده به شرح زیر است:

امپدانس خط را با Z_L در نظر بگیرید در اینصورت ولتاژ محل خطا برای خطای فاز R به نوترال با در نظر گرفتن امپدانس خطای صفر برابر است با:

$$V_{fR} = V_{rR} - I_R Z_L$$

با جاگذاری مؤلفه‌های توالی جریان I_R و نیز امپدانس توالی Z_L در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$V_{fR} = V_{rR} - I_{R1}Z_{L1} - I_{R2}Z_{L2} - I_{R0}Z_{L0}$$
$$= V_{rR} - (I_R - KI_{R0})Z_{L1}$$

حال، سه ولتاژ جبرانسازی شده را می‌توان با معادلات زیر بیان نمود:

$$V_x = V_{rR} - (I_R + KI_{R0})Z_R = V_{x1} + V_{x2} + V_{x0}$$
$$V_y = V_{rY} - (I_Y + KI_{R0})Z_R = \alpha^2 V_{x1} + \alpha V_{x2} + V_{x0}$$
$$V_z = V_{rB} - (I_B + KI_{R0})Z_R = \alpha V_{x1} + \alpha^2 V_{x2} + V_{x0}$$

در اینجا، α یک عملگر و $Z_{L1}=Z_R$ امپدانس معادل می‌باشد.

$$V_{x1} = V_{rR} - I_{R1}Z_R$$

$$V_{x2} = V_{rR2} - I_{R2}Z_R$$

$$V_{x3} = V_{rR} - I_{R3}Z_R$$

در این رله‌ها، V_{rR} و V_x– سیگنالهای ارسال شده به ماژول فاز R می باشند. به طور مشابه، V_{rY} و V_Y– سیگنالهای ارسالی به مازول فاز Y و V_{rB} و V_Z– نیز سیگنال‌های ارسالی به ماژول فاز B می باشند. در اصل مشخصه عملکرد رله چند فازه تلفیقی از عملکرد چند رله تک فاز می باشد و مشخصات عملکرد هر رله مشابه عملکرد رله مهو می‌باشد.

با بیان ریاضی داریم:

$S_1=V_{rR}$

و

$$S_2 = -V_x = (I_R - KI_{R0})Z_R - V_{rR}$$

$$\left(\frac{-V_x}{V_{rR}}\right) = \frac{[(I_R + KI_{R0})Z_R - V_{rR}]}{V_{rR}}$$

$$= \frac{Z_R}{V_{rR}/(I_R + KI_{R0})} - 1$$

$$= \frac{Z_R}{Z_L} - 1$$

$V_{fR}=0$ بدین معناست که فاز R اتصال کوتاه شده است. بنابراین

$$\frac{-V_x}{V_{rR}} = \alpha = \frac{[Z_R - Z_L]}{Z_L}$$

شرط صدور فرمان قطع رله به صورت بازه زیر بیان می‌گردد:

$$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

تمرین

۱. رله استاتیک چیست؟ فهرستی از اجزای مورد استفاده در طرح‌های حفاظتی استاتیک تهیه نمایید.

۲. مرز عملکرد مشخصه یک رله استاتیک به چه معناست؟

۳. مزایا و محدودیت‌های رله‌های استاتیکی را بنویسید

۴. انواع مختلف مقایسه‌گر دامنه را تشریح کنید.

۵. انواع مختلف مقایسه‌گر فاز را تشریح کنید.

۶. دوگان رله امپدانسی به چه معناست؟ سیگنال‌های مربوط به این رله را در در حالتی که به عنوان یک مقایسه‌گر دامنه در نظر گرفته شود و نیز در حالتی که به عنوان مقایسه‌گر فاز در نظر گرفته شود استخراج کنید.

۷. به کمک یک بلوک دیاگرام طرح حفاظتی اضافه جریان استاتیک را توضیح دهید.

۸. حفاظت دیستانس استاتیک را توضیح دهید.

۹. طرح رله‌گذاری استاتیک جهتی را به طور مختصر توضیح دهید.

۱۰. مزایای رله‌های چند فازه را بیان کنید. به کمک یک دیاگرام، تئوری و اصول عملکرد یک رله چند فازه را توضیح دهید.

فصل ۵

رله های امواج سیار[1]

۱-۵- مقدمه

در گذشته اصلی‌ترین پارامترهایی که برای اندازه گیری در حفاظت سیستم های قدرت به کار گرفته می شدند، مؤلفه‌های فرکانس قدرت (۵۰ یا ٦۰ هرتز) بودند. در روش‌های حفاظتی متداول ، به منظور جلوگیری از ایجاد تداخل، سیگنال‌های فرکانس بالا فیلتر می‌شدند و برای امر حفاظت استفاده‌ای نداشتند. اما مؤلفه‌های فرکانس بالای موجود در سیگنال‌ها اطلاعات وسیعی از جمله موارد زیر را به همراه دارند:

۱. نوع خطا
۲. محل خطا
۳. جهت خطا
۴. مدت زمان خطا

واضح است که سیگنال‌های گذرای فرکانس بالای ناشی از خطا نسبت به سیگنال‌های فرکانس قدرت، اطلاعات بیشتری را به همراه دارند.

امروزه، نگرانی و دغدغه اصلی مهندسین قدرت حفظ پایداری شبکه های قدرت بسیار بزرگ و تجدید ساختار یافته است. بنابراین به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت، پاکسازی فوق العاده سریع خطا[2]، بسیار ضروری می‌باشد. گسترش مدارشکن‌های فوق العاده سریع همچون مدارشکن های گاز SF6، پاکسازی فوق سریع خطا با بکارگیری مفهوم پدیده موج سیار را امکان‌پذیر کرده است.

سیگنال های گذرا و یا امواج سیار حاصل از خطا، اطلاعات مهم و دست اولی را در رابطه با اغتشاش روی خط فراهم می‌آورند. بنابراین استفاده از امواج سیار برای تشخیص خطا معقول به نظر می‌رسد چون بدون شک سریع‌ترین روش ممکن برای تشخیص خطا می‌باشد. در این نوع از حفاظت، فاصله محل خطا تا محل قرارگیری رله به وسیله ی اندازه گیری و محاسبه زمان حرکت رفت و برگشتی موج سیار بین این دو نقطه صورت می‌پذیرد.

[1]. Travelling Waves Relays
[2]. Ultra High Speed

خطایی که در یک خط ولتاژ بالا و در لحظه‌ای که ولتاژ مخالف صفر است رخ می دهد، موجب تخلیه سریع بار پیش از خطا بر روی خط می‌شود. این تخلیه بار سبب ایجاد یک موج ضربه بر روی خط انتقال می شود.

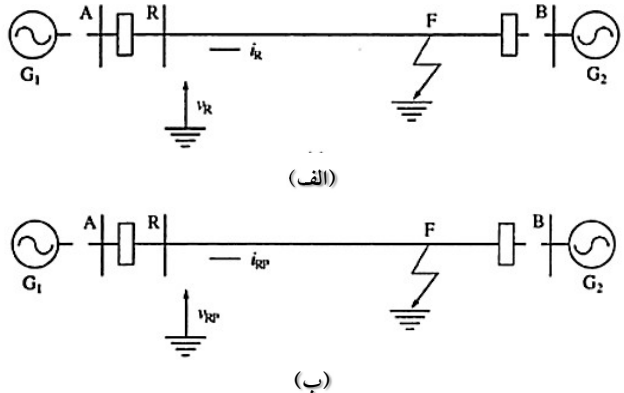
این ضربه به صورت امواجی با سرعت نور در هر دو جهت از محل خطا انتشار یافته و در مسیر خود در امتداد خط منعکس نیز می‌گردد. در حقیقت، این بازتاب هنگامی رخ می دهد که موج با یک ناپیوستگی در امپدانس مواجه شود، برای مثال در دو انتهای خط، نقاط اتصال و یا حتی در نقطه خطا این اتفاق رخ می دهد.

بازتاب مکرر و رفت و برگشت این امواج سیار باعث میرایی جریان‌ها و ولتاژهای گذرای فرکانس بالا می‌شود. هر موج سیار ترکیبی از طیف وسیعی از فرکانس‌ها از چند کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز می باشد. این امواج در پیشانی خود شیب تندی داشته ولی در مقابل در انتهای آن‌ها شیب کندتر بوده و آرام‌تر میرا می‌شوند. امپدانس مشخصه خط نیز به پارامترهای خود خط وابسته است.

حالت های گذرا در خط انتقال فوق فشار قوی (EHV) به دلیل طول زیاد این خطوط و نیز راکتانس خازنی بسیار بالای آنها، بسیار برجسته‌تر و با اهمیت‌تر خواهند بود. از این رو، به کارگیری سیگنال‌های گذرا که با عنوان امواج سیار شناخته می‌شوند، می تواند به شناسایی و تشخیص خطاهای خطوط انتقال کمک کند.

۲-۵- جمع آثار[1] در شبکه حادثه دیده

در شکل (۵-۱ الف)، یک خطای خط به زمین در نقطه F رخ می‌دهد و سیگنال‌های ولتاژ و جریان در محل رله R اندازه‌گیری می شود. وقوع خطای فرضی در نقطه ی F به ترتیب باعث ایجاد ولتاژ و جریان پس از خطای[2] v_R و i_R در محل رله (R) خواهد شد. ولتاژ و جریان پیش از خطای[3] v_{RP} و i_{RP} را نیز در شکل (۵-۱ ب) می‌توان مشاهده کرد.



شکل (۵-۱): نمایش شبکه قبل و بعد از خطا

[1]. Superposition
[2]. Post-Fault
[3]. Pre-Fault

ولتاژ و جریان قبل از خطا نسبت به مقادیر بعد از آن مقداری انحراف خواهند داشت. این انحراف ایجاد شده بواسطه وقوع خطا در مقدار ولتاژ و جریان نسبت به حالت دائم قبل از خطا (v_R و i_R) در محل رله به ترتیب با مقادیر Δv_R و Δi_R نمایش داده می‌شود.

با استفاده از قضیه جمع آثار برای سیگنال پیش از خطا و نیز مقادیر انحراف سیگنال، روابط زیر قابل بیان است:

$$v_R(t) = v_{RP} + \Delta v_R(t) \qquad \text{(i)}$$

$$i_R(t) = i_{RP} + \Delta i_R(t) \qquad \text{(ii)}$$

مقادیر حاصل از جمع آثار نمایش داده شده در معادلات i و ii عموماً جهت تسهیل در ارزیابی الگوریتم‌های حفاظتی امواج سیار استفاده می شوند.

مقدار تغییرات ولتاژ (Δv_R) به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- مقدار دامنه ولتاژ در نقطه خطا در لحظه وقوع خطا

۲- مقاومت خط و منابع

۳- مقاومت خطا

اگر دامنه ولتاژ در لحظه وقوع خطا حداکثر باشد، میزان انحراف ولتاژ (Δv_R) نیز حداکثر خواهد بود. از طرف دیگر، اگر در لحظه ی وقوع خطا ولتاژ صفر باشد، مقدار انحراف ولتاژ (Δv_R) نیز صفر خواهد بود.

دامنه انحراف جریان (Δi_R) بستگی به زاویه شروع خطا[1] دارد که شامل یک مؤلفه کاهشی نمایی می‌باشد تحت عنوان DC offset می‌باشد. این آفست DC هنگامی در مقدار حداکثر خود قرار خواهد داشت که مقدار ولتاژ در لحظه وقوع خطا صفر باشد و زمانی رخ می دهد که دامنه ولتاژ لحظه ای خطا در مقدار حداکثر خود باشد. وجود مقاومت در حلقه خطا، دامنه هر دو مقدار انحراف ولتاژ و جریان Δv_R و Δi_R را کاهش می دهد.

۳-۵- انتشار[2] امواج سیار

اغتشاشات الکتریکی در خطوط منجر به انتشار گذراهای ولتاژ و جریان به شکل امواج سیار می‌گردد. ویژگی‌های امواج سیار ولتاژی و جریانی در طول خط به مشخصه‌های خط بستگی دارد. انعکاس موج نیز هنگامی رخ خواهد داد که این امواج به نقاط ناپیوستگی امپدانس همچون انتهای خط، اتصالات و نیز محل وقوع خطا برسند.

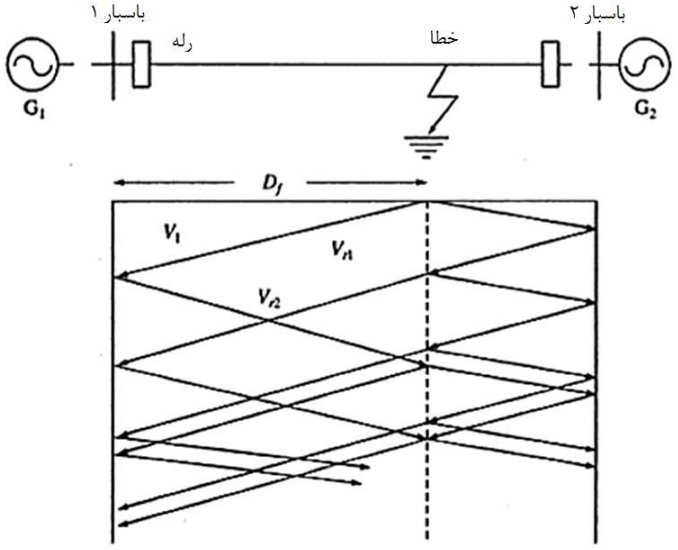
[1] . Fault inception Angle
[2] . Propagate

برای نمایش پدیده امواج سیار از دیاگرام بیولی[1] استفاده می‌شود. دیاگرام بیولی برای یک سیستم قدرت تک فاز در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.

یک خط انتقال بلند، با پارامترهای مدل توزیع شده نمایش داده می‌شود. فرض کنید خطا در فاصله D_f کیلومتر از محل قرارگیری رله رخ دهد. امواج سیار ناشی از وقوع خطا در طول خط به دو طرف منتشر می‌شوند و هنگامی که موج پس رو[2] V_1 به منبع G_1 (ژنراتور شماره ۱) که در پشت رله قرار دارد می رسد، بازتاب رخ می‌دهد. موج بازتابی V_{r1} در امتداد خط به سمت نقطه خطا به حرکت در می آید. اگر در آن نقطه مقاومت خطا صفر نباشد، بخشی از موج عبور کرده و بخش دیگر منعکس خواهد شد. موج بازتابی V_{r2} پس از طی مدت زمانی، به باسبار ۱ باز خواهد گشت.

اگر فاصله زمانی بین لحظه رسیدن موج بازتاب شده V_{r1} و موج پس‌روی V_{r2} مشخص باشد و به عنوان مثال با t_0 نمایش داده شود، فاصله محل رله تا خطا یا همان D_f را می توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$D_f = \frac{Vt_o}{2} \quad (\text{v سرعت نور است})$$



شکل (۲-۵): اصول حفاظت امواج سیار

شناخت سیگنال V_{r2} مشکل اصلی حفاظت با استفاده از امواج سیار می‌باشد. دامنه پیشانی موج منتقل شده و منعکس شده به امپدانس خطا وابسته است. موج منعکس شده به سمت ناحیه R که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است حرکت می‌کند. پیشانی موجی که از نقطه خطای F به سمت باسبار B حرکت می‌کند، منعکس شده و دوباره به نقطه F می‌رسد. بخشی از

[1] . Bewely lattice diagram
[2] . Backward

این پیشانی موج به سمت نقطه R (محل قرارگیری رله) منتقل می‌شود در حالیکه بخش باقیمانده به سمت باسبار B بر می‌گردد. این امواج به همین صورت و به طور مداوم انتشار پیدا کرده و منعکس می‌شوند تا زمانی که میرا شوند.

دامنه و شکل سیگنال‌های ولتاژ و جریان در یک خط انتقال دارای تلفات ممکن است متفاوت باشد. پاسخ عمومی معادله موج می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$v(x,y) = F_1(x-at) - F_2(x+at) \quad (۱)$$

$$i(x,y) = [F_1(x-at) + F_2(x+at)]/Z_0 \quad (۲)$$

در این روابط:

a: سرعت انتشار موج در خط

Z_0: امپدانس موجی خط

انحراف ایجاد شده بواسطه خطا در ولتاژ و جریان را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$\Delta v(x,y) = f_1(x-at) - f_2(x+at) \quad (۳)$$

$$\Delta i(x,y) = [f_1(x-at) + f_2(x+at)]/Z_0 \quad (۴)$$

در این رابطه f_1 و f_2 امواج سیار پسرو و پیشرو[1] می‌باشند. با حل معادلات (۳) و (٤) ، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

$$S_1(t) = \Delta v(x,t) + Z_0 \Delta i(x,t) = 2f_1(x-at) \quad \text{سیگنال پس رو} \quad (۵)$$

$$S_2(t) = \Delta v(x,t) - Z_0 \Delta i(x,t) = -2f_2(x-at) \quad \text{سیگنال پیش رو} \quad (۶)$$

در الگوریتم حفاظتی موج سیار، سیگنال‌های $S_1(t)$ و $S_2(t)$ به ترتیب به عنوان سیگنال های پس‌رو و پیش‌رو استفاده می‌شوند. مفهوم پدیده امواج سیار برای توسعه این سه دسته از رله های امواج سیار به خدمت گرفته شده است:

- رله مقایسه دامنه
- رله مقایسه جهت
- رله مقایسه‌کننده فاز، که امروزه با نام رله های همبستگی[2] شناخته می شوند.

رله‌های اشاره شده در بخش‌های بعدی به طور مفصل شرح داده شده‌اند.

[1]. Forward
[2]. Correlation

۴-۵- رله مقایسه دامنه موج سیار

پس از وقوع خطا، ولتاژ و جریان هر نقطه در شبکه قدرت به صورت حاصل جمع ولتاژ و جریان قبل از خطا و ولتاژ و جریان ناشی از خطا، در نظر گرفته می شود. بخش ناشی از وقوع خطا می تواند به صورت موج سیار در چند میلی ثانیه اول خطا نمایش داده شود. خطاهای داخلی با محاسبه تفاوت بین امواج سیار محلی (در محل رله) و انتهای خط تشخیص داده می‌شوند.

برای تشخیص خطاهای سه فاز نیز سه عدد سیگنال حفاظتی استفاده می‌شود. این سیگنال های حفاظتی در صورتی که خطایی رخ نداده باشد، صفر خواهند بود و اگر خطایی رخ داده باشد، مقدار خواهند داشت. عیب اصلی این روش این است که برای پیاده سازی آن به تبادل اطلاعات بین دو انتهای خط انتقال نیاز است.

خطای پیش‌رو[1]

انتشار و انعکاس پیشانی موج برای یک خطای پیش‌رو در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است. انعکاس در پیشانی امواج در نقاطی که گسستگی امپدانس وجود دارد نظیر نقطه F و باسبارهای A و B، اتفاق خواهد افتاد. به منظور بدست آوردن معادلات ریاضی، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در باس بار R به عنوان مؤلفه‌های افزایشی[2] در نظر گرفته می‌شود که پیشتر در معادلات ۱ و ۲ بیان شده‌اند.

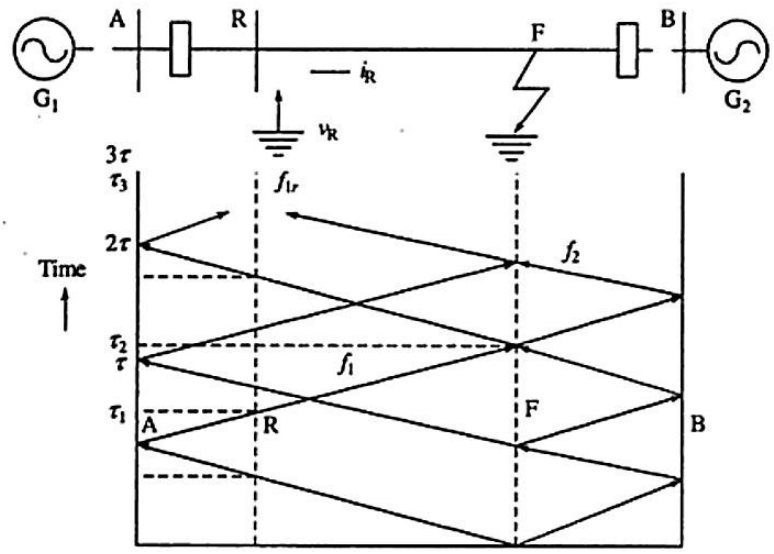
اولین موج سیار پس رو، یعنی f_1، پس از مدت زمان τ_1 بعد از وقوع خطا به نقطه R می رسد و پس از آن در طی مدت τ به باسبار A می‌رسد. این موج f_1 از باسبار A منعکس شده و به سمت نقطه خطا حرکت می کند تا اینکه در زمان τ_2 از نقطه R عبور می کند. پس از اینکه موج سیار پیش رو f_2 در زمان 2τ به نقطه خطای F رسید، بخشی از این موج به مسیر خود به سمت باسبار B ادامه داده و بخشی منعکس می گردد. پس از آن، بخش منعکس شده موج f_2 یعنی f_{2r}، در زمان τ_3 به باسبار R رسیده و در زمان 3τ از باسبار A منعکس می‌گردد.

ولتاژ حالت دائم پیش از خطا را برابر با $V_p = \sin(\omega t + \phi)$ در نظر بگیرید. حال می‌توان خطا را به صورت منبع ولتاژی با اندازه برابر و علامت مخالف در محل خطا توصیف کرد.

انحراف در ولتاژ را می توان با رابطه ی زیر بیان کرد:

$$\Delta v_F(t) = -V_p Sin(\omega t + \phi)$$

[1]. Forward Fault
[2] . Incremental component



شکل (۳-۵): انتشار پیشانی موج و بازتاب آن برای یک خطا در جلوی رله

اگر تغییرات ولتاژ و جریان حاصل از خطا را به ترتیب با Δv_F و Δi_{RF} نمایش دهیم، با تلفیق انحرافات ولتاژ و جریان دیده شده در نقطه R، نتایج به صورت روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$\Delta v_F(t) + Z_0 \Delta i_{RF} = \Delta v_R(t + \tau_1) + Z_0 \Delta i_R(t + \tau_1) \qquad (۷)$$

$$\Delta v_F(t) - Z_0 \Delta i_{RF} = \Delta v_R(t + \tau_1) - Z_0 \Delta i_R(t + \tau_1) \qquad (۸)$$

با توجه به اینکه در لحظه ی τ_1 موج سیار پیش روی f_2 در نقطه رله صفر می‌باشد بنابراین ترکیب روابط (٦) و (٨) امکان‌پذیر می‌باشد و در نتیجه معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\Delta v_R(t + \tau_1) - Z_0 \Delta i_R(t + \tau_1) = 0 \qquad (۹)$$

و

$$\Delta i_{RF} = [\Delta v_F(t)]/Z_0 = [-V_p Sin(\omega t + \phi)]/Z_0$$

با قرار دادن مقادیر بالا در معادله (۷)، رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta v_R(t + \tau_1) + Z_0 \Delta i_R(t + \tau_1) = -2V_p Sin(\omega t + \phi)$$

با استفاده از یک جابجایی زمانی، خواهیم داشت:

$$f_1(t + \tau_1) = -2V_p Sin(\omega t + \phi)$$

$$f_1(t) = -2V_p Sin(\omega t - \omega t_1 + \phi) \qquad (۱۰)$$

در بازه زمانی $\tau_1 < t < (2\tau + \tau_1)$ موج سیار پس روی f_1 از شرایط دو انتهای خط کاملا مستقل است. اگر در یک خط بی اتلاف زمان τ_1 در مقایسه با دوره تناوب سیگنالی با فرکانس 50Hz و 60Hz کوچک باشد، f_1 را می‌توان به طور تقریبی ثابت و برابر با مقداری که در رابطه (۱۱) به آن اشاره شده است در نظر گرفت:

$$f_1(t) = -2V_p Sin(\phi) \qquad (۱۱)$$

شکل موج سیار در یک خط بدون تلفات با امپدانس موج Z_0 با رابطه (۱۱) تعیین می گردد و هنگامی که این موج از یک منبع اندوکتانسی خالص با مقدار Ls انعکاس یابد، رابطه‌ی موج به شکل زیر خواهد بود:

$$f_2(t) = V_p Sin(\phi)[1 - 2e^{-[(t-t_2)/L_s]Z_0}] \qquad (۱۲)$$

معادله (۱۱) برای بازه ی زمانی $\tau_2 < t < (2\tau + \tau_2)$ صادق خواهد بود. یک سیگنال فرکانس پایین انعکاس یافته به صورت نمایی میرا می‌شود در حالیکه سیگنال‌های فرکانس بالا با پیشانی موج تیز به سرعت منعکس می‌گردد.

خطای معکوس[1] (خطا در پشت رله)

در یک خطای معکوس، موج سیار پیش رو که در این جا f_2 نامیده شده است، پس از وقوع خطا ابتدا به محل قرارگیری رله یعنی R می رسد. پس از آن در امتداد خط به مسیر انتشار خود ادامه داده و پس از گذشت از R در باس بار B که در انتهای خط قراردارد بازتاب پیدا می‌کند.

اولین پیشانی موج پیش‌روی (رو به جلو) f_2 از نقطه خطای F شروع به حرکت کرده و در مدت زمان τ_1 به نقطه R می‌رسد. در مدت زمان τ این موج به نقطه B خواهد رسید. پیشانی موج f_2 از نقطه B منعکس شده و سپس به سمت محل رله R حرکت کرده و در زمان τ_2 به آن خواهد رسید .

انتشار موج برای یک خطای معکوس در شکل (٤-٥) نمایش داده شده است. اگر $V_p = \sin(\omega t + \phi)$ به عنوان ولتاژ حالت دائم پیش از خطا در نظر گرفته شود، انحراف ولتاژ ناشی از وقوع خطا که ΔV_F نامیده می شود، به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\Delta V_F(t) = -\mathrm{Sin}(\omega t + \phi)$$

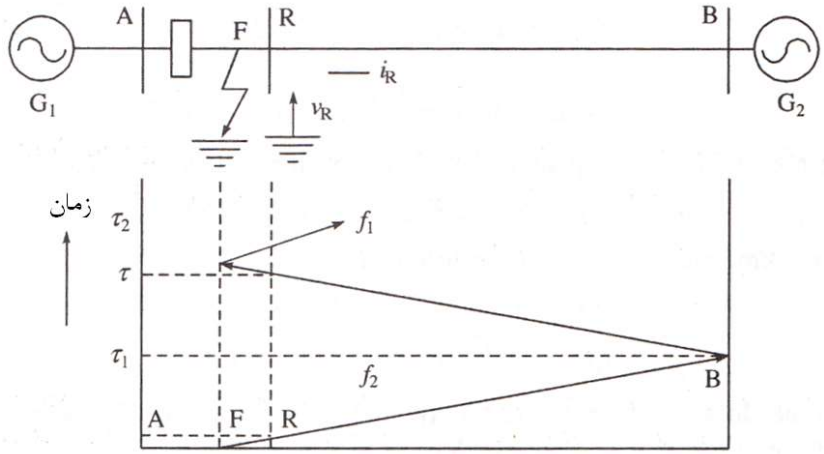
اگر زمان‌های انتشار مطابق شکل (٤-٥) در نظر گرفته شده و زمان وقوع خطا نیز t فرض شود، با تلفیق مقادیر انحراف ولتاژ و جریان دیده شده در محل رله R، روابط زیر بدست خواهد آمد:

$$\Delta v_F(t) + Z_0 \Delta i_{RF} = \Delta v_R(t + \tau_1) + Z_0 \Delta i_R(t + \tau_1) \qquad (۱۳)$$

[1]. Backward Fault

$$\Delta v_F(t) - Z_0 \Delta i_{RF} = \Delta v_R(t+\tau_1) - Z_0 \Delta i_R(t+\tau_1) \qquad (۱۴)$$

در این روابط τ_1 مدت زمان حرکت موج از نقطه F به نقطه R بوده و Δi_{RF} انحراف جریان با احتساب جهت RB به عنوان جهت حرکت مثبت، می باشد.



شکل (٤-٥): انتشار موج در یک خطا پشت رله

به هر حال، در ابتدا موج سیار پس‌روی f_1 در محل قرارگیری رله صفر است. بنابراین، با استفاده از معادلات (۵) و (۱۳) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta v_R(t+\tau_1) + Z_0 \Delta i_R(t+\tau_1) = 0 \qquad (۱۵)$$

با تلفیق رابطه $\Delta V_F(\mathrm{t}) = -\mathrm{Sin}\,(\omega t + \phi)$ با رابطه (۱۵)، رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta i_{RF} = -\{\Delta v_F(t)/Z_0\} = V_p Sin(\omega t + \phi)/Z_0 \qquad (۱۶)$$

حال با حل معادلات (١٤) و (١٦)، رابطه زیر را داریم:

$$\Delta v_R(t+\tau_1) - Z_0 \Delta i_R(t+\tau_1) = -2V_p Sin(\omega t + \phi) \qquad (۱۷)$$

و با توجه به تعریف جابجایی زمانی که در معادله (٦) صورت گرفت، داریم:

$$f_2(t) = -2V_p Sin(\omega t - \omega\tau_1 + \phi) \qquad (۱۸)$$

بازه زمانی معادله بالا $\tau_1 < t < (2\tau + \tau_1)$ خواهد بود.

اساسا موج سیار پیش روی f_2 از شرایط دو انتهای خط مستقل می‌باشد. در شرایطی که τ_1 در مقایسه با دوره تناوب فرکانس قدرت (۵۰ یا ۶۰ هرتز) بسیار کوچک باشد، مقدار f_2 در معادله ۱۸ را می‌توان برای بازه زمانی $\tau < t < (2\tau + \tau_1)$ به صورت تقریبی مطابق زیر در نظر گرفت:

$$f_2(t) \approx -2V_p \mathrm{Sin}\,(\phi)$$

۵-۵- رله امواج سیار با مقایسه گر فازی

این گونه از رله‌ها میزان همبستگی[1] موج سیار پیش‌رو و پس‌رو در محل قرارگیری رله را اندازه‌گیری می کنند. همبستگی معیاری از رابطه خطی بین دو متغیر بوده و بر روی مقادیر تصادفی و توابع قطعی قابل اعمال می‌باشد. این روش هم برای سیگنال های آنالوگ و هم برای سیگنال های دیجیتال قابل اجرا بوده و به طور گسترده برای تشخیص سیگنال‌های نویز نیز به کار برده می‌شود. مقادیر نمونه‌گیری شده از سیگنال برای تعیین همبستگی در حوزه دیجیتال استفاده می‌شوند. تابع همبستگی متقابل برای مقایسه رابطه بین دو سیگنال جابجا شده زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع همبستگی متقابل دو سیگنال $x(k)$ و $y(k)$ با رابطه زیر بیان می‌گردد:

(۱۹)

$$R_{xy}(t) = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{K=1}^{N} x(k\Delta t).\, y(k\Delta t + \tau)$$

تابع کوواریانس متقابل سیگنال‌های $x(k)$ و $y(k)$ که مقدار میانگین از آن‌ها کم شده است به شکل زیر خواهد بود:

$$\phi_{xy}(t) = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{K=1}^{N}[x(k\Delta t) - \bar{x}].\,[y(k\Delta t + \tau) - \bar{y}(t)] \qquad (۲۰)$$

که در آن:

$$\bar{x} = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} x(n\Delta t)$$

$$\bar{y}(\tau) = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} y(n\Delta t + \tau)$$

تابع کوواریانس متقابل φ_{s2s1} برای یافتن تشابه بین سیگنال‌های حفاظتی پس‌رو و پیش‌رو S_1 و S_2 به طور موثری قابل استفاده می‌باشد. این امر به حذف مقادیر متوسط به منظور جلوگیری از پیچیدگی در همبستگی متقابل بین دو سیگنال، کمک

[1]. Correlation

خواهد کرد. رابطه تابع کوواریانس متقابل گسسته بین سیگنال ذخیره شده S_2 و سیگنال انعکاس یافته S_1 با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\phi_{S_2S_1}(t) = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} -[\bar{S_2}(k\Delta t) - \bar{S_2}].[S_1(k\Delta t + \tau) - \bar{S_1}(t)] \qquad (۲۱)$$

در این رابطه برای S_1 و S_2 داریم:

$$\bar{S_2} = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} S_2(n\Delta t)$$

$$\bar{S_1}(\tau) = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} S_1(n\Delta t + \tau)$$

در این رابطه $\bar{S}_1$ و $\bar{S}_2$ به ترتیب مقادیر متوسط سیگنال‌های $\bar{S_1}$ و $\bar{S_2}$ در بین نمونه‌ها می‌باشد. در این رابطه τ جابجایی زمانی متناظر با مقدار پیک φ_{s2s1} بوده و عموماً برای تخمین میزان فاصله‌ی خطا تا محل رله استفاده می‌گردد.

۶-۵- رله امواج سیار با مقایسه گر جهتی

در این شیوه، به منظور گسترش رله مقایسه دامنه، تصمیم گیری حفاظتی بر اساس دو سیگنال که عبارت از سیگنال های پیش‌رو و پس‌رو موج سیار هستند، صورت می پذیرد. این دو سیگنال را می‌توان چنانکه در روابط زیر آورده شده است در نظر گرفت:

$$D_1 = |a(t)| - |b(t)|$$

$$D_2 = \left|\frac{da(t)}{dt}\right| - \left|\frac{db(t)}{dt}\right|$$

سیگنال D_2 به تعیین احتمال وقوع خطا در نزدیکی صفر ولتاژ کمک می‌کند. برای خطای پیش‌رو، D_1 و D_2 نمی‌توانند به طور همزمان منفی باشند. به طور مشابه در یک خطای معکوس، D_1 و D_2 نباید به طور همزمان مثبت باشند. اطلاعات کیفی در رابطه با جهت خطا با استفاده از کانال ارتباطی موج حامل فرکانس بالا مبادله می‌شود. هنگامیکه رله مقایسه گر جهتی با رله دیستانس ترکیب می گردد، می تواند به عنوان حفاظت باس دور[1] و نیز حفاظت پشتیبان استفاده شود. حفاظت باس دور با بکارگیری توابع چندگانه امکان عملکرد بهتر را بواسطه پوشش متقابل دو رله انتهای خط فراهم می‌آورد.

[1]. Remote

۷-۵- محل خطا

در یک سیستم قدرت که تحت شرایط عملکرد عادی و حالت دائم قرار دارد، مؤلفه‌های افزایشی سیگنال‌های ولتاژ و جریان در خلال تخمین توابع امواج سیار S_1 و S_2، به طور ایده‌آل برابر صفر خواهند بود. در هنگام بروز یک خطا، مقادیر دامنه ولتاژ و جریان نسبت به مقادیر حالت دائم خود انحراف قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت. تغییر در ترتیب غیر صفر شدن سیگنال‌های S_1 و یا S_2، به جهت خطا و محل قرارگیری رله بستگی دارد. جهت خطا با بررسی اینکه کدامیک از مقادیر S_1 و یا S_2 زودتر از دیگری از مقدار تنظیمی از پیش تعیین شده خود بیشتر گردد، قابل تخمین خواهد بود. برای مثال، اگر سیگنال S_2 قبل از S_1 از مقدار آستانه تنظیمی بیشتر گردد، می توان گفت که خطا در جهت پس‌رو (پشت رله) اتفاق افتاده است در غیر این صورت خطا در جهت پیش‌رو (جلوی رله) رخ داده است.

زاویه شروع خطا φ نقش مهمی را در این فرآیند ایفا می کند چون توابع امواج سیار پیش‌رو و پس‌رو، یعنی S_1 و S_2، به زاویه φ وابسته می‌باشند. در موارد خیلی خاص که خطا در نزدیکی صفر ولتاژ اتفاق می افتد، زاویه شروع خطا نیز به صفر نزدیک خواهد بود. در این حالت، سیگنال‌های S_1 و S_2 اندازه کوچکی دارند و تشخیص خطا با استفاده از این سیگنال‌ها به تنهایی مشکل خواهد بود. در این گونه موارد استفاده از یک روش که مستقل از شروع خطا φ باشد توصیه می‌شود چون می‌تواند تشخیص شرایط خطا و قابلیت اطمینان را بهبود دهد. به منظور بهبود قابلیت اطمینان در تشخیص خطا، تابع تفکیک‌کننده[1] که مستقل از زاویه شروع خطا φ می باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً بکارگیری توابع امواج سیار و تغییرات آن ها تخمین توابع تفکیک‌کننده را امکان‌پذیر می‌سازد. توابع تفکیک‌کننده پیش‌رو و پس‌رو که به ترتیب با D_F و D_B نشان داده شده‌اند با استفاده از روابط زیر بدست می آیند:

$$D_B = (\Delta v_R + Z_0 \Delta i_R)^2 + (1/\omega^2)[d(\Delta v_R + Z_0 \Delta i_R)/dt]^2$$

و

$$D_F = (\Delta v_R - Z_0 \Delta i_R)^2 + (1/\omega^2)[d(\Delta v_R - Z_0 \Delta i_R)/dt]^2$$

توابع تفکیک‌کننده D_F و D_B در یک خط سالم برابر صفر بوده و در هنگام شروع خطا مقدار بسیار بالایی را از خود نشان می دهند. اگر D_F قبل از D_B از مقدار تعیین شده بیشتر گردد، خطا از نوع پس‌رو و اگر برعکس این قضیه رخ دهد خطا پیش‌رو در نظر گرفته می‌شود. خوشبختانه این توابع ذاتاً قطعیت بالایی دارند.

برای تعیین محل خطا، تعیین اینکه اغتشاش در داخل محدوده حفاظتی و یا خارج از آن رخ داده است، ضروری می‌باشد. به دلیل سادگی پیاده‌سازی الگوریتم همبستگی، تابع همبستگی متقابل به طور گسترده برای تخمین فاصله رله تا محل خطا به

[1]. Discriminant

کار گرفته می شود. امواج ناشی از خطا، در هر دو جهت بر روی خط انتقال انتشار می‌یابند. اولین پیشانی موج f_1 در زمان τ_1 به محل رله R [به شکل (۳-۵) رجوع شود] می رسند.

هنگامی که مقدار سیگنال S_2 در لحظه τ_1 کوچک باشد، خطا در جلوی رله تشخیص داده خواهد شد. هنگامیکه سیگنال S_2 در زمان τ_2 از یک مقدار از پیش تعیین شده بیشتر باشد، پیشانی موج پیش‌رو در نقطه رله R تشخیص داده خواهند شد. پس از تشخیص خطای پیش‌رو، رله شروع به ذخیره سازی سیگنال موج سیار پیش روی S_2 خواهد کرد. سیگنال پیشانی موج S_2 را می توان در یک پنجره متشکل از N نمونه، ذخیره کرد. زمان ذخیره سازی مقداری ثابت است به طوری که سیگنال ذخیره شده شامل اطلاعات پیش از خطا و پس از خطا باشد.

پیشانی موج f_2 در نقطه خطا منعکس شده و بخشی از آن در زمان τ_3 به محل رله باز می‌گردد. تشخیص موج منعکس شده با تطبیق سیگنال پس‌روی S_1 با سیگنال ذخیره شده S_2 صورت می پذیرد. این عمل با مقایسه‌ی همبستگی متقابل سیگنال ذخیره شده و بازگشتی انجام می‌گیرد.

لحظه‌ای که همبستگی متقابل دو سیگنال به مقدار حداکثر خود می‌رسد معادل زمان τ_3 است که موج بازگشتی S_1 و سیگنال ذخیره شده‌ی S_2 بر هم منطبق می‌شوند.

فاصله‌ی خطا تا محل رله نیز با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$x_f = \frac{a(t_3 + t_2)}{2}$$

در این جا، a سرعت انتشار امواج در طول خط است و پر واضح است که اگر x_f از طول خط کمتر باشد بدین معناست که خطا در محدوده حفاظتی رله رخ داده است.

۸-۵- امواج سیار در سیستم های سه فاز

به دلیل تزویج متقابل بین دو رسانا در یک خط انتقال سه فاز، اگر خطایی در یکی از رساناها (فازها) رخ دهد، جریان‌های گذرایی بر روی دیگر فازهای سالم القاء خواهد شد. امواج القاء شده بر روی فازهای سالم بین دو انتهای خط سالم حرکت کرده و با امواج روی خط فاز حادثه دیده اثر متقابل خواهند داشت. بنابراین هر سه فاز تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. در نتیجه مجموعه معادلاتی که انتشار موج در هر فاز را بیان می‌کنند به دلیل اثر تزویج متقابل به یکدیگر مرتبط خواهند شد و برای حل آن باید از تئوری مدهای طبیعی استفاده نمود. براساس این تئوری، یک خط سه فاز تزویج شده به سه مد مستقل انتشار یا سه خط تک فاز تبدیل می شود. حال به منظور تحلیل خطا در یک سیستم سه فاز، تئوری موج سیار که بر روی

مدار تک فاز قابل اجرا می‌باشد، به طور جداگانه بر روی مدهای مستقل اعمال می‌شود. روشی که از طریق آن یک سیستم سه فاز می‌تواند به سه سیستم تکفاز و یا سه مد مستقل از هم تبدیل شود در ادامه توضیح داده شده است.

یک خط متشکل از n رسانا بوده و زمین نیز n مد برای انتشار دارد. هر مد در هر فرکانس یک رابطه ولتاژ–جریان، سرعت و ثابت تضعیف مخصوص به خود دارد. روش تبدیل مودال[1] می‌تواند برای تبدیل سیستمی شامل n خط وابسته به یکدیگر به n مد مستقل از هم استفاده شود. معادلات زیر رابطه‌ی بین فازها و مقادیر مودال را نمایش می دهد.

$$[v(t)] = [S]\left[v^{(m)}(t)\right] \quad (۲۲)$$

$$[i(t)] = [Q]\left[i^{(m)}(t)\right] \quad (۲۳)$$

رابطه معکوس نیز به وسیله معادلات زیر قابل توصیف است:

$$\left[v^{(m)}(t)\right] = [S]^{-1}[v(t)] \quad (۲۴)$$

$$\left[i^{(m)}(t)\right] = [Q]^{-1}[i(t)] \quad (۲۵)$$

که در این جا $\left[v^{(m)}(t)\right]$ و $\left[i^{(m)}(t)\right]$ به ترتیب ماتریس‌های ولتاژ و جریان مودال می باشند. [S] و [Q] نیز به ترتیب ماتریس های تبدیل مودال ولتاژ و جریان هستند.

ماتریس های تبدیل مودال [S] و [Q] به نحوی انتخاب می‌شوند که جداسازی مدهای انتشار مستقل را تسهیل کنند. تبدیل‌های کلارک[2]، ودپول[3] و کارن‌باور[4] سه ماتریس تبدیل ثابت هستند که برای یک خط کاملاً جایگشت شده[5] استفاده شوند. جزئیات این سه ماتریس تبدیل به شکل زیر است:

- ✓ **تبدیل کلارک**

$$Q = S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3/2} \\ 1 & 1/2 & -\sqrt{3/2} \end{bmatrix}$$

$$Q^{-1} = S^{-1} = \left(1/3\right)\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \\ 1 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

[1]. Modal Transformation
[2]. Clarke
[3]. Wedepohl
[4]. Karrenbauer
[5] . Transposed

✓ **تبدیل ودپول**

$$Q = S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q^{-1} = S^{-1} = (1/3)\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix}$$

✓ **تبدیل کارن باور**

$$Q = S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

$$Q^{-1} = S^{-1} = (1/3)\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

به هر حال، عملکرد روش تابع همبستگی به مقاومت خطا، پیکره‌بندی سیستم و نوع مد بستگی دارد. مقادیر مودال ارزیابی شده به دو حالت خواهند بود: حالت ۱ که مد زمین می باشد و حالت های ۲ و۳ که مدهای هوایی[1]می باشند.

این دو حالت در زیر شرح داده شده است:

✓ **حالت ۱ : حالت زمین**

مد زمین، مؤلفه‌های توالی صفر ولتاژ و جریان را در بر می‌گیرد. این مد وابسته به فرکانس بوده و سرعت و میزان تضعیف آن نیز متأثر از مقدار مقاومت زمین می‌باشد. در فرکانس‌های پایین سرعت به طور تقریبی در حدود 75% سرعت نور خواهد بود.

✓ **حالت ۲ و ۳: حالت های هوایی**

در این حالت تلاش برای حذف جریان سه فاز می باشد و بنابراین اثر مقاومت زمین در این مد بسیار کم می‌باشد. از این رو، مد هوایی را می‌توان مستقل از فرکانس دانست و سرعت امواج در این حالت نزدیک به سرعت نور می‌باشد. مد زمین نسبت به مدهای هوایی سرعت کمتر و تضعیف و اعوجاج بیشتری دارد. سرعت و تضعیف مدهای هوایی برای یک سیستم سه فاز تک مداره کاملاً جایگشت شده یکسان می‌باشد.

[1]. Aerial Mode

تمرین

۶- توضیح دهید که چگونه جمع آثار در یک شبکه شامل خطا برای طرح حفاظتی موج سیار مفید است.

۷- چگونگی انتشار موج سیار در یک شبکه قدرت را توضیح دهید

۸- طرح‌های حفاظتی مختلف مبتنی بر موج سیار کدامند؟ هر یک را توضیح دهید.

۹- یک رله مقایسه دامنه موج سیار چگونه خطای جلو و پشت رله با را تشخیص می‌دهد؟

۱۰- روش همبستگی چیست؟ این روش چگونه به حفاظت مقایسه فاز موج سیار کمک می‌کند؟

۱۱- رله مقایسه جهت موج سیار را به طور مختصر توضیح دهید

۱۲- تعیین محل خطا با استفاده از امواج سیار را توضیح دهید

۱۳- نحوه اثرگذاری تزویج متقابل در سیستم سه فاز بر عملکرد رله‌های مبتنی بر امواج سیار را توضیح دهید.

فصل ششم

۶-۱- مقدمه

پایلوت[1] به معنی وجود کانال و یا سیم ارتباطی، جریان حامل[2] و یا ریزموج[3] به منظور ارسال و دریافت اطلاعات بین دو انتهای سیستم (خط) انتقال می‌باشد. طرح حفاظتی پایلوت بهترین انتخاب برای هر نوع خطا در هر نقطه از خط توزیع و یا انتقال می‌باشد. این طرح حفاظتی امکان وصل مجدد خودکار با سرعت بسیار بالا را فراهم می‌کند. انواع مختلف طرح حفاظتی پایلوت شامل موارد زیر است:

- حفاظت پایلوت سیمی
- حفاظت پایلوت جریان حامل
- حفاظت پایلوت ریزموج

علاوه بر این، روش حفاظت پایلوت جریان حامل و ریزموج می‌توانند به شاخه‌های زیر تقسیم شوند.

- طرح مقایسه فاز
- طرح مقایسه جهتی
- ترکیبی از دو طرح بالا
- طرح‌های قطع از راه دور[4]

۶-۲- نیازمندی‌های حفاظت پایلوت

اصول پایه و تجهیزات اساسی مورد نیاز در حفاظت پایلوت ریزموج و جریان حامل کم و بیش مشابه یکدیگر می‌باشند. در هر کدام از این طرح‌ها، دو اصل مقایسه فاز و مقایسه جهت استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که حفاظت پایلوت از حفاظت دیفرانسیل اقتباس شده است. پیاده‌سازی حفاظت پایلوت نیازمند تجهیزات و اصول رله‌گذاری زیر می‌باشد:

۱- سیم پایلوت، مولد موج حامل، مولد ریزموج

۲- مقایسه فاز

---

[1] . Pilot
[2] . Carrier current
[3] . Microwave
[4] . Remote tripping scheme

۳- مقایسه ترکیبی فاز و جهت

۴- ترانسفورماتورهای جریان

۵- پایانه‌های قفل کننده[1]

۶- تضعیف

۷- قطع سریع و از راه دور[2]

۸- وصل مجدد سریع مدارشکن

۹- نظارت خودکار بر کانال جریان حامل[3]

۱۰- سرعت و حساسیت

۱۱- تشخیص انباشتگی برف و یخ بر روی خط

۱۲- قفل گذرا[4]

در پایلوت سیمی، سیم به طور فیزیکی از یک انتهای خط به انتهای دیگر آن ارتباط دارد. در پایلوت جریان حامل، جریان‌های فرکانس بالا (۲۰ کیلوهرتز تا ۷۰۰ کیلوهرتز) و تحت ولتاژ پایین از طریق هادی خط نیرو منتقل می‌شود. عموماً سیم زمین به عنوان هادی مسیر برگشت عمل می‌کند.

پایلوت ریزموج متشکل از یک سیستم رادیویی با فرکانس بسیار بالا می‌باشد. استفاده از پایلوت ریزموج می‌تواند به ارائه خدمات فراوانی که از لحاظ فنی در پایلوت حامل جریان امکان‌پذیر نیست کمک کند.

۳-۶- حفاظت پایلوت سیمی

سیم پایلوت بکار برده شده برای مقاصد حفاظتی بصورت یک کابل مدفون در خاک و یا زوج سیم هوایی (به غیر از خطوط هوایی قدرت) می‌باشد. این طرح حفاظتی واحد بسیار شبیه به حفاظت دیفرانسیل درصدی که برای حفاظت تجهیزات استفاده می‌شود، می‌باشد. در شرایطی که پایلوت جریان حامل غیراقتصادی به نظر می‌رسد، حفاظت پایلوت سیمی برای حفاظت مدارات ولتاژ پایین و خطوط انتقال ولتاژ بالا ترجیح داده می‌شود.

در شرایطی که تضعیف جریان حامل ناشی از مقاومت سری و خاصیت خازنی توزیع شده کابل قدرت بالا باشد، طرح حفاظتی پایلوت سیمی برای حفاظت مدارات کابلی قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. عموماً حفاظت پایلوت سیمی اقتصادی‌ترین نوع حفاظت سریع برای حفاظت خطوط انتقال کوتاه AC می‌باشد.

---

[1] . Blocking Terminals
[2] . Quick and remote tripping
[3] . Carrier Current Channel
[4] . Transient Blocking

محدودیت‌های فنی استفاده از طرح پایلوت سیمی شامل مقاومت و خاصیت خازنی موازی خط حفاظت شده می‌باشد. معمولاً راکتورهای جبرانساز به منظور جبران خاصیت خازنی خطوط انتقال بلند مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این دلیل، قابلیت اطمینان حفاظت پایلوت سیمی در مقایسه با حفاظت پایلوت جریان حامل، کمتر در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که مدار حفاظت پایلوت سیمی مستعد بروز خرابی می‌باشد، انتخاب این نوع حفاظت باید با دقت زیادی انجام شود.

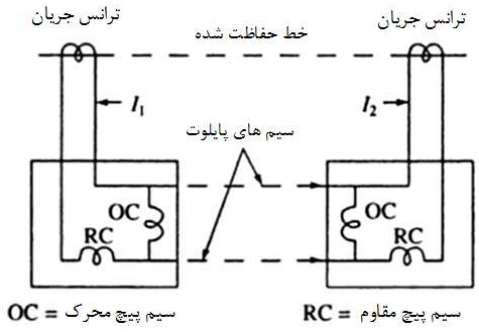
حفظ حساسیت و سرعت مورد نیاز در تجهیزات حفاظت پایلوت سیمی حائز اهمیت می‌باشد. به منظور جلوگیری از اعمال بار[1] اضافی بر روی ترانسفورماتورهای جریان، توصیه می‌شود تجهیز برای به دست آوردن حساسیت بالاتر تنظیم نشود.

برخی اوقات مدار شکن‌ها در جریان بار عادی به طور ناخواسته مدار را قطع می‌کنند که در چنین شرایطی سیم‌های پایلوت مدار باز می‌شوند. با تنظیم سطح تحریک[2] به نحوی که حداقل ۲۵٪ بالاتر از حداکثر جریان بار باشد می‌توان از عملکرد ناخواسته مدارشکن جلوگیری نمود.

در بیشتر طرح‌های حفاظتی پایلوت، روش مقایسه دامنه ترجیح داده می‌شود. مقایسه دامنه برای پیاده‌سازی در خطوط چند پایانه ساده‌تر می‌باشد. دو طرح عملی مورد استفاده در حفاظت پایلوت سیمی عبارتند از:

- ✓ طرح پایلوت سیمی جریان گردشی
- ✓ طرح پایلوت سیمی ولتاژ مخالف

طرح پایلوت سیمی جریان گردشی شبیه به حفاظت دیفرانسیل درصدی است که برای حفاظت تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. آرایش این طرح در شکل (۱-٦) نشان داده شده است.

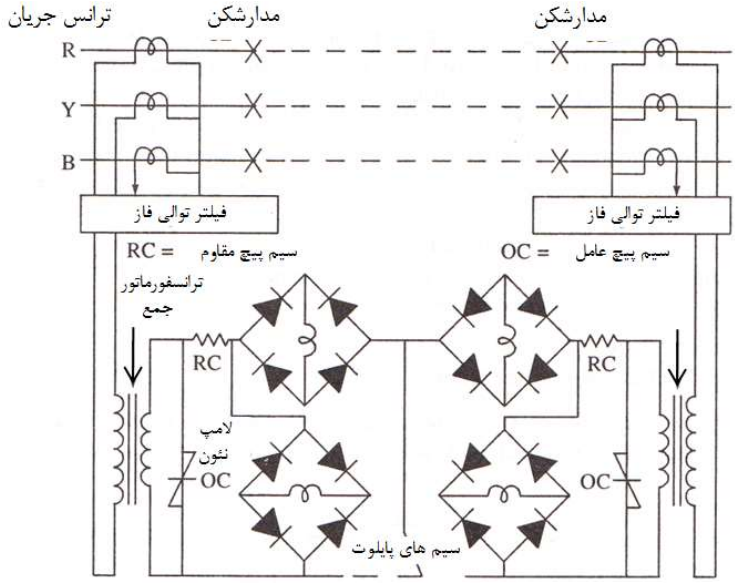


شکل (۱-٦): طرح پایلوت سیمی جریان گردشی

[1] . Burden
[2] . Pick up

در طرح پایلوت سیمی جریان گردشی، دو رله یکسان مجهز به یک سیم‌پیچ عمل‌کننده و یک سیم‌پیچ بازدارنده، در دو انتهای خط قرار می‌گیرند. در شرایط عمکلرد عادی که جریان خطایی وجود ندارد و یا در خطاهای خارجی، جریان‌های خروجی ترانسفورماتورهای جریان مشابه که در دو انتهای خط قرار دارند (I_1 و I_2) با یکدیگر برابر هستند. این جریان‌های برابر از سیم‌پیچ بازدارنده می‌گذرند و هیچ جریانی از سیم‌پیچ عمل‌کننده نمی‌گذرد. اگر بر روی خط خطایی رخ دهد، جریان خروجی ترانسفورماتورهای جریان متفاوت خواهد بود و اختلاف آن‌ها از سیم-پیچ عمل کننده می‌گذرد. این اختلاف جریان، گشتاوری در سیم‌پیچ عمل کننده ایجاد می‌کند. اگر این گشتاور از گشتاور ایجاد شده در سیم‌پیچ بازدارنده بیشتر شود، رله یک فرمان قطع به مدار شکن ارسال می‌کند.

طرح جریان گردشی عمدتاً برای شرایطی که مقاومت حلقه پایلوت کمتر از یک مگا اهم و خاصیت خازنی هسته نیز حداکثر ۲/۵ میکروفاراد باشد مناسب است. طرح عملیاتی مورد استفاده برای این نوع رله در شکل (۲-٦) نشان داده شده است.



شکل (۲-٦): طرح عملی یک رله پایلوت سیمی جریان گردشی

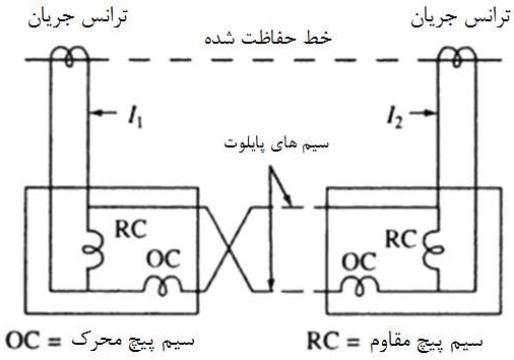
به دلایل اقتصادی، این طرح برای حفاظت خطوط ۱۵ تا ۳۰ کیلومتری مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای حفاظت خطوط بیش از ۳۰ کیلومتر غیراقتصادی می‌باشد. این طرح به دلایل زیر برای حفاظت خطوط AC متداول می‌باشد:

- یک ترانسفورماتور AC می‌تواند دامنه جریان خطای جاری شده در سیم پایلوت را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

- فیلترهای توالی فاز متصل به دو انتهای خط می‌توانند جریان خطای سه فاز یا جریان زمین را به جریان تکفاز تبدیل می‌کنند. این عمل با استفاده از ترانسفورماتورهای ترکیب‌کننده [1] نیز امکان‌پذیر است. بنابراین، برای خطای سه فاز تنها دو سیم پایلوت مورد نیاز است.

سیم‌پیچ‌های بازدارنده و عمل کننده که به ترتیب با نماد RC[2] و OC[3] نشان داده شده‌اند از طریق یکسوسازهای تمام موج تغذیه می‌شوند. به منظور دستیابی به حساسیت بالا، یک رله جهتی DC با مقادیر یکسو شده AC مورد استفاده قرار می‌گیرد. دامنه ولتاژ اعمال شده بر مدار پایلوت توسط ترانسفورماتورهای جمع‌کننده[4] محدود می‌شود.لامپ‌های نئون نیز به منظور محدودسازی حداکثر دامنه ولتاژ ضربه تولید شده بوسیله عملیات کلیدزنی[5] استفاده می‌شوند.

در یک طرح پایلوت سیمی ولتاژ مخالف، امکان گردش جریان از طریق سیم‌های پایلوت وجود ندارد. در این طرح، به دلیل اینکه جریان بار از سیم پایلوت عبور نمی‌کند، اتصال معکوس شده است. از آنجا که سیم‌پیچ عمل کننده سری با سیم پایلوت می‌باشد، هیچ جریانی در شرایط عادی و یا هنگام وقوع خطای خارجی از آن نمی‌گذرد. از طرف دیگر، در یک خطای داخلی پلاریته ترانس جریان (CT) انتهای دیگر خط معکوس می‌شود و جریان خطای مسیری برای جاری شدن در سیم‌های پایلوت پیدا می‌کند. در این شرایط جریان تفاضلی از سیم‌پیچ‌های عمل کننده رله‌ها می‌گذرد و بنابراین رله یک فرمان قطع به مدارشکن می‌فرستد. طرح ولتاژ مخالف در شکل (۳-٦) نشان داده شده است.



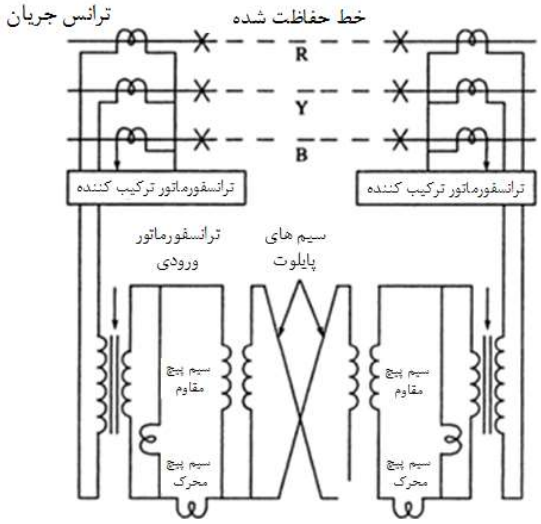
شکل (٦-۳): طرح پایلوت سیمی ولتاژ مخالف

[1] . Mixing transformer
[2] . Restraining coil
[3] . Operating coil
[4] . summation transformer
[5] . Switching

لازم به ذکر است که شرایط اتصال کوتاه و مدار باز اثرات معکوسی بر طرح‌های پایلوت سیمی ولتاژ مخالف و جریان گردشی دارند. اتصال کوتاه در سیم پایلوت در طرح جریان گردشی مانع از صدور فرمان قطع می‌شود در حالیکه در طرح ولتاژ معکوس سبب صدور فرمان قطع می‌شود. در مقابل، شرایط مدار باز به طور عکس اثر می‌گذارد به گونه‌ای که در طرح جریان گردشی سبب صدور فرمان قطع شده و در طرح ولتاژ مخالف مانع از صدور فرمان قطع می‌شود. این طرح برای شرایطی که مقاومت حلقه‌های پایلوت حداکثر ٤٠٠ اهم باشد مناسب می‌باشد. شکل (٤-٦) نحوه اتصال طرح پایلوت ولتاژ مخالف را نشان می‌دهد.

رله استفاده شده در هر یک از دو انتهای خط یک رله جهتی AC می‌باشد. هدف استفاده از ترانس‌های ترکیب‌کننده ایجاد مقادیر تک فاز برای انواع مختلف خطا می‌باشد. محدودیت‌های اصلی حفاظت پایلوت سیمی AC عبارتند از:

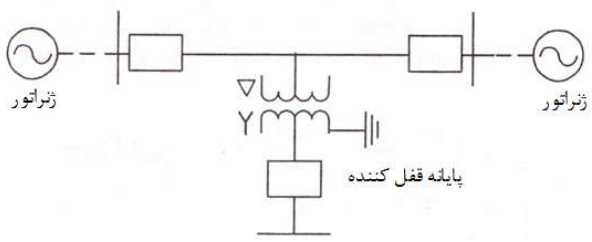
- ✓ اگر خطایی بسیار نزدیک به یک انتهای خط رخ دهد، سبب می‌شود جریان بسیار کمی در انتهای دیگر ایجاد شود و در نتیجه ممکن است که مدارشکن عملکرد نداشته باشد.
- ✓ جریان شارژ سیم‌های پایلوت از حساسیت تجهیزات می‌کاهد.



شکل (٤-٦): حفاظت پایلوت سیمی ولتاژ مخالف

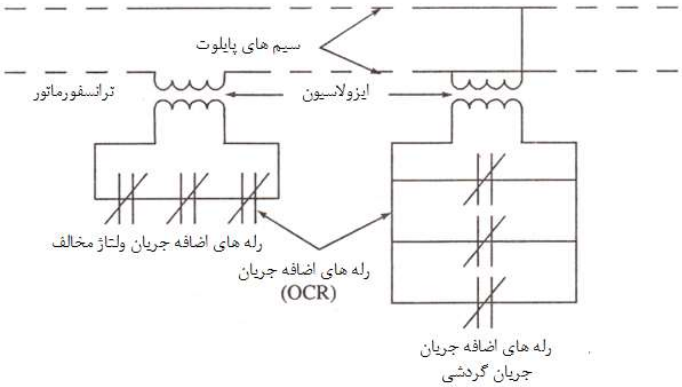
حفاظت خطوط با چند پایانه

اگر بیش از یک واحد تولیدی به خطوط با چند پایانه متصل شود، حساسیت طرح‌های حفاظتی بواسطه پیچیده‌تر شدن شبکه کاهش می‌یابد. هر چند که دستیابی به حفاظت کامل یک فاز در مقابل خطا غیرممکن می‌باشد اما یک خط با چند پایانه که مجهز به حفاظت پایلوت سیمی باشد در مقابل خطاهای زمین به خوبی حفاظت می‌شود. ساده‌ترین حالت یک خط با چند پایانه، یک خط شامل سه پایانه می‌باشد که در شکل (٥-٦) نشان داده شده است.



شکل (٦-٥): نمایش یک پایانه قفل‌کننده

در این سیستم، پایانه‌ای که هیچ منبع تولیدی به آن متصل نیست تحت عنوان پایانه قفل‌کننده[1] شناخته می‌شود. شکل (٦-٦) اتصال یک ترانس ایزوله به رله اضافه جریان در مسیر سیم پایلوت در روش پایانه قفل‌کننده را نشان می‌دهد. به منظور حفاظت سیم‌های پایلوت از شرایط اتصال کوتاه و یا مدار باز، رله‌های اضافه جریان آنی به سمت ولتاژ بالا متصل می‌شوند. این رله‌ها توسط ثانویه ترانس‌های جریان تغذیه می‌شوند. تجهیزات دارای تنظیماتی به منظور جبران نسبت نامی ترانس جریان می‌باشند. نسبت ترانس جریان در پایانه‌های مختلف، می‌تواند متفاوت باشد. اختلاف گذرا و کوتاه مدت در نسبت تبدیل ترانس‌های مختلف می‌تواند عملکرد ناخواسته رله به خصوص در مواجهه با خطاهای خارجی را در پی داشته باشد. به این دلیل است که عمدتاً استفاده از ترانس‌های جریان با نسبت تبدیل یکسان در تمام پایانه‌ها ترجیح داده می‌شود.



شکل (٦-٦): تکنیک پایانه قفل‌کننده

اگر خط انتقال به چند ترانسفورماتور موازی بدون مدار شکن ولتاژ بالا منتهی شود، ترانس جریان نصب شده بر روی بوشینگ سمت فشار قوی تجهیزات حفاظتی را تغذیه می‌کند. به منظور دسترسی به نقطه خنثی، سمت فشار ضعیف ترانسفورماتورهای قدرت عمدتاً به صورت ستاره می‌باشد. بنابراین اگر سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور

[1] . Blocking

برای اتصال ترانس جریان استفاده شود باید از آرایشی استفاده شود که جابجایی فاز ایجاد شده توسط اتصال مثلث- ستاره ترانسفورماتور جبران شده و مؤلفه‌های توالی صفر حذف شود.

به منظور جلوگیری از عملکرد ناخواسته رله هنگام مواجهه با جریان هجومی ناشی از برقدار کردن ترانس و یا در اثر وقوع اغتشاش، تجهیزات حفاظتی اضافی مورد نیاز است.

زمان قطع پایانه‌های اصلی با زمان قطع رله‌های پایانه قفل‌کننده هماهنگ می‌شود. جریان کلی تمام پایانه‌های قفل‌کننده خط باید کمتر از جریان مورد نیاز برای عملکرد رله‌های پایلوت سیمی در یکی از پایانه‌های متصل به منبع باشد البته به شرط آنکه مدار شکن در پایانه دیگری که متصل به منبع است باز باشد.

حفاظت پایلوت سیمی حفاظت پشیبانی را ارائه نمی‌دهد و در صورتی که حفاظت پایلوت سیمی به عنوان طرح حفاظتی اصلی به کار گرفته شود، تجهیزات حفاظتی دیستانس و یا جریان زیاد موجود می‌توانند به عنوان حفاظت پشتیبان استفاده شوند. اگه رله‌های پایلوت سیمی طوری اتصال یابند که تنها جریان خنثی (نوترال) ترانس جریان را دریافت کنند، با این نوع خط چند پایانه می‌توان به عنوان یک خط با دو پایانه رفتار کرد.

۴-۶- رله پایلوت جریان حامل

هنگامی که یک ولتاژ با پلاریته مثبت در مدار کنترل فرستنده به کار گرفته می‌شود، ولتاژ با فرکانس بالا (۵۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز) در خروجی ایجاد می‌شود. سپس این ولتاژ خروجی بین هادی یک فاز از خط انتقال و زمین استفاده می‌شود.

حفاظت پایلوت جریان حامل شایع‌ترین نوع حفاظت برای خطوط ولتاژ بالا می‌باشد. این نوع حفاظت برای خطوط انتقال با ولتاژ بالاتر از ۳۳ کیلوولت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این طرح به دلیل مزایای زیر نسبت به حفاظت پایلوت سیمی ترجیح داده می‌شود:

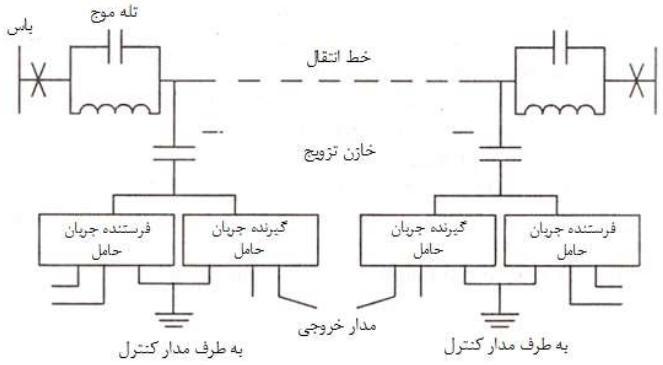
- حفاظت پایلوت جریان حامل تمامی تجهیزات متصل به پایانه‌های خطوط را در بر می‌گیرد.
- این حفاظت کاملا تحت کنترل کاربر می‌باشد
- حفاظت پایلوت جریان حامل امکان استفاده به همراه سایر خدمات نظیر سیستم تلفن اضطراری و قطع از دور را به آسانی فراهم می‌کند.
- در خطوطی که با حفاظت دیستانس حفاظت می‌شوند، مشکل اصلی مربوط به باز شدن غیرهمزمان مدارشکن‌ها در دو انتهای خط می‌باشد. این امر می‌تواند منجر به ایجاد ناپایداری در سراسر شبکه قدرت

شود. طرح حفاظتی پایلوت جریان حامل، عملکرد سریع و همزمان مدارشکن‌های دو انتهای خط را تضمین می‌کند.

- علاوه بر موارد بالا، حفاظت پایلوت جریان حامل ارزان‌تر، با قابلیت اطمینان بالاتر و پرکاردبردتر از سایر انواع حفاظت می‌باشد.

در طرح پایلوت جریان حامل، در هر انتهای خط، یک واحد فرستنده-گیرنده، خازن تزویج و یک تله خط[1] و یا اصطلاحا تله موج وجود دارد. هر گیرنده جریان حامل، جریان حامل ارسالی از فرستنده موجود در انتهای دیگر خط را دریافت می‌کند. سیگنال حامل به وسیله یک فرستنده که شامل یک نوسان‌ساز اصلی و یک واحد تقویت‌کننده توان با خروجی ۱۵ تا ۲۰ وات در محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۵۰۰ هرتز است، تولید می‌شود. گیرنده، جریان حامل دریافتی را به ولتاژ DC تبدیل می‌کند. این ولتاژ می‌تواند در رله و یا هر مدار دیگر به منظور اجرای تابع مورد نظر به کار رود. در غیاب جریان حامل، این ولتاژ DC صفر خواهد بود.

نمایی از یک کانال پایلوت حامل جریان در شکل (۷-٦) نشان داده شده است. تله موج یک مدار تشدید موازی می‌باشد و در مقابل جریان فرکانس قدرت (۵۰ یا ٦۰ هرتز) امپدانس ناچیزی دارد. اما در مقابل جریان فرکانس حامل امپدانس بسیار بالایی دارد.



شکل (٦-۷): طرح پایلوت جریان حامل

فرض کنید که X_c راکتانس خازنی و برابر با $X_C = 1/(2\pi fC)$ باشد. برای فرکانس قدرت (۵۰ هرتز) که در مقایسه با فرکانس حامل بسیار کمتر است، خازن امپدانس بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. در مقابل برای مقادیر بالاتر فرکانس، راکتانس خازنی کمتر بوده که به معنای امپدانس خازنی خیلی پایین در مقابل سیگنال حامل می‌باشد. بنابراین خازن به سیگنال‌های حامل اجازه عبور داده و سیگنال‌های قدرت را سد می‌کند.

[1] . Line Trap

به طور مشابه، راکتانس سلفی را به صورت $X_L = 2\pi fL$ در نظر بگیرید. در فرکانس‌های بالا، راکتانس سلفی بسیار بالا می‌باشد و این امر بدین معناست که سیم‌پیچ سلفی امپدانس بسیار بالایی در مقابل سیگنال حامل از خود نشان می‌دهد. در فرکانس قدرت که در مقابل فرکانس حامل بسیار پایین است، سیم‌پیچ سلفی امپدانس بسیار کمی از خود نشان می‌دهد. در نتیجه این اندوکتانس به سیگنال‌های قدرت اجازه عبور داده ولی سیگنال حامل را سد می‌کند.

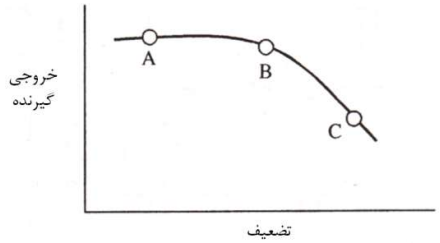
تله موج ترکیبی موازی از خازن و سلف می‌باشد که در فرکانس حامل تنظیم شده و به طور سری در هر انتهای خط متصل شده است. نصب تله موج به محدود کردن سیگنال حامل به ناحیه مختص به خود که همان خط انتقال است کمک می‌کند. همچنین از اثرگذاری اغتشاشاتی نظیر خطا در خارج از ناحیه حفاظت شده بر سیگنال حامل نیز جلوگیری می‌کند. اندوکتانس تله موج در مقیاس چند صد میلی‌هانری است در حالیکه خازن آن در محدوده ۰/۰۰۱ میکرو فاراد می‌باشد.

علاوه بر حفاظت، سیگنال‌های حامل به منظور ایجاد ارتباط نیز به کار برده می‌شوند. در این روش کمترین مقدار فرکانس، به عنوان نمونه ۵۰ هرتز، انتخاب می‌شود چون برای مقادیر کمتر از ۵۰ هرتز هزینه تجهیزات موجود در پایانه‌ها بالا می‌رود در حالیکه برای مقادیر بالاتر از ۵۰۰ کیلوهرتز، تضعیف سیگنال بسیار بالاست.

علاوه بر تجهیزات معمول مربوط به سیگنال حامل، سیستم حفاظت پایلوت جریان حامل مجهز به آشکارساز خطا و یک رله جهتی نیز می‌باشد. هنگامی که حفاظت پایلوت جریان حامل برای اولین بار معرفی شد، قابلیت اطمینان لامپ‌های خلأ مورد استفاده در آن تا حد مورد نیاز بالا نبود. بنابراین نیاز به تجهیزات خودکار به منظور نظارت بر کانال پایلوت احساس می‌شد. اما با گسترش اتوماسیون و کنترل نظارتی، کانال جریان حامل به یک المان بسیار قابل اعتماد در بین تجهیزات حفاظتی تبدیل شد.

هر کاربرد پیشنهادی باید به منظور حصول اطمینان از اینکه تضعیف و تلفات در کانال جریان حامل در محدوده مجاز قرار گیرد مطالعه شود. در مدارکی که تولید کنندگان برای کاربران منتشر می‌کنند این محدوده‌ها به همراه محاسبات تضعیف ناشی از هر یک از المان‌های کانال مشخص شده است. پیاده‌سازی طرح جریان حامل در کابل‌های زیرزمینی به واسطه خاصیت خازنی بالای کابل که منجر به تضعیف قابل توجه سیگنال حامل می‌شود، امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل است که طرح جریان حامل اغلب برای حفاظت خطوط هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان‌های حامل برای تشخیص انباشتگی برف و انباشتگی خاک و نمک بر روی مقره‌های خط و هادی‌های نیرو نیز استفاده می‌شود. روش تشخیص انباشتگی برف بر مبنای این واقعیت است که تضعیف یک خط انتقال با انباشته شدن برف بر روی خط افزایش می‌یابد. شکل (۸-٦) اثر تضعیف بر دامنه خروجی گیرنده جریان

حامل را توصیف می‌کند. نقطه A در شکل (۸-٦) عملکرد عادی را نشان می‌دهد. به منظور اطمینان از ایمن بودن از اثرات نامناسب شرایط جوی نظیر برف و باران، تضعیف نباید به میزان زیادی از مقدار نشان داده شده با B بیشتر شود. برای تشخیص انباشتگی برف، کاربر جریان حاملی که قرار است منتقل شود را در یک انتهای خط تولید می‌کند. با ارسال این جریان، دامنه خروجی گیرنده بواسطه تجمع برف به شدت از نقطه B کاهش می‌یابد. پیش از هر گونه تفسیر اطلاعات بدست آمده از بررسی خروجی گیرنده و میزان تضعیف، نیاز است این اطلاعات با مشاهدات عینی و تجارب موجود انطباق داده شود. روشی مشابه با آنچه برای تشخیص تجمع برف استفاده می‌شود می‌تواند به منظور تشخیص انباشتگی خاک و یا نمک بر روی مقره‌های خط و هادی‌های نیرو به کار گرفته شود.



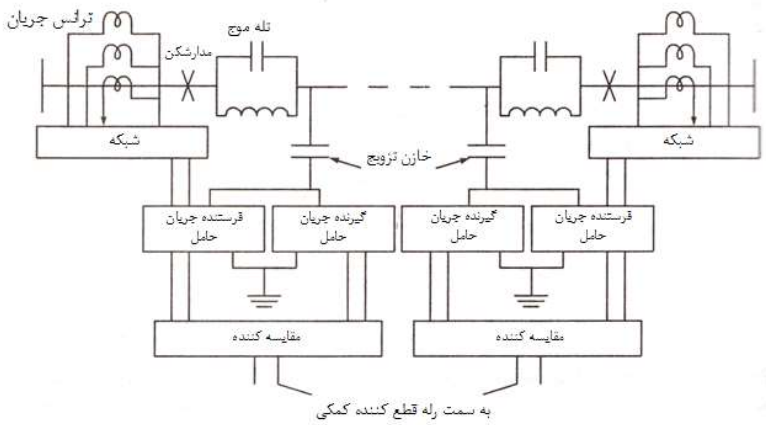
شکل (٦-٨): اثر تضعیف بر قدرت سیگنال دریافتی

سه روش‌زیر می‌تواند برای حفاظت جریان حامل استفاده شود:

- روش مقایسه فاز
- روش مقایسه جهت
- حفاظت جریان حامل بر مبنای مقایسه ترکیبی جهت و فاز

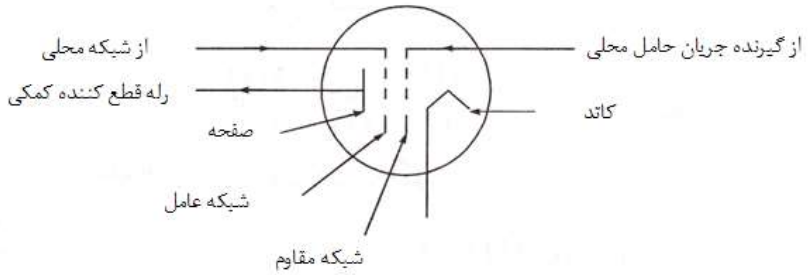
۱-۴-۶- حفاظت جریان حامل مقایسه فاز

در این روش، فاز جریان ورودی به خط با فاز جریان خروجی از انتهای دیگر خط مقایسه می‌شود. دامنه‌های این دو جریان با یکدیگر مقایسه نمی‌شوند. در این روش، ترانس‌های جریان خط انتقال یک شبکه جمع‌کننده را تغذیه می‌کنند که جریان‌های خروجی CT را به ولتاژ سینوسی تکفاز تبدیل می‌کند. این ولتاژ سینوسی به یک فرستنده جریان حامل و یک مقایسه‌گر اعمال می‌شود. خروجی گیرنده جریان حامل نیز به مقایسه‌گر اعمال می‌شود. این مقایسه‌گر عملکرد یک رله کمکی برای قطع مدارشکن خط انتقال را کنترل می‌کند. این تجهیزات امکان ارسال و دریافت سیگنال‌های جریان حامل در هر پایانه خط را فراهم می‌کنند و بدینوسیله می‌توان فاز نسبی جریان‌های ورودی به دو انتهای خط انتقال را مقایسه نمود. نمایی از این طرح در شکل (۹-٦) ارائه شده است.



شکل (۹-٦): نمایی از حفاظت جریان حامل مقایسه فاز

مقایسه‌گر می‌تواند قلب سیستم مقایسه فاز نامیده شود. نمایی از مقایسه‌گر در شکل (۱۰-٦) نشان داده شده است. این شکل یک لامپ خلأ را نشان می‌دهد. لامپ خلأ زمانی هدایت می‌کند که پلاریته مثبت ولتاژ از طریق شبکه محلی[1] به شبکه عامل[2] اعمال شود. در این زمان نباید ولتاژ پلاریته منفی توسط گیرنده جریان حامل به شبکه مقاوم اعمال شود. با هدایت لامپ خلأ، یک رله قطع کننده کمکی تحریک شده و مدار شکن محلی را قطع می‌کند. در هنگام دریافت جریان حامل، اعمال ولتاژ خروجی گیرنده جریان حامل به شبکه مقاوم سبب می‌شود لامپ هدایت نکند صرفنظر از از اینکه شبکه عامل تغذیه شده باشد و یا نشده باشد.

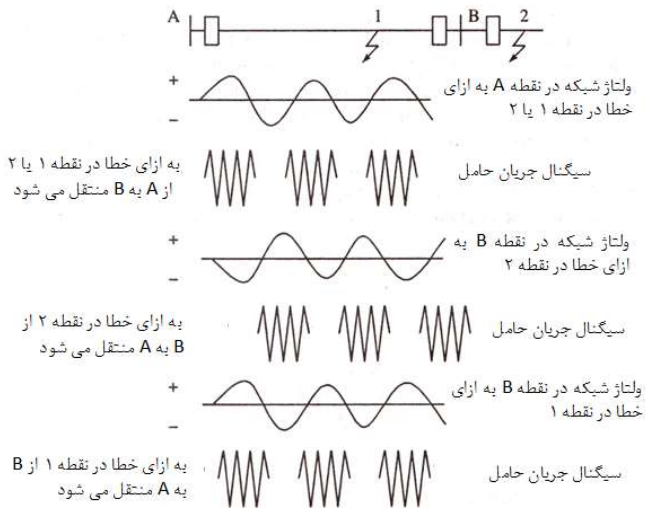


شکل (۱۰-٦): نمایی از یک مقایسه‌گر

شکل (۱۱-٦) به بررسی ارتباط بین ولتاژهای خروجی در دو انتهای خط کمک می‌کند. این شکل سیگنال‌های جریان حامل ارسال شده در شرایط خطای داخلی و خارجی را نیز نشان می‌دهد. اگر خطایی رخ دهد، یک جریان حامل فرکانس بالا تولید شده و از طریق تزریق این حامل به خط نیرو بوسیله خازن تزویج، به انتهای دیگر خط ارسال می‌شود. در این شرایط مسیر برگشت از طریق زمین تشکیل می‌شود. به واسطه وجود تله موج، سیگنال‌های حامل تنها به محدوده مخصوص به خود که همان خط حفاظت شده است محصور می‌شوند. برای یک خطای

[1] . Local network
[2] . Operating grid

خارجی در نقطه ۲، ولتاژهای شبکه در پست‌های ۱ و ۲ با یکدیگر ۱۸۰ درجه اختلاف فاز خواهند داشت. این اختلاف فاز به این دلیل است که ترانس‌های جریان در دو انتهای خط به طور معکوس به یکدیگر متصل شده‌اند. از آنجا که یک ولتاژ AC به منظور کنترل فرستنده استفاده می‌شود، تنها در بازه‌ای که شکل موج ولتاژ مثبت است موج حامل ارسال می‌شود. در نتیجه موج حامل قفل‌کننده عملکرد رله را تنها در حضور یک موج حامل پیوسته سد می‌کند. به این دلیل است که به ازای یک خطا در خارج ناحیه حفاظتی در نقطه ۲، رله فرمان قطع به مدارشکن ارسال نمی‌کند.



شکل (۱۱-٦): رابطه بین ولتاژهای شبکه و سیگنال‌های جریان حامل

به هر حال هنگامی که یک خطای داخلی به عنوان مثال در نقطه ۱ رخ دهد، ولتاژ پست‌های A و B همفاز خواهند بود. از آنجا که این دو ولتاژ همفاز هستند، سیگنال حامل از هر دو انتهای خط در یک بازه زمانی مشترک ارسال می‌شود. بنابراین در نیم سیکل مثبت موج حامل وجود دارد در حالیکه در نیم‌سیکل منفی موج حاملی ارسال نمی‌شود. در شرایطی که سیگنال حامل وجود ندارد، رله عمل می‌کند که صدور فرمان قطع را به همراه دارد. بنابراین همانطور که ملاحظه شد حفاظت پایلوت یک طرح پایلوت قفل‌کننده می‌باشد چون برای صدور فرمان قطع به سیگنال حامل نیازی نیست. در نتیجه خرابی در سیستم پایلوت مانع از صدور فرمان قطع نمی‌شود.

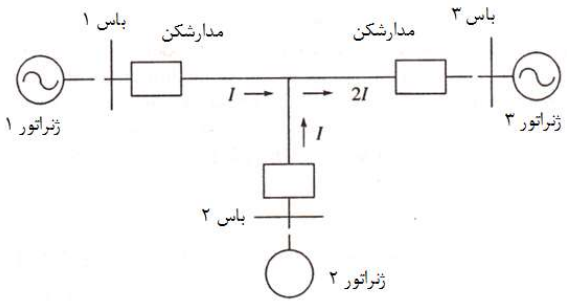
حفاظت مقایسه فاز ذاتاً نسبت به اثرات امواج ضربه ناشی از کلیدزنی[1] و نیز از دست دادن همزمانی بین منابع تولیدی خارج از مرز ناحیه حفاظت شده مصون می‌باشد. علاوه بر این، جریان القا شده بر روی خطوط در اثر التقای متقابل با مدارات جانبی نیز بر عملکرد تجهیزات مقایسه فاز اثرگذار نمی‌باشد. در این طرح، طول ناحیه حفاظت شده بواسطه اختلاف فاز ایجاد شده ناشی از عوامل زیر محدود می‌شود:

[1] . switching surges

- مدت زمان مورد نیاز برای ارسال سیگنال از یک انتهای خط به انتهای دیگر بخش حفاظت شده که تحت عنوان زمان انتشار[1] شناخته می‌شود و عمدتاً برابر با ۰/۰۶ درجه بر کیلومتر در نظر گرفته می‌شود.
- زمان پاسخ‌گویی فیلتر میان‌گذر که حدود ۵ درجه است.
- جابجایی فاز ایجاد شده بواسطه خاصیت خازنی خط انتقال (که حداکثر ۱۰ درجه می‌باشد)

حفاظت خطوط چند پایانه

حساسیت طرح‌های حفاظتی به تعداد پایانه‌های متصل به منبع وابسته می‌باشد. افزایش تعداد پایانه‌های متصل به منبع، حساسیت طرح حفاظتی را کاهش می‌دهد. به عنوان نمونه شکل (۱۲-٦) را در نظر بگیرید که در آن سه پایانه متصل به منبع وجود دارد. لازم به ذکر است که طرح حفاظتی مقایسه فاز یک طرح غیرجهتی می‌باشد. در این طرح، در هر یک از پایانه‌های خط، هر گاه جریان عبوری از مقدار از پیش تعیین شده بیشتر شود فرمان قطع صادر می‌شود مگر اینکه یک سیگنال جریان حامل قفل‌کننده از سایر پایانه‌ها دریافت شود. بدترین حالت شرایطی است که جریان‌های ورودی به باس‌های ۱ و ۲ برابر باشند. در نتیجه، هنگامی که به ازای یک خطای خارجی بعد از پایانه ۳، دامنه جریان خطای ورودی به پایانه‌های ۱ و ۲ مساوی باشند، جریان تحریک آشکارسازهای خطا در پایانه ۳ باید بیشتر از دو برابر جریان حامل قفل‌کننده آشکارسازهای خطا در پایانه‌های ۱ و ۲ باشد.



شکل (۱۲-٦): کاهش حساسیت حفاظت مقایسه فاز در خطوط با چند پایانه

اگر جریان‌های پایانه‌های ۱، ۲ و ۳ برابر نباشند، حساسیت آشکارساز خطا در پایانه ۳ می‌تواند کاهش پیدا کند در غیر اینصورت آشکارساز خطا در پایانه ۳ باید طوری تنظیم شود که سه برابر حداکثر جریان بار باشد.

۲-۴-۶- حفاظت جریان حامل مقایسه‌گر جهتی

رله مقایسه فاز رله‌ای است که گسترده‌ترین کاربرد را دارا می‌باشد. به هر حال این رله در شرایطی که القای متقابل قابل توجهی با خطوط دیگر وجود دارد مناسب نمی‌باشد. همچنین این رله در شرایطی که رله زمین جهتی به جای

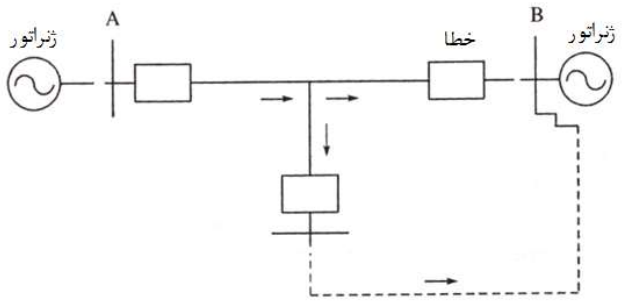
[1] . Propagation time

رله دیستانس زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد قابل استفاده نمی‌باشد. به منظور غلبه بر این مشکلات، روش مقایسه ترکیبی فاز و جهت که در بخش پایانی این فصل تشریح شده است، ترجیح داده می‌شود. طرح‌های حفاظتی مقایسه‌گر جهتی جدید به طور هماهنگ با رله‌های دیستانس به کار برده می‌شوند چون این طرح در کنار رله‌های دیستانس، انتخاب مناسبی برای حفاظت پشتیبان می‌باشد. در این طرح، سیگنال حامل پایلوت به تجهیزات موجود در یک انتهای خط اطلاع می‌دهد که یک واحد جهتی در انتهای دیگر خط چگونه به یک اتصال کوتاه پاسخ داده است. انتقال یک سیگنال پایلوت از پایانه‌ای که جریان اتصال کوتاه از آن خارج می‌شود انجام می‌پذیرد که همان جهتی است که عمل قطع انجام نمی‌شود. در این طرح سیگنال پایلوت یک سیگنال قفل‌کننده است به این خاطر که دریافت یک سیگنال برای صدور فرمان قطع مورد نیاز نمی‌باشد. در این طرح، سیگنال پایلوت، پس از صدور به همان صورت باقی می‌ماند و همانند آنچه در روش حفاظت مقایسه فاز انجام می‌شود به نیم‌سیکل‌های متوالی تبدیل نمی‌شود.

این طرح می‌تواند به یک خط با هر تعداد پایانه اعمال شود. انتخاب نوع تجهیز و نیز تنظیم رله برای قطع کردن و یا قفل‌کردن نیاز به دقت فراوان دارد. در ادامه نمونه‌هایی از شرایطی ارائه شده است که ممکن است قطع سریع و همزمان در همه پایانه‌های خط امکان‌پذیر نباشد.

ممکن است شرایطی پیش آید که در آن جریان خطای داخلی (خطای زمین و یا خطای فاز) که به عنوان مثال از نقطه A (شکل ۱۳-٦) جاری می‌شود بیشتر از جریان قفل‌کننده در آن نقطه باشد. اگر افزایش سطح جریان قفل‌کننده رله امکان‌پذیر نباشد، تنها در صورتیکه عمل قطع در نقطه A پس از قطع مدارشکن‌های رله پشتیبان در نقطه B انجام شود می‌توان از وقوع این شرایط جلوگیری نمود. سپس، دو پایانه دیگر نیز به سرعت قطع خواهند شد.

شرایط مشابه دیگر ممکن است زمانی رخ دهد که امپدانس خطای بالا سبب شود جریان به حدی کم شود که صدور فرمان قطع را به تأخیر انداخته و یا مانع از صدور آن شود. با توجه به شکل (۱۳-٦)، در شرایطی که خطا به نقطه اتصال نزدیک‌تر باشد، جریان در نقطه A یا در جهت قفل‌کنندگی جریان پیدا می‌کند ولی آنقدر مقدارش کم است که باعث عملکرد رله قفل‌کننده نمی‌شود، یا در جهت قطع کننده است ولی مقدارش آنقدر کم است که موجب عملکرد رله قطع‌کننده نمی‌شود و یا صفر می‌باشد. اما با صدور فرمان قطع در چنین شرایطی، پایانه‌های دیگر قفل نمی‌شوند.



شکل (٦-١٣): جلوگیری از صدور فرمان قطع برای یک خطای داخلی توسط رله مقایسه‌گر جهتی

امکان عملکرد نادرست رله مقایسه جهت با استفاده از رله زمین سرعت بالا که از مقادیر توالی صفر تغذیه می‌کند در مقایسه با حفاظت مقایسه فاز بیشتر است. به منظور حداقل کردن امکان عدم عملکرد، عمدتاً ویژگی‌های خاصی به طرح حفاظتی مقایسه‌گر دیجیتالی افزوده می‌شود که عبارتند از:

- حساسیت محدود
- تأخیر زمانی کم در رله‌های کمکی
- قفل‌شدن در شرایط گذرا

مشکل عملکرد نادرست در شرایط گذرا می‌تواند با استفاده از رله دیستانس زمین که به امپدانس توالی مثبت پاسخ می‌دهد رفع شود.

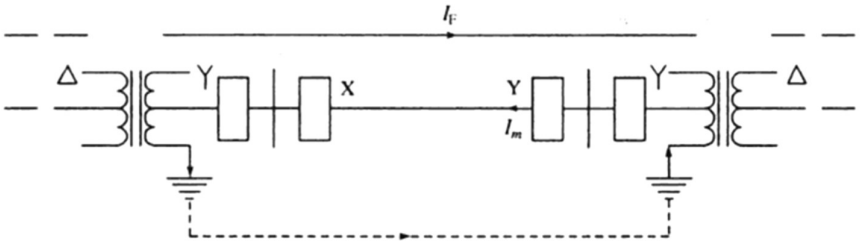
۳-۴-۶- حفاظت جریان حامل بر مبنای مقایسه ترکیبی فاز و جهت[1]

القا با مدارات قدرت جانبی می‌تواند عملکرد ناخواسته حفاظت جریان حامل مقایسه جهت که با استفاده از رله زمین جهتی پیاده‌سازی شده است را به همراه داشته باشد. عملکرد اشتباه رله زمین جهتی به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن پلاریزاسیون رله می‌باشد. تجهیزاتی که در روش حفاظت جریان حامل بر مبنای مقایسه ترکیبی فاز و جهت استفاده می‌شوند تنها اندکی از تجهیزات مورد استفاده در حفاظت مقایسه‌گر جهتی گران‌تر می‌باشند و این امر از آنجا ناشی می‌شود که برخی از تجهیزات نظیر فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در هر دو روش مشترک است. خوشبختانه، حفاظت خطای زمین مقایسه فاز در مواجهه با بیشتر شرایط گذرا که رله‌های زمین جهتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثرپذیری کمتری دارند.

اصولی که در عملکرد ناخواسته رله زمین جهتی به دلیل القای متقابل اثرگذار است در شکل (١٤-٦) نشان داده شده است. جریان خطای I_F که در خط مجاور جاری است جریانی مانند I_m را به واسطه القای متقابل در خط حفاظت

[1] . Combined Phase and Directional Carrier Current Relaying

شده القا می‌کند. این جریان القا شده از طریق نوترال زمین شده ترانسفورماتور قدرت انتهای خط و زمین به گردش در می‌آید. رله‌های زمین جهتی در دو انتهای خط در این شرایط عمل می‌کنند. جریان پلاریزه کننده در نقطه Y از زمین به نوترال وارد می‌شود. جهت هر دو جریان I_F و I_m در موقعیت X نسبت به موقعیت Y معکوس می‌شود. رله‌های قطبی شده (پلاریزه شده) با ولتاژ نیز عملکرد یکسانی دارد. بنابراین می‌توان گفت جهت جریان جاری شده در خط، مستقل از فاز کمیت پلاریزه‌کننده می‌باشد. راه حل این مشکل استفاده از روش حفاظت جریان حامل بر مبنای مقایسه فاز و جهت است.



شکل (٦-١٤): عملکرد ناخواسته رله زمین جهتی به دلیل القای متقابل

۵-۶- حفاظت دیستانس به کمک حامل[1]

بر خلاف طرح مقایسه فاز، طرح حفاظت دیستانس امکان ایجاد حفاظت پشتیبان را دارا می‌باشد. اما حفاظت دیستانس، حفاظت سریعی برای کل طول خط فراهم نمی‌کند. در نتیجه، علیرغم اینکه قطع همزمان مدارشکن‌های دو انتهای خط در مواجهه با خطاهای انتهای ناحیه حفاظتی بسیار مطلوب می‌باشد، این حالت در حفاظت دیستانس امکان‌پذیر نمی‌باشد.

طرح‌های محدودی وجود دارد که هر دو ویژگی قطع آنی برای خطا در تمامی طول خط و حفاظت پشتیبان را فراهم می‌کند. حامل‌های خط نیرو[2]، ارتباط رادیویی و یا ریزموج می‌توانند کانال مناسبی برای انتقال سیگنال فراهم آورند. این طرح‌ها تحت عنوان حفاظت دیستانس به کمک حامل شناخته می‌شوند. اساساً این طرح شامل دو نوع می‌باشد. نوع اول طرح قفل‌کننده توسط سیگنال حامل است که مانع از صدور فرمان قطع می‌باشد و نوع دوم طرح انتقال سیگنال حامل[3] یا طرح قطع متقابل توسط سیگنال حامل[4] که به منظور قطع مدارشکن مورد استفاده قرار می‌گیرد. طرح قطع متقابل می‌تواند به زیرشاخه‌های زیر تقسیم شوند:

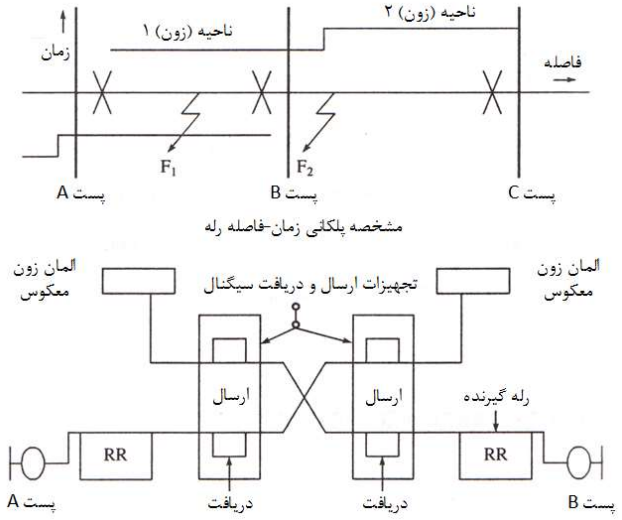
---

[1] . Carrier-Aided Distance Protection
[2] . Power Line Carriers
[3] . Carrier transfer
[4] . Carrier inter-tripping

- طرح کاهش برد با فرمان قطع مستقیم[1]
- طرح کاهش برد با مجوز انتقالی از باس دور[2]
- قطع با تسریع سیگنال حامل[3]
- طرح افزایش برد با مجوز انتقالی از باس دور[4]

۱-۵-۶- طرح قفل‌کننده توسط سیگنال حامل

این طرح در هنگام وقوع یک خطای خارجی، با استفاده از سیگنال حامل مانع از عملکرد رله می‌شود. این طرح برای حفاظت خطوط چند پایانه مناسب می‌باشد. بلوک دیاگرام این طرح در شکل (۱۵-٦) نشان داده شده است.



شکل (٦-۱۵): بلوک دیاگرام طرح حفاظتی قفل‌کننده توسط سیگنال حامل

عموماً در این طرح ناحیه ۱[5] عملکرد رله تمام خط حفاظت شده به همراه ۲۰٪ از خط بعدی را پوشش می‌دهد. یک رله جهتی معکوس به همراه رله دیستانس در هر دو انتهای خط قرار گرفته که قادر به تشخیص انواع مختلف خطاهای فاز و زمین می‌باشد. اگر خطا در خط مجاور تشخیص داده شود، بوسیله سیگنال حامل قفل می‌شود. رله جهتی معکوس سیگنالی تولید می‌کند که به منظور جلوگیری از قطع به انتهای دیگر خط ارسال می‌شود.

---
[1] . Direct Underreach Transfer Trip
[2] . Permissive Underreach Transfer Trip
[3] . Tripping by Carrier Acceleration
[4] . Permissive Overreach Transfer Trip
[5] . First zone

اگر خطایی مثل F_1 در هر نقطه‌ای از خط حفاظت شده رخ دهد، رله‌های دیستانس پست‌های A و B باید عملکرد داشته باشند. اما اگر خطایی خارج از ناحیه ۱ رله و در جلوی رله جهتی معکوس رخ دهد، رله‌های دیستانس دو انتهای خط عملکردی نخواهند داشت.

هنگامی که خطایی در نقطه F_2 در زون ۲ رخ دهد توسط رله دیستانس در باس A و توسط رله جهتی معکوس در باس B دیده می‌شود. این خطا خارج زون ۱ می‌باشد. از آنجا که خطا در نزدیکی پست B قرار دارد، باید فوراً توسط رله‌هایی که در باس B (برای پوشش خط مجاور) قرار گرفته‌اند رفع شود و در صورتیکه این عمل انجام نشود، پس از گذشت فاصله زمانی ناحیه ۲، رله مستقر در A باید عمل کند. در این حالت رله A به عنوان حفاظت پشتیبان عمل می‌کند.

۲-۵-۶- طرح قطع متقابل حامل

این طرح که تحت عنوان سیگنال قطع ارسالی[1] نیز شناخته می‌شود کنترل عملکرد مدارشکن را به عهده دارد. این طرح مدار را به طور همزمان از دو انتهای خط جدا می‌کند. دو مد اصلی عملکرد طرح قطع متقابل عبارتند از:

- ✓ انتقال فرمان کاهش برد
- ✓ انتقال فرمان افزایش برد

برای تقویت سطح حفاظتی در هنگام استفاده از این طرح برخی اقدامات پیشگیرانه نیاز است که انجام شود. نکته اول اینکه باید تزویج دو فاز[2] به کار برده شود و دیگر اینکه در تجهیزات چند کاربرده، حین ارسال سیگنال در زمان وقوع یک خطا، سایر خدمات باید متوقف شوند.

طرح کاهش برد با فرمان قطع مستقیم

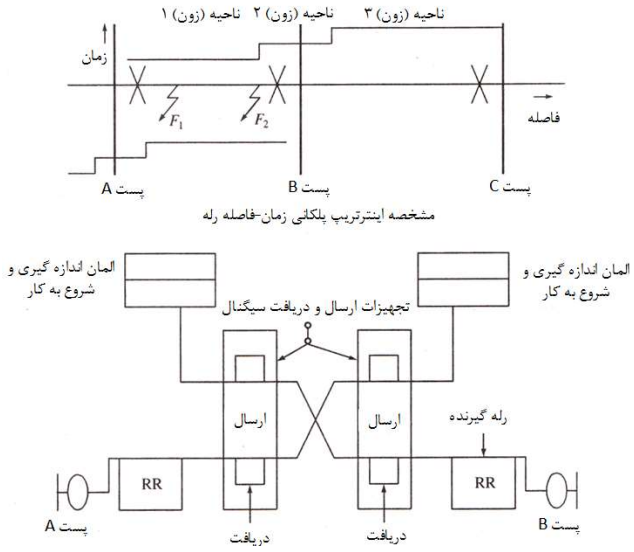
طرحی که در آن سیگنال حامل ورودی مستقیماً مدارشکن را قطع می‌کند تحت عنوان DUTT شناخته می‌شود. جهت اثربخشی قطع مستقیم، رله گیرنده به منظور جلوگیری از احتمال عملکرد تصادفی ناشی از فرکانس‌های نویز که توسط موج کلیدزنی یا سایر پدیده‌های مشابه تولید می‌شود، کنار گذاشته می‌شود. پیشنهاد می‌شود به منظور غلبه بر مشکلات عملکرد تصادفی در طرح DUTT از روش‌های ویژه‌ای استفاده شود. این روش‌ها که هزینه‌بر بوده اما قابلیت اطمینان طرح را افزایش می‌دهند عبارتند از:

---

[1] . transferred tripping
[2] . two-phase coupling

- از دو کانال جداگانه استفاده شود و فرمان‌های قطع به طور همزمان از طریق این دو کانال ارسال شود. کنتاکت‌های رله گیرنده به طور سری با یکدیگر باشند. برای قطع مدارشکن، هر دو کانال باید فرمان قطع را به طور همزمان منتقل کنند. با این روش، سیگنال‌های نویز سبب عملکرد اشتباه مدارشکن نمی‌شوند.
- استفاده از سیگنال‌های کد (رمزنگاری) شده راه حل دیگری برای جلوگیری از عملکرد تصادفی می‌باشد. به منظور جلوگیری از طولانی شدن زمان انتقال، کلمات کد شده باید تا حد ممکن کوتاه باشند.
- در مواردی که برای وصل مجدد خودکار تک فاز نیاز است فاز خطا در انتهای گیرنده انتخاب شود، برای هر فاز باید از یک کانال استفاده شود.

طرح حفاظتی DUTT در شکل (۱۶-۶) نشان داده شده است. حفاظت خط AB را در نظر بگیرید. اگر خطا در نقطه F_1 رخ دهد که در ناحیه ۱ هر دو رله قرار دارد، رله‌های دو انتهای خط به طور آنی عمل کرده و خطا را رفع می‌کنند. اگر خطا در انتهای ناحیه به عنوان مثال در F_2 رخ دهد، رله دیستانس موجود در پست B به سرعت فرمان قطع را به مدارشکن ارسال می‌کند و فوراً یک سیگنال حامل قطع متقابل را به منظور قطع مدارشکن به پست A می‌فرستد. واضح است که قطع مدارشکن پس از اندکی تأخیر صورت می‌گیرد.



شکل (۱۶-۶): بلوک دیاگرام طرح حفاظتی قطع متقابل حامل

طرح کاهش برد با مجوز انتقالی از باس دور

طرحی که در آن پس از عملکرد رله دیستانس محلی، سیگنالی به سمت گیرنده فرستاده شده و به منظور قطع مدارشکن مورد استفاده قرار می‌گیرد تحت عنوان "PUTT" شناخته می‌شود. در این طرح، فرمان ارسال شده به

پایانه دیگر زمانی اجرا می‌شود که المان تشخیص خطا در رله دیستانس سمت گیرنده تحریک شده باشد و وجود خطا را تأیید کند. این طرح، احتمال قطع ناخواسته ناشی از وجود نویز در خط را از بین می‌برد. به عبارت دیگر، اجرای سیگنال قطع دریافتی منوط به تأیید المان تشخیص خطای رله دیستانس محلی می‌باشد و به این دلیل نویز موجود در خط نمی‌تواند سبب اشتباه در عملکرد این طرح حفاظتی شود. این موضوع در شکل (۱۶-۶) نشان داده شده است. بنابراین، این طرح نیازمندی‌های وصل مجدد خودکار را برآورده می‌کند.

قطع با تسریع سیگنال حامل

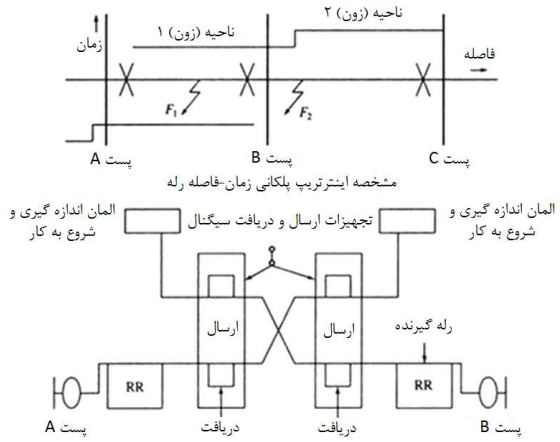
تفاوت اصلی این روش با روش "انتقال فرمان کاهش برد" این است که ناحیه ۱ رله به جای ۸۰٪ تا ۱۲۰٪ افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که خطایی در انتهای ناحیه حفاظت شده رخ می‌دهد، رله در باس نزدیک به محل خطا مدارشکن محلی را قطع کرده و سیگنال حاملی نیز به انتهای دیگر خط می‌فرستد. به محض دریافت سیگنال حامل ارسالی از انتهای دیگر خط، برد ناحیه عملکرد فوراً از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ تغییر پیدا می‌کند که سبب می‌شود خطا در باس دور نیز به سرعت رفع شود.

طرح افزایش برد با مجوز انتقالی از باس دور

طرح POTT هنگامی اثرگذار است که رله برای خطاهای خارج ناحیه حفاظتی‌اش عمل می‌کند. در این طرح رله سمت گیرنده به وسیله یک رله جهتی نظارت می‌شود و به همین دلیل است که این روش تحت عنوان طرح مقایسه جهتی نیز شناخته می‌شود. این طرح برخلاف طرح حامل قفل‌کننده هیچ رله جهتی معکوسی نیاز ندارد.

بلوک دیاگرام طرح حفاظتی "قطع متقابل توسط سیگنال حامل" و مشخصه پله‌ای زمان- فاصله طرح POTT در شکل (۱۷-۶) نشان داده شده است. در این طرح، المان ناحیه ۲ سیگنال حاملی به انتهای دیگر خط حفاظت شده می‌فرستد. ناحیه ۱ هر دو رله دیستانس، خطای F_1 در هر نقطه از خط حفاظت شده را پوشش می‌دهد و در عین حال پس از صدور فرمان قطع توسط هر دو رله دیستانس، یک سیگنال حامل به منظور بستن کنتاکت معمولا باز[1] (NO) رله سمت گیرنده ارسال می‌شود.

[1] . Normal open



شکل (۱۷-٦): بلوک دیاگرام طرح حفاظتی overreach intertripping

خطا در نقطه F_2 در ناحیه ۱ رله موجود در پست A دیده می‌شود و سیگنال حامل به منظور بستن کنتاکت رله گیرنده در پست B فرستاده می‌شود. اما اگر خطا در ناحیه (زون) معکوس رله B تشخیص داده نشود، هیچ سیگنالی از پست B به پست A فرستاده نمی‌شود.

به هر حال، این روش به دو دلیل نسبت به سایر روش‌ها ترجیح داده نمی‌شود. دلیل اول این است که زمان جداسازی بخش خطا در این روش در مقایسه با زمان مورد نیاز در طرح‌های کاهش برد[1] طولانی‌تر می‌باشد. دلیل دوم نیز مشکل در تعیین صحیح جهت خطا در این روش به خصوص در حضور خازن در نزدیکی پست‌ها می‌باشد.

۶-۶- مقایسه طرح‌های حفاظتی قفل‌کننده (ممانعت از قطع) و انتقال فرمان قطع

- هر چه تضعیف کمتر باشد، انتقال با قابلیت اطمینان بیشتری انجام می‌شود. تضعیف ناشی از یک خطا در طرح "انتقال فرمان قطع" متغیر و غیر قابل پیش‌بینی است در حالیکه در طرح قفل‌کننده، تضعیفی وجود ندارد.
- در خطوط انتقالی که مجهز به وصل مجدد خودکار می‌باشند، طرح ممانعت از قطع (قفل‌کننده) گزینه بهتری در مقایسه با طرح "انتقال فرمان قطع" می‌باشد چون در طرح "انتقال فرمان قطع" رله به منظور پوشش خطای انتهای ناحیه حفاظت شده به طور آنی عمل نمی‌کند. یکی از مزایای اصلی این طرح سرعت عملکرد آن می‌باشد.
- طرح حامل تسریع شده در مقایسه با سایر طرح‌های حفاظتی مقرون به صرفه می‌باشد.

[1] . Underreach schemes

- هزینه تجهیزات تزویج[1] در طرح "انتقال فرمان قطع"بیش از هزینه طرح قفل‌کننده است چون طرح قفل‌کننده از یک خط سالم برای ارسال سیگنال استفاده می‌کند و یک دستگاه تزویج تک‌فاز برای عملکرد آن کافی است.

✓ رله‌های دیستانس در هنگام خرابی کانال حامل رفتار متفاوتی دارند. در طرح انتقال فرمان کاهش برد، خطاهای انتهای ناحیه برد پس از زمان تأخیر متناظر با نزدیک‌ترین ناحیه حفاظتی عمل می‌کنند. در طرح انتقال فرمان افزایش برد، اگر رله دیستانس نتواند خطا در ناحیه حفاظت شده به عنوان مثال ناحیه ۱ را از دو انتهای خط قطع کند، تمامی خطاها پس از تأخیر زمانی متناظر با ناحیه ۲ رفع خواهند شد. طرح حفاظتی قفل‌کننده در مواجهه با خطاهایی که در خط حفاظت شده رخ می‌دهد به درستی و به طور مؤثر عمل می‌کند اما برای خطاهایی که در بخش‌های مجاور رخ می‌دهد عملکردی ندارد.

تمرین

۱- از پایلوت چه می‌دانید و یک طرح حفاظتی پایلوت چیست؟

۲- با استفاده از دیاگرام مناسب انواع طرح‌های حفاظتی پایلوت را تشریح کنید.

۳- نیازمندی‌های یک طرح حفاظتی پایلوت چیست؟ هر کدام از نیازمندی‌ها را به طور خلاصه بیان کنید.

۴- با استفاده از بلوک دیاگرام طرح پایلوت سیمی جریان گردشی و طرح پایلوت سیمی ولتاژ مخالف را تشریح کنید.

۵- یک طرح پایلوت جریان حامل چیست؟ با استفاده از یک دیاگرام اجزای آن را نشان دهید. همچنین اصول عملکردی طرح پایلوت جریان حامل را توضیح دهید.

۶- طرح‌های قفل‌کننده توسط سیگنال حامل و قطع‌کننده توسط سیگنال حامل را توضیح دهید.

۷- به کمک یک بلوک دیاگرام تئوری طرح جریان حامل مبتنی بر مقایسه زاویه فاز را توضیح دهید.

۸- مزایا و معایب طرح قفل‌کننده توسط سیگنال حامل را در مقایسه با سایر انواع حفاظت دیستانس به کمک سیگنال حامل توضیح دهید.

۹- توضیح دهید که چه زمانی حفاظت ترکیبی جریان حامل مقایسه‌گر جهت و فاز مورد نیاز است.

۱۰- از طرح‌های حفاظتی کاهش برد مجاز و طرح کاهش برد با مجوز انتقالی چه می‌دانید؟

۱۱- از حفاظت واحد چه می‌دانید؟

---

[1] . Coupling

۷- حفاظت تجهیزات

۷-۱- حفاظت دیجیتال ژنراتور

۷-۱-۱- مقدمه

ژنراتورها از جمله تجهیزات حیاتی هستند که در سیستم‌های قدرت به کار برده می‌شوند. در حقیقت، دسترسی به انرژی الکتریکی وابسته به سلامت ژنراتورهای سنکرون می‌باشد. از آنجا که واحدهای تولیدی بسیار گران قیمت هستند، حفاظت مؤثر از آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. انتخاب طرح‌های حفاظتی برای واحدهای تولید توان باید با دقت فراوانی انجام شود چون عملکرد نادرست بخشی از یک واحد تولیدی ممکن است باعث اضافه بار در سایر بخش‌های سیستم شده و نوسان و ناپایداری در شبکه قدرت را به همراه داشته باشد. بنابراین به منظور جلوگیری از وقوع چنین احتمالاتی و اطمینان از حفاظت مؤثر ژنراتور سنکرون، به کارگیری رله‌های حفاظتی با سرعت بالا و تابلوها و سوئیچگیرهای مربوط به آن که دارای ویژگی‌های سادگی، انعطاف‌پذیری، حساسیت و قابلیت اطمینان بالا باشد ضروری به نظر می‌رسد. رله‌های الکترومکانیکی، استاتیک و الکترونیکی توانایی برآورده ساختن سرعت بالا، سادگی، انعطاف‌پذیری، حساسیت و قابلیت اطمینان مورد نیاز را دارا نیستند و این ویژگی‌ها تنها در رله‌های دیجیتال از جمله رله‌های مبتنی بر میکروپروسسور، رله‌های مبتنی بر مینی کامپیوتر و یا رله‌های مبتنی بر کامپیوترهای شخصی قابل دستیابی هستند. از آنجا که مشخصه‌های عملکردی طرح‌های حفاظتی مبتنی بر رله‌های دیجیتال به آسانی از طریق اصلاح سخت افزار و یا تغییرات جزئی در نرم‌افزار قابل تغییر می‌باشند، برای حفاظت ژنراتورها، ایده‌آل هستند.

۷-۱-۲- خطاهای ژنراتور

طرح‌های حفاظتی واحدهای تولیدی باید به دقت طراحی شوند. ژنراتورها و بخش‌های مرتبط با آن در معرض فشارها و خطرات مختلفی هستند. خطاهای عمده و شرایط غیرعادی که ممکن است در ژنراتورهای سنکرون به وقوع بپیوندد در جدول (۱-۷) آورده شده است. طرح‌های حفاظتی که عمدتاً برای حفاظت بخش‌های مختلف یک ژنراتور به کار برده می‌شوند نیز در این جدول آورده شده است. اتفاقات و مخاطراتی که ممکن است در حین بهره‌برداری برای یک ژنراتور سنکرون رخ بدهد به طور کلی به دو بخش عمده خطاهای داخلی و شرایط عملکرد غیرعادی سیستم تقسیم‌بندی می‌شوند.

جدول ۱: خطاها و طرح‌های حفاظتی ژنراتور

خطاها و شرایط غیرعادی	طرح‌های حفاظتی
خرابی در عایق سیم‌پیچی استاتور	حفاظت دیفرانسیل
خرابی در عایق سیم‌پیچی روتور	حفاظت خطای بین سیم‌پیچ
خرابی در سیم‌پیچ میدان	حفاظت خطای زمین استاتور
اضافه بار	حفاظت خطای زمین روتور
بارگذاری نامتعادل	حفاظت اضافه جریان زمین
اضافه ولتاژ	حفاظت توالی منفی
خرابی در محرک اولیه[1]	حفاظت خرابی در میدان
اضافه سرعت	حفاظت اضافه بار
از دست دادن سنکرونیزم	حفاظت اضافه ولتاژ
افزایش بیش از حد دما	حفاظت توان معکوس
کاهش فرکانس	حفاظت امپدانسی پشتیبان حفاظت کاهش فرکانس حفاظت لغزش قطب

۳-۱-۷- انواع حفاظت ژنراتور

طرح‌های حفاظتی ژنراتورهای سنکرون بر مبنای شدت خطا و شرایط غیرعادی به انواع A، B و C تقسیم‌بندی می‌شوند. جدول (۲-۷) مجموعه‌ای از طرح‌هایی حفاظتی و خطاهای متناظر با آن‌ها را نشان می‌دهد.

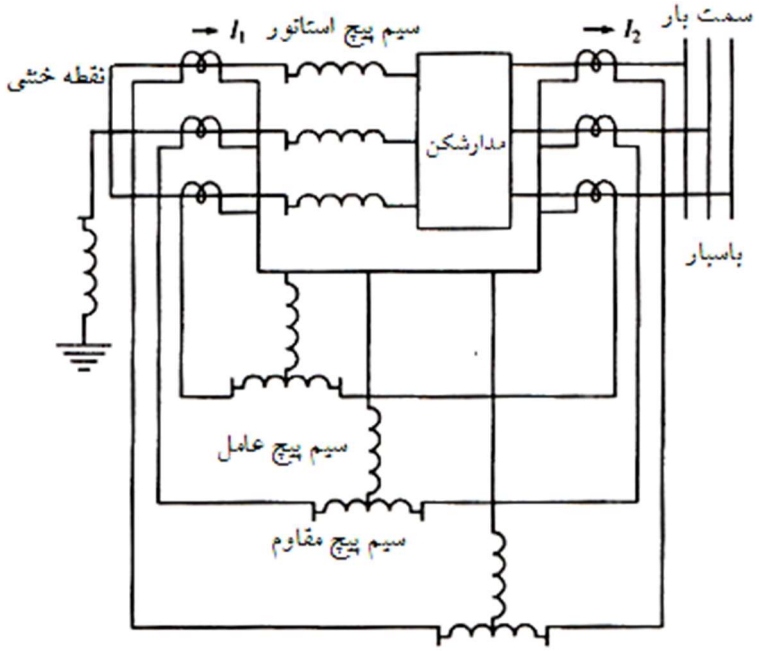
جدول ۲-۷: انواع طرح‌های حفاظتی و عملکرد متناظر با آن‌ها

حفاظت‌های نوع A	حفاظت‌های نوع B	حفاظت‌های نوع C
اعلان وجود خطای نوع A قطع ترانس کمکی قطع مدارشکن[2] ژنراتور قطع مدارشکن میدان ژنراتور قطع محرک اولیه قطع بویلر	اعلان وجود خطای نوع A قطع عملکرد توربین به تأخیر انداختن عملکرد رله‌های نوع A قطع عملکرد بویلر	تنها قطع مدارشکن ژنراتور

[1] . Prime mover
[2] . Breaker

۴-۱-۷- طرح حفاظتی واحد[2] مبتنی بر میکروپروسسور

این طرح حفاظتی از حفاظت دیفرانسیل درصدی پایه مطابق شکل (۷-۱) استفاده می‌کند.



شکل ۱-۷: رله دیفرانسیل درصدی

در این طرح حفاظتی، I_1 جریان ورودی به سیم‌پیچ استاتور است در حالیکه I_2 جریان خروجی از آن می‌باشد. این جریان‌ها با استفاده از دو ترانسفورماتور جریان دقیقاً مشابه کاهش می‌یابند. در طرح حفاظتی دیفرانسیل درصدی، اختلاف جریان‌های I_1 و I_2 یعنی (I_1-I_2) سیگنال عامل و $(I_1+I_2)/2$ سیگنال مقاوم است. شرایط صدور فرمان قطع عبارت است از:

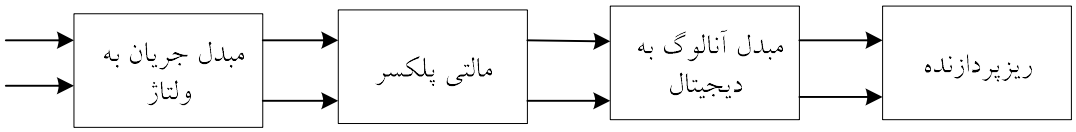
$$|(I_1 - I_2)| > \left|\frac{S(I_1 + I_2)}{2}\right|$$

در این رابطه S ضریب بایاس رله دیفرانسیل درصدی بایاس شده (وزندهی شده) است. مقدار S بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ می‌باشد.

[1] . Tie-breaker
[2] . Unit protection schemes

هنگام وقوع یک خطای خارجی و یا تحت شرایط بار عادی، اختلاف برداری جریان‌های دو سیم‌پیچ که سیگنال عامل می‌باشد قابل صرفنظر کردن است. اما در زمان وقوع یک خطای داخلی در سیم‌پیچ‌ها، اختلاف دامنه و فاز جریان‌های دو سر سیم‌پیچ‌ها قابل توجه است. بنابراین هنگام وقوع یک خطای داخلی سیگنال عامل (I_1-I_2) آنقدر زیاد است که از S برابر مقدار متوسط سیگنال مقاوم $(I_1+I_2)/2$ بیشتر است. سپس فرمان قطع برای مدارشکن فرستاده می‌شود.

بلوک دیاگرام این طرح حفاظتی در شکل (۲-۷) نشان داده شده است. خروجی ترانسفورماتورهای جریان، I_1 و I_2، برای تبدیل سیگنال جریان به سیگنال ولتاژ به مبدل جریان به ولتاژ وارد می‌شوند. تبدیل ولتاژ به جریان توسط مبدل جریان به ولتاژ[1] انجام می‌شود. در مرحله بعد، این سیگنال‌ها به منظور سهولت در انتخاب، به مالتی‌پلکسر فرستاده می‌شوند. بعد از انتخاب سیگنال، عمل نمونه برداری انجام می‌پذیرد. سیگنال‌های نمونه‌برداری شده سپس به مبدل آنالوگ به دیجیتال فرستاده می‌شوند. پس از این، مبدل دیجیتال، مؤلفه DC و هارمونیک‌های سیگنال‌ها را حذف و آن‌ها را به حافظه‌های میکروپروسسور می‌فرستد. در این روش، تنها مقدار مؤثر سیگنال عامل (I_1-I_2) و سیگنال مقاوم $(I_1+I_2)/2$ به میکروپروسسور فرستاده می‌شود. گاهی اوقات به خاطر عدم دسترسی به سیم‌پیچ خنثی[2] ترجیح داده می‌شود از طرح حفاظت واحد برای حفاظت ژنراتورهای سنکرون استفاده نشود .



شکل ۷-۲: بلوک دیاگرام طرح حفاظتی واحد مبتنی بر ریزپردازنده

۷-۱-۵- حفاظت دیجیتال مبتنی بر هارمونیک دوم جریان القا شده در مدار میدان روتور

هر گونه شرایط غیر عادی در ژنراتور سنکرون توسط عدم تعادل داخلی مشخص می‌شود. میدان استاتور ناشی از جریان توالی مثبت استاتور با سرعتی معادل با سرعت میدان روتور و در همان جهت می‌چرخد. به همین خاطر، هیچ نیروی الکترومغناطیسی در مدار روتور القا نمی‌شود. این امر به خاطر این است که میدان استاتور مستقل و مجزا از میدان روتور باقی می‌ماند.

به هر حال، جریان توالی منفی در سیم‌پیچ استاتور، میدانی با سرعتی معادل با سرعت چرخش روتور ولی در خلاف جهت آن ایجاد می‌کند. این میدان ولتاژی با فرکانسی معادل با دو برابر فرکانس سنکرون در روتور ایجاد می‌کند. به همین خاطر است که جریان توالی منفی در استاتور، سبب ایجاد هارمونیک دوم در سیم‌پیچ میدان روتور می‌شود.

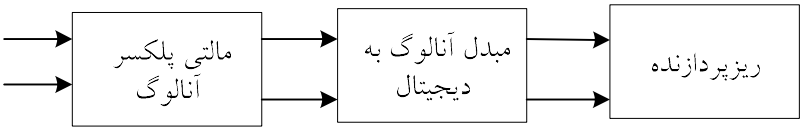
---

[1] . Transactor

[2] . Neutral

وجود مؤلفه هارمونیک دوم در سیم‌پیچ میدان به منظور تشخیص وجود خطا و یا شرایط غیرعادی در سیم‌پیچی استاتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت جریان توالی مثبت در پایانه‌های ژنراتور تشخیص خطای داخلی و خارجی را تسهیل می‌کند. تشخیص دامنه و اختلاف فاز بین جریان‌های توالی به تعیین نوع خطا کمک می‌کند.

بررسی وجود قطع تحریک از طریق نمونه‌برداری از جریان میدان انجام می‌شود. بدست آوردن هارمونیک دوم جریان میدان با استفاده از یک فیلتر مناسب امکان‌پذیر است. به طور کلی وجود مؤلفه هارمونیک دوم با دامنه بیش از ۰/۲ پریونیت به عنوان یک نشانگر برای حالت غیرعادی در مدار استاتور و یا وجود یک خطا خارج از مدار استاتور در نظر گرفته می‌شود. یک رله برگشت توان نیز به منظور تشخیص جهت جریان به عنوان مثال برای تشخیص جهت شارش توان در پایانه‌های ژنراتور مورد نیاز است. مراحل مختلف پیاده‌سازی شده در این طرح در قالب یک بلوک دیاگرام در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.



شکل (۳-۷): مراحل طرح حفاظتی دیجیتال مبتنی بر هارمونیک دوم جریان القا شده در مدار میدان روتور

این طرح حفاظتی توسط میکروپروسسورهای ۸۰۸۵ یا ۸۰۸۶ قابل پیاده‌سازی می‌باشد. به منظور اینکه رله از سرعت قابل قبولی برخوردار باشد، بهتر است در هر سیکل ۸ نمونه انتخاب شود. با استفاده از یک زمان‌سنج[1] قابل برنامه‌ریزی می‌توان به طور همزمان از جریان توالی مثبت و منفی در مدار آرمیچر و میدان نمونه‌برداری نمود. سپس خروجی زمان‌سنج به المان وقفه به عنوان مثال RST 7.5 داده می‌شود. در مرحله بعدی، جریان توالی در آرمیچر و یا میدان از طریق یک مالتی‌پلکسر آنالوگ انتخاب می‌شود. سیگنال فرمان قطع نیز می‌تواند خروجی میکروپروسسور که دارای پورت مناسب است باشد. منطق‌های ممکن که در تشخیص نوع خطا مفید هستند در جدول (۳-۷) ارائه شده است.

جدول (۳-۷): منطق‌های ممکن

دامنه تمام مؤلفه‌های جریان مساوی است	خطای فاز به زمین
دامنه جریان‌های توالی مثبت و منفی برابر و جریان توالی صفر وجود ندارد	خطای فاز به فاز
تنها توالی مثبت وجود دارد در حالیکه جریان‌های توالی صفر و منفی وجود ندارند.	خطای سه فاز یا سه فاز به زمین

۶-۱-۷- حفاظت تزریق مؤلفه زیرسنکرون در مدار روتور

این طرح به منظور جداسازی سریع ژنراتور سنکرون از بقیه بخش‌های سیستم به محض وقوع خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداکثر جریان خطای تک فاز به زمین بسیار کم است و این امر به واسطه مقاومت بالای زمین می‌باشد. در

[1] . Timer

نتیجه، جریان خطای زمین آنقدر پایین است که برای تحریک[1] رله کافی نیست. به هر جهت، خطای تک فاز به زمین در ژنراتورهای سنکرون بسیار متداول است و نیاز به جداسازی خطا از بقیه سیستم به منظور حفظ جان کاربران سیستم امری ضروری می‌باشد. در صورت وقوع یک خطای فاز به زمین، تشخیص آن در سرتاسر طول سیم‌پیچ استاتور به ظرفیت خازنی اتصال کوتاه شده ژنراتور وابسته است. هر تغییری در راکتانس خازنی می‌تواند بوسیله فرکانس زیرهارمونیک تشخیص داده شود.

در این طرح حفاظتی، ولتاژی با فرکانس مناسب (به عنوان مثال ۱۲/۵ هرتز) بین نقطه خنثی و زمین تزریق می‌شود. این ولتاژ پایش[2] جریان بدست آمده از این طرح حفاظتی را تسهیل می‌کند. تزریق ولتاژ با فرکانس زیرهارمونیک به نقطه خنثی به تشخیص خطای زمین کمک می‌کند. این طرح حفاظتی بر این مبنا عمل می‌کند که هنگام وقوع یک خطای فاز به زمین، جریان ۱۲/۵ هرتز به واسطه اتصال کوتاه شدن ظرفیت خازنی ژنراتور افزایش یافته و بنابراین منجر به عملکرد رله می‌شود. مسیر جریان با فرکانس ۱۲/۵ هرتز در شکل (۴-۷) نشان داده شده است که در آن:

V= ولتاژ تولید شده با فرکانس ۱۲/۵ هرتز

R_S= مقاومت ثانویه انتقالی به اولیه

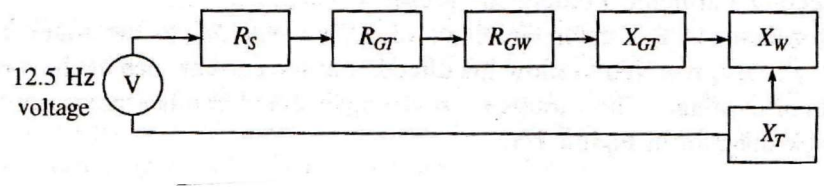
R_{GT}= مقاومت ترانسفورماتور زمین

R_W= مقاومت ترانسفورماتور تزریق

X_T= راکتانس خازنی (سه فاز) نسبت به زمین ناحیه حفاظت شده

X_{GT}= راکتانس نشتی ترانسفورماتور زمین ژنراتور

X_W= راکتانس نشتی ترانسفورماتور تزریق



شکل (۴-۷): مسیر جریان فرکانس پایین (۱۲/۵ هرتز)

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل (۴-۷)، حداقل میزان تنظیم جریان از لحاظ تئوری مطابق رابطه زیر است:

---

[1] . Pick-up

[2] . Monitoring

$$I_{min} = \frac{V}{R + j(X + X_T)}$$

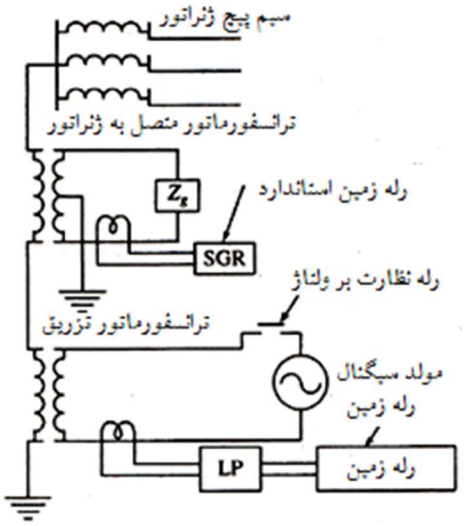
و حداکثر میزان تنظیم جریان از لحاظ تئوری مطابق رابطه زیر خواهد بود:

$$I_{max} = \frac{V}{R + jX}$$

به هر حال اقدامات پیشگیرانه زیر باید در نظر گرفته شود:

i. تزریق ولتاژ در ژنراتور تحریک نشده، در حال دنده گردان[1]، باید متوقف شود.
ii. یک رله ناظر بر ولتاژ به منظور غیر فعال کردن تزریق ولتاژ برای حالتی که ولتاژ تولیدی کمتر از ۰/۴ پریونیت است به کار برده شود.

نمایی از این طرح حفاظتی در شکل (۵-۷) نشان داده شده است.



شکل (۵-۷): نمایی از حفاظت خطای زمین استاتور

۷-۲- حفاظت دیجیتال ترانسفورماتور

۷-۲-۱- مقدمه

رله‌های دیفرانسیل درصدی متداول برای مواجهه با همه انواع خطاهای داخلی به کار برده می‌شدند. اما این روش گاهی اوقات در مورد جریان مغناطیس کننده و جریان هجومی ایجاد شده بوسیله خطای بین حلقه[1]، کلیدزنی و غیره عملکرد

[1]. Turning gear: حالتی است که به منظور جلوگیری از تنش حرارتی در شفت ژنراتور، قبل از توقف کامل، توربین با سرعت ثابت برای یک مدت معین می‌چرخد.

موفقی ندارد. استفاده از ترانسفورماتورهای جریان با نسبت دور متفاوت و یا ظرفیت نامی متفاوت در هر یک از دو سمت ترانسفورماتور اصلی و نیز تغییر نسبت دور توسط تپ چنجر ترانسفورماتور اصلی پدیده‌هایی هستند که موجب عملکرد نادرست در حفاظت ترانسفورماتور می‌شود. حفاظت دیجیتال ترانسفورماتور راه‌حل نهایی برای مشکلات ناشی از عملکرد نادرست ترانسفورماتور است.

هر دو نوع خطای داخلی و خارجی می‌توانند سبب عملکرد نامناسب ترانسفورماتورها شوند. در حالیکه طرح‌های حفاظتی به کار برده شده برای خطوط انتقال مراقب خطاهای خارجی هستند، رله‌های متفاوت دیگری برای حفاظت ترانسفورماتور در مقابل خطاهای داخلی استفاده می‌شوند. از میان این رله‌ها می‌توان به رله حساس به گاز بوخهلتس[۲]، رله‌های اضافه جریان، رله خطای زمین محدود شده[۳] و رله دیفرانسیل درصدی[۴] اشاره نمود. انتخاب طرح حفاظتی به نوع خطا و نیز به نوع، ظرفیت و اندازه ترانسفورماتور مورد استفاده بستگی دارد.

۲-۲-۷- انواع خطا در ترانسفورماتور

خطاهای متفاوتی که در ترانسفورماتورها اتفاق می‌افتد را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- خطای خارجی که عبارت از مشاهده اضافه جریان برای یک مدت کوتاه و یا یک اتصال کوتاه خارج ترانسفورماتور می‌باشد.
- خطای داخلی که عبارت از خطای ابتدایی، خطا در پایانه‌ها[۵] و خطا در سیم‌پیچ می‌باشد.

خطاهای ابتدایی سبب افزایش حرارت می‌شوند بنابراین درصورتیکه برای مدت زمان طولانی به آن‌ها توجه نشود مستعد ایجاد خطر هستند. خطاهای ابتدایی عبارتند از:

i. خطاهای هسته که به واسطه شکست عایقی مواد به کار برده شده در هسته‌های مورق، پیچ‌ها و یا حلقه‌های نگهدارنده[۶] ایجاد می‌شوند که ممکن است ایجاد قوس‌های الکتریکی محدود در روغن را در پی داشته باشد.
ii. خطاهای زمین که در نزدیکی نقطه خنثی در ترانسفورماتورها با اتصال ستاره بوقوع می‌پیوندد.
iii. اتصال الکتریکی ضعیف رساناها
iv. خرابی سیستم خنک کننده که عبارت از خرابی در نظم عملکرد سیستم خنک‌سازی است.

---

[1] . Inter-turn fault
[2] . Gas actuated Buchholz relay
[3] . Restricted earth fault
[4] . Percentage differential relay
[5] . Terminal fault
[6] . Clamping ring

v. جریان نادرست روغن، از دست دادن و یا مسدود شدن روغن که ممکن است افزایش دمای موضعی را در بر داشته باشد.

vi. خرابی در تنظیم کننده ولتاژ و تقسیم نادرست بار بین ترانسفورماتورهای موازی که ایجاد یک جریان گردشی را در پی دارد.

خطای پایانه‌ها که شامل موارد زیر است:

i. خطای فاز به فاز در پایانه‌های HV و یا LV
ii. خطای فاز به زمین در پایانه‌های HV و یا LV
iii. خطای سه فاز در پایانه‌های HV و یا LV

خطا در سیم‌پیچی شامل موارد زیر است:

i. خطای فاز به فاز در سیم‌پیچ‌های HV و یا LV
ii. خطای فاز به زمین در سیم‌پیچ‌های HV و یا LV
iii. اتصال کوتاه بین حلقه‌های سیم‌پیچی LV و یا HV
iv. اتصال کوتاه بین حلقه‌های سیم‌پیچی ثالثیه
v. خطای زمین در سیم‌پیچی ثالثیه

خطای پایانه‌ها و خطای سیم‌پیچی ذاتاً بسیار خطرناک هستند و می‌توانند به ترانسفورماتور آسیب برسانند.

۳-۲-۷- حفاظت ترانسفورماتورها

حفاظت دیفرانسیل درصدی امکان حفاظت مطمئن همراه با عملکرد سریع را تسهیل می‌کند. حفاظت واحد دیجیتال نیز قابلیت اطمینان بالا به همراه عملکرد سریع را به همراه دارد. علاوه بر این، چندین ویژگی اضافی از جمله انعطاف‌پذیری و امکان خودبازبینی[1] را نیز در بر دارد. به هر جهت پدیده‌های ویژه مرتبط با حفاظت ترانسفورماتور بر عملکرد طرح حفاظتی مورد استفاده تأثیر می‌گذارد. این پدیده‌ها همراه با جزئیات در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

جریان هجومی مغناطیس کننده

جریان هجومی مغناطیس کننده به جریانی اطلاق می‌شود که به محض بسته شدن کلید در اولیه، در سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور جاری می‌شود در حالیکه سیم‌پیچی ثانویه مدار باز است. دامنه جریان هجومی مغناطیس کننده به چندین عامل از جمله کیفیت فولاد مورد استفاده در ساخت هسته، دامنه و پلاریته پسماند مغناطیسی، لحظه کلیدزنی و امثال

[1] . Self-cheking

آن بستگی دارد. شار نامتقارن ابتدایی[1]، هسته را به شدت به اشباع می‌برد که یک جریان مغناطیس کننده غیرعادی و با دامنه بالا را در پی دارد. بیشتر ترانسفورماتورها در نزدیکی سطح اشباع کار می‌کنند. مشخصه مغناطیسی شکل دقیق جریان هجومی مغناطیس کننده را تعیین می‌کند که گاهی تا میزان ۱۰ تا ۱۵ برابر مقدار نامی بالا می‌رود. در بسیاری از موارد، کاهش این جریان به واسطه وجود اندوکتانس مغناطیس‌کننده بالا، ۱ تا ۲ ثانیه طول می‌کشد. این اثر در یک ترانسفورماتور سه فاز بسیار شدیدتر است چون جریان یک سیم‌پیچ وابسته به جریان سایر سیم‌پیچ‌ها است. جریان هجومی مغناطیس کننده که هارمونیک دوم بالایی دارد ممکن است سبب شود رله به اشتباه فرمان قطع صادر کند. در بررسی‌ها مشاهده شده است که محتوای هارمونیک دوم همیشه بیش از ۱۶ درصد است و این نکته برای تشخیص اختلاف بین جریان خطا و جریان هجومی مغناطیس کننده در کاربردهای حفاظتی مفید می‌باشد.

جریان هجومی اضافه ولتاژ

در شرایط غیر عادی سیستم، ممکن است یک افزایش ولتاژ کوتاه مدت ایجاد شود که به نوبه خود ممکن است سبب اشباع ترانسفورماتور و ایجاد جریان دیفرانسیل بالایی شود. مشاهده شده است که ۲۰ تا ۵۰ درصد افزایش ولتاژ در فولاد می‌تواند منجر به افزایش ۱۰ تا ۱۰۰ درصدی در جریان تحریک شود. دامنه اضافه ولتاژ بوسیله عوامل مختلفی تعیین می‌شوند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

i. تحریک ژنراتور
ii. طول خط باقیمانده متصل به پست[2] نیروگاهی
iii. راکتانس موازی سیستم
iv. ظرفیت تولید کلی

افزایش جریان مغناطیس‌کننده در اثر اضافه ولتاژ موجب افزایش در محتوای هارمونیکی دوم و پنجم شده که به نوبه خود منجر به عملکرد نادرست رله‌ها می‌شود.

روش‌های فیلتر کردن

روش‌های فیلتر کردن مشتمل بر دو طرح فیلترینگ آنالوگ و دیجیتال می‌باشند. فیلترهای آنالوگ به خاطر نوع سخت‌افزارشان خیلی قابل اطمینان نیستند. از آنجا که در این فیلترها برای هر سیگنال ورودی فیلترهای جداگانه‌ای مورد نیاز است مدارات پیچیده‌ای دارند. اما در مقابل فیلترهای دیجیتال به خاطر برتری‌های زیر ارجحیت بیشتری دارند:

i. دقت بالا

[1] . Initial asymmetrical flux
[2] . Station

ii. قابلیت اطمینان بالا
iii. خطای کم اجزا
iv. عدم تأثیرپذیری عمر اجزا بر عملکرد فیلتر
v. انعطاف‌پذیری بیشتر

فیلترهای دیجیتال به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

فیلترهای غیربازگشتی[1]، که خروجی آن‌ها تابعی از ورودی فعلی و قبلی است، پاسخ ضربه آن‌ها محدود بوده و به همین خاطر فیلترهای پاسخ ضربه محدود[2] (FIR) نامیده می‌شوند.

فیلترهای بازگشتی که خروجی آن‌ها تابعی از ورودی و خروجی قبلی و فعلی است و این امر از طریق بازخورد[3] خروجی انجام می‌شود. بواسطه وجود بازخورد، این فیلترها پاسخ ضربه نامحدود داشته و به همین دلیل فیلترهای پاسخ ضربه نامحدود[4] (IIR) نامیده می‌شوند.

به منظور برآورده ساختن نیازمندی‌هایی که پیشتر توضیح داده شد لازم است فیلترهای آنالوگ به فیلترهای دیجیتال تبدیل شوند. این امر توسط روش‌های زیر محقق می‌شود:

i. پاسخ ضربه
ii. تبدیل مستقیم با استفاده از تبدیل‌های حوزه Z به S
iii. تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات تفاضلی
iv. سنتز[5] مستقیم

یک فیلتر لگراند مرتبه چهارم حداقل زمان استقرار را برای ورودی پله تأمین می‌کند (به طور متوسط ۵۶/۲ میلی‌ثانیه) و در عمل زمانی می‌توان به صورت مطمئن تصمیم به صدور فرمان قطع گرفت که خروجی فیلتر استقرار پیدا کرده باشد. فیلترهای IIR در صورتیکه لازم باشد در طی یک سیکل پس از وقوع خطا فرمان قطع صادر شود خوب عمل نمی‌کنند. به همین دلیل است که استفاده از فیلترهای FIR به جای فیلترهای IIR ترجیح داده می‌شود. فیلترهای FIR معادل دیجیتالی فیلتر آنالوگ همسانساز با خط تأخیر[6] و یا فیلترهای عرضی هستند. استفاده از فیلترهای مبتنی بر تبدیل والش[7] که در ادامه تشریح شده‌اند، ساده‌تر و بهتر می‌باشد.

---

[1] . Non-Recursive
[2] . Fnite impulse response (FIR)
[3] . Feedback
[4] . Infinite impulse response (IIR)
[5] . Synthesis
[6] . Tapped delay line analog filter
[7] . Walsh transform

فیلترهای مبتنی بر تبدیل والش

تابع والش، که با Wal(k,t) نشان داده شده است مجموعه کاملی از توابع متعامد را تشکیل می‌دهد و شباهت‌هایی با سینوس و کسینوس داشته و به عبارت دیگر به عنوان نسخه مربع شکل آن‌ها به نظر می‌رسد. این تبدیل تنها مقدار ۱+ و ۱- به خود می‌گیرد و علامت آن تنها وقتی که t ضریبی از توان $\frac{1}{2}$ است تغییر می‌یابد.

یک تابع پیوسته با دوره تناوب T=1، توسط سری والش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(t)=\sum_{n=0}^{\infty} W_n Wal(n,t)$$

که در آن

$$W_n=\int_0^n f(t)Wal(n,t)$$

برای تابع f(t) که با N نمونه مانند ($X_1, X_2, ...,X_N$) در یک دوره تناوب مشخص شده است، استفاده از تبدیل والش (به صورت بالا) ممکن نیست. به هر حال، تبدیل والش گسسته و معکوس آن با استفاده از دو رابطه بالا مطابق آنچه در ادامه آمده خواهد بود:

$$X_n=(\frac{1}{N})\sum_{k=0}^{N-1} W_k Wal(n,\frac{k}{N})$$

$$W_k=\sum_{k=0}^{N-1} X_n Wal(n,\frac{k}{N})$$

برای k و n=0,1,2,...,(n-1).

زمان استقرار این فیلتر کمتر از ۲۰ میلی ثانیه است.

۴-۲-۷- حفاظت دیفرانسیل درصدی دیجیتال

دو جریان ورودی I_1 و I_2 که از ترانسفورماتورهای جریان بدست می‌آیند، در ابتدا لازم است که با عبور از مبدل، به ولتاژ تبدیل شوند. پس از این، سیگنال‌های ولتاژ که در شکل (۶-۷) با S_1 و S_2 نمایش داده شده‌اند به کمک مالتی‌پلکسر یک به یک انتخاب شده و نمونه‌برداری می‌شوند. به منظور امکان تشخیص بالاترین فرکانس موجود در سیگنال در فرآیند نمونه‌برداری، فرکانس نمونه‌برداری باید دو برابر بالاترین فرکانس باشد. به هر حال، فرکانس نمونه‌برداری به نوع میکروپروسسور مورد استفاده نیز وابسته است.

شرایط صدور فرمان قطع توسط رله دیفرانسیل درصدی در معادله زیر ارائه شده است:

$$|I_1 - I_2| \geq S_2 |I_1 + I_2|$$

در این رابطه، S ضریب بایاس است که مقدار آن بین ۰/۱۵ تا ۰/۶ تغییر می‌کند. I_1 و I_2 مؤلفه اصلی شکل موج سینوسی خالص جریان هستند. اما در عمل پس از وقوع خطا شکل موج جریان شامل مؤلفه اصلی و چندین مؤلفه هارمونیکی می‌باشد. بنابراین فیلتر کردن هارمونیک‌های جریان ضروری بوده و در غیر اینصورت مؤلفه‌های هارمونیکی موجود در جریان با مؤلفه اصلی تداخل پیدا می‌کنند. سیگنال‌های حاصل از عمل فیلترینگ در معادلات زیر نشان داده شده‌اند:

برای فرکانس اصلی:

$$|I_1 - I_2|_1 \geq S |I_1 + I_2|_1$$

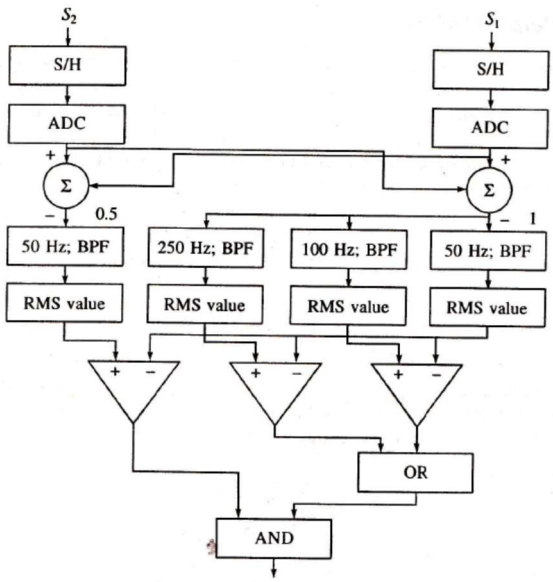
برای مؤلفه هارمونیکی دوم، که بر مبنای نتایجی که پیشتر اشاره شد مربوط به شرایطی است که جریان هجومی ناشی از اضافه ولتاژ وجود داشته باشد:

$$|I_1 - I_2|_2 \geq 0.16 |I_1 - I_2|_1$$

و برای مؤلفه هارمونیک پنجم:

$$|I_1 - I_2|_5 \geq 0.008 |I_1 + I_2|_5$$

در این روابط، ۱، ۲ و ۵ به ترتیب به مؤلفه‌های هارمونیکی اصلی، دوم و پنجم اشاره دارد.



شکل ۶-۷: حفاظت دیفرانسیل درصدی دیجیتال

تمرین:

۱. انواع خطاهایی که در ژنراتور سنکرون رخ می‌دهند کدام‌اند؟ طرح‌های حفاظتی که برای حفاظت ژنراتور سنکرون در مقابل این خطاها مورد استفاده قرار می‌گیرند را به طور مختصر مورد بحث قرار دهید.

۲. مزایای استفاده از طرح‌های حفاظتی مبتنی بر میکروپروسسور را توضیح دهید

۳. تئوری و اصول عملکرد طرح حفاظتی واحد مبتنی بر میکروپروسسور برای یک ژنراتور سنکرون را نام ببرید

۴. به کمک یک بلوک دیاگرام طرح حفاظتی مبتنی بر میکروپروسسور برای یک ژنراتور سنکرون بوسیله پایش جریان میدان را توضیح دهید.

۵. هنگامی که یک جریان نامتعادل ناشی از خطا و یا اغتشاشات خارجی در استاتور ایجاد می‌شود، چه مؤلفه هارمونیکی در مدار میدان القا می‌شود؟ در این روش چگونه خطای داخلی از خارجی را تشخیص می‌دهید.

۶. انواع مختلف خطا در ترانسفورماتور را به طور مختصر توضیح دهید. طرح‌های حفاظتی که برای مقابله با این نوع خطاها مورد استفاده قرار می‌گیرد را نام ببرید.

۷. به کمک یک دیاگرام، تئوری و اصول عملکرد طرح حفاظتی واحد (حفاظت دیفرانسیل درصدی) با استفاده از اجزای استاتیک برای حفاظت یک ترانسفورماتور را توضیح دهید

۸. برداشت خود از جریان هجومی مغناطیس کننده در یک ترانسفورماتور را بیان کنید؟ عواملی که جریان هجومی مغناطیس کننده به آن وابسته است را تشریح کنید

۹. تئوری و اصول عملکرد یک رله دیفرانسیل درصدی مبتنی بر میکروپروسسور برای حفاظت یک ترانسفورماتور را توضیح دهید.
۱۰. دلایل برتری فیلتر دیجیتال را به طور مختصر توضیح دهید. برداشت خود از فیلترهای بازگشتی و غیربازگشتی را بیان کنید.

۸- رله‌گذاری مبتنی بر فیبرنوری

۸-۱- مقدمه

کابل فیبرنوری یک واسط ساده به منظور تسهیل ارتباط منطقی رله به رله می‌باشد. فیبر نوری به واسطه ایمنی در مقابل تداخل الکتریکی ترجیح داده می‌شود. نرخ خطای بیت آن نیز بسیار کوچک و کمتر از $۱۰^{-۹}$ می‌باشد. در رله‌های مبتنی بر فیبر نوری ارتباط منطقی رله به رله از طریق اتصال مستقیم فیبرنوری انجام می‌شود. این روش مشکلات ناشی از افزایش پتانسیل زمین و مشکلات ناشی از اختلالات که به هنگام استفاده از کابل‌های فلزی به چشم می‌خورد را رفع می‌کند. در رله‌های فیبرنوری، نرخ انتقال داده بین رله‌ها بسیار سریع بوده و هرگونه تأخیر در انتقال داده در فرستنده-گیرنده های فیبرنوری و کابل‌های نوری تنها کمتر از کسری از میکروثانیه است. این تأخیر در انتقال داده در مقایسه با تأخیرهای متناظر در سایر رله‌ها قابل صرفنظر کردن است.

در ارتباطات مستقیم با استفاده از کابل فیبر نوری، یک فرستنده-گیرنده فیبر نوری در پایانه هر رله مورد استفاده قرار می‌گیرد. گیرنده فیبرنوری، سیگنال‌های رله دیجیتال را به سیگنال‌های نوری تبدیل می‌کند که از طریق کابل فیبر نوری ارسال می‌شود. استفاده از فرستنده-گیرنده و کابل نوری تک حالته[1] امکان انتقال تا فاصله ۹۰ کیلومتر را امکان‌پذیر

[1] . Single mode

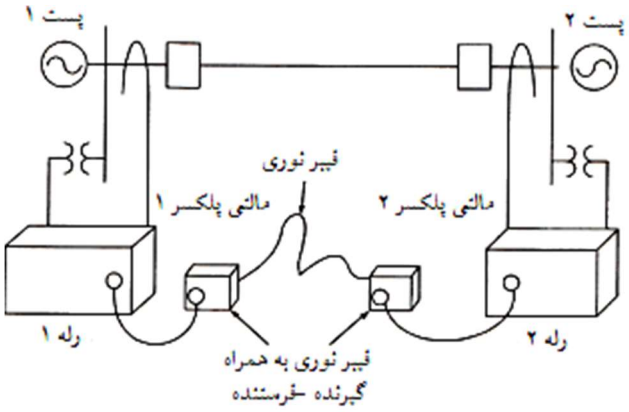
می‌سازد در حالیکه کابل نوری و فرستنده-گیرنده چند حالته[1] امکان انتقال سیگنال نوری به فاصله ۳ تا ۵ کیلومتر را امکان‌پذیر می‌سازد.

انتظار می‌رود با توسعه نسل جدید سیستم‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان فیبرنوری، کاربرد گسترده‌تر حفاظت بر مبنای امواج سیار با استفاده از ارتباطات مبتنی بر فیبرنوری در آینده نزدیک امکان‌پذیر شود.

۲-۸- ارتباطات منطقی دیجیتال رله به رله مبتنی بر فیبر نوری

اتصال مالتی‌پلکسر شبکه مخابرات با ارتباط منطقی بین رله‌ها از طریق یک کارت شبکه که مطابق شکل (۱-۸) در قفسه مالتی‌پلکسر قرار می‌گیرد، میسر می‌شود. ورودی ارتباطی سریال رله از طریق یک کابل فیبر نوری پوشش دار[2] مجهز به فرستنده-گیرنده فیبرنوری به کارت واسط مالتی‌پلکسر شبکه متصل می‌شود.

توپولوژی شبکه چندین گره ارتباطی دارد که در آن‌ها کانال‌ها وارد شده و یا قطع می‌شوند. همچنین این امکان وجود دارد که با ایجاد حلقه‌هایی بتوان مسیرهای جایگزینی فراهم نمود که به هنگام خرابی بخشی از شبکه و یا خروج از سرویس بخشی از آن به منظور تعمیرات، از این مسیرها استفاده نمود.



شکل ۱-۸: ارتباط منطقی دیجیتال رله به رله با استفاده از فیبر نوری

ارتباطات فیبر نوری به منظور ارتباط بین رله و مالتی‌پلکسر و جهت حذف اثر هر گونه تداخل الکتریکی ناشی از محیط پست توصیه می‌شود.

وظایف مختلف در نظر گرفته شده برای مالتی‌پلکسر شبکه در زیر با جزئیات آورده شده است:

i. بررسی وقوع خطا[1] بوسیله مالتی‌پلکسر انجام می‌شود.

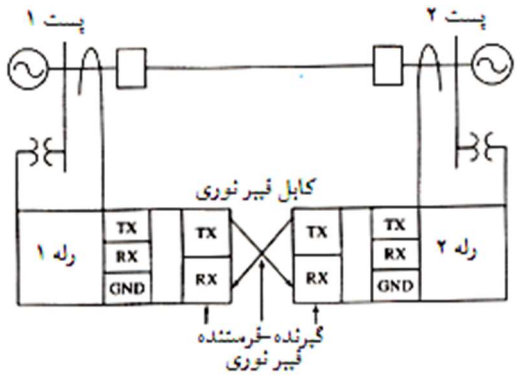
---

[1] . Multi-mode
[2] . Shielded

ii. مالتی پلکسر وظیفه آدرس‌دهی شبکه (کانال) و همزمان‌سازی را بر عهده دارد.

iii. هر زمان که بواسطه وقوع خرابی و یا اشتباه در داده، کانال با مشکل و قطعی مواجه شود، همزمان‌سازی مجدد سیگنال‌ها در مالتی‌پلکسر انجام می‌گیرد. عمل همزمان‌سازی مجدد توسط مالتی‌پلکسر بیش از چند میلی‌ثانیه طول نمی‌کشد.

iv. مالتی‌پلکسر شبکه وظیفه تشخیص خطا را نیز بر عهده دارد. این عمل ممکن است سبب تأخیر در انتقال داده شود و بر زمان پاسخ‌گویی منطقی رله اثرگذار باشد. شکل ۲-۸ اتصال سخت افزاری طرح مخابرات منطقی دیجیتال رله به رله مبتنی بر فیبر نوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸ اتصال سخت افزاری طرح مخابرات منطقی دیجیتال رله به رله مبتنی بر فیبر نوری

پرواضح است که فیبرهای نوری ساخته شده از رشته‌های نازک شیشه به عنوان هادی موج برای نور عمل می‌کنند. علاوه بر این، در مقابل تداخلات الکترومغناطیسی ایمن هستند. سیستم فرستنده پالس‌های الکتریکی را به پالس‌های نوری تبدیل می‌کند. سپس، پالس‌های نوری از طریق فیبر نوری ارسال شده و در ادامه در پایانه گیرنده رمزگشایی می‌شوند. در سمت گیرنده، پالس‌های نوری به پالس‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. روش‌های دیجیتال مدولاسیون پالس در تجهیزات پایانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کمیت‌های حفاظتی آنالوگ پس از نمونه‌برداری در قالب اطلاعات رمزنگاری شده، بوسیله مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال به پایانه‌های دور انتقال داده می‌شوند. در پایانه دور، اطلاعات پس از رمزگشایی با سیگنال استخراج شده محلی مقایسه می‌شوند.

---

[1] . Error checking

تمرین:

۱. امکان استفاده از ارتباط فیبرنوری برای حفاظت خط انتقال نیرو را توضیح دهید
۲. چه ویژگی‌هایی از کانال فیبرنوری سبب شده است که بتوان از آن به عنوان خطوط ارتباطی استفاده نمود؟
۳. طرح حفاظتی پایلوت مبتنی بر فیبر نوری را با حفاظت پایلوت که از سیم معمولی استفاده می‌کند مقایسه کنید.
۴. عملکرد طرح حفاظتی پایلوت با فیبر نوری را به کمک دیاگرام اتصال سخت افزاری توضیح دهید.
۵. نیازمندی‌ها و نقش تجهیزات مختلف در پایانه‌ها در یک طرح مخابرات منطقی دیجیتال رله به رله مبتنی بر فیبر نوری را توضیح دهید

۹- حفاظت ریزموج[1]

۹-۱- مقدمه

حفاظت ریزموج در حفاظت خطوط نیرو قابل استفاده می‌باشد. در این طرح حفاظتی، یک آنتن برپا شده و در مسیر خط دید نصب می‌شود. فاصله بین آنتن‌های نصب شده در یک خط دید معمولا در حدود ۹۰ کیلومتر حفظ می‌شود. این طرح کم و بیش شبیه به طرح پایلوت جریان حامل[2] می‌باشد به جز اینکه در این مورد، سیگنال‌ها از طریق همان خط نیرو منتقل نمی‌شوند. در طرح حفاظتی ریزموج ، یک فرستنده-گیرنده رادیویی دیجیتال نقطه به نقطه ارتباط مستقل بین دو ایستگاه را فراهم می‌کند. آنتن خط دید[3] به تولید و انتقال یک حامل موج در فضا با فرکانس بسیار بالا در محدوده ۹۰۰ تا ۶۰۰۰ مگاهرتز با ظرفیت نامی نسبتاً پایین کمک می‌کند.

---

[1] . Microwave
[2] . Carrier current
[3] . Line of sight antena

در این طرح، یک فرستنده-گیرنده رادیویی دیجیتال جهت اتصال به ورودی (درگاه) ارتباط سریال با نرخ حداکثر ۹۶۰۰ در ثانیه[1] مورد نیاز است. این طرح حفاظتی مبتنی بر ریزموج نیاز به خازن تزویج و تله موج ندارد.

ارتباط منطقی رله به رله بدون واحد تشخیص خطای رادیویی داخلی به خوبی کار می‌کند به دلیل اینکه در این حالت تنها دو تا سه میلی‌ثانیه به تأخیر کلی انتقال داده رله به رله افزوده می‌شود. ایستگاه رادیویی با تشخیص خطای داخلی ممکن است تأخیری به میزان ۶۰ میلی‌ثانیه و یا بیشتر به سیستم تحمیل کند. از آنجا که سرعت در بیشتر طرح‌های ارتباطی پایلوت الزامی است، بررسی مشخصات رادیویی به منظور سازگاری با مشخصه‌های تأخیر در داده در سیستم رادیویی امری ضروری می‌باشد.

۲-۹- پایلوت ریزموج

پایلوت ریزموج، یک سیستم رادیویی با فرکانس بسیار بالاست که در باند اختصاصی بالای ۹۰۰ مگاهرتز کار می‌کند. در این روش، تزویج و تله‌گذاری موج مورد نیاز نیست و بنابراین حذف می‌شود. سایر تجهیزات مورد نیاز و عملکرد آن‌ها در پایلوت ریزموج مشابه پایلوت حامل جریان است. تجهیزات آنتن خط دید نیز در این روش مورد نیاز است.

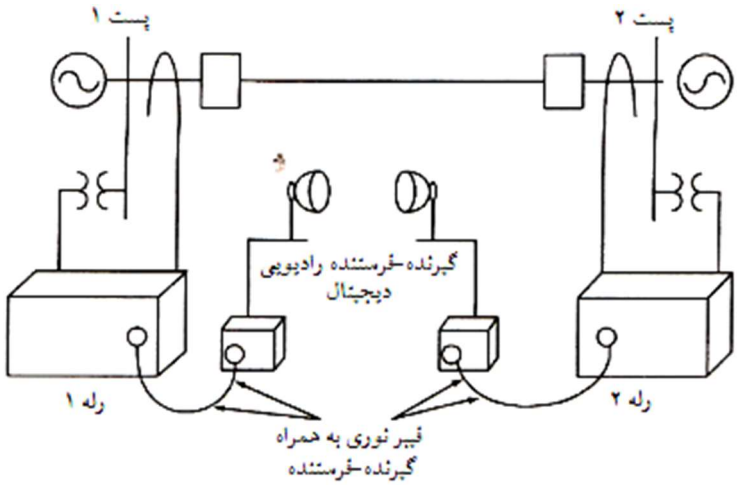
به هر حال به خاطر معایب خاص، اگر طرح حفاظت پایلوت سیمی و یا پایلوت حامل جریان قابل استفاده باشد، طرح حفاظتی ریزموج نباید استفاده شود. این معایب در ادامه آورده شده‌اند.

معایب پایلوت ریزموج

i. بواسطه وجود مدارات پیچیده و درگیر بودن پارامترهای متعدد و نیز پیاده‌سازی خدمات متعدد بر روی یک کانال ریزموج ، طرح پایلوت ریزموج کاملاً قابل اطمینان نیست.
ii. در مواردی که ایستگاه تکرارکننده مورد نیاز است، پیچیدگی شبکه بیش از پیش بر قابلیت اطمینان سیستم تأثیر منفی خواهد داشت.
iii. در برخی موارد در دسترس بودن سیگنال‌های ریزموج برای اهداف ارتباطاتی و مخابراتی مهم‌تر از استفاده از آن‌ها در طرح‌های حفاظتی است. در چنین شرایطی در صورت وقوع خطا، عدم دسترسی به سیگنال‌های ریزموج تأثیر منفی بر سیستم خواهد داشت.

نحوه اتصال در مخابرات منطقی دیجیتال رله به رله مستقیم در شکل (۱-۹) نشان داده شده است.

[1] . Baud



شکل ۹-۱- مخابرات منطقی دیجیتال رله به رله مستقیم بر مبنای ریزموج

رله‌گذاری مبتنی بر ریزموج نیز چندین مزیت دارد که در ادامه آورده شده است:

مزایای پایلوت ریزموج

i. شبکه رله‌های مبتنی بر ریزموج از خط انتقال نیرو مستقل است که در نتیجه امکان وقوع خطا در طول خط را منتفی می‌کند.

ii. وجود یک خطا بر روی خط حفاظت شده هیچ تداخلی با انتقال سیگنال قطع فرستاده شده از دور توسط رله مبتنی بر ریزموج ایجاد نمی‌کند.

iii. تجهیزاتی مشابه آنچه برای پایلوت حامل جریان استفاده می‌شود برای پایلوت ریزموج نیز قابل استفاده است.

۹-۳- کانال ریزموج

یک سیستم رادیویی مبتنی بر خط دید، که در یک محدوده فرکانسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عنوان یک کانال ریزموج شناخته می‌شود. این سیستم به یک خط مستقیم از یک آنتن به دیگری و از بالای معارض‌های موجود در مسیر نیازمند می‌باشد. فضای مورد نیاز برای این منظور حدود ۵۰ فوت می‌باشد. معارض‌های موجود در مسیر فاصله بین آنتن‌ها را بین ۳۰ تا ۹۰ کیلومتر محدود می‌کند. فاصله بین آنتن‌ها به توپولوژی زمین نیز وابسته است. ممکن است نصب یک یا تعداد بیشتری ایستگاه تکرارکننده به منظور ایجاد یک کانال طولانی‌تر ضروری باشد. به هر حال، هر ایستگاه تکرار کننده تعداد تجهیزات پایه و همچنین دکل آنتن را افزایش می‌دهد که به نوبه خود به افزایش هزینه کانال ریزموج منجر می‌شود.

برای رله‌های حفاظتی استفاده از منبع AC سیستم قدرت قابل قبول نمی‌باشد چون برای سیستم حفاظتی حتی یک لحظه قطع برق هم قابل تحمل نمی‌باشد. بنابراین استفاده از یک منبع تغذیه آماده به کار در قالب یک ژنراتور AC و یا

یک بانک باتری ضروری می‌باشد. این مسأله ممکن است در یک ایستگاه تکرار کننده که ممکن است بانک باتری مناسب در دسترس نباشد مشکلاتی را به همراه داشته باشد.

در یک ایستگاه ریزموج، امکان استفاده از تجهیزات آماده به کار که به هنگام خرابی در تجهیزات معمول به طور خودکار شروع به کار کند نیز پیش‌بینی شده است. فرکانس ریزموج عموماً به طور مستقیم و با استفاده از روش‌های متداول از جمله روش به اصطلاح تُن[1] مدوله می‌شود. تُن مورد استفاده یک ولتاژ تک فرکانس در محدوده صوتی و یا بالاتر از آن است. از آنجا که مدارات فیلتر در تُن با فرکانس فراتر از محدوده صوتی ثابت‌های زمانی کوتاه‌تری دارد، این نوع تُن ترجیح داده می‌شود.

۴-۹- قطع از راه دور

مزیت اصلی استفاده از حفاظت مبتنی بر ریزموج این است که از هرگونه تداخل سیگنال قطع از راه دور[2] با خطا جلوگیری می‌کند. در حفاظت مبتنی بر ریز موج، عملکرد اولین رله موجب انتقال سیگنال قطع به ترمینال دیگر می‌شود و بنابراین حذف بخشی از تأخیر زمانی در عملکرد متوالی رله‌ها در سایر پایانه‌ها را به همراه خواهد داشت. اگر هر پایانه طوری تنظیم شود که به هر پایانه دیگر یک سیگنال قطع ارسال کند، قطع همزمان و با سرعت بسیار بالا در تمام پایانه-ها امکان‌پذیر می‌شود. رله‌های نصب شده در نقاط دور ممکن است با تأخیر ۲ تا ۳ سیکل فرمان قطع صادر کنند.

این نوع از رله‌گذاری در مواردی که قطع از راه دور برای کاربردهای چند پایانه مورد نیاز است دارای بیشترین کاربرد می‌باشد.

تمرین

۱. چگونه استفاده از ریزموج به حفاظت سیستم قدرت کمک می‌کند؟
۲. ارتباطات منطقی دیجیتال مستقیم رله به رله توسط ریزموج را شرح دهید. چگونه این روش به حفاظت سیستم قدرت کمک می‌کند.
۳. مزایا و معایب طرح رله‌گذاری با استفاده از ریزموج را توضیح دهید.
۴. توضیحاتی در رابطه با موارد زیر بنویسید:
   - کانال ریزموج
   - قطع از راه دور

[1] . Tone
[2] . Remote tripping signal

۱۰- خرابی‌های غیر قابل تشخیص در سیستم قدرت

۱-۱۰-مقدمه

خرابی‌هایی که به طور تصادفی و بدون هیچ‌گونه تغییری در وضعیت شبکه سیستم قدرت اتفاق می‌افتد، به عنوان خرابی‌های پنهان در سیستم قدرت الکتریکی شناخته می‌شوند. هر چند این نوع خرابی به ندرت اتفاق می‌افتد اما اگر سیستم قدرت تحت استرس باشد ممکن است تأثیرات اسفناکی بر شبکه قدرت داشته باشد چون خرابی‌های پنهان غیر قابل پیش بینی بوده و می‌تواند در هر تجهیزی که در هر نقطه‌ای از شبکه قرار گرفته است به وقوع بپیوندد.

دلایل چنین خرابی‌های غیر منتظره‌ای در مکانیسم‌های قدرت، باعث نگرانی مهندسین قدرت در سال‌های اخیر بوده است. در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته و رقابتی کنونی، شرکت‌های برق ملزم به بهبود توانایی تولید و بازده هستند در حالیکه درجه قابلیت اطمینان آن‌ها نیز باید افزایش یابد. این وضعیت تنها در یک سیستم کنترل و حفاظت پر بازده، خبره و اختصاصی امکان‌پذیر است. از آنجا که خرابی‌های غیر منتظره در شبکه قدرت اجتناب ناپذیر هستند، مهندسین قدرت و محققین هنوز نیاز دارند که پاسخی برای پرسش‌های زیر پیدا کنند:

i. چه عواملی موجب وقوع خرابی‌های ناگهانی[1] می‌شوند؟
ii. آیا هیچ اقدام دفاعی برای کاهش احتمال چنین خرابی‌هایی در دسترس است؟
iii. آیا مکانیزمی که بتواند محدوده گسترش این خرابی‌ها را کاهش داده و یا محدود کند وجود دارد؟

یکی از اقدامات دفاعی که ممکن است بتواند در مواجهه با خرابی‌های ناگهانی استفاده شود مقاوم[2] نمودن سیستم قدرت با استفاده از طرح‌های حفاظتی مدرن مبتنی بر کامپیوتر و اقتباس ایده‌های نظری جدیدتر در زمینه حفاظت می‌باشد. خطوط ارتباطاتی، مانیتورینگ بهبود یافته از طریق اندازه‌گیری فازور همزمان شده و حفاظت تطبیقی نقش کلیدی در چنین طرح‌های دفاعی و پیشگیرانه به عهده دارند.

۲-۱۰-خرابی‌های پنهان در سیستم قدرت

خرابی و یا خروج برنامه‌ریزی شده و یا بدون برنامه ژنراتورهای اصلی و دیگر تجهیزات انتقال که تا حد بالایی بارگیری شده‌اند، به شبکه سیستم قدرت فشار می‌آورد. شرایط ناشی از این فشارها احتمال وقوع خرابی‌های ناگهانی را افزایش می‌دهد. در سال‌های اخیر وقوع خرابی‌های غیر منتظره در شبکه افزایش چشم‌گیری داشته است. در ابتدا، واحدهای تولیدی به هم پیوسته نبودند. با مطرح شدن مبحث ظرفیت ذخیره، واحدهای تولیدی ایزوله[3] نیز توانایی تأمین بار مورد نیاز در ناحیه‌ای که به آن تعلق داشتند را دارا شدند. به هر حال، امروزه به هم پیوستگی ایستگاه‌های تولیدی در شبکه یک راهکار متعارف به منظور بهینه‌سازی دسترسی به توان الکتریکی شده است.

مزیت اصلی یک شبکه به هم پیوسته این است که می‌تواند در مواقع اضطراری توان اضافی که به عنوان ظرفیت ذخیره در نظر گرفته شده است را به سیستم‌های همسایه انتقال دهد. وظایف مربوط به تنظیم فرکانس بار نیز می‌تواند به طور مساوی بین تمام ژنراتورهای شبکه به هم پیوسته تقسیم شود که این امر به نوبه خود بار تحمیلی هر ناحیه را کاهش می‌دهد.

خرابی‌های پنهان خرابی‌هایی هستند که به هنگام وقوعشان قابل تشخیص نیستند چون تا زمانی که سیستم در شرایط عادی می‌باشد هیچ‌گونه مشکلی برای سیستم به همراه ندارند. دلایل خرابی‌های پنهان اجتناب ناپذیر در سیستم قدرت به شرح زیر هستند:

۱. شبکه قدرت ممکن است بواسطه رخدادهای برنامه ریزی نشده نظیر آتش‌سوزی، سیل، طوفان، خطا و غیره تحت استرس قرار گیرد. این مسأله باعث می‌شود، ژنراتورها، خطوط نیرو و ترانسفورماتورها به طور جدی در آستانه خروج از محدوده عملکرد ایمن قرار گیرند.

---
[1] . Catasrophic Failure
[2] . Robust
[3] . Isolated station

۲. کاربران سیستم ممکن است مرتکب خطاهای انسانی شوند که از آن جمله می‌توان به خطا در اندازه‌گیری زمان-واقعی[1]، ارزیابی اشتباه از شرایط سیستم و عدم رعایت حاشیه امنیت کافی و کارآمد اشاره کرد.
۳. اگر طرح‌های حفاظتی خطا را در زمان مقتضی به خوبی رفع نکنند، این خطا ممکن است شروع عکس‌العمل زنجیره‌وار سایر بخش‌ها را به دنبال داشته باشد.
۴. شروع خطاهای ابتدایی[2] ممکن است منجر به گسترش ناپایداری شود که این امر به نوبه خود تضعیف بیش از پیش سیستم را به همراه خواهد داشت.
۵. تقسیم شبکه به زیر بخش‌هایی که دچار عدم تعادل بار و تولید باشند در نهایت ممکن است فروپاشی در برخی نواحی را به همراه داشته باشد.
۶. در صورت عدم تنظیم مناسب سیستم‌های حفاظتی، خرابی در سیستم اجتناب ناپذیر است.
۷. خرابی یک جزء از سیستم بواسطه کهنگی، پارگی یا آسیب ناشی از شرایط نامناسب و خشن محیطی نیز ممکن است به خرابی در شبکه منجر شود.
۸. مداخله انسانی غیر مجاز و یا نادرست ممکن است دلیل دیگری برای خرابی در سیستم قدرت باشد.

۳-۱۰-اقدامات جبرانی برای پیشگیری از خطاهای پنهانی

خطاهای پنهان که در بیشتر موارد اجتناب‌ناپذیر هستند، نقش مهمی در خرابی‌های ناگهانی بازی می‌کنند. تنها راه مواجهه با این خرابی‌ها، اتخاذ اقدامات اصلاحی و در نظر گرفتن اقدامات جبرانی برای کاهش احتمال وقوع خطاهای پنهان و جلوگیری از گسترش آن‌ها در سیستم می‌باشد.

سه راهکار اشاره شده در زیر می‌تواند به عنوان اقدامات جبرانی برای جلوگیری از خطاهای پنهان اتخاذ شود:

۱- حفاظت تطبیقی
۲- کنترل و پایش خطاهای پنهان
۳- سیستم‌های حفاظتی ویژه

حفاظت تطبیقی شامل ارزیابی از وضعیت سیستم قدرت و سپس تنظیم خودکار سیستم‌های حفاظتی به منظور اطمینان از صحت تنظیمات برای شرایط حکمفرما بر سیستم قدرت می‌باشد. مفاهیم حفاظت تطبیقی به طور عمده در

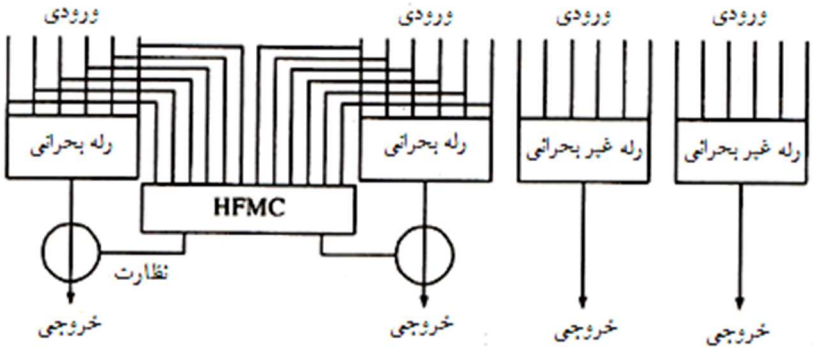
[1] . Real-time
[2] . Incipient Failures

رله‌های دیجیتال پیاده‌سازی می‌شود. تنظیمات رله‌ها در طرح‌های حفاظتی دیجیتال خیلی نزدیک به تنظیمات مقتضی و مطلوب است و این مسأله به جلوگیری از خطاهای پنهان ناشی از تنظیمات نادرست کمک می‌کند.

نمونه‌ای از طرح‌های حفاظتی تطبیقی حفاظت خروج از سنکرونیزم تطبیقی است. این رله‌ها برای تشخیص شرایطی که گروهی از ماشین‌ها و یا یک یا تعدادی از بخش‌های سیستم قدرت در شرف خروج از سنکرونیزم (همزمانی) با سایر بخش‌های سیستم هستند، به کار برده می‌شوند. این وظیفه رله است که با تشخیص شرایط ناهمزمانی، ماشین‌های متأثر از این مسأله را قبل از وقوع خطای ناگهانی در تمام شبکه، جدا کند.

سیستم کنترل و پایش خطای پنهان[1] (HFMC) در شکل (۱۰-۱) نشان داده شده است. در این روش، دو رله اول از دیدگاه خطای غیرمنتظره، بحرانی هستند و سیگنال‌های ورودی تغذیه کننده HFMC نیز از همین رله‌ها گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که سیگنال‌های ورودی HFMC و رله‌های بحرانی مشترک هستند که سهولت شبیه‌سازی عملکرد رله به عنوان رله پشتیبان را به همراه دارد. خروجی سیستم HFMC برای نظارت بر خروجی رله‌های بحرانی استفاده می‌شود.

بر مبنای همین قاعده (شکل ۱۰-۱)، اگر در هر محل بحرانی، سه سیستم حفاظتی بر روی یک خط بحرانی در هر محل بحرانی مورد استفاده قرار گیرند، حالت عادی عملکرد هر کدام از رله‌ها صدور فرمان قطع بریکر می‌باشد. این حالت مشابه اعمال تابع OR به خروجی هر سه رله می‌باشد. به منظور تعیین حالت اضطراری سیستم قدرت، منطق سیستم حفاظتی می‌تواند به AND و یا منطق ۲ از ۳ تغییر پیدا کند. این تغییر منطق می‌تواند اطمینان دهد که حداقل دو رله وقوع خطا را تأیید می‌کنند. این مسأله قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد و احتمال عملکرد اشتباه ناشی از خطای پنهان را به شدت کاهش می‌دهد.



شکل ۱-۱۰: اصول پایه مورد استفاده برای نظارت بر خطاهای پنهان در یک سیستم حفاظتی

[1] . Hidden failures monitoring and control (HFMC)

سیستم‌های حفاظتی خاص (SPS) به سیستم‌های حفاظتی اشاره دارد که عملکردهای کنترلی و حفاظتی را راه‌اندازی می‌کنند و سبب کاهش احتمال تبدیل اغتشاش به خرابی گسترده می‌شود. جداول ذخیره شده در سیستم‌های SPS نیازهای شرایط متغیر سیستم را برآورده می‌کنند. در یک شبکه ارتباطات، اطلاعات ناظر بر وضعیت مدارشکن‌ها و کلیدهای مهم، بار سیستم، بار عبوری از تأسیسات انتقال کلیدی و غیره به SPS برده می‌شوند. یک جدول مراجعه‌ای[1] پاسخ مناسب برای شرایط حاکم بر سیستم را تعیین می‌کند.

۴-۱۰-یکپارچگی زیرساخت‌های ارتباطی

ارتباطات نقش مهمی در تمامی استراتژی‌های دفاعی بازی می‌کنند. به هر حال، به منظور جلوگیری از وابستگی کامل شبکه قدرت به سیستم مخابرات، وجود یک سیستم حفاظتی جایگزین که از سیستم مخابرات استفاده نمی‌کند ضروری است.

در حفاظت اولیه، کانال‌های مخابراتی مورد استفاده عمدتاً اختصاصی هستند. حفاظت اولیه سریع‌ترین عملکرد را داراست و معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ میلی‌ثانیه پس از وقوع خطا عمل می‌کند.

طرح‌های حفاظتی پشتیبان کندتر از سیستم‌های حفاظت اولیه می‌باشند. بیشتر توابع پشتیبان متداول از خطوط مخابراتی استفاده نمی‌کنند. توابع حفاظتی دیستانس و اضافه جریان در شبکه دسترسی[2] (برد) کافی، دقیق و سریع را فراهم می‌آورند. برخی سیستم‌های حفاظت تطبیقی نیازی به داده‌های ورودی از سایر بخش‌های خط انتقال ندارند. اما در بیشتر سیستم‌های حفاظت تطبیقی، داده‌های ورودی از پست‌های دور مورد نیاز می‌باشند. سیستم‌های حفاظت تطبیقی نیازمند برخی داده‌ها از مرکز کنترل سیستم و یا برخی پست‌های دور می‌باشند.

سیستم‌های حفاظت خاص به منظور عدم از کار افتادن بواسطه وقوع خرابی، (وابستگی به حالت تک خطا) دارای مسیرهای داده جایگزین می‌باشند. همچنین این سیستم‌ها نیازمند داده از سایت‌های دور می‌باشند. سیستم‌های پایش خطای پنهان نیازی به داده از سایر پست‌ها نمی‌باشند.

مهندسین سیستم قدرت می‌توانند یکی از سیستم‌های مخابراتی زیر را انتخاب کنند:

i. حامل خط نیرو (Power Line Carrier)
ii. سیم‌های پایلوت
iii. ریزموج‌ها
iv. مدارهای تلفن اجاره‌ای

[1] . Table look-up
[2] . Reach

۷. خطوط فیبر نوری

تمامی سیستم‌های مخابراتی بالا در سیستم‌های حفاظتی به منظور جلوگیری از خرابی‌های ناگهانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تمامی موارد خرابی، امنیت کانال مخابراتی باید بالاترین اولویت را داشته باشد. تحت هر شرایط استرس در شبکه، خرابی در هر کدام از خطوط نباید منجر به خرابی در هیچ خط دیگری شود. همچنین، حفظ امنیت و سلامت خطوط مخابراتی در مقابل هر گونه مداخله هکرها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین به کار بردن رله‌های مرتبط با کامپیوتر، اندازه‌گیرهای فازوری همزمان شده[1] و حفاظت تطبیقی می‌تواند به گسترش سیستم‌های حفاظتی مناسب برای مدیریت استرس‌ها کمک کند و احتمال وقوع خرابی‌های ناگهانی را کاهش می‌دهد.

تمرین

۱. خرابی‌های ناگهانی چه هستند؟
۲. خطاهای پنهان در سیستم قدرت را توضیح دهید.
۳. دلایل خطاهای پنهان اجتناب ناپذیر را بیان کنید.
۴. برخی اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از خطاهای پنهان را توضیح دهید.
۵. در این رابطه که چگونه یکپارچگی زیرساخت‌های سیستم مخابرات به جلوگیری از خطاهای پنهان کمک می‌کند توضیح دهید.

[1] . Synchronised phasor measurement

۱۱- حفاظت منبع تغذیه[1]

۱۱-۱-مقدمه

خرابی‌های سیستم تغذیه، تولید صنعتی را متوقف کرده و زیان‌های اقتصادی به همراه خواهد داشت. عملکرد موازی سیستم‌های تولید نیروی الکتریکی متوسط و کوچک از این جهت که می‌تواند به جلوگیری از طولانی شدن قطع سیستم تأمین انرژی الکتریکی اصلی کمک کنند، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. علاوه بر این، در نواحی صنعتی، نیاز است واحدهای نیروگاهی مستقل و خصوصی[2] به عنوان منبع انرژی جایگزین به منظور تأمین اختلاف بین توان درخواستی مورد نیاز و انرژی تأمین شده از شبکه قدرت نصب شوند. همچنین واحدهای تولید همزمان برق و حرارت[3] به عنوان منابع انرژی جایگزین می‌توانند استفاده شوند.

---

[1] . Mains protection
[2] . Captive power plant
[3] . Combined heat and power (CHP)

هنگام وقوع یک خطا در شبکه، مدارشکن میانی[1] باید به سرعت عمل کند و این بدان معنی است که بخش شامل خطا را به طور خودکار از سیستم تولید نیرو جدا کند. جداسازی تغذیه به معنای باز کردن مدارشکن‌های خطوط ارتباطی است که سیستم نیروی مورد نظر را به شبکه سراسری متصل می‌کند. در برخی موارد، مدارشکن ژنراتور ممکن است با هدف جداسازی به کار برده شود. در فرآیند جداسازی، تمرکز اصلی بر روی اندازه‌گیری موج[2] و ارزیابی نرخ تغییر فرکانس (df/dt) است.

قبل از اینکه اقدامات پیشگیرانه‌ای به منظور سهولت تشخیص زودهنگام خطاهای اولیه انجام شود نیاز است پارامترهایی که در ادامه آمده است مطالعه شود:

- تشخیص منابع به شدت تحت استرس که ممکن است دچار خطا شوند.
- تعیین آن دسته از کلیدزنی‌های تغذیه که ممکن است اثرات خطرناکی بر هر دو طرف منبع و شبکه داشته باشند.
- نیاز به حفاظت بخش‌های معیوب
- تعیین خطاهای منحصر به فرد[3] در سیستم
- آخرین طرح‌های حفاظتی متداول
- تعیین اینکه اولیت با کدام است: حفاظت سیستم یا پیوستگی تغذیه
- ضرورت اقدامات حفاظتی اضافی

مدارشکن میانی به منظور حذف احتمال هر گونه خطای خارجی باز نگه داشته می‌شود. این اقدام مشترکان را از تضعیف و یا قطعی ولتاژ محافظت می‌کند.

۲-۱۱-حفاظت از دست دادن تغذیه[4]

بررسی‌های دوره‌ای[5] و یا تشخیص یک خطای زمین در شبکه، جداسازی همزمان تمامی تأمین کنندگان توان خصوصی و نیروگاه‌های مستقل از شبکه را ضروری می‌سازد. جداسازی نیز به نوبه خود نیازمند هماهنگی و برنامه‌ریزی صحیح می‌باشد در غیر اینصورت وصل مجدد بخش معیوب می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در چنین شرایطی، امکان از دست رفتن همزمانی در نقطه جداسازی وجود دارد که بستن مدارشکن را با ریسک همراه می‌سازد.

---

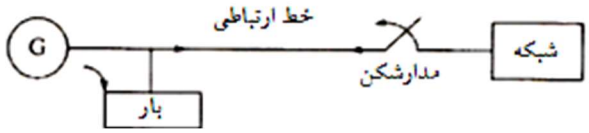
[1] . Inter-tie
[2] . Surge
[3] . Individual
[4] . Loss of mains protection
[5] . Routine cheking

دلیل دیگر برای حفاظت از دست دادن تغذیه، کوتاه کردن زمان وقفه در تغذیه بوسیله وصل مجدد خودکار[1] است که می‌تواند فاز معیوب را پس از رفع خطا به طور مجدد وصل کند. به هر حال، قوس الکتریکی که در زمان اتصال کوتاه ایجاد می‌شود ادامه می‌یابد و عایق را تضعیف می‌کند. خرابی در عایق نیز به نوبه خود سبب حفاظت از دست دادن بار می‌شود.

اثرات ناشی از یک فیوز سوخته و یا هادی شکسته می‌تواند دلیل یک خرابی در هادی تک فاز باشد. حتی بازیابی ولتاژ ناهمفاز[2] ژنراتورهایی که به طور موازی کار می‌کنند را نیز به خطر می‌اندازد. به طور عمده، حفاظت اضافه جریان کارآمد و مؤثر می‌شود و منجر به جداسازی بخش خروجی معیوب درست پس از وقوع خطا می‌شود. جداسازی بخش معیوب به بازیابی ولتاژ خط کمک می‌کند. در این حالت ولتاژ تغذیه و ولتاژ ژنراتور دقیقاً مخالف یکدیگر قرار می‌گیرند. در صورتی که دو ولتاژ در زمان جداسازی همزمان نباشند پدیده‌های گذرا بوجود می‌آیند. در چنین شرایطی، تغذیه و ژنراتور به شدت تحت استرس قرار می‌گیرند.

۳-۱۱-اثرات پس از جداسازی تغذیه

تغذیه می‌تواند بدون تغییر ولتاژ سیستم جدا شود به این معنی که جداسازی تغذیه قبل از تغییر در ولتاژ اتفاق می‌افتد. این امر بواسطه وجود یک بار متغیر در پایانه ژنراتور مطابق شکل (۱-۱۱) امکان‌پذیر است. مدار شکن خط ارتباطی، نیروگاه مستقل را از شبکه جدا می‌کند. در این حالت، بار باقیمانده در سمت ژنراتور می‌ماند و ژنراتور به تأمین توان مورد نیاز بار ادامه می‌دهد.



شکل ۱-۱۱: جداسازی پس از کلیدزنی دستی

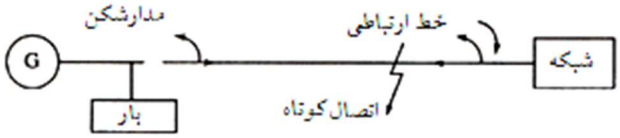
اگر در طی فرآیند جداسازی بار اکتیو افزایش یابد، سرعت ژنراتور کاهش می‌یابد. همین طور اگر یک کاهش در توان اکتیو مورد نیاز سیستم جدا شده بوقوع بپیوندد، سرعت ژنراتور افزایش یافته که به نوبه خود افزایش فرکانس را در بر خواهد داشت.

حال اگر در حین جداسازی، افزایشی در توان راکتیو مورد نیاز بار ایجاد شود، ولتاژ پایانه ژنراتور کاهش می‌یابد. در مقابل، اگر کاهشی در توان راکتیو مورد نیاز رخ دهد، ولتاژ پایانه افزایش می‌یابد.

---

[1] . Auto-reclosing
[2] . Out of phase

در صورت وقوع یک اتصال کوتاه با و یا بدون وصل مجدد خودکار، ولتاژ با تغییر مواجه خواهد شد. شکل‌گیری یک سیستم جداشده در اثر وقوع یک اتصال کوتاه و سیستم وصل مجدد خودکار در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است. در اینجا گذرایی ژنراتور و مجموعه راه‌انداز آن نتیجه وقوع یک اتصال کوتاه است که در پی آن خطا به سرعت رفع شده است.



شکل ۱۱-۲: جداسازی پس از وقوع اتصال کوتاه و وصل مجدد خودکار

با باز شدن مدار شکن، خرابی در تغذیه وارد مرحله دومی می‌شود که در آن، بخش معیوب خط از ژنراتور جدا شده و بار باقیمانده را تشکیل می‌دهد، پس از آن بازیابی ولتاژ انجام می‌شود.

۱۱-۴-جداسازی تغذیه

جداسازی تغذیه ممکن است به چند عامل از جمله تغییرات ولتاژ، نامتعادلی ولتاژ، شارش توان معکوس[1]، تغییر فرکانس، نرخ تغییر فرکانس، تغییر بار و غیره بستگی داشته باشد. این عوامل در ادامه با جزییات بیشتر مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۱۱-۴-۱- پایش ولتاژ

مناسب‌ترین معیار برای جداسازی، اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ است و این امر از آنجا ناشی می‌شود که ولتاژ در تمام نقاط اندازه‌گیری یکسان فرض می‌شود. با استفاده از معیار اندازه‌گیری ولتاژ، حتی امکان پایش هر فیدر در یک شبکه پیچیده و دارای شاخه‌های متعدد وجود خواهد داشت.

اگر هر نشانه‌ای از اضافه ولتاژ و یا کاهش ولتاژ در نقطه جداسازی وجود داشته باشد، به منظور حفظ ایمنی مشترکین و یا سیستم، جداسازی ضرورت پیدا می‌کند. موتور تحت باری که جریانی بیش از حد معمول مصرف می‌کند نمونه‌ای از شرایطی است که نیاز به جداسازی می‌باشد. اگر به هر دلیلی کاهشی در ولتاژ تغذیه رخ دهد، اضافه بار حرارتی رخ خواهد داد.

نامتعادلی ولتاژ نیز می‌تواند معیاری برای جداسازی باشد. نامتعادلی ولتاژ را می‌توان با ارزیابی مؤلفه‌های متقارن زیر بررسی نمود:

- ولتاژ توالی فاز مثبت
- ولتاژ توالی فاز منفی

[1] . Reverse power flow

- ولتاژ توالی فاز صفر

انحراف از فازور ولتاژ اصلی هنگام وقوع یک خطای تکفاز و یا دو فاز اتفاق می‌افتد. این مسأله با افزایش دامنه توالی فاز منفی و افت ولتاژ توالی فاز مثبت بازتاب پیدا می‌کند. توالی فاز صفر نیز اطلاعاتی در رابطه با خطای زمین در سیستم‌های ایزوله شده و یا جبران شده بدست می‌دهد.

۱۱-۴-۲- پایش توان معکوس

روش دیگر حفاظت، پایش شارش توان معکوس می‌باشد. در این روش، جهت شارش انرژی در نقطه اتصال تغذیه پایش می‌شود. تنها پیش شرط در این روش این است که در شرایط کارکرد عادی، ورود انرژی مجاز می‌باشد. بنابراین اگر ژنراتور ما در حین خطا مشترکان خارجی را تغذیه کند، کلید تزویج باید عمل کند.

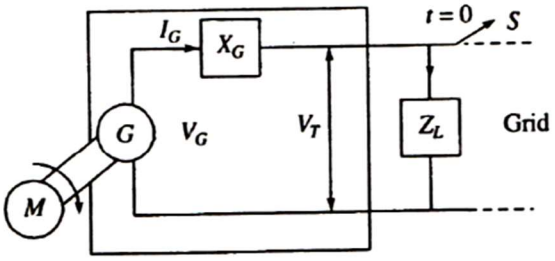
۱۱-۴-۳- پایش فرکانس

اگر بار ژنراتور افزایش پیدا کند، سرعت ژنراتور و فرکانس سیستم کاهش می‌یابند. بنابراین خطا در منبع تغذیه با نظارت بر فرکانس سیستم قابل تشخیص است. در این صورت، عناصر اضافی نظارت بر فرکانس به منظور تحقق طرح حذف بار مورد نیاز است. در برخی شرایط، فرکانس تا حدی تغییر می‌کند که حدود مطلق[1] را نقض میکند. اما اگر فرکانس وجود نداشته باشد، چه پارامتری باید اندازه‌گیری شود؟ در چنین شرایطی، تشخیص نرخ تغییر فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. رله df/dt تمایل به تغییر در فرکانس را تحلیل می‌کند.

۱۱-۴-۴- پایش موج بردار[2] ولتاژ

دامنه موج بردار بوسیله تغییر بار اکتیو در ژنراتور در زمان خرابی در تغذیه تعریف می‌شود. رله موج بردار برای مدیریت تغییرات بزرگ در بارهای اکتیو مناسب است چون جداسازی سریع و مطمئن را تضمین می‌کند. فرض کنید که نیروی یک موتور صرف چرخش یک ژنراتور شود. همچنین فرض کنید که بار Z_L به عنوان مصرف‌کننده در نظر گرفته شود. در اینصورت مصرف کننده Z_L هم از شبکه و هم از ژنراتور متصل به آن توان دریافت می‌کند. این عمل در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است.

[1] . Absolute limit
[2] . Vector surge



شکل ۳-۱۱: دیاگرام مداری شبیه‌سازی

در این شکل:

V_T: ولتاژ پایانه ژنراتور

V_G: ولتاژ داخلی ژنراتور

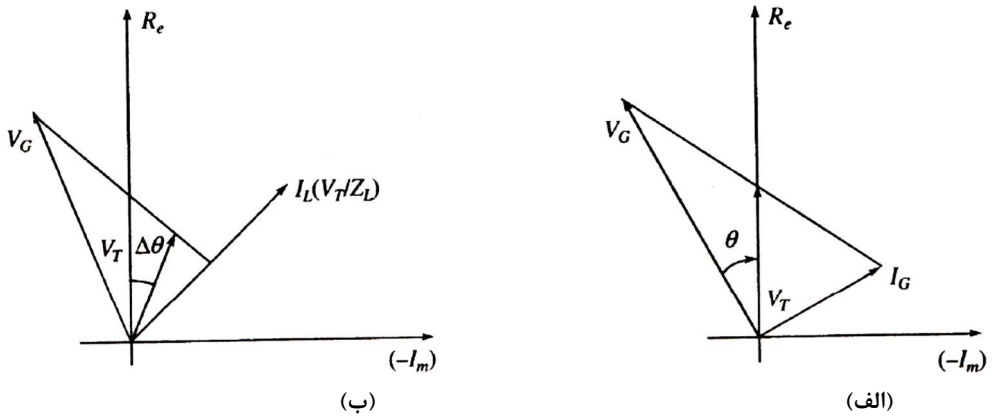
X_G: راکتانس ژنراتور

Z_L: بار مصرف کننده‌های متصل

Θ: زاویه جابجایی روتور، زاویه بین V_T و V_G.

بنابراین، پیش از جداسازی، بخشی از توان مورد نیاز Z_L از شبکه و بخشی از آن توسط ژنراتور متصل به آن تأمین می‌شود. به عبارت دیگر، هر دو منبع ولتاژ که عبارتند از ژنراتور مستقل جدا از شبکه یا ژنراتور آماده به کار و نیز تغذیه شبکه برای تأمین بار Z_L در دسترس هستند. در مواردی که خرابی در تغذیه پیش می‌آید و یا در وصل مجدد خودکار، ژنراتور به طور ناگهانی بار بسیار زیادی را تغذیه می‌کند. به عبارت دیگر، اگر به عنوان مثال در لحظه ($t>0$) ولتاژ شبکه دچار وقفه‌ای شود، توانی که توسط شبکه تأمین می‌شد به طور ناگهانی توسط ژنراتور تأمین خواهد شد بنابراین یک بار اضافی به ژنراتور تحمیل می‌شود.

به هر حال، بواسطه وجود اینرسی، سرعت روتور به طور ناگهانی تغییر نمی‌کند. زاویه جابجایی روتور Θ بواسطه تغییر جریان از I_G به I_L دچار تغییر می‌شود. در همین زمان، زاویه فاز ولتاژ پایانه نیز تغییر می‌کند. شکل (۴-۱۱)-الف دیاگرام برداری قبل از جداسازی در لحظه ($t<0$) و شکل (۴-۱۱)ب دیاگرام برداری پس از جداسازی برای لحظه ($t>0$) را نشان می‌دهد. زاویه جابجایی بین روتور و استاتور به گشتاور محرک مکانیکی شفت ژنراتور وابسته است. توان مکانیکی شفت توسط توان الکتریکی تزریقی به شبکه متعادل می‌شود و در نتیجه سرعت سنکرون را ثابت حفظ می‌کند. تغییر زاویه بسیار سریع اتفاق می‌افتد. تأثیر دیگر تغییر بار، افت سرعت است که بواسطه اثر اینرسی، پس از مدت زمانی به یک مقدار قابل اندازه‌گیری می‌رسد. علامت منفی (-) قبل از I_m در دیاگرام برداری نشانگر جهت مخالف جریان I_G می‌باشد.

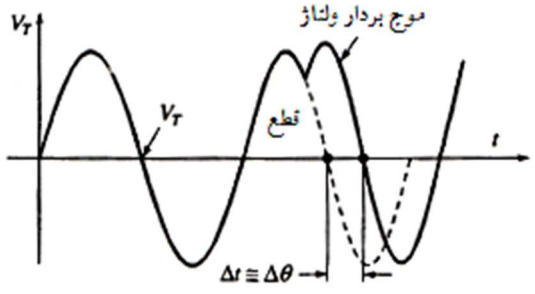


شکل ۴-۱۱: الف) دیاگرام فازوری قبل از جداسازی ب) دیاگرام فازوری پس از جداسازی

نوسان‌نگاری ولتاژ پایانه ژنراتور هنگامی که تغذیه شبکه جدا می‌شود در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. در نوسان‌نگاری نشان داده شده مشاهده می‌شود که ولتاژ پایانه ژنراتور V_T به یک مقدار لحظه‌ای متفاوت پرش می‌کند. هنگامی که ولتاژ به مقدار دیگری پرش می‌کند تغییر در مقدار فاز تحت عنوان موج ولتاژ[1] و یا موج بردار[2] شناخته می‌شود.

۵-۴-۱۱- پایش تغییر در بار

پایش تغییر در بار، یک بخش حیاتی از سیستم قدرت است. یک حذف بار الکتریکی ناگهانی از ژنراتور سبب افزایش غیر مجاز سرعت توربین می‌شود. حفاظت تغذیه تأثیر مستقیمی بر تنظیم (رگولاسیون) ژنراتور دارد و رله قدرت بخار را در مواردی که نیاز به حفاظت است کاهش می‌دهد. در این روش، بار با اندازه‌گیری سه مقدار متفاوت ولتاژ و جریان از هر فاز اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵-۱۱: تغییر در موج بردار

[1] . voltage surge
[2] . vector surge

۶-۴-۱۱- معیار ترکیبی

به منظور حفاظت تغذیه و جداسازی آن، امکان به کارگیری ترکیبی از معیارهای مختلف که پیش‌تر مورد بحث قرار گرفت وجود دارد. به عنوان مثال، یک اتصال کوتاه و یا بار خروجی بیش از حد، نشانه‌ای از شرایط یک اضافه جریان و یا کاهش ولتاژ است. در این مورد، یک رله اضافه جریان که دارای چندین مشخصه زمان- جریان معکوس است مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن مشخصه‌ها توسط رله کاهش ولتاژ انتخاب می‌شود. اگر در جریانی بیش از مقدار تحریک[1]، ولتاژ تغذیه کاهش یابد، به عنوان مثال کمتر از ۶۰٪ ولتاژ فاز به خنثی شود، می‌توان حدس زد که یک اتصال کوتاه در نزدیکی رله رخ داده است و رله شروع به کار می‌کند. خاموشی گزینشی[2] توسط رله‌ای انجام می‌شود که به خطای واقعی نزدیک‌تر است. از آنجا که این روش خیلی کند است، استفاده از آن برای جداسازی سریع تغذیه در وصل مجدد خودکار پیشنهاد نمی‌شود.

نمونه دیگری از معیار ترکیبی برای جداسازی تغذیه، تشخیص شرایط کاهش ولتاژ و کاهش فرکانس است. در صورتی که بواسطه قطع تغذیه، ژنراتورهای باقیمانده طوری دچار اضافه بار شوند که سرعت آن‌ها به طور قابل توجهی افت کند، واحد کاهش فرکانس رله فرمان قطع را صادر می‌کند. این روش به عنوان نشانه مطمئنی برای جداسازی حین اتصال کوتاه استفاده می‌شود.

۵-۱۱-رله‌های جداسازی تغذیه

وظایف اصلی رله‌ای که هنگام وقوع خرابی در شبکه، مولدهای مستقل و خصوصی را از شبکه جدا می‌کند عبارتند از:

i. فراهم کردن حفاظت افزایش/کاهش ولتاژ
ii. فراهم کردن حفاظت افزایش/کاهش فرکانس
iii. نظارت بر توالی فازها
iv. پایش ولتاژ فاز به خنثی
v. جداسازی ژنراتور در زمان خرابی در تغذیه

رله‌های جداسازی تغذیه دیجیتال بواسطه مزایای زیر نسبت به رله‌های متداول برتری دارند:

i. اندازه جمع و جور و کوچک
ii. توانایی اندازه‌گیری RMS ولتاژ
iii. زمان پاسخگویی بسیار کوتاه

---

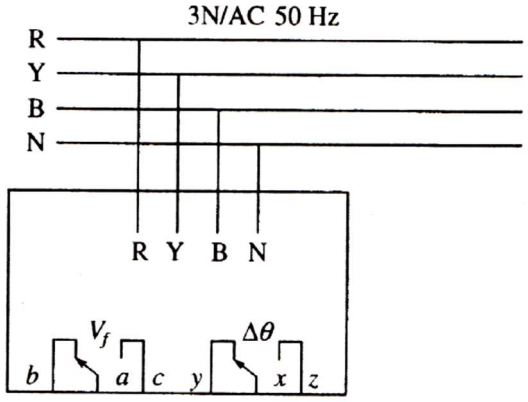
[1] . Pick-up
[2] . Selective shutdown

iv. توانایی نمایش خطا توسط LED

v. استفاده از پردازش داده دیجیتال به منظور اندازه‌گیری که دقت را بسیار بالا می‌برد.

vi. امکان اعمال تنظیمات در یک محدوده وسیع با درجه‌بندی ریز

مطابق با شکل (۶-۱۱)، رله با اتصال به خط به طور مستقیم از مقادیر اندازه‌گیری شده تغذیه می‌شود. سیگنال‌های ورودی آنالوگ ولتاژ از طریق پایانه‌های R، Y، B و N به تجهیز حفاظتی متصل می‌شوند. عمدتاً محدوده تغذیه رله در ۲۵ درصد ولتاژ فاز به فاز حفظ می‌شود. بالاترین مقدار ولتاژ برای حفاظت اضافه ولتاژ و کمترین مقدار ولتاژ برای حفاظت کاهش ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. ولتاژهای فاز و خط با مقادیر از پیش تعیین شده مقایسه می‌شوند. صدور فرمان قطع با LED چشمک زن نمایش داده می‌شود که بر حسب شرایط به معنای اضافه ولتاژ و یا کاهش آن است.



شکل ۶-۱۱: اتصال رله به سیستم چهار سیمه

۱-۵-۱۱- رله تغییر فرکانس

در رله‌های دیجیتال، پایش فرکانس با بررسی بازه زمانی یک چرخه (سیکل) انجام می‌شود و این اندازه‌گیری مستقل از اثرات هارمونیک است. این عدم وابستگی به اثرات هارمونیکی یک معیار الزامی و مؤکد است. به منظور اجتناب از صدور فرمان قطع در شرایط عادی عملکرد که بواسطه گذاریی ولتاژ و فاز (زاویه) اتفاق می‌افتد، اندازه‌گیری تکرار می‌شود. در سیستم‌های سه فاز، هر فاز به صورت جداگانه پایش می‌شود. اگر حداقل یک فاز از مقدار مرجع تنظیم شده تجاوز کند فرمان قطع صادر می‌شود. صدور فرمان قطع با LED چشمک زن نمایش داده می‌شود که بر حسب شرایط به معنای اضافه فرکانس و یا کاهش آن است.

رله تغییر فرکانس بر مبنای دو روش اندازه‌گیری زیر عمل می‌کند:

i. روش تشخیص مقدار میانگین

ii. روش تشخیص گرادیان فرکانس

روش تشخیص مقدار میانگین

در نظر بگیرید:

f_{th}: مقدار آستانه فرکانس

f_t: فرکانس قطع نیز به عنوان سطح آستانه دوم (ثانویه) شناخته می‌شود.

اگر تغییری در فرکانس وجود داشته باشد خواهیم داشت:

$$\Delta f = f_{th} - f_t$$

در روش تشخیص مقدار میانگین، رله تنها هنگامی فعال می‌شود که فرکانس از سطح آستانه قابل تنظیم f_{th} بیشتر و یا کمتر شود. وقتی که چنین شرایطی پیش می‌آید، یک شمارنده زمانی (گام زمانی بر حسب درصدی از سیکل تنظیم می‌شود) شروع به کار می‌کند. اگر فرکانس اندازه‌گیری شده سیستم در بازه زمانی Δt از سطح آستانه ثانویه که فرکانس قطع است بیشتر و یا کمتر شود رله فورا فرمان قطع صادر می‌کند. فرکانسی که به ازای آن فرمان قطع صادر می‌شود، به تنظیمات df، f_{th} و Δt وابسته است.

$$df = \frac{f_{th} - f_t}{\Delta t}$$

$$f_t = f_{th} - df.\Delta t$$

اگر در بازه زمانی Δt فرکانس به مقدار قطع f_t نرسد، فرمان قطع صادر نمی‌شود.

روش تشخیص گرادیان فرکانس (df/dt)

به منظور ارزیابی نرخ تغییر فرکانس، رله‌ها چند مقدار فرکانس را در نظر می‌گیرد. سنجش چند فرکانس صدور فرمان قطع دقیق‌تری را فراهم می‌آورد. به هر حال، می‌توان طول بازه‌ای که در آن چند اندازه‌گیری متوالی از فرکانس انجام می‌شود را وابسته به پارامترهای مختلف نمود و بدین ترتیب طول این بازه بر حسب شرایط قابل تغییر است. در نتیجه، دقت و سرعت روش تشخیص گرادیان فرکانس نیز می‌تواند بر مبنای شرایط حاکم بر تغذیه، به طور بهینه تنظیم شود. عمل قطع باید سطح بالایی از قابلیت اطمینان را دارا باشد و در نتیجه پایداری بالایی در طی عمل کلیدزنی فراهم می‌آورد. نوسان‌های کوتاه مدت در فرکانس تغذیه که بواسطه کلیدزنی ایجاد می‌شود نباید منجر به صدور فرمان قطع شود.

روش تشخیص گرادیان فرکانس به شدت نسبت به گذراهای کلید زنی و نوسانات فرکانسی کوتاه مدت متناظر با آن مقاوم است.

۲-۵-۱۱- رله موج بردار

وصل مجدد خودکار تغذیه برای آلترناتورها بسیار خطرناک است. ولتاژ بازگشتی تغذیه در صورتی که ناهمزمان باشد می‌تواند به آلترناتور آسیب بزند. در مواردی که خرابی تغذیه به وقوع می‌پیوندد، پایش موج بردار که توسط رله انجام می‌شود، آلترناتورهایی که به طور موازی کار می‌کنند را محافظت می‌کند. اتصال کوتاه در منبع تغذیه می‌تواند شرایطی را ایجاد کند که منجر به صدور فرمان قطع توسط رله شود چون رله در این شرایط می‌تواند موج برداری بیشتر از سطح آستانه از پیش تنظیم شده را تشخیص دهد. مقدار موج بردار به فاصله اتصال کوتاه از محل ژنراتور وابسته است.

رله طول یک سیکل را اندازه‌گیری می‌کند و در هر نقطه عبور از صفر ولتاژ یک اندازه‌گیری جدید شروع می‌شود. رله یک معادل[1] فرکانس داخلی ایجاد می‌کند و بر مبنای آن نقطه عبور از صفر بعدی را تخمین می‌زند. در شرایطی که موج بردار بوجود آید، فرکانس مرجع و فرکانس تغذیه یکسان نیستند و نقطه عبور از صفر بعدی دیرتر و یا زودتر اتفاق می‌افتد. جابجایی زاویه‌ای ولتاژ تغذیه می‌تواند بر پایه اختلاف زمان اندازه‌گیری شده و زمان مرجع اصلاح شود. عمدتاً، رله‌ها موج بردار را تنها پس از چند میلی‌ثانیه به طور مثال ۱۰ میلی ثانیه تشخیص می‌دهند. دو یا سه اندازه‌گیری متوالی از زاویه منجر به صدور فرمان قطع می‌شود. بنابراین این رله صدور فرمان قطع با قابلیت اطمینان بالا را تضمین می‌کند و آنقدر سریع است که می‌تواند برای جداسازی سریع تغذیه به کار برده شود.

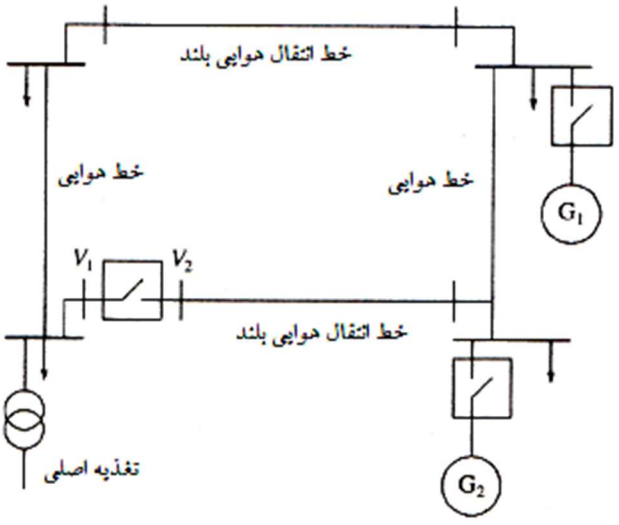
تنظیمات قطع رله ترجیحاً برای موج بردار تک‌فاز و یا سه فاز انجام می‌شود. امواج بردار توسط توابع موج بردار رله در هر سه ولتاژ خط به خط و نیز ولتاژ فاز به طور همزمان نظارت می‌شوند. تنظیمات تک‌فاز رله به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هنگام وقوع یک خرابی تک فاز به عنوان مثال یک خطای فاز به زمین، برای قطع مدار فعال شود. تنظیم سه فاز رله هنگامی انتخاب می‌شود که نیاز به تشخیص خطای سه فازی است که منجر به از دست رفتن کامل تغذیه در هر سه فاز می‌شود. نیاز است که با جداسازی سریع تغذیه و بخش‌های مرتبط با آن، از صدور فرمان قطع اشتباه به واسطه اختلاف زاویه جلوگیری نمود.

در بهره‌برداری از یک ژنراتور مستقل از شبکه، هر گونه تغییر بار یک موج ولتاژ ایجاد می‌کند. بنابراین کاربرد موج بردار تنها برای عملکرد موازی ژنراتورها و تغذیه قابل توصیه است. این مسأله به این معنی است که تابع موج بردار تنها باید پس از همزمان شدن ژنراتورها فعال شود. معمولاً بار اکتیو باقیمانده‌ای معادل حداقل ۱۵ تا ۲۰ درصد بار نامی برای تعیین موج بردار در ژنراتورهایی که به طور موازی با تغذیه کار می‌کنند ضروری است. خطایی که با تغییر ناچیز در بار

[1] . Replica

همراه است منجر به ایجاد یک موج بردار و یا تغییر در بار و یا فرکانس نمی‌شود و بنابراین این خطا قابل تشخیص نخواهد بود.

نمونه‌ای از عملکرد رله برای یک خط انتقال بلند در شبکه حلقه بسته[1] نظیر یک خط هوایی در شکل (۷-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۷-۱۱): شبکه انتقال بلند به هم پیوسته

در شبکه متناظر با آنچه در شکل (۷-۱۱) نشان داده شده است، مصرف کننده‌ها در سرتاسر شبکه به گونه‌ای گسترده شده‌اند که فاصله آن‌ها گاه به ۱۰۰۰ کیلومتر و یا حتی بیشتر می‌رسد. در صورت عملکرد رله که به معنای باز شدن نقطه اتصال به شبکه است، زاویه ولتاژهای V_1 و V_2 به واسطه امپدانس خط دچار تغییر می‌شود. در اینصورت، رله موج بردار متصل به V_2 ممکن است بواسطه این عمل کلیدزنی فرمان قطع صادر کند. به نظر می‌رسد رله نرخ تغییر فرکانس برای حفاظت از دست رفتن تغذیه مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

[1] . Closed loop

تمرین:

۱. جداسازی تغذیه چیست؟ توضیح دهید
۲. اثرات ناشی از جداسازی تغذیه را مورد بحث قرار دهید.
۳. پارامترهای الکتریکی که برای جداسازی تغذیه باید به دقت پایش شوند را توضیح دهید
۴. از موج بردار ولتاژ چه مواردی را می‌توان دریافت؟ به کمک شبیه‌سازی یک مدار تشریح کنید.
۵. توضیحاتی در رابطه با رله‌های زیر که معمولا برای حفاظت تغذیه استفاده می‌شوند بنویسید

الف) رله تغییر فرکانس

ب) رله موج بردار

۱۲- رله‌های شبکه

۱-۱۲-مقدمه

از مراحل آغازین ظهور سیستم قدرت، تشخیص خودکار و رفع خطا جزء شروط اولیه برای عملکرد مطمئن و بدون اشکال سیستم بوده است. روش‌های اولیه بهره‌برداری سیستم قدرت بر مبنای تجهیزات الکترومکانیکی و طرح‌های نسبتاً پیچیده بوده است. گام بعدی در توسعه سیستم‌های قدرت مربوط به رله‌های حالت جامد بود که توسط مدارهای الکترونیکی و به منظور تشخیص خطا پیاده‌سازی شده بودند. در حال حاضر، تشخیص خطا توسط رله‌های عددی[1] انجام می‌شود که در بسیاری از موارد شامل یک پردازنده سیگنال دیجیتال با مدارات اضافی برای اندازه‌گیری و همچنین مدارات طبقه خروجی می‌باشند. آینده نوید بهبود بیشتر در سرعت و درنتیجه در ظرفیت پردازش کامپیوترهای مورد استفاده در سیستم قدرت را به همراه دارد.

[1] .Nuemerical

توانایی ریزپردازنده‌های[1] پیشرفته و ریزکامپیوترها برای برقراری ارتباط با یکدیگر و ظهور لینک‌های ارتباطاتی گسترده، به اشتراک گذاشتن اطلاعات را تسهیل کرده است. این اطلاعات می‌توانند برای اهداف نظارتی، کنترل و حفاظت سیستم قدرت مورد استفاده قرار گیرند. اینگونه پیشرفت‌ها در تولید ریزپردازنده‌ها و کامپیوترها مسیر را برای توسعه طیف وسیعی از رله‌های شبکه نظیر رله‌های حفاظت تطبیقی، حفاظت بر مبنای هوش مصنوعی، حفاظت بر مبنای تبدیل موجک، حفاظت ناحیه گسترده[2] و حفاظت ترکیبی[3] هموار کرده است. این طرح‌های حفاظتی که تحت عنوان روش‌های حفاظتی بسیار سریع[4] مشهور شده‌اند برای بکارگیری در شبکه‌های قدرت پیچیده کنونی مورد نیاز هستند. برخی از پیشرفت‌ها و توسعه‌های اخیر در ادامه به طور خلاصه توصیف شده‌اند.

۲-۱۲-حفاظت تطبیقی

۱-۲-۱۲- مقدمه

حفاظت تطبیقی یک فلسفه حفاظتی است که به دنبال تنظیماتی می‌گردد تا با اعمال آن‌ها به توابع حفاظتی، هماهنگی هر چه بیشتر با شرایط حاکم بر سیستم قدرت امکان‌پذیر شود. این عمل به معنی به روز کردن تنظیمات رله است که ناشی از تغییر در توپولوژی سیستم قدرت می‌باشد. تغییر در توپولوژی سیستم قدرت عمدتاً به واسطه دو دلیل زیر است:

i. کلیدزنی عمدی سیستم به عنوان نمونه جداسازی بخشی از تجهیزات به منظور تعمیرات
ii. کلیدزنی برنامه‌ریزی نشده در سیستم به عنوان نمونه رفع خطا از سیستم قدرت با استفاده از یک رله

در این موارد، توپولوژی سیستم قدرت تغییر کرده است اما تنظیمات سیستم حفاظتی مطابق با آنچه قبل از اصلاح بوده باقی می‌ماند و همین امر سبب می‌شود که سیستم حفاظتی توانایی حفاظت کافی از سیستم فعلی را نداشته باشد. این مسأله مبنای اساسی استفاده از حفاظت تطبیقی می‌باشد. به محض اینکه توپولوژی سیستم تغییر کند، تنظیمات تجهیزات سیستم باید هر چه سریع‌تر به روز شود تا بتواند سیستم را در مقابل خطاهای جدید محافظت کند. این هدف با بکارگیری طرح حفاظتی تطبیقی قابل دستیابی است. حفاظت تطبیقی در نواحی زیر قابل استفاده است:

i. کنترل وصل مجدد خودکار مدارشکن
ii. حفاظت ترانسفورماتور قدرت
iii. حفاظت خط انتقال دارای چند پایانه
iv. تنظیمات رله

---

[1] . Microprocessor
[2] . Wide area protection
[3] . Hybrid protection
[4] . Ultra-high-speed protection

حفاظت تطبیقی به طور خاص برای تعیین دینامیکی جریان پیک آپ و ضریب زمانی[1] در رله‌های اضافه جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامترها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی قابل تعیین هستند. شبیه‌سازی‌های زمان واقعی پیوسته سیستم قدرت نیز برای پیکره‌بندی مجدد[2] سیستم حفاظتی باید انجام شود. بنابراین، زمانی که تغییری در سیستم قدرت بوجود می‌آید، شبیه‌سازی‌های زمان واقعی پیوسته کمک می‌کند که تجهیزات حفاظتی به طور خودکار به روز شوند. انتظار می‌رود سیستم‌های حفاظت تطبیقی وظایفی که در ادامه آمده است را انجام دهند:

i. رله‌ها تنها باید در مواجهه با خطاهایی که در ناحیه حفاظتی مختص آن‌ها و در جهتی که تحت نظارت آن‌ها است عملکرد داشته باشند.
ii. اگر دو رله خطایی را در ناحیه حفاظتی خود حس کنند، رله با تأخیر زمانی کوتاه‌تر یا رله‌ای که در معرض جریان خطای بیشتری است ابتدا عمل می‌کند.
iii. به محض تغییر توپولوژی سیستم، رله به طور خودکار به گروه رله[3] مناسب برای حفاظت سیستم قدرت منتقل می‌شود.

پر واضح است که حفاظت تطبیقی یک مفهوم قدیمی است به این دلیل که طرح‌های حفاظتی جهتی از جهت جریان خطا پیروی می‌کنند در حالیکه رله‌های اضافه جریان با تأخیر زمانی، زمان عملکردشان را با دامنه جریان خطا تطبیق می‌دهند. اما این مباحث قدیمی نشانگر مشخصه‌های دائمی یک رله و یا یک سیستم حفاظتی می‌باشند. این مشخصه‌ها بخشی از طراحی‌های اصلی تأسیساتی هستند که برای اجرای یک وظیفه معین مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مفهوم این نوع حفاظت بر مبنای این واقعیت است که بسیاری از تنظیمات رله به شرایط مفروض در سیستم قدرت وابسته است. در حال حاضر، فرض کردن شرایط برای شبکه‌های قدرت پیچیده به هم پیوسته بواسطه پایین آمدن دقت امکان‌پذیر نیست. تنظیمات رله باید هنگام تغییر شرایط سیستم خود را با سیستم زمان واقعی وفق دهند. مزایا و کاربردهای طرح‌های حفاظت تطبیقی در جدول (۱-۱۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۱۲: کاربردها و مزایای طرح‌های حفاظت تطبیقی

کاربردها	مزایا
مدلسازی تطبیقی امپدانس سیستم	بهبود قابلیت اطمینان
قطع آنی ترتیبی تطبیقی	حفاظت پشتیبان سریع‌تر
پوشش رله چند پایانه تطبیقی	بهبود تنظیمات ناحیه حفاظت شده
رله دیستانس زمین ناحیه ۱ تطبیقی	حساسیت بالاتر به خطاهای زمین امپدانس بالا

[1] . Time multiplier
[2] . Reconfigure
[3] . Relay group

پاسخ تطبیقی به تجهیزات حفاظتی معیوب	حداقل کردن نیاز به طرح پایلوت ثانویه
وصل مجدد تطبیقی	بازیابی سریع‌تر پس از صدور فرمان قطع اشتباه
زمان‌بندی متغیر حفاظت خرابی مدارشکن[1]	بهبود در حاشیه زمانی حفاظت پشتیبان و حذف فرمان‌های قطع غیرضروری مدارشکن پشتیبان
جزیره ای شدن کنترل شده تطبیقی[2]	تسهیل بازیابی بار
پایش منطق داخلی تطبیقی	بهبود قابلیت اطمینان حفاظت
بررسی هماهنگی تنظیمات رله	بهینه‌سازی هماهنگی

۲-۲-۱۲- تحلیل خطا و تعیین حفاظت

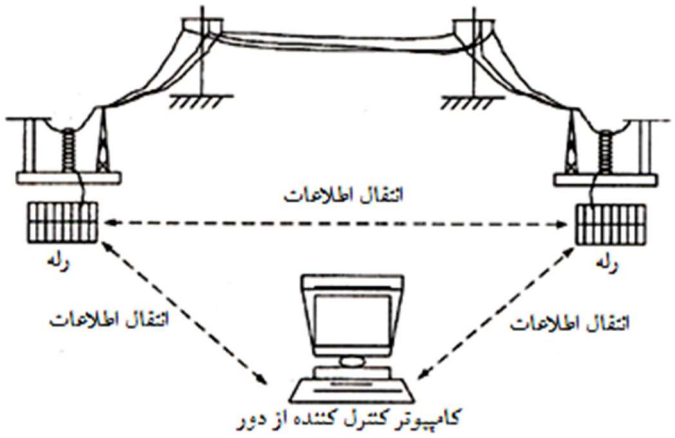
خطاها را می‌توان با اعمال آن‌ها در محل‌های مختلف سیستم قدرت مدل‌سازی شده و سپس ذخیره‌سازی ولتاژ و جریان بدست آمده تحلیل کرد. نتایج این تحلیل به تعیین سطح حفاظتی کمک می‌کند. به منظور شبیه‌سازی، محل خطا به طور معمول در باس‌ها و یا در میانه خطوط در نظر گرفته می‌شود. جریان و ولتاژ خطا به ازای هر نوع خطا و در هر محل از سیستم نتایج تحلیل خطا را نشان می‌دهد. به منظور تعیین تنظیمات حفاظت تطبیقی، نتایج تحلیل خطا برای تمام پیکره‌بندی‌های ممکن سیستم بدست می‌آید.

به منظور تحقق حفاظت سیستم، تنظیمات رله بر مبنای پیکره‌بندی سیستم قدرت و شرایط خطا و پس از تکمیل آنالیز خطا انتخاب می‌شود. جدولی شامل توپولوژی‌های مختلف سیستم قدرت و تنظیمات رله متناظر با آن‌ها به گونه‌ای تنظیم شده است که مجموعه تنظیمات رله‌هایی که در یک نقطه خاص قرار دارند مشابه باشند. هر گروه از تنظیمات حفاظتی مشابه مورد تحلیل قرار می‌گیرند تا بتوان به مجموعه‌ای از تنظیمات مشترک که برای آن گروه مفید بوده و تمام شرایط مورد نیاز را پوشش می‌دهد دست پیدا کرد.

طرح حفاظتی تطبیقی بسیار سریع عمل کرده و رله‌ها می‌توانند به منظور تشخیص خطا با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. کامپیوترهای محلی و یا از راه دور[3] می‌توانند با رله‌های دیجیتال ارتباط برقرار کنند و اجازه می‌دهند تا کاربران به راحتی با رله تعامل داشته باشند. هر داده دیجیتال رله شامل تنظیمات فعلی، ثبّات عملکرد و گزارشگر رویداد[4] را می‌توان توسط کامپیوتر دانلود کرد و تغییرات لازم در تنظیمات فعلی رله را اعمال نمود. جزئیات را می‌توان در فایل جداگانه‌ای برای

[1] . Variable Breaker-Failure Timing
[2] . Adaptive Last-Resort Islanding
[3] . Remote
[4] . Event reporter

مراجعات بعدی ذخیره و استفاده کرد. مسیرهای ارتباطی رله به رله و رله به کامپیوتر برای یک رله دیجیتال در شکل (۱۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲: وضعیت اشتراک منطقی رله در ارتباطات منطقی پایلوت

۱۲-۲-۳- روش‌های تطبیقی[1]

روش‌های عددی مورد استفاده برای رله‌های حفاظتی بر مبنای الگوریتم‌های حفاظت است و بنابراین سبب می‌شود که آن‌ها در سیستم قدرت تطبیق‌پذیر باشند. این الگوریتم‌های حفاظتی، امنیت و قابلیت اعتماد حفاظت را افزایش می‌دهند. روش‌های تطبیقی که در اینجا تشریح شده‌اند روش نظارت راکتانس تطبیقی[2] و روش پلاریزاسیون حافظه‌ای تطبیقی می‌باشند.

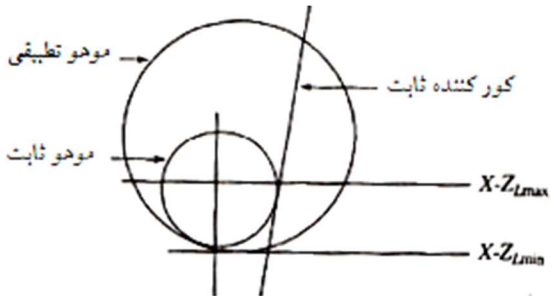
نظارت راکتانس تطبیقی

این نوع از نظارت بوسیله مشخصه‌های راکتانسی به منظور جلوگیری از عملکرد ناخواسته تحت شرایط مختلف بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسدودکننده‌های[3] مورد استفاده در مشخصه راکتانسی به منظور محدود کردن بارهای مقاومتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تنظیم توابع نظارتی بر اساس حداقل امپدانس باری[4] که امکان دارد رله در حال بهره‌برداری ببیند انجام می‌شود. استفاده از تابع دیستانس موهو با برد تطبیقی در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است. بکارگیری رله‌های دیجیتال، اصلاح توابع نظارتی بر مبنای توان عبوری از خطوط نیرو را تسهیل می‌کنند. حداکثر مقاومت خطا برای هر مقدار بار معین، توسط تابع تطبیقی پایش می‌شود. رله‌های دیجیتال به طور مستمر امپدانس بار را پایش کرده و تنظیمات برد تابع نظارتی دیستانس موهو را به منظور فراهم کردن حداکثر پوشش مقاومتی در عین حفظ حاشیه امنیت از امپدانس بار میزان می‌کنند.

---

[1] . Addaptive techniques
[2] . Addaptive reactance supervision
[3] . Blinder
[4] . Load impedance

در شکل (۲-۱۲) برد رله توسط حداقل امپدانس بار که در نقطه X رسم شده است محدود می‌شود. پوشش مقاومتی در این مورد با حداکثر توان عبوری مورد انتظار محدود شده است.



شکل ۲-۱۲: برد تطبیقی با استفاده از یک تابع دیستانس موهو

روش پلاریزاسیون حافظه‌ای تطبیقی

پلاریزاسیون ولتاژ حافظه‌ای وظایف زیر را انجام می‌دهد:

i. امکان عملکرد رله دیستانس برای خطاهای سه فاز در جلوی رله که ولتاژ محل رله به صفر می‌رسد.
ii. جلوگیری از عملکرد رله برای خطاهای سه فاز پشت رله که در آن‌ها ولتاژ محل رله صفر می‌شود.
iii. فراهم کردن یک مشخصه متغیر برای رله

بر خلاف رله‌های الکترومکانیکی، در رله‌های دیجیتال زمان ذخیره‌سازی می‌تواند تطبیقی باشد. به عنوان مثال، اگر ولتاژ توالی مثبت هنگام خطا کمتر از ۶٪ ولتاژ نامی باشد، رله به طور مستمر از ولتاژ ذخیره شده در حافظه برای پلاریزاسیون تابع دیستانس استفاده می‌کند. ولتاژ قبل از خطا ذخیره شده در حافظه تا زمانی که ولتاژ توالی مثبت از ۶٪ ولتاژ نامی بیشتر شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر رله از پلاریزاسیون ولتاژ توالی مثبت برای تمامی واحدهای دیستانس استفاده کند این تغییر به جز در مورد خطای سه فاز، بر عملکرد رله تأثیری نخواهد داشت.

۳-۱۲-حفاظت بر مبنای هوش مصنوعی

در شرایطی که دستیابی به مدل قطعی برای رفتار یک سیستم غیرخطی مشکل است، یک شبکه عصبی مصنوعی که معمولاً تحت عنوان هوش مصنوعی شناخته می‌شود راه‌حل مناسبی را فراهم می‌کند. به منظور تعیین جهت خطا می‌توان از یک شبکه عصبی پیشخوراند[1] چند لایه استفاده نمود. در این طرح چهار گام زیر باید برداشته شود:

i. آماده‌سازی داده‌های مناسب برای آموزش
ii. انتخاب ساختار مناسب برای شبکه عصبی مصنوعی
iii. آموزش شبکه عصبی

[1] . FeedForward

iv. ارزیابی شبکه آموزش دیده با استفاده از الگوهای تست

داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی را می‌توان توسط شبیه‌سازی سیستم در یک نرم‌افزار به عنوان مثال نرم افزار EMTDC بدست آورد. فرآیند انتخاب ساختار مناسب برای شبکه عصبی مستلزم انتخاب دقیق و مناسب تعداد لایه‌ها، تابع تبدیل، تعداد نورون‌ها و تعداد ورودی‌ها و خروجی‌هابه منظور تعیین دقیق تمام شرایط خطا است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اثبات شده است که ابزاری حیاتی در کاربردهای مرتبط با سیستم قدرت می‌باشند. مزیت اصلی شبکه‌های عصبی مصنوعی این است که استفاده از آن‌ها مستلزم درک کامل از رفتار سیستم نمی‌باشد و بنابراین آن‌ها می‌توانند در شرایط بسیار پیچیده مورد استفاده قرار گیرند. به هر حال، دقت یک شبکه وابسته به اندازه و دقت مجموعه آزمون است. آموزش و تست یک شبکه عصبی ممکن است زمان زیادی به طول انجامد.

دامنه فازورهای ولتاژ و جریان می‌توانند در یک رله حفاظتی مبتنی بر شبکه عصبی به منظور دستیابی به عملکرد سریع و دقیق تحت شرایط مختلف خطا و تغییر در شبکه مورد استفاده قرار گیرند. الگوریتم پس انتشار[1] نیز می‌تواند با تنظیم ضرایب وزنی متصل در لایه‌های متوالی پرسپترون‌های چند لایه به عنوان یک شبکه عصبی کار کند. دیدگاه مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، امنیت رله‌های دیستانس را با گسترش برد ناحیه ۱ بهبود می‌بخشد.

۴-۱۲-حفاظت بر مبنای تبدیل موجک

تبدیل موجک عملی است که تبدیل یک تابع را با استفاده از انتگرالگیری آن با نسخه‌های اصلاح شده برخی توابع هسته[2] بدست می‌آورد. این تابع هسته موجک مادر[3] نامیده می‌شود و اصلاحات انجام شده شامل انتقال[4] و فشرده‌سازی[5] موجک مادر می‌باشد. تبدیل موجک یک روش بسیار قدرتمند برای نمایش سیگنال‌ها در مقیاس‌های مختلف و تحلیل آن‌ها می‌باشد. جالب توجه است که تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستا[6] نیز قابل استفاده می‌باشد. تبدیل موجک در فرکانس‌های بالا و پایین به ترتیب از پنجره‌های کوچک و بزرگ استفاده می‌کند. ویژگی تبدیل موجک در تعیین موقعیت و جانمایی اطلاعات در صفحه زمان- فرکانس آن را قادر می‌سازد تا نوعی از تفکیک‌پذیری را با نوع دیگر مبادله کند که به نوبه خود این تبدیل را برای تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا مناسب می‌سازد. موجک مادر باید مطلقاً همگرا باشد و یک تابع مطلقاً همگرا است اگر:

---

1 . Back propagation
2 . Kernel function
3 . Mother wavelet
4 . Translation
5 . Comperation
6 . Non-stationary

$$C_g \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|G(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

که در آن $G(\omega)$ تبدیل فوریه $g(t)$ است، $L^2(R)$ مجموعه‌ای از تمام مربعات انتگرال‌پذیر یا سیگنال‌های با انرژی محدود و R نشانگر اعداد حقیقی است. ثابت cg ثابت همگرایی تابع $g(t)$ است و محدود بودن تابع معکوس تبدیل موجک را امکان‌پذیر می‌سازد. برای تابع مفروض $g(t)$، فرض می‌شود که موجک مادر مطلقاً همگرا باشد. موجک مادر می‌تواند متعامد یا غیر متعامد باشد. تبدیل موجک می‌تواند در حوزه آنالوگ (تبدیل موجک پیوسته[1]) و یا در حوزه دیجیتال (تبدیل موجک گسسته[2]) باشد.

تبدیل موجک در موارد زیر قابل کاربرد است:

i. تشخیص و تعیین محل اغتشاش توان
ii. ذخیره‌سازی و فشرده‌سازی داده‌های اغتشاش توان
iii. تعیین و گروه‌بندی اغتشاش توان
iv. حفاظت تجهیزات قدرت و تحلیل اغتشاش توان در سیستم/شبکه
v. تعیین گذراهای سیستم قدرت

یکی از روش‌های بکارگیری تبدیل موجک از طریق پیاده‌سازی تحلیل قدرت تفکیک‌پذیری (رزولوشن) چندگانه[3] با استفاده از بانک فیلتری می‌باشد. در این روش، سیگنال تحلیل شده توسط زنجیره‌ای از بانک فیلتر به گونه‌ای فیلتر می‌شود که نتیجه آن مجموعه‌ای از سیگنال‌ها در حوزه زمان است. هر مجموعه نشانگر نسخه فیلتر شده‌ای از سیگنال اصلی است.

۵-۱۲-حفاظت ناحیه گسترده

نسل کنونی رله‌ها بر مبنای تکنولوژی پیشرفته رله‌های حفاظتی است که قابلیت‌های ارتباطی را نیز دارا می‌باشد. به همین دلیل است که رله‌های جدید تجهیزات الکترونیکی هوشمند[4] نامیده می‌شوند. لینک‌های ارتباطاتی سریع این امکان را فراهم می‌کنند که رله‌های نسل کنونی به سرعت وضعیتشان را با یکدیگر و یا با ایستگاه کنترل مرکزی به روز کنند. پیشرفت‌های فن‌آوری حفاظت ناحیه گسترده و قابلیت همزمان‌سازی توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)[5]

[1] . Continuous wavelet transform (CWT)
[2] . Discrete wavelet transform (DWT)
[3] . Multi Resolution Analysis (MRA)
[4] . Inteligent Electronic Devices (IED)
[5] . Global Positioning System (GPS)

که در الگوریتم‌های حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، جلوگیری از وقوع شرایط خاموشی سراسری را نوید می‌دهند.

طرح حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده از نوع جریان تفاضلی، قابلیت انتخاب‌پذیری بیشتری نسبت به حفاظت پشتیبان متداول که از رله‌های دیستانس استفاده می‌کند فراهم می‌آورد. شبکه‌های ATM[1] و سیستم‌های همزمان‌شده می‌توانند توسط پیکره‌بندی سیستم حفاظتی تفاضلی جریان پشتیبان ناحیه گسترده مورد استفاده قرار گیرند. برای حفاظت پشتیبان خطوط انتقال بلند می‌توان از اندازه‌گیری جریان همزمان شده با GPS در پایانه‌های خط استفاده کرد. اندازه‌گیری جریان خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و هر کدام از باس‌بارها برای عملکرد طرح حفاظتی تفاضلی جریان مورد نیاز است. همچنین طرح حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده می‌تواند برای جلوگیری از خروج‌های زنجیره‌وار درسیستم قدرت بسیار مفید باشد. این طرح می‌تواند برای موارد زیر به کار گرفته شود:

i. تعیین محل دقیق خطا به منظور تسهیل عملکرد مدارشکن‌هایی که برای جداسازی خطا استفاده می‌شوند.
ii. جلوگیری از صدور فرامین قطع غیر ضروری ناشی از خطاهای پنهانی و یا اضافه بار با سد کردن فرمان قطع رله‌های حفاظتی پشتیبان متداول.

امروزه سیستم خبره حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده WABPES[2] برای جلوگیری از قطعی‌های متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد. WABPES، یک شبکه مخابراتی گسترده بر مبنای یک سیستم حفاظتی است که به منظور حفاظت بخشی از شبکه از طریق ایجاد پشتیبان‌های انتخابگر و ایمن طراحی شده است و شامل دو حالت است:

i. حالت عادی
ii. حالت اضطراری

WABPES وضعیت باز و یا بسته بودن مدارشکن‌ها و پاسخ عملیاتی رله‌های حفاظتی متداول در سرتاسر شبکه را حین عملکرد عادی پایش می‌کند. اگر هنگام وقوع یک خطا حفاظت اصلی با شکست مواجه شود، WABPES رله مربوط را به حالت اضطراری تغییر می‌دهد و پس از آن سیستم بهترین روش جداسازی خطا را تعیین می‌کند. در صورت لزوم، رله حفاظت پشتیبان متداول توسط WABPES غیر فعال می‌شود.

۶-۱۲-حفاظت ترکیبی[3]

یک رله ترکیبی متشکل از مفاهیم چند رله است. این رله علاوه بر استفاده از امپدانس محاسبه شده توسط مؤلفه‌های اصلی ولتاژ و جریان، از اطلاعات امواج سیار بدست آمده از سیگنال‌های گذرای فرکانس بالا نیز استفاده می‌کند. در طرح

[1] . Asynchronous Transfer Mode
[2] . Wide Area Back-up Protection Expert System (WABPES)
[3] . Hybrid

حفاظتی ترکیبی، اگر تشخیص خطا توسط روش امواج سیار امکان‌پذیر باشد، رله امپدانسی به عنوان یک پشتیبان سریع عمل می‌کند. به این ترتیب قابلیت اطمینان طرح حفاظتی ترکیبی افزایش می‌یابد. الگوریتم حفاظت ترکیبی به طور موازی عمل می‌کند و به پردازش سرعت بالا نیازمند است. این امر مستلزم وجود سیگنال قطع داخلی[1] برای خطاهایی است که در خارج از حداکثر برد ناحیه حفاظتی رخ می‌دهد. حداکثر برد سیستم حفاظتی به دقت تخمین فاصله بستگی دارد. پردازنده‌های سیگنال دیجیتال مدرن و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال می‌توانند اندازه‌گیری‌های مختلف و محاسبات طولانی الگوریتم حفاظت ترکیبی که قطعاً الگوریتم پیچیده‌ای است را مدیریت کنند. دقت طرح حفاظتی به قدرت پردازش پردازنده سیگنال دیجیتال وابسته است.

محاسبات امپدانس و استخراج اطلاعات امواج سیار باید به طور همزمان و بر پایه سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده انجام شود. عملکرد رله موج سیار به سیگنال‌های گذرای فرکانس بالا بستگی دارد و به همین دلیل نیاز است که مؤلفه‌های فرکانس اصلی ۵۰ یا ۶۰ هرتز از بین شکل موج‌های اندازه‌گیری شده فیلتر شوند. در همین زمان، از آنجا که رله امپدانسی از مؤلفه فرکانس اصلی استفاده می‌کند، نویزهای فرکانس بالا باید توسط فیلتر حذف شوند.

از آنجا که سیگنال‌های موج سیار شامل گذراهای فرکانس بالا می‌باشند، نمونه‌برداری از سیگنال‌های ولتاژ و جریان باید با نرخ بالایی انجام شود. فرکانس سیگنال‌های گذرا بر حسب موقعیت خطا و سایر شرایط خطا تغییر می‌کند.

در یک رله دیستانس مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس به چنین نرخ نمونه‌برداری بالایی نیاز نیست چون در این نوع رله، تنها مؤلفه فرکانس اصلی مورد توجه است. در صورتیکه الگوریتم مبتنی بر گذراهای فرکانس بالا و الگوریتم مبتنی بر مؤلفه فرکانس اصلی به طور متوالی قرار گیرند، مقادیر نمونه‌برداری شده مورد استفاده در الگوریتم امپدانسی می‌تواند در الگوریتم موج سیار نویز ایجاد کند و عکس این حالت نیز صادق است. بنابراین به منظور اجتناب از نمونه‌برداری سیگنال‌های یکسان در دو فرکانس متفاوت، از بین نمونه‌های ولتاژ و جریان بدست آمده برای رله موج سیار، با توجه به فرکانس نمونه‌برداری، چند نمونه در میان انتخاب می‌شوند و به این ترتیب سیگنالی با نرخ نمونه‌برداری پایین‌تر برای استفاده در رله امپدانسی به دست می‌آید. به منظور جلوگیری از همپوشانی، سیگنال نمونه‌برداری شده به طور خاص بوسیله فیلترهای ضدهمپوشانی[2] با فرکانس قطع مناسب فیلتر می‌شوند. تبدیل فوریه گسسته سیکل کامل قادر به محاسبه مؤلفه‌های اصلی می‌باشد و در عین حال هر گونه هارمونیک را دفع می‌کند.

با توجه به اصول عملکرد الگوریتم ترکیبی، امپدانس اندازه‌گیری‌شده برای خطاهای نزدیک به محل رله در طرح حفاظتی دیستانس به سرعت وارد ناحیه قطع رله می‌شود. رله موج سیار می‌تواند خطاهای نزدیک به نقطه انتهای برد رله امپدانسی را بسیار سریع تشخیص دهد. همچنین بسته به حداکثر برد تنظیمی الگوریتم مبتنی بر موج سیار، این رله

---

[1] . Inter-trip

[2] . Anti aliasing

می‌تواند خطاهای فراتر از ناحیه برد رله را تشخیص دهد. دقت مبدل‌های اندازه‌گیری، حداکثر تنظیمات برد رله را تعیین می‌کند که به دقت قابل محاسبه می‌باشد. خروجی دو الگوریتم ترکیب شده در پیکره‌بندی‌های متفاوت نیازهای حفاظتی مختلفی را برآورده می‌سازد اما در عین حال نیاز است که قابلیت اطمینان و سرعت کلی این طرح بهبود پیدا کند.

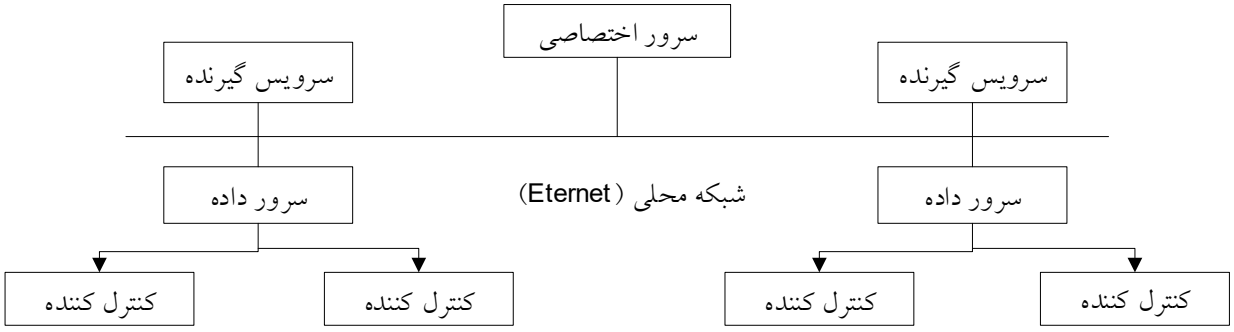
۷-۱۲-اسکادا

۱-۷-۱۲- مقدمه

واژه اسکادا[1] مخفف سیستم کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده است. این سیستم یک کنترل کامل بر روی سیستم ایجاد نمی‌کند اما اساساً بر سطح نظارتی تمرکز دارد. سیستم اسکادا یک بسته نرم‌افزاری است که بر ماژول‌های سخت‌افزاری که با آن‌ها ارتباط دارد مشرف است. یکی از ماژول‌های سخت‌افزاری مشهور کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر[2] می‌باشد. قابلیت توسعه، کارایی، و امکان ویرایش از جمله مزایای سیستم‌های اسکادا می‌باشند.

معماری سخت‌افزار

معماری متداول سخت‌افزار یک سیستم اسکادا شامل دو لایه اصلی می‌باشد که عبارت‌اند از : لایه مشتری و لایه سرور داده. هدف از لایه مشتری امکان ارتباط انسان و ماشین می‌باشد. لایه سرور داده مدیریت کنترل داده‌های فرآیند را بر عهده دارد. سرور داده از طریق کنترل‌کننده‌های فرآیند با تجهیزات ارتباط برقرار می‌کند. این تجهیزات از طریق شبکه Field bus و یا به طور مستقیم به شبکه‌ای متصل هستند که سرور داده نیز در آن قرار دارد. معماری سخت‌افزاری متداول در در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است. سرورهای داده به طور عمده از طریق شبکه محلی[3] به یکدیگر و نیز به ایستگاه‌های مشتری متصل هستند.



شکل ۳-۱۲: معماری سخت‌افزاری متداول

[1] . Supervisory Control And Data Analysis (اسکادا)
[2] . Programmable Logic Controller (PLC)
[3] . Local Area Network

معماری نرم‌افزار

نرم‌افزار اسکادا بر مبنای یک پایگاه داده زمان واقعی است که در سرورهای متفاوت در دسترس می‌باشد. جمع‌آوری داده و مدیریت آن بر پایه مجموعه‌ای از پارامترها توسط سرورها انجام می‌شود. مدیریت داده شامل بررسی هشدارها، کنترل نمونه‌برداری، ثبت کردن وقایع، بایگانی کردن و محاسبات می‌باشد.

عملکرد

در سیستم اسکادا، در دسترس بودن برخی توابع نظیر کنترل سطح دسترسی گروه کاربران ویژه، ویرایش شامل بزرگنمایی، تغییر اندازه، پیمایش[1]، پیکره‌بندی بر خط[2]، سفارشی کردن[3] و راهبری[4] عمل کاربران کنترل و حفاظت را آسان می‌کند.

قابلیت‌های دیگر سیستم اسکادا شامل مشاهده روند تغییرات[5]، مدیریت هشدارها[6]، ثبت وقایع، بایگانی و تولید گزارش می‌باشد. اغلب انواع محصولات اسکادا این قابلیت را دارند که عملیات به طور خودکار با وقایع شروع به کار کنند. به طور کلی، انواع اسکادا زبان برنامه‌نویسی را ارائه می‌دهد که در آن فعالیت‌هایی که باید انجام شوند به طور خودکار تعریف می‌شوند.

ارتباطات

ارتباط داخلی و دسترسی به دستگاه‌ها یکی از نیازهای سیستم اسکادا است. به طور کلی، ارتباط سرور با سرور و سرور با مشترک تحت عنوان ارتباط داخلی شناخته می‌شوند. پارامتر متعلق به یک سرور خاص به عضویت نرم‌افزار مشتری در می‌آید و از آن پس تنها تغییرات آن پارامتر خاص به نرم‌افزار مشتری مخابره می‌شود.

در زمان دسترسی به دستگاه‌های مخابراتی، کنترل‌کننده‌ها با نرخ تعریف شده توسط کاربر نمونه‌برداری می‌شوند. نمونه‌برداری از پارامترها با نرخ‌های متفاوت انجام می‌شوند. برچسب زنی زمانی معمولاً در کنترل‌کننده‌ها انجام می‌شود کنترل‌کننده‌ها پارامترهای مورد نیاز را به سرورهای داده می‌فرستند. تأمین‌کننده‌های نرم‌افزاری نیز راه‌اندازهای[7] مخابراتی برای کنترل‌کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر را فراهم می‌کند.

قابلیت توسعه

---

[1] . Scroling
[2] . On-line configuration
[3] . Customization
[4] . Navigation
[5] . Trending
[6] . Alarm handling
[7] . Drivers

قابلیت توسعه بیانگر امکان گسترش سیستم کنترل مبتنی بر اسکادا با اضافه کردن متغیرهای فرآیندی، سرورهای مخصوص و نیز مشترکین بیشتر می‌باشد. هر سرور داده به همراه یک پایگاه داده با پیکره‌بندی خاص و یک پایگاه داده زمان واقعی[1] مسئول مدیریت زیر مجموعه‌ای از متغیرهای فرآیند نظیر جمع‌آوری داده، مدیریت هشدارها و بایگانی را بر عهده دارد.

تعامل

داده مورد نیاز برای پیکره‌بندی در یک پایگاه داده که از لحاظ فیزیکی توزیع شده ولی از لحاظ منطقی متمرکز می‌باشد ذخیره می‌شود. پایگاه داده زمان واقعی در حافظه سرورها قرار می‌گیرد. ورودی‌های زیر برای برقراری تعامل مورد نیاز می‌باشند:

i. یک واسط به منظور ارتباط پایگاه داده باز[2] با داده‌های موجود در بایگانی و یا ثبت وقایع
ii. امکان ورود و یا استخراج کد اسکی برای داده‌های پیکره‌بندی
iii. کتابخانه‌ای از API شامل ویژوال بیسیک، C و C++ به منظور دسترسی داده موجود در پایگاه داده زمان واقعی، ثبت وقایع و بایگانی.

سیر تکامل

توسعه گسترده کاربردهای صنعتی منجر به ظهور نسخه‌های اصلاح شده از اسکادا برای مدیریت دستگاه‌ها و سیستم‌ها شده است تا جایی که فروشنده‌ها هر سال نسخه‌های جدیدی از اسکادا به همراه اضافات و اصلاحات منتشر می‌کنند. معمولاً تمهیداتی برای اصلاح بر خط پیکره‌بندی پایگاه داده و گرافیک‌ها در سیستم‌های اسکادا موجود است. ابزارهای توسعه‌ای فراهم شده در این سیستم‌ها شامل یک ویرایشگر گرافیکی، یک ابزار پیکره‌بندی پایگاه داده، یک زبان برنامه‌نویسی، واسط برنامه اجرایی[3] (API) که از ویژوال بیسیک، C و C++ پشتیبانی کند و ابزار تولید راه‌انداز به منظور تولید راه‌اندازهایی برای سخت‌افزارها می‌باشد.

۲-۷-۱۲- استفاده از اسکادا در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته

افزایش سریع تقاضای انرژی الکتریکی در سرتاسر دنیا، تأمین کننده‌های توان را وادار به افزایش ظرفیت واحدهای تولید توان کرده است. این مسأله اتصال مراکز بار متفاوت در نواحی مختلف را ضروری می‌سازد. از آنجا که شبکه قدرت یک شبکه به شدت پیچیده است، مهندسین قدرت با برخی از وظایف چالش برانگیز از جمله ثبت زمان واقعی داده‌ها،

---

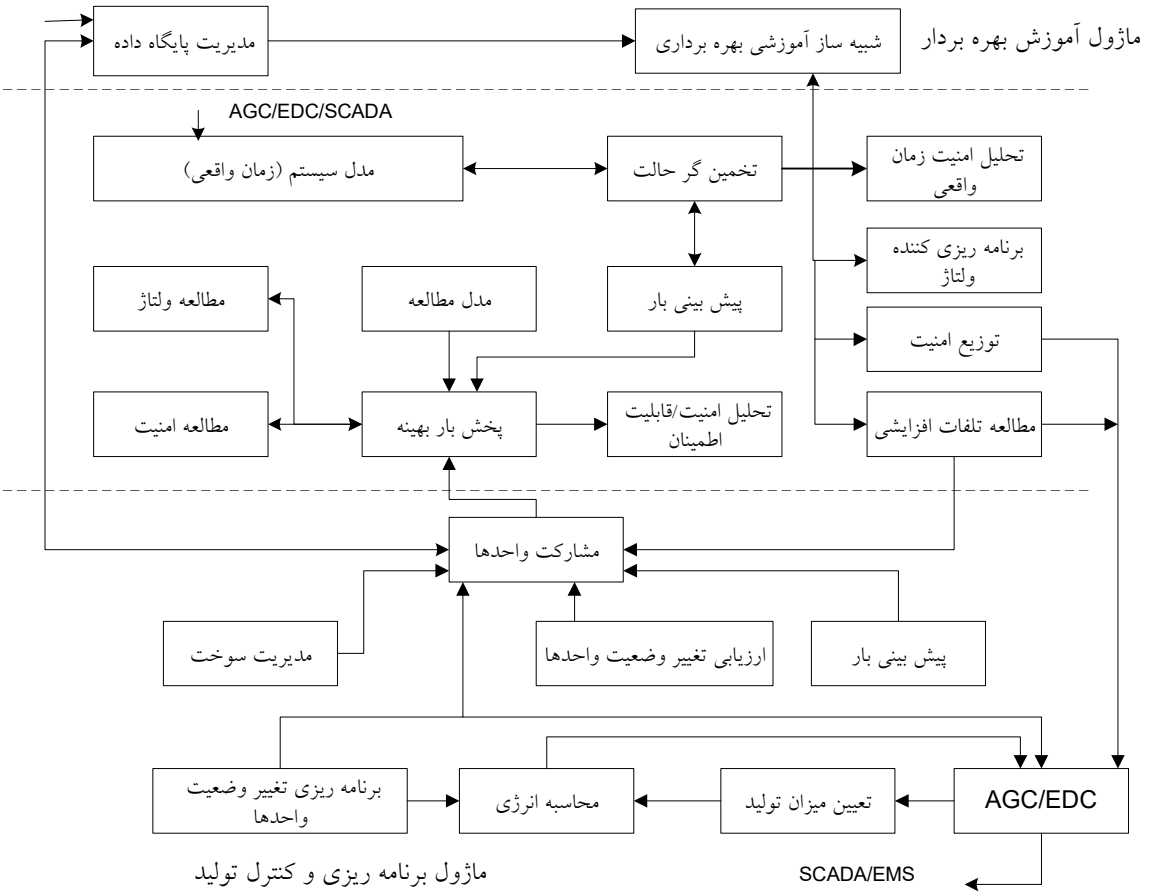
[1] . Real time
[2] . Open database connectivity (ODBC)
[3] . Application Program Interface

شبکه‌های مخابراتی و ارتباط ماشین- انسان مواجه هستند. در فضای رقابتی بین‌المللی کنونی، تأمین‌کنندگان نیروی برق ملزم به بهره‌برداری اقتصادی از سیستم‌ها و نیز حفظ محدودیت‌های ایمنی و امنیتی مورد نیاز می‌باشند.

ناپایداری سیستم و نیز فروپاشی ولتاژ از جمله نگرانی‌های اصلی تأمین‌کنندگان انرژی الکتریکی می‌باشند که می‌توان با پایدارسازی شبکه قدرت به هم پیوسته چند ناحیه‌ای آن‌ها را رفع نمود. ویژگی‌های پیشرفته موجود در سیستم مدیریت انرژی و سیستم‌های اسکادا به منظور تأمین کنترل و حفاظت مبتنی بر سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بلوگ دیاگرام شکل (۴-۱۲) ساختار سیستم مدیریت انرژی/اسکادا را نشان می‌دهد. این ساختار شامل ماژول‌های متفاوت از جمله ماژول برنامه‌ریزی و کنترل تولید، ماژول تحلیل شبکه و ماژول آموزش کاربر می‌باشد.

مهم‌ترین نکته برای مدیریت و برنامه‌ریزی تولید اقتصادی در یک شبکه قدرت به هم پیوسته کنترل تولید است. در این مسأله، باید فرکانس سیستم و توان عبوری از خطوط ارتباطی در محدوده از پیش تعیین شده که متناسب با ظرفیت سیستم است، حفظ شوند. ماژول کنترل تولید و برنامه‌ریزی وظیفه تعیین اقتصادی‌ترین سطح خروجی هر واحد تولیدی برای یک بار معین، برنامه‌ریزی روشن و یا خاموش بودن و نیز مشارکت ژنراتورها به منظور برآورده کردن تقاضای بار متغیر را بر عهده دارد. همچنین این ماژول تعیین قیمت و معاملات خرید و فروش با سایر شبکه‌های قدرت را بر عهده دارد.



شکل ۴-۱۲: ماژول‌های مختلف سیستم اسکادا

چند خطاهای محتمل ممکن است منجر به خروج واحدهای تولیدی، شبکه‌های انتقال و شبکه‌های توزیع در یک سیستم قدرت به شدت پیچیده شود. تحلیل درست به منظور حفظ ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم ضروری می‌باشد. سیستم مدیریت انرژی باید توانایی تحلیل برخی از خروجی‌های ممکن را داشته باشد. تحلیل صحیح وقایع بوقوع پیوسته در سیستم اطمینان می‌دهد که اطلاعات به طور خودکار به کاربر ارسال شده است. این کاربر می‌تواند بهترین استراتژی ممکن برای جلوگیری از دست دادن تولید و مشکلات افت ولتاژ را طراحی کند. این تحلیل توسط ماژول تحلیل شبکه با پایش برخی مقادیر که از دور اندازه‌گیری شده است و تخمین اثر هر خروج ممکن بر بهره‌برداری شبکه قدرت انجام می‌شود.

۳-۷-۱۲- معماری سیستم اسکادا

بخش جمع‌آوری داده در اسکادا، داده‌های اندازه‌گیری شده از دور که توسط سایر توابع در سیستم مدیریت انرژی استفاده می‌شود را جمع‌آوری می‌کند. سیستم اسکادا ضمن کنترل تجهیزات به طور محلی و یا از راه دور ، پشتیبانی از

بهره‌برداران سیستم را نیز بر عهده دارد. فرآیند کنترل تجهیزات شامل باز و بسته کردن مدارشکن به همراه خصوصیات ایمنی نظیر صدور اجازه و فرآیند انتخاب-تأیید- اجرا می‌باشد. سیستم اسکادا سه وظیفه خطیر زیر را بر عهده دارد:

i. جمع‌آوری داده
ii. کنترل نظارتی
iii. کنترل و نمایش هشدار

این وظایف به تفصیل در ادامه مورد بحث قرار گرفته‌اند.

جمع‌آوری داده

اسکادا دارای یک زیر ماژول تحت عنوان تابع جمع‌آوری داده می‌باشد که داده‌های خام و یا داده‌های پردازش شده از پایانه‌های راه دور را در بازه‌های زمانی معین جمع‌آوری می‌کند. پنج واحد که وظیفه جمع‌آوری داده را بر عهده دارند در ادامه توضیح داده شده‌اند:

۱) واحد جمع‌آوری داده به طور متناوب و با نرخ نمونه‌برداری مناسب، داده‌ها را از پایانه‌های راه دور[1] (RTUs) جمع‌آوری می‌کند و داده‌های برداشت شده به منظور اطمینان از عملکرد پایانه‌های راه‌دور پایش می‌شود.
۲) واحد پردازش داده، داده‌های خام (مقادیر آنالوگ) را به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌کند. این واحد همچنین وظیفه تبدیل وضعیت سیستم به مقدار متناظر را به عهده دارد به عنوان مثال عدد ۱ برای حالت بسته و عدد ۰ برای حالت باز در نظر گرفته می‌شود.
۳) واحد پایش داده ضمن ارتباط با پردازنده، هشدار، تغییر وضعیت دستگاه‌ها و نیز تجاوز از حدود عملکردی را به آن اعلام می‌کند. همچنین این واحد خصوصیاتی شامل باند مرده[2] و بازگشت به حالت عادی[3] را فراهم می‌کند.
۴) واحد محاسبات ویژه پارامترهای مختلف را محاسبه می‌کند که از آن جمله می‌توان به محاسبه MVA از MW و MVAR، محاسبه MVA از kV و آمپر و محاسبه آمپر از MVA و kV اشاره نمود. علاوه بر این، سایر محاسبات لازم را هنگام نیاز انجام می‌دهد. این مقادیر از داده‌های برداشت شده و موجود در پایگاه‌های داده استخراج می‌شود.
۵) واحد کنترل پیکره‌بندی هنگامی عمل می‌کند که یک خطای مخابراتی پایدار رخ می‌دهد. در چنین شرایطی این واحد، پایانه مورد نظر را از فرآیند برداشت داده خارج می‌کند و یا کانال‌های اختصاص داده شده را تغییر

[1] . Remote terminal unit (RTU)
[2] . Dead-band
[3] . Return-to-Normal

می‌دهد. این واحد همچنین ارتباط خاتمه یافته با پایانه راه دور را در یک بازه زمانی مشخص مجدداً برقرار می‌کند.

تابع کنترل نظارتی

بهره‌برداری از واحد کنترل نظارتی از فرآیندهای چند مرحله‌ای پیروی می‌کند. اولین گام انتخاب دستگاهی است که باید کار کند. در مرحله دوم، تأیید بصری انجام می‌شود. مرحله سوم که مرحله نهایی است شامل اجرا و یا لغو توسط کاربر می‌باشد. در این روش، تابع کنترل نظارتی اجازه می‌دهد که کاربر دستگاه‌ها را از راه دور کنترل کند و یا مقادیر موجود در پایگاه داده را جایگزین و یا اصلاح کند.

شرطی‌سازی داده شامل عملکردهای مختلف از جمله جابجایی داده‌های اندازه‌گیری‌شده از دور، فعال‌سازی سدکننده هشدار و تغییر وضعیت دستگاه می‌باشد.

تابع کنترل و نمایش هشدار

این واحد سیگنال‌های هشدار را به کاربر اعلان می‌کند. ارائه هشدار شامل موارد زیر می‌باشد:

- ایجاد پیام هشدار
- سازماندهی هشدارها در گروه‌های مختلف
- نگهداری و نمایش خلاصه هشدار
- ثبت و نگهداری وقایع
- شروع اعلان صوتی و یا تصویری و برقراری ارتباط با سایر توابع
- تخصیص الویت به پیام‌های هشدار
- تعیین نقاطی که از هشدار منع شده‌اند و یا اساساً توسط کاربر جایگزین شده‌اند.
- پاسخگویی به یک هشدار

به منظور توانایی برای انجام برخی از وظایف بالا، سیستم EMS/SCADA به زیربخش‌های زیر احتیاج دارد:

i. زیر سیستم رابط کاربر
ii. زیر سیستم ارتباطات
iii. زیر سیستم مدیریت اطلاعات

۸-۱۲-حفاظت مبتنی بر کامپیوتر

اختراع ریزپردازنده‌ها در آغاز دهه هفتاد، انقلابی در عملکرد دنیای حرفه‌ای ایجاد کرد. خیلی زود پس از اختراع ریزپردازنده‌ها، محققین توسعه طرح‌های حفاظتی مبتنی بر ریزپردازنده‌ها را آغاز کردند. در آغاز این رله‌ها بر مبنای اعدادی که متناظر با مقادیر لحظه‌ای سیگنال خطا بودند عمل می‌کردند. در گام بعدی، پیشرفت محققین در دهه ۹۰ به پیدایش طرح‌های حفاظتی بسیار سریع بر مبنای امواج سیار و ریزموج‌ها منجر شد. این رله‌ها به کمک نرم‌افزارهایی که به طور خاص برای این هدف طراحی شده‌اند کار می‌کنند. بنابراین رله‌های مبتنی بر کامپیوتر، یک دستگاه براساس گشتاور الکتریکی را به یک پردازنده اطلاعات قابل برنامه‌ریزی تبدیل کرده‌اند.

سیگنال‌های خطا در سیستم قدرت ذاتاً آنالوگ هستند. ولتاژ و جریان خطا پس از برداشت از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ از فیلترهای آنالوگ پایین‌گذر عبور داده می‌شوند. این فیلترها به منظور اطمینان از عدم حضور مؤلفه‌هایی با فرکانسی بیش از نصف فرکانس نمونه‌برداری مورد نیاز می‌باشند. از آنجا که پردازش دیجیتال تنها زمانی قابل انجام است که طیف فرکانسی سیگنال عاری از نویز و هارمونیک‌های مزاحم باشد بنابراین فیلتر کردن سیگنال ورودی مورد نیاز است.

هنگام تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، سیگنال آنالوگ باید ثابت نگه داشته شود. برای این منظور، سیگنال آنالوگ به مدار نمونه‌بردار و نگهدار[1] فرستاده می‌شود. بدون مدار نمونه‌بردار و نگهدار، مدیریت محدوده فرکانسی برای مبدل آنالوگ به دیجیتال مشکل می‌باشد. در مرحله بعد، خروجی مدار نمونه‌بردار و نگهدار به مبدل آنالوگ به دیجیتال ارسال می‌شود. به منظور تطبیق تعداد سیگنال‌های ورودی، پیش از مبدل آنالوگ به دیجیتال از مالتی‌پلکسر استفاده می‌شود. پردازنده کامپیوتری با کمک سیگنال نشانگر پایان عملیات تبدیل[2] که توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال صادر می‌شود، عمل مدار نمونه‌بردار و نگهدار و نیز عمل تبدیل آنالوگ به دیجیتال را کنترل می‌کند. سیگنال خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال نشانگر شکل دیجیتال مقادیر لحظه‌ای سیگنال خطا است که مناسب پردازنده‌های کامپیوتری می‌باشد. دقت و قدرت تفکیک مبدل آنالوگ به دیجیتال بر حسب اینکه خروجی آن چند بیتی باشد تغییر می‌کند. خروجی مبدل می‌تواند ۱۶، ۳۲ و یا ۶۴ بیتی و یا حتی بیشتر باشد.

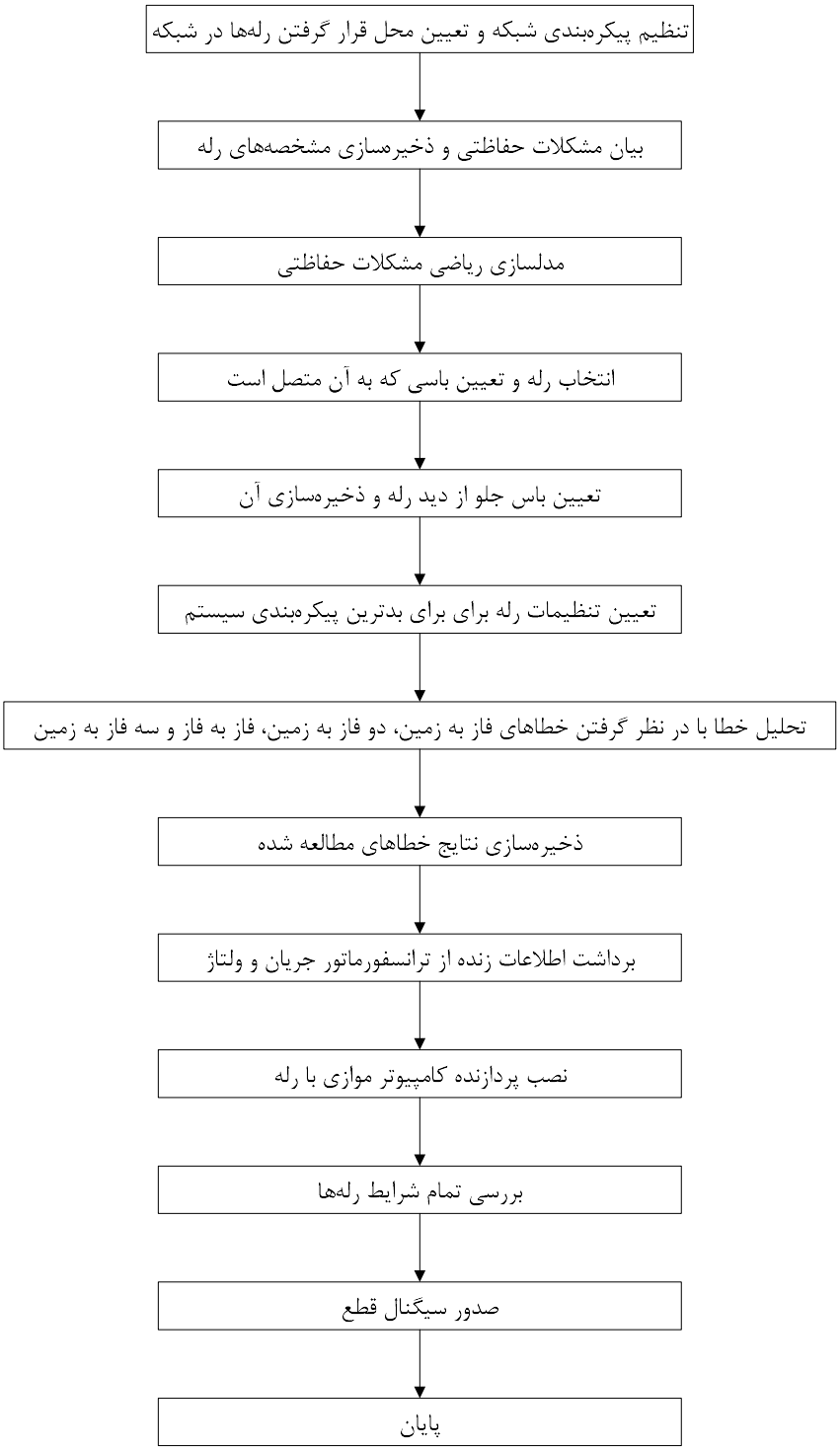
پس از این مرحله، مقادیر دیجیتال سیگنال‌ها در حافظه تصادفی پردازنده ذخیره می‌شود. نرم افزار رله مطابق با الگوریتم حفاظتی، سیگنال‌های دیجیتال را که همان سیگنال‌های خطا هستند مورد پردازش قرار می‌دهد. پردازنده‌ای که مسئولیت صدور فرمان قطع را بر عهده دارد بر روی یکی از بیت‌های خروجی خود سیگنال قطع را صادر می‌کند. این سیگنال متناسب با سیم‌پیچ قطع مدار شکن تولید می‌شود. همچنین پردازنده کامپیوتر امکان برقراری ارتباط با سایر

---

[1] . Sample and hold

[2] . End of conversion

رله‌ها و یا سایر کامپیوترهای ناظر به هم پیوسته را فراهم می‌سازد. طرح‌های حفاظتی مبتنی بر کامپیوتر، کاربر پسند بوده و اطمینان کاربر را افزایش می‌دهند. این مسأله کارآمدی و قابلیت اطمینان کلی سیستم حفاظتی را بهبود می‌دهد. الگوریتم حفاظت مبتنی بر کامپیوتر در بلوک دیاگرام شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: الگوریتم حفاظت مبتنی بر کامپیوتر

تمرین

۱. حفاظت بسیار سریع در شبکه‌های قدرت کنونی تا چه حد حائز اهمیت می‌باشند؟
۲. توضیح دهید که طرح‌های حفاظتی تطبیقی کنونی چه تفاوت‌هایی با انواع قدیمی آن دارند.
۳. حفاظت بر مبنای هوش مصنوعی را توضیح دهید.
۴. توضیحاتی در رابطه با روش حفاظت بر مبنای تبدیل موجک بنویسید.
۵. نیاز به حفاظت ناحیه گسترده در شرایط فعلی را با جزئیات کامل شرح دهید.
۶. چگونه استفاده از حفاظت ترکیبی، سرعت و قابلیت اطمینان سیستم قدرت مدرن را بهبود می‌دهد؟
۷. پیکره‌بندی و نیز امکاناتی که در سیستم‌های EMS/SCADA موجود است را توضیح دهید.
۸. چگونگی کاربرد سیستم اسکادا در سیستم قدرت را بیان کنید
۹. توضیحاتی در رابطه با حفاظت مبتنی بر کامپیوتر در سیستم قدرت بنویسید.

۱۳- مدیریت سیستم قدرت

۱-۱۳-مرکز توزیع بار[1]

وقوع تغییرات مختلف در سیستم قدرت از جمله ارتقای شبکه قدرت، افزایش سطح ولتاژ انتقال، ارتباط داخلی در شبکه، افزایش مشترکین، گروه‌بندی مصرف‌کنندگان و استفاده از انواع مختلف سوخت در تولید توان، عملیات مربوط به توزیع بار را بیش از پیش پیچیده کرده است. مسئولیت توزیع‌کنندگان بار نیز چند بعدی شده است چون یکپارچگی شبکه‌ها و صنایع مختلف منجر به مشکلات امنیتی در سیستم شده و نیاز به توزیع اقتصادی بار را در پی دارد.

وظایف اصلی مراکز توزیع بار عبارتند از:

i. پردازش داده و مطالعات سیستم
ii. پیش‌بینی بار و تحلیل رفتار سیستم
iii. موازنه بار و تولید و تأمین کیفیت توان
iv. توزیع اقتصادی بار
v. مطالعه الگوی توزیع بار و انرژی
vi. یکپارچه‌سازی مراکز فرماندهی و مراکز توزیع بار محلی
vii. حفظ نظم شبکه و هماهنگی با شبکه‌های همسایه
viii. طراحی استراتژی برای بهره‌برداری شبکه
ix. تحلیل وقایع و اقدامات پیشگیرانه
x. آمادگی برای شروع تاریک[2]
xi. خروج واحدهای تولیدی و خطوط EHV
xii. حفظ برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی و خطوط انتقال
xiii. امنیت سیستم و امکان وقوع جزیره
xiv. مدیریت اسکادا و ارتباطات
xv. روابط عمومی و تعامل با مشترکین

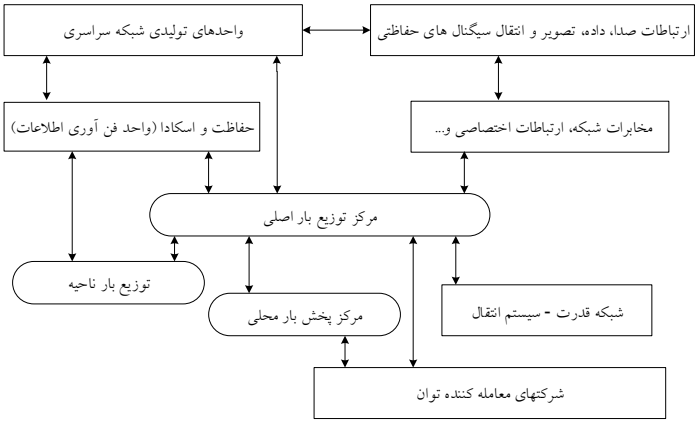
به منظور جلوگیری از وقوع خاموشی‌های سراسری، اطمینان از کنترل خودکار، مؤثر و پیوسته واحدهای تولیدی و مراکز بار توسط مرکز توزیع بار ضروری می‌باشد. اینترلاک‌های مطمئن و سیستم‌های پشتیبان نیز برای اطمینان از عملکرد ایمن شبکه و آرایش‌های عاری از اشتباه برای جلوگیری از وقوع خاموشی سراسری مورد نیاز است.

---

[1] . Load dispatch center
[2] . Black start

به منظور کمک به مدیریت مؤثر سیستم قدرت، امکان برقراری ارتباط صوتی و انتقال داده بین مراکز بار، پست‌ها، واحدهای تولیدی و مرکز توزیع بار ضروری می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از شبکه مخابراتی اختصاصی، وجود یک شبکه آماده به کار مطمئن که ظرفیت اداره تمامی کانال‌های داده و صوت را داشته باشد، ضروری است.

بلوک دیاگرام یک مرکز توزیع بار در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۳: بلوک دیاگرام مرکز توزیع بار

۱۳-۲-گزارش‌گیری و مدیریت داده

برآورد تقاضای بار در آینده و برنامه‌ریزی برای واحدهای تولیدی آتی، مستلزم مدیریت صحیح داده توأم با نگاهی نسبت به تغییرات گذشته داده‌ها می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، مهندسین در مراکز توزیع بار نیازمند ثبت دقیق، نظام‌مند و خودکار داده‌های زیر هستند:

- ثبت پخش بار در بخش‌های مختلف شبکه در هر ساعت
- توان تبادلی توسط خطوط بین ناحیه‌ای
- توان تولیدی توسط واحدهای تولید مرکزی
- توان تولیدی توسط واحدهای خصوصی
- سطوح ولتاژ در مراکز بار
- سطوح ولتاژ در پست‌های شبکه مرکزی
- سطوح ولتاژ در پست‌های شبکه بین ناحیه‌ای
- جزئیات خروج خطوط انتقال
- مدت زمان خروج خط
- مدت زمان خروج واحدهای تولیدی
- توان راکتیو تبادلی توسط خطوط بین ناحیه‌ای

- توان راکتیو عبوری از خطوط انتقال شبکه
- فرکانس شبکه در هر ساعت
- تغییرات ناگهانی در فرکانس شبکه
- هشدارهای صادره از واحد هواشناسی
- جزئیات واحدهای خارج شده به همراه دلایل خروج
- نوسان توان و یا پدیده هانتینگ [1]به همراه دلایل آن
- خرابی سیستم اسکادا و یا سیستم ارتباطی
- خرابی در سوئیچگیر و یا هر تجهیز مهم دیگر
- جزئیات خطا در سیستم
- خطاهای مهم در شبکه‌های همسایه

دلیل اینکه گفته می‌شود مرکز توزیع بار، مرکز اعصاب هر شبکه قدرت است این است که علاوه بر گزارش منظم تغییرات در سیستم قدرت، به جمع‌آوری داده و نیز ثبت و نگهداری پارامترهای مختلف سیستم به همراه تغییرات شرایط آب و هوایی می‌پردازد. تبادل داده به طور روزانه و متناوب بین بخش‌های مختلف شبکه قدرت که شامل نیروگاه‌ها، واحدهای بازرگانی و فروش انرژی، پست‌های انتقال و توزیع و واحدهای تأمین سوخت می‌باشد، مدیریت مؤثرتر سیستم قدرت را تضمین می‌کند. از این منظر، مرکز توزیع بار نقشی حیاتی بر عهده دارد. داده‌هایی که توسط مرکز توزیع بار و به طور منظم ارائه می‌شود به آماده‌سازی استراتژی آینده و پیش‌بینی تقاضا کمک می‌کند.

۳-۱۳-توزیع‌کننده بار

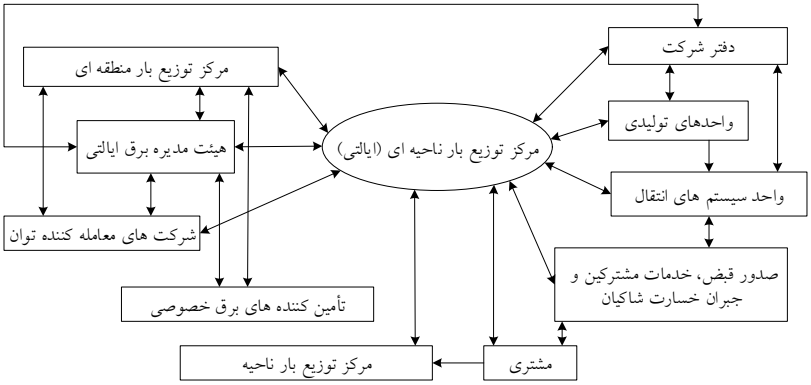
یک استفاده کننده از انرژی الکتریکی که در ازای آن هزینه می‌پردازد به عنوان مشترک و فراهم‌آورنده انرژی مورد نیاز به عنوان تأمین کننده شناخته می‌شود. مشابه سایر حوزه‌ها، در حوزه مدیریت سیستم قدرت نیز روابط مصرف‌کننده-تأمین‌کننده حائز اهمیت است و در نتیجه نقش پرداخت درست و به موقع توسط مصرف‌کننده در مقابل دریافت توان الکتریکی و خدمات مرتبط نیز قابل توجه می‌باشد.

یک مصرف‌کننده انتظار دارد در موقع لزوم پاسخ‌های روشنی در تمامی جوانب سیستم قدرت از جمله تولید، مبادله توان، انتقال توان و شرکت‌های تولید کننده توان بدست آورد. بنابراین توزیع کننده بار باید قادر به پاسخ‌گویی خواسته‌های مصرف‌کنندگان باشد. هر گونه اختلاف بین توان سفارش داده شده و توان واقعی در دسترس از لحظ مقدار و یا بازه زمانی باید شناسایی شده و توزیع کننده بار باید به منظور جلوگیری از اختلاف در آینده، مصرف کننده را از این امر مطلع کند.

[1] . Hunting

در شبکه قدرت پیچیده و تجدیدساختار یافته امروزی، توزیع کننده بار باید در رابطه با حجم و ماهیت داده و حتی کوچک‌ترین اطلاعاتی که باید از بنگاه و یا شخص مربوطه اخذ شود دقیق و صریح عمل کند. این امر به کاهش زحمات هر فرد و جلوگیری از تکرار تلاش‌های صورت گرفته در هر مرحله از کار کمک می‌کند. بنابراین نگهداری اسناد مربوط به داده‌ها در هر مرکز توزیع بار حائز اهمیت می‌باشد.

علاوه بر این، توزیع کننده بار باید توانایی داشته باشد که نتایج بدست آمده از تعاملات منظم را با مقامات و متخصصینی که مسئولیت تولید، انتقال، توزیع، کنترل و مبادلات (خرید و فروش) توان را بر عهده دارند به طور صحیح قالب‌بندی و ذخیره‌سازی کند. اگر اطلاعات همراه با جزئیات کامل در اختیار توزیع کننده بار باشد اجرای عملیات اصلاحی و سریع برای جلوگیری از وقوع عیب در سیستم به آسانی انجام می‌پذیرد. در بیشتر موارد، یک وقفه ارتباطاتی و یا ارتباطات ناصحیح اغلب باعث ایجاد اختلاف بین تأمین‌کننده و مصرف‌کننده شده و نتایج نامطلوبی را در پی خواهد داشت. بلوک دیاگرام ارتباطات یک توزیع کننده بار در بین مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.



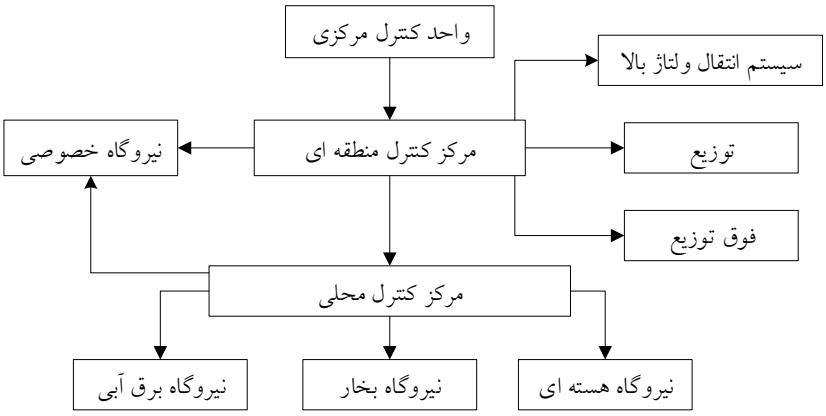
شکل ۲-۱۳: توزیع کننده بار در بین مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان

۴-۱۳-مرکز کنترل بار

به منظور اطمینان از کیفیت توان، حفظ ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه در محدوده مجاز ضروری می‌باشد. هر تغییری در فرکانس سیستم موضوع بسیار حساسی است چون بر عملکرد سیستم تأثیرگذار می‌باشد. در شبکه قدرت پیچیده و به هم پیوسته امروزی، فرکانس سیستم ممکن است در اثر تغییر در تولید و یا تقاضا در هر بخشی از سیستم قدرت تغییر پیدا کند. بنابراین تنظیم فرکانس سیستم به منظور حفظ آن در نزدیکی مقدار نامی ضروری می‌باشد. در فرآیندی که به طور معمول برای کنترل بار- فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد، تولید به گونه‌ای کنترل می‌شود که تقاضای بار دقیقا برآورده شود، فرکانس سیستم نزدیک به مقدار نامی باشد و توان مبادلاتی در خطوط ارتباطی بین ناحیه‌ای در مقدار برنامه‌ریزی شده حفظ شود. تغییرات کم بار نیز به طور خودکار در پست‌های تنظیم کننده، تنظیم می‌شود.

وظیفه اصلی مرکز کنترل در یک سیستم قدرت به هم پیوسته مدیریت هر گونه شرایط اضطراری هنگام خرابی یک خط انتقال و یا از دست دادن تولید از طریق بازیابی سیستم می‌باشد. بازیابی سیستم شامل دو مرحله است که مرحله اول شامل حذف بار اضطراری به منظور حذف اضافه بار و سپس عملکرد عادی سیستم می‌باشد.

به منظور اطمینان از کنترل اضطراری مؤثر و کارآمد، حذف بار در سراسر سیستم و به صورت پلکانی گسترش می‌یابد. پس از آن که اقدامات اصلاحی انجام شود، حذف بار به طور خودکار توسط رله‌ها در بازه‌های زمانی منظم به منظور بازیابی سیستم انجام می‌شود. همراه با مراکز توزیع بار، مراکز کنترل بار نیز راه‌اندازی می‌شوند. در حقیقت مراکز کنترل بار بخشی از مراکز توزیع بار هستند و دارای سیستم‌های اسکادا برای جمع‌آوری و پایش داده هستند. وظیفه مهم مراکز کنترل محدودسازی زمان و میزان اثرات خطا می‌باشد. بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۳-۱۳) سلسله مراتب کنترل در سیستم قدرت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳: بلوک دیاگرام کنترل سلسله مراتبی در سیستم قدرت

۵-۱۳-کنترل سیستم قدرت مبتنی بر کامپیوتر

هدف اصلی کامپیوتری کردن عملکرد سیستم قدرت، اطمینان از بهره‌برداری اقتصادی و مطمئن همراه با کاهش ضرایب خطا به خصوص خطاهای انسانی می‌باشد. در بهره‌برداری با استفاده از کامپیوتر، تنها نیاز است که کاربران در صورت لزوم برای پاسخگویی و اقدام بازخوردی[1]، با مصرف‌کننده ارتباط برقرار کند. همچنین مدیریت و کنترل مبتنی بر کامپیوتر، ذخیره‌سازی اطلاعات و ثبت دقیقه به دقیقه وظایف انجام شده توسط کاربران انسانی را تسهیل می‌کند. بسته به اندازه و ماهیت شبکه سیستم قدرت، ماژول‌های عملکردی مختلفی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این ماژول‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

i. سیستم کامپیوتر اصلی که در ایستگاه مرکزی قرار می‌گیرد.

[1] . Feedback action

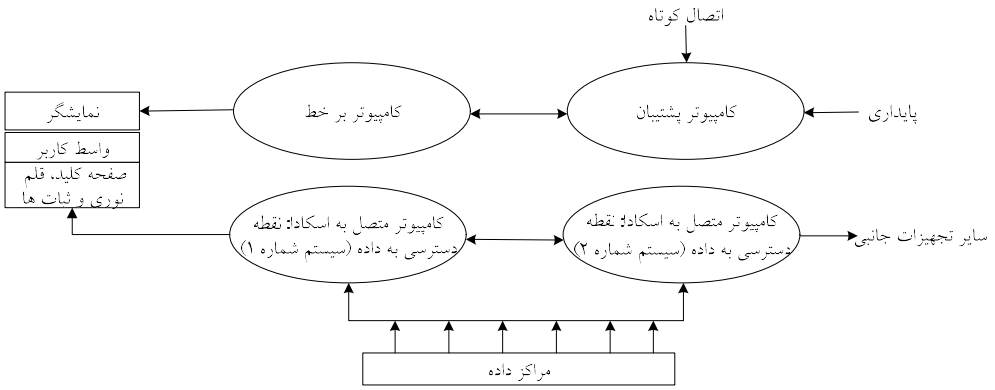
ii. واحد پایانه راه دور[1] که نیروگاه‌ها و پست‌های شبکه را کنترل می‌کند.

iii. ماژول‌های ذخیره‌سازی داده

iv. ماژول خروجی

وظیفه سیستم کامپیوتر اصلی مدیریت محاسبات داده، پذیرش داده‌های ورودی، ذخیره‌سازی اطلاعات مطلوب، پردازش عملکردها و صدور دستورالعمل مقتضی برای RTU مورد نظر می‌باشد. ماژول خروجی شامل چاپگر و صفحه نقشه پویا می‌باشد. واحد RTU داده را ارسال و اطلاعات پردازش شده را دریافت می‌کند.

به طور کلی، به منظور اطمینان از قابلیت اعتماد بالا و جلوگیری از خرابی در شبکه سیستم قدرت، دو مجموعه کامپیوتر برای نظارت از راه دور، جمع‌آوری داده، کنترل، مدیریت انرژی و امنیت سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۴-۱۳) یک نوع پیکره‌بندی را نشان می‌دهد که در آن یک کامپیوتر به عنوان کامپیوتر بر خط و دیگری به عنوان پشتیبان شناخته می‌شود. هر کدام از کامپیوترها دارای حافظه، سیستم راه‌اندازی و تجهیزات ورودی- خروجی مختص به خود می‌باشد. کامپیوتر بر خط سیستم قدرت را پایش و کنترل می‌کند. این واحد به طور متناوب حافظه سخت مشترک بین دو کامپیوتر را به روز رسانی می‌کند. کامپیوتر برنامه‌های خارج از خط[2] نظیر پیش‌بینی بار و یا جایابی هیدروترمال را انجام می‌دهد. برنامه‌های جدید که برای کنترل سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند عمدتاً در کامپیوتر پشتیبان ترجمه و آزمایش می‌شوند. این برنامه‌ها پس از تست به وضعیت بر خط تبدیل می‌شوند. بررسی نکات مربوط به وضعیت‌های مختلف شامل موقعیت تپ ترانسفورماتور، موقعیت کنتاکت سوئیچگیر، برنامه‌ریزی تبادل توان در خطوط ارتباطی و بررسی از راه دور به منظور تشخیص خرابی و خطا، بار ژنراتورها، ولتاژ، محدوده عملکرد و ظرفیت بویلر در بازه‌های زمانی دو ثانیه‌ای انجام می‌شود. مقیاس زمانی کنترل‌های مختلف در مرکز توزیع و کنترل بار در جدول (۱-۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: پیکره‌بندی کامپیوتر

[1] . Remote terminal unit

[2] . OffLine

جدول ۱-۱۳: مقیاس زمانی کنترل‌های مختلف در مرکز توزیع و کنترل بار

مقیاس زمانی	کنترل
میلی‌ثانیه	رله‌گذاری حفاظتی، کنترل ولتاژ سیستم و کنترل تحریک
۱ تا ۱۰ ثانیه	کنترل تولید اتوماتیک
۱ تا ۱۵ ثانیه	توزیع بار اقتصادی
چند ساعت تا یک هفته	مشارکت واحدها
۱ تا ۶ ماه	برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری واحدهای تولیدی
۱ تا ۵ سال	برنامه‌ریزی سیستم (نوسازی/گسترش)

تمرین

۱. توضیح مختصری در رابطه با نیاز به مدیریت سیستم قدرت بنویسید
۲. وظایف اصلی مرکز توزیع بار را بیان کنید
۳. یک مرکز کنترل چگونه کار می‌کند؟
۴. اهمیت و مزایای کنترل سیستم قدرت مبتنی بر کامپیوتر را بیان کنید.
۵. نقش یک توزیع کننده بار در مجموعه مصرف کننده را شرح دهید
۶. گزارش‌گیری و مدیریت داده در مراکز توزیع بار از چه لحاظ اهمیت دارد؟