۱۳

حفاظت سیستم

درفصل ۵، درارتباط با بررسی حالتهای گذرای خط انتقال، ازحفاظت دستگاهها دربرابر امواج ناشی از آذرخش وکلیدزنی به‌اختصار بحث کردیم. خرابی وسایل دراثرضربه‌های ولتاژ یا به‌دلایل دیگر، منجر به‌عیب در سیستم قدرت می‌شود. اکنون که عیبهای متعادل و نامتعادلی را که ممکن است در سیستم قدرت رخ بدهند بررسی کردیم و از نحوهٔ محاسبهٔ جریانها و ولتاژهایی که در طی اتصال کوتاه وجـود دارند آگاهی داریم، آماده‌ایم تـا حفاظت سیستم را با جداسازی بخش عیب کرده بررسی کنیم. اگرچه وقوع اتصال کوتاهها ازجمله رویدادهای نادر است با این حال حذف اتصال کوتاهها از سیستم قدرت،مرحله به‌مرحله وبا حداکثرسرعت ممکن، بیشترین اهمیت را دارد. درسیستمهای قدرت امروزی، فرایند حذف اتصال‌کوتاه به‌طورخودکار یعنی بدون دخالت انسان انجام‌می‌شود. تجهیزاتی که‌این‌کار را انجام می‌دهند درمجموع، سیستم حفاظت نام‌دارند. ما روی حفاظت خطهای انتقال و ترانسفورماتورها تأکید خواهیم کرد تا برخی اصول مهم را به‌دست آوریم اما روشی راکه درحفاظت ژنراتورها، موتورها وشینه‌ها به‌کارمی‌رود نیزمطالعه خواهیم‌کرد. یك روش جامع برای حفاظت سیستم، خارج ازحوزهٔ بحث این‌کتاب است.

دقیقترگفته باشیم عیب، عبارت از هرحالت غیرعادی سیستم است، به‌طوری که در حالت‌کلی، عیبها شامل‌اتصال‌کوتاهها ومدارباز‌ها می‌شوند. دراینجا بحث عیبها را به‌اتصال کوتاه محدود خواهیم‌کرد. عیبهای‌مدار-بازی‌از اتصال‌کوتاهها بسیار نادرترند واغلب در پیامدهای بعدی به‌اتصال‌کوتاه تبدیل می‌شوند. از نظر وخامت آثار عیب، اتصال کوتاهها

نسبت به‌مدار-بازها بسیار نگران‌کننده‌ترند. هرچند پاره‌ای از مدار-بازیها برای کارکنان، خطر بالقوه محسوب می‌شوند.

اگر اجازه داده شود اتصال‌کوتاهها مدتی دراز در سیستم قدرت باقی بمانند احتمال وقوع همه یا بسیاری از آثار نامطلوب زیر وجود دارد:

۱. کاهش پهنهٔ پایداری سیستم قدرت که موضوع بحث در فصل ۱۴ است.

۲. خسارت به‌تجهیزات نزدیک محل‌عیب بر اثر جریانهای زیاد، جریانهای نامتعادل، یا کاهش ولتاژهای ناشی از اتصال‌کوتاه.

۳. بروز انفجارهای احتمالی در طی اتصال‌کوتاه در تجهیزات حاوی روغن عایق کننده و منجر به‌آتش سوزی که خطر جدی برای کارکنان و خسارت به‌تجهیزات دیگر را به‌دنبال دارند.

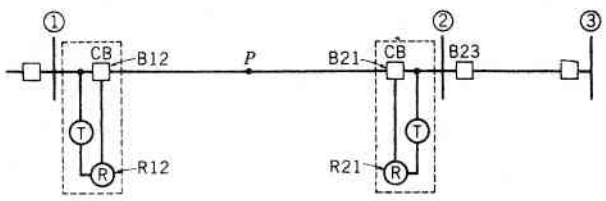
۴. گسیختگیهایی در سراسر منطقهٔ زیر پوشش سیستم قدرت بر اثر عملکردهای حفاظتی پشت سرهم یا زنجیره‌ای که سیستمهای مختلف حفاظت انجام می‌دهند.

اینکه در هر حالت خاص، کدام یك از این آثار عمیق‌تر است بستگی به‌طبیعت و شرایط کار سیستم قدرت دارد.

۱۳-۱ مشخصات سیستمهای حفاظت

حذف سریع عیب، توسط سیستم حفاظت، نیازمند کار درست تعدادی از زیرسیستمهای آن است. بهترین راه درك کار هر کدام از این زیرسیستمها توصیف رویدادهایی است که از زمان بروز عیب تا حذف احتمالی آن از سیستم قدرت، به‌وقوع می‌پیوندد. هرچند گاهگاهی عیبهای پی در پی و پیچیده‌ای در سیستم قدرت رخ می‌دهند و در بعضی اوقات برخی از عملیات نامعمول حفاظت سیستم انجام می‌شوند. با این حال، به‌حالت سادهٔ وقوع اتصال کوتاه سه فاز درخط انتقال و عملکرد متعاقب سیستم حفاظت مربوط به‌آن بیشتر توجه خواهیم کرد. سیستم نمایانده درشکل۱۳-۱ را در نظر بگیرید. شینه‌های ۱ و ۲ در دوسرخط انتقال قرار دارند. در این دو سرسیستم حفاظت یکسانی، در میان مستطیلهای نقطه‌چین گنجانده شده است که خط انتقال ۱-۲ را حفاظت می‌کنند. سیستم حفاظت می‌تواند به‌سه زیرسیستم تقسیم شود:

۱. مدارشکنها (CB یا B)



شکل ۱۳-۱ نمودار تك-خطی که دوخط انتقال وعناصرسیستم حفاظت را نشان می‌دهد.

۲. مبدلها (T)
۳. رله‌ها (R)

مدارشکنها را به‌اختصار درفصل ۱۰ بررسی کردیم. رله‌ها وسایلی هستند که عیب را حس می‌کنند و باعث تحریك (تغذیهٔ) مدار رهاگر مدارشکنها و بازشدن اتصال آنها می‌شوند. مبدلها ورودی رله‌ها را تأمین می‌کنند. همان‌طور که به‌بسط مطالب این‌فصل ادامه می‌دهیم هـر کـدام ازاین زیرسیستمها را بیشترخواهیم شکافت.

معمولا برای شناسایی مدارشکنها و رله‌ها نشانه‌گذاری دو شماره‌ای به‌کار خواهیم برد. بـدین‌سان، خط ۱–۲ در شکل ۱۳–۱ دارای مـدارشکن B۱۲ در سرشینهٔ ۱ خط و مدارشکن B۲۱ درسرشینهٔ ۲ است. رله‌های این‌نقاط به‌ترتیب با R۱۲ و R۲۱ علامت‌گذاری می‌شوند یك رلهٔ R۲۳ – هرچندکه درشکل آورده نشده – مسلماً همراه B۲۳ وجود دارد. بعضی اوقات برای سیستمهای ساده‌ای‌که بررسی‌خواهیم کرد مناسب‌تراست‌که مدارشکنها را با حروف نشان دهیم. برای مثال B۱۲ و B۲۱ را می‌توان به‌جای علامت شماره‌دار با A و B نشانه‌گذاری کرد.

امکان دارد مدارشکنهای جداگانه درهرفازکارکنند ویا رله‌ها یك مدارشکن‌سه‌فازی را کنترل کنندکه با عملکرد هررله، هرسه‌فاز باز خواهد شد.

وقتی روی خط شکل ۱۳–۱، عیبی در P رخ می‌دهد – اگرفرض‌کنیم در پشت هر دو شینهٔ ۱ و ۲ منابع قدرت قرار دارد – جریانهای زیادی از دو سرخط انتقال به‌طرف عیب سرازیرمی‌شوند. هنگامی‌که این‌فرض مورد نداشته‌باشد سیستم حفاظت قدری ساده‌تر می‌شود. ما حفاظت چنین سیستمهای شعاعی را بعداً بررسی خواهیم کرد. افزایش جریان درسرهای خط، همراه با کاهش ولتاژ آنهاست. باید دانست که جریانها و ولتاژهای خط انتقال در سطوح کیلوآمپر و وکیلوولت‌اند. این سیگنالهای سطح بـالا برای استفاده در سیستم حفاظت نامناسب‌اند. سیگنالهای خط قدرت را مبدلها، T، به‌سطح پایینتر (چند ده آمپر و ولت) تبدیل می‌کنند. مبدلها راکمی بعد به‌تفصیل بررسی خواهیم کرد.

افزایش جریان و کاهش ولتاژ ناشی ازعیب می‌تواند برای آشکارسازی اینکه عیبی درخط انتقال روی داده است، به‌کار رود. رله‌ها عناصرمنطقی سیستم‌حفاظت‌اند. سیگنالهای سطح پایینتر حاصل ازمبدلها، بازتابهای با دقت قابل قبولی از ولتاژها و جریانهای واقعی خط انتقال‌اند. رله‌های R۱۲ و R۲۱ با تحلیل این سیگنالهای ورودی، بروز مسلم عیب را در خط انتقال ۱–۲ اعلام می‌کنند. ایـن تصمیم در زمان بسیارکوتاهی پس از وقوع عیب – بسته به‌طراحی رله‌ها نوعاً بین ۸ تا ۴۰ میلی ثانیه – گرفته می‌شود.

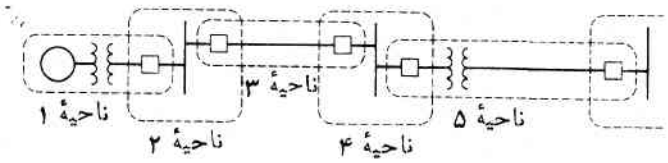
تصمیم رلـه‌های R۱۲ و R۲۱ مبنی براینکه عیبی درخط روی داده است منجـر به‌بازشدن مدارشکنهای وابسته به‌آنها یعنی B۱۲ و B۲۱ می‌شود. مدارشکنها را کـه در فرایند حذف عیب، آخرین حلقهٔ زنجیرند در فصل ۱۰ به‌اجمال بررسی کردیم. وقتی مدار رهاگر یك مدارشکن را رله‌اش تحریك می‌کند کنتاکتهای مدارشکن – که با خط انتقال متوالی‌اند – به‌سرعت ازهم جدا می‌شوند. به‌مجرد اینکه جریان در کنتاکتهای مدارشکن

(جریان عیب) به‌صفرمی‌رسد، فضای بین کنتاکتها عایق می‌شود وجلوعبور دوبارهٔ جریان عیب ازمدارشکن را می‌گیرد این امر، منجر به‌قطع خط انتقال از بقیهٔ سیستم وحذف عیب می‌شود. بسته به‌نوع سیستم حفاظت به‌کار رفته، کل فرایند از زمان شروع عیب تا حذف کامل آن بین ۳۰ تا ۱۰۰ میلی ثانیه طول می‌کشد.

بعضی مشخصات رله، معیار مهمی برای کیفیت عملکرد آن است.توالی رویدادهای برشمرده نشان می‌دهدکه رله برای اینکه‌کار خود را درست انجام دهد باید سریع و قابل اطمینان (به‌معنای قابل‌اعتماد وگزیننده) باشد. مشخصهٔ اول ــ سرعت ــ بی‌شك بدین‌معنی است‌که رله باید هرچه سریعتر چنان تصمیم بگیردکه بـا ملزمات دیگرش سازگار باشد. مشخصهٔ قابلیت اعتماد بدین معناست‌که رله باید دربرابرهمهٔ عیبهایی‌که برای آنها طراحی شده با اطمینان عمل‌کند و از عمل‌کردن در برابرهروضعیت دیگرسیستم خودداری ورزد. گزینندگی رله،معطوف به‌این ضرورت است کـه در پی عیب کردهـا کوچکترین قسمت ممکن سیستم مجزا شود. گزینندگی را می‌توان به‌کمك شکل۱۳ــ۱ نشان داد رلهٔ R۲۳، وصل به‌سر ۲ ازخط ۲ــ۳ را درنظر بگیرید. با بروز عیب در P، جریان و ولتاژ ورودی این رله نیز تغییرمی‌کند. تأثیراین عیب بررلهٔ R۲۳ را بیشتر چنین توصیف می‌کنند که رلهٔ R۲۳ عیب را در P «می‌بیند». البته اگر P درخارج منطقهٔ مسئولیت یا بود رلهٔ R۲۳ باشد این‌رله باید طوری گزیننده باشدکه به‌ازای عیب در P عمل‌نکند. به‌طورکلی شرایط قابل اطمینان بودن هر رله بـا ضرورت سرعت آن در تضاد است و در طراحـی سیستم حفاظت باید سازشی صورت پذیرد تا به‌این‌ترتیب میزان قابل قبولی برای این مشخصات به‌دست آید.

۱۳ــ۲ نواحی حفاظت

اندیشهٔ ناحیهٔ مسئولیت سیستم‌حفاظت مذکور در بالا بااختصاص نواحی حفاظت به‌سیستمهای حفاظت مختلف، شکل گرفته است. مفهـوم نواحی، به‌تعریف شرایط قابل اطمینان بودن سیستمهای حفاظت مختلف، کمك می‌کند. ما مفهوم نواحی حفاظت را به‌کمك شکل۱۳ــ۲ توضیح خواهیم داد. ایـن شکل، قسمتی از یك سیستم قدرت متشکل از یك ژنراتور، دو ترانسفورماتور، دوخط انتقال، وسه شینه را با نمودار تك‌خطی نمایش می‌دهد. این سیستم قدرت به‌پنج ناحیهٔ حفاظت تقسیم شده‌است‌که مستطیلهای خط‌چین، آنها را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳ــ۲ نواحی حفاظت با خط چینهای دربرگیرندهٔ مؤلفه‌های سیستم قدرت در هرناحیه مشخص شده‌اند.

هر ناحیه علاوه بر دو مدارشکن، شامل یك یا چند جزء سیستم قدرت است. هر مدارشکن در دو ناحیهٔ حفاظت مجاور قرار گرفته‌است. برای مثال، ناحیهٔ ۱ از ژنراتور، ترانسفورماتور وابسته به‌آن وسیستمهای ارتباطی بین ژنراتور و ترانسفورماتور تشکیل می‌شود. ناحیهٔ ۳ فقط یك خط انتقال را دربرمی‌گیرد. توجه کنیدکه نواحی ۱ و ۵، هرکدام، دو جزء از سیستم قدرت را شامل‌اند.

مرز هر ناحیه، قسمتی ازسیستم قدرت را مشخص می‌کند که به‌ازای هرعیب در هر جای داخل آن، سیستم حفاظت مسئول ناحیه، برای جداسازی همهٔ اجزای داخل آن ناحیه ازبقیهٔ‌سیستم، عمل می‌کند. چون درشرایط‌عیب، جداسازی (یا بی‌برق‌کردن) را مدارشکنها انجام می‌دهند، باید دانست که در هرنقطهٔ اتصال بین تجهیزات داخل ناحیه و بقیهٔ سیستم قدرت باید یك مدارشکن قرار بگیرد. به‌عبارت دیگر مدارشکنها مرز نواحی حفاظت را معین می‌کنند.

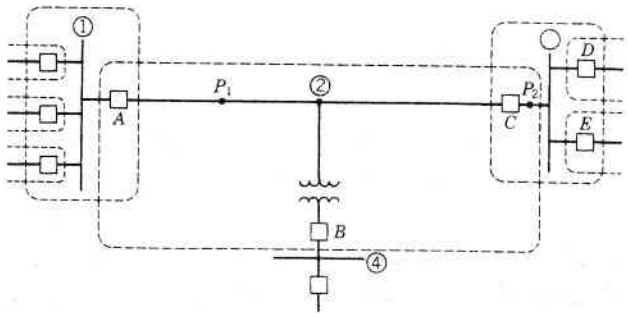
یك خصوصیت مهم‌دیگر نواحی حفاظت آن است‌که نواحی مجاورهمیشه همپوشانی دارند. این‌همپوشانی ضروری است زیرا بدون آن، قسمت‌کوچکی ازسیستم‌که بین‌نواحی مجاور قرار می‌گیرد ــ هرقدرهم‌کوچك باشد ــ بدون حفاظت خواهد ماند. با همپوشانی نواحی مجاور، هیچ قسمتی ازسیستم قدرت بدون حفاظت نخواهدماند هرچند واضح‌است که اگرعیبی درپهنهٔ همپوشانی رخ بدهد قسمت بسیاربزرگتری ازسیستم‌قدرت (که متناظر با دو ناحیهٔ درگیر در همپوشانی است) مجزا و از رده خارج خواهد شد. برای حداقل ساختن این احتمال، پهنهٔ همپوشانی تا حد ممکن‌کوچك می‌شود.

مثال ۱۳ــ۱ الف) در سیستم قدرت شکل ۱۳ــ۳ (الف) منبعهای تولید در طرف دیگرشینه‌های ۱، ۳، و ۴ واقع‌اند. این سیستم باید به‌چند ناحیهٔ حفاظت تقسیم شود؟ کدام مدارشکنها به‌ازای عیبهای واقع در P_1 و P_2 بازخواهند شد؟

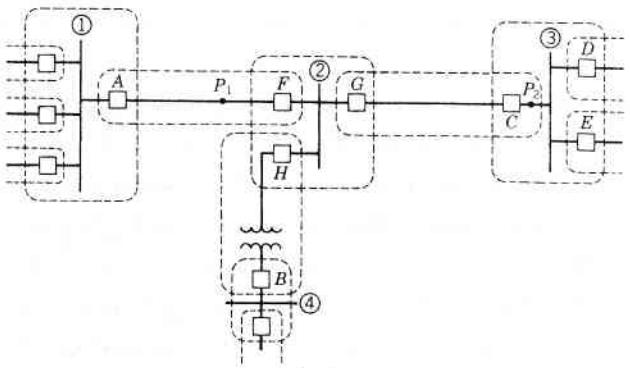
ب) اگر در نقطهٔ انشعاب ۲ سه مدارشکن اضافه شود، در نواحی حفاظت، چه تغییری پدید می‌آید؟ دراین حالت، به‌ازای عیبهای واقع در P_1 و P_2 کدام مدارشکنها عمل خواهندکرد؟

حل: الف) با استفاده از اصول تعیین نواحی حفاظت، سیستم شکل ۱۳ــ۳(الف) را می‌توان با خطچینهای رسم شده در شکل به‌ناحیه‌هایی تقسیم کرد به‌ازای عیب واقع در P_1، مدارشکنهای A و B و C عمل خواهند کرد. به‌ازای عیب واقع در P_2، مدارشکنهای A، B، C، D، و E عمل خواهندکرد.

ب) اگر به‌صورتی که در شکل ۱۳ــ۳(ب)، می‌بینیم سه مدارشکن F، G، و H به‌شینهٔ ۲ اضافه شود نواحی حفاظت را خطچینهای رسم شده در شکل نشان خواهند داد. دراین‌حالت عیب واقع در P_1، مدارشکنهای A و F عمل خواهندکرد وحال‌آنکه به‌ازای عیب واقع در P_2 مدارشکنهای G، C، D، و E عمل خواهندکرد. دیده می‌شودکه در این حالت به‌دنبال دو عیب مذکور، قسمت بسیارکوچکتری از سیستم قدرت بی‌برق می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳-۳ نمودار تک‌خطی مثال ۱۳-۱ نمایش دهندهٔ، الف) نواحی حفاظت ابتدایی، و ب) نواحی جدید وقتی‌که مدارشکنهای اضافی به‌شینهٔ ۲ افزوده می‌شوند.

این بهبود عمل‌کرد به‌قیمت سه مدارشکن اضافی و تجهیزات حفاظت وابسته به‌آنها انجام می‌شود. □

۱۳-۳ مبدلها

جریانها و ولتاژهای تجهیزات قدرت حفاظت‌شونده را ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ به‌سطوح پـایین مناسب برای کار رله تبدیل می‌کنند. ایـن سطوح کاهش یافته به‌دو علت ضروری‌اند: (۱) ورودی سطح پایینتر به‌رله، تضمین می‌کندکه سخت‌افزار فیزیکی به‌کار رفته درساخت رله‌ها کاملاکوچك و درنتیجه ارزان شود؛ (۲)کسانی‌که با رله کار می‌کنند درمحیطی ایمن انجام وظیفه خواهندکرد. این‌مبدلها دراصل با ترانسفورماتورهای قدرت بررسی شده در فصل ۶ تفاوتی ندارند امـا کارکردی کاملا اختصاصی دارند. برای مثال ضروری است‌که ترانسفورماتور جریان در سیم‌پیچ ثانویهٔ خود، جریانی تولید کند کـه

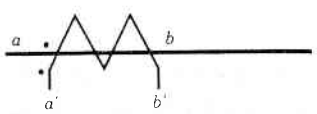
شکل موج جریان اولیه را تا حد امکان با امانت حفظ کند. ترانسفورماتور جریان این وظیفه را به‌خوبی انجام می‌دهد. همین ملاحظات برای ترانسفورماتور ولتاژ نیز وجود دارد. توان در گیر در این ترانسفورماتورها نسبتاً کم است زیرا بار متصل به آنها فقط شامل رله‌ها و اندازه‌گیرهایی است که امکان دارد در لحظهٔ خاصی به‌کار گرفته شوند. بار ترانسفورماتورهای جریان (CTها) و ترانسفورماتورهای ولتاژ (VTها) بارکشی آنها خوانده[1] می‌شود. بارکشی عموماً امپدانس وصل به‌سیم‌پیچ دومین ترانسفورماتورها را توصیف می‌کند اما ممکن‌است ولت‌آمپر تحویل داده شده به‌بار را مشخص کند. برای مثال، ترانسفورماتوری را که به‌بارکشی مقاومتی ۱ر۰ اهمی، ۵ آمپر تحویل می‌دهد می‌گویند دارای بارکشی ۵ر۲ ولت-آمپر در ۵ آمپر است.

اکنون ترانسفورماتورهای جریان و ترانسفورماتورهای ولتاژ را جداگانه بررسی خواهیم کرد.

۱. ترانسفورماتورهای جریان

درعمل دو نوع ترانسفورماتور جریان وجود دارد، بعضی لوازم قدرت از نوع مخزن بی‌برق، مخزن فلزی زمین شده‌ای‌دارند که تجهیزات قدرت، در داخل آن در یك محیط عایق کننده (معمولا روغن) قرارمی‌گیرد نمونه‌های آن عبارت‌اند از ترانسفورماتورهای قدرت، القاگرها و مدارشکنهای روغنی. این نوع تجهیزات، یك سر-مقره دارند که از میان آن یك‌سر تجهیزات قدرت بیرون آورده می‌شود. ترانسفورماتورهای جریان در داخل این سر-مقره‌ها نصب می‌شوند و به CTهای سر-مقره‌ای معروف‌اند. در جایی که نمی‌توان از چنین سیستم مخزن بی برق، استفاده کرد ــ برای مثال در یك پست کلیدزنی بسیار پرولتاژ (EHV) که مدارشکنهای مخزن برقدار به‌کار می‌روند ــ از ترانسفورماتور جریان مستقل استفاده می‌کنند.

نمایش طرحواره‌ای ترانسفورماتورهای جریان را شکل ۱۳ــ۴ نشان می‌دهد. سیم‌پیچ اولیهٔ ترانسفورماتورجریان معمولا یك حلقه یا یك دورسیم دارد که درشکل ۱۳ــ۴ باخط مستقیم ab نشان داده شده است. با عبور دادن سیم یکمین از میان یك یا چند هستهٔ آهنی چنبره‌ای، این تك دور به‌دست می‌آید. سیم‌پیچ ثانویه یادومین که سرهایش درشکل ۱۳ــ۴، با a' و b' علامت‌گذاری شده چند دور یا حلقه بر روی هسته چنبره‌ای دارد. نقطه‌های نهاده برسرهای a و a' ازسیم‌پیچهای ترانسفورماتور جریان به‌همان چیزی اشاره



شکل ۱۳ــ۴ نمایش طرحواره‌ای وصل کردن ترانسفورماتور جریان به‌خط دریك سیستم قدرت.

1. Burden

جدول ۱۳-۱ نسبت استاندارد CTها

نسبت جریان	نسبت جریان	نسبت جریان
۵۰ : ۵	۳۰۰ : ۵	۸۰۰ : ۵
۱۰۰ : ۵	۴۰۰ : ۵	۹۰۰ : ۵
۱۵۰ : ۵	۴۵۰ : ۵	۱۰۰۰ : ۵
۲۰۰ : ۵	۵۰۰ : ۵	۱۲۰۰ : ۵
۲۵۰ : ۵	۶۰۰ : ۵	

می‌کنندکه در ترانسفورماتور معمولی شرح دادیم. اگراز جریان مغناطنده صرف‌نظرشود، وقتی جریان ازسر a وارد یکمین می‌شود (سرنقطه‌دار) جریان خارج شونده ازسرنقطه‌دار سیم‌پیچ ثانویه ـ یعنی a'ـ با جریان یکمین همفاز است.

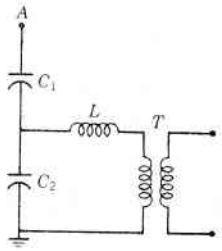
ترانسفورماتورهای جریان، خطای نسبت دارندکه مقدارآن دربعضی انواع، قابل محاسبه‌است و درانواع دیگرباید از راه آزمون تعیین شود. اگرامپدانس بارکشی خیلی بزرگ باشد، خط نسبتاً افزایش می‌یابد امـا با انتخاب درست CT نسبت به‌بـارکشی، می‌توان خطا را در مقدار قابل قبولی نگه داشت. از آنجا که دراینجا عمدتاً با روشهای حفاظت سروکار داریم بیش ازاین دربارهٔ خطای CT بحث نمی‌کنیم اما باید در بررسی رله‌ها به‌آنها توجه داشت.

جریان نامی معمول ثانویهٔ CTها در ۵A استاندارد شده‌است. دراروپا وتا اندازهٔ کمتری در امریکا، یك استاندارد دیگر یعنی ۱ A نیز به‌کار می‌رود. برای فواصل زمانی کوتاه بدون آنکه سیم پیچ ثانویهٔ CTها آسیب ببینند، می‌توان از ایـن اندازه‌های نامی تجاوز کرد. اغلب وقتی در سیستم قدرت، اتصال کوتاه روی می‌دهد جریان در سیم‌پیچ CTها بیش از ۱۰ تا ۲۰ برابرمقدار معمول است.

نسبت جریانهای استاندارد CTها تعیین شده‌است و برخی ازآنها درجدول۱۳-۱ داده شده‌اند.

۲. ترانسفورماتورهای ولتاژ

در کاربردهای رله‌گذاری، عموماً دونوع ترانسفورماتور ولتاژ یافت می‌شود. برای بعضی کاربردهای ولتاژ-پایین (ولتاژسیستم درحدود ۱۲ kV یا پایینتر) ترانسفورماتورهایی با سیم پیچ اولیه در ولتاژ سیستم و سیم پیچ ثانویهٔ در ۶۷ V (نمایندهٔ ولتاژ خط-به-خنثای سیستم) $۶۷ \times 1/\sqrt{3} = ۱۱۶\ V$ (نمایندهٔ ولتاژ خط-به-خط سیستم) یك استاندارد صنعتی



شکل ۱۳–۵ نمودار مداری یك ترانسفورماتور ولتاژ با تقسیم‌گر خازنی (CVT) با اندوکتانس تنظیم L.

است. این نوع ترانسفورماتور ولتاژ، کاملا شبیه به‌ترانسفورماتور قدرت چند سیم‌پیچه است و در سیستمهای با ولتاژ بالاتر، گران قیمت می‌شود. چنانکه درشکل ۱۳–۵ دیده می‌شود برای سطوح ولتاژ HV و EHV، یك مدار تقسیم پتانسیل خازنی به‌کار می‌رود. خازنهای C_1 و C_2 طوری تنظیم شده‌اند که وقتی سر A با سیستم هم پتانسیل است کیلوولت کمی بین سرهای C_2 می‌رسد. درچنین ترانسفورماتور ولتاژ با تقسیم‌گرخازنی (CVT) ولتاژ خروجی را یك ترانسفورماتور تا سطح ولتاژ رله‌گذاری کاهش می‌دهند، مطابق شکل ۱۳–۵.

تا جایی که به‌خازنهای اتصال یافته مربوط می‌شود درمدارشکل۱۳–۵،ولتاژنقطهٔ A، ولتاژ یك شینهٔ بی‌نهایت است. امپدانس تونن سیستم از دیدگاه سرهای C_2، برابر $1/\omega(C_1+C_2)$ است. تنظیم L به‌نحوی که ωL مساوی امپدانس تونن شود تشدید متوالی ایجاد می‌کند ودراین‌حالت، خروجی CVT بدون هیچ‌گونه خطای زاویهٔ فاز، با پتانسیل خط همفاز است. CVT تجهیزاتی است مستقل که در سازهٔ عایق نگهدارندهٔ خود جای می‌گیرد ودرسیستمهای HV و EHV کاربرد دارد. وقتی یکی از اجزای سیستم قدرت، دارای سرمقره‌ای است که از میان آن یك سیم دارای ولتاژ سیستم می‌گذرد ــ مانند ترانسفورماتورقدرت یا انواع خاصی ازمدارشکنها ــ می‌توان با قبول هزینهٔ اضافی کمی، CVT سرمقره‌ای‌که در داخل سرمقره ساخته می‌شود، فراهم کرد. در یك چنین CVT، خازنهای C_1 و C_2 در میان سازهٔ سرمقره ساخته می‌شوند. به‌طور کلی CVT های سرمقره‌ای نسبت به CVTهای مستقل، ظرفیت تغذیهٔ بارکشیهای کوچکتری دارند.

ترانسفورماتورهای ولتاژ عموماً بسیار دقیقتر از ترانسفورماتورهای جریان‌اند. و معمولا ازخطاهای زاویهٔ فاز ونسبت آنها صرف‌نظر می‌شود. ازطرف دیگراغلب ضروری است که هنگام بروز عیب به‌پاسخ گذرای CVTها توجه کنیم زیرا در این حالت امکان خطا وجود دارد. پاسخ‌گذرای CVTها خارج ازحوزهٔ بحث ماست.

۱۳–۴ طراحی منطقی رله‌ها

وظیفهٔ رله این است‌که عیب واقع درناحیهٔ حفاظت خود را از هرحالت دیگرسیستم تمیز

بدهد. رله باید درمورد عیبهای واقع در ناحیهٔ حفاظت خود با اطمینان عمل کند (به‌پیچك رهاگر مربوط به‌مدارشکن خود انرژی برساند)، وازقطع اشتباهی درمورد عیبهای خارج ازناحیهٔ خویش، ایمن بماند. با ایجاد قابلیت تصمیم‌گیری منطقی در رله براساس وضعیت سیگنالهای ورودی به‌طوری‌که بتواند به‌ازای هرحالت ممکن از سیگنالهای ورودی خود، خروجی‌مناسب را تولیدکند رلـه،ایمن وقابل اعتماد می‌شود.ما اکنون چندین دسته رله و وظایف منطقی آنها را بررسی خواهیم کرد. با وجود انواع زیاد رله در سیستم قدرت، بیشتر آنها در پنج گروه می‌گنجند. صرف‌نظر از سخت‌افزار به‌کار رفته در ساخت رله‌ها، عملکرد منطقی آنها برحسب خروجی و ورودیشان قابل تعریف است. برای هر نوع رله، وضعیت سیگنالهای ورودی (معمولا ولتاژها وجریانها) وسیگنالهای خروجی متناظر با آنها را مشخص می‌کنیم.خروجی مورد نظر در متـن کنونی عبارت از ورودی به‌پیچك رهاگر مدارشکن است. درنتیجه برحسب اینکه‌کنتاکتهای رله بسته یا باز باشد وضعیت خروجی آن به‌ترتیب قطع یا سد (سد در برابر قطع) نامیده خواهد شد. پنج دسته رلهٔ مورد نظر عبارت‌اند از:

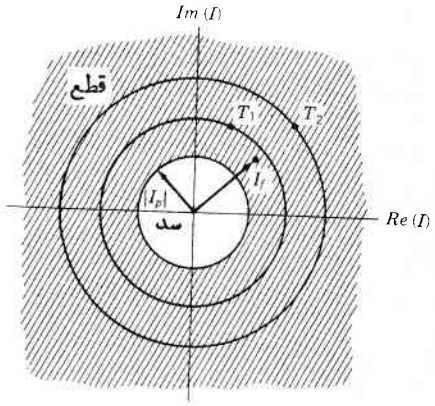
۱. رله‌های مقداری، ۲. رله‌های سودار، ۳. رله‌های نسبتی، ۴. رله‌های تفاضلی، ۵. رله‌های پیلوتی.

۱. رله‌های مقداری: اینها در معمولترین شکل خـود رله‌های اندازهٔ جریان ــ یا رله‌های اضافه جریان‌اند. این رله‌ها به‌مقدار جریان ورودی خود پاسخ می‌دهند وهنگامی عمل می‌کنندکه مقدار جریان از میزان معین قابل تنظیمی بیشتر شود. اگر بتوان از بررسی اتصال کوتاه سیستم، مقدار $|I_p|$ را برحسب سیم پیچ ثانویهٔ CT طوری پیدا کرد کـه به‌ازای همهٔ عیبهای داخل ناحیهٔ حفاظت رله، مقدار جریان عیب $|I_f|$ ــ بازهـم برحسب سیم‌پیچ ثانویهٔ CT ــ از $|I_p|$ بزرگتر باشد آن‌گاه توصیف تابعی زیر، یك رلهٔ ایمن و مطمئن ایجاد می‌کند:

$$\begin{aligned} |I_f| > |I_p| \qquad & \text{قطع کرد} \\ |I_f| < |I_p| \qquad & \text{سد کرد} \end{aligned} \qquad (۱-۱۳)$$

نامعادله‌های (۱۳ــ۱) توصیف منطقی یك رلـهٔ اضافه جریان‌اند و می‌توانند بـا نمودار فازبرداری شکل ۱۳ــ۶، به‌طور ترسیمی به‌نمایش درآیند. مقدار جریان $|I_p|$ را مقدار برداشت رله گویند.

درصفحهٔ مختصات مختلط با درنظرگرفتن فازبردار مرجع به‌طور دلخواه، فازبردار جریان عیب رسم می‌شود. زاویهٔ فازجریان عیب می‌توانند بین ۰و۳۶۰ درجه باشد زیرا فازبردار مرجع دلخواه است. دایرهٔ رسم شده به مرکز مبدأ مختصات و به شعاع مقـدار جریان برداشت $|I_p|$، صفحهٔ فازبردار مختلط را به‌دو ناحیه تقسیم می‌کندکـه در شکل ۱۳ــ۶ باقطع‌وسد علامت‌گذاری شده‌است. به‌ازای هرجریان عیبی‌که نمایش فازبرداریش درخارج دایره و در داخل ناحیهٔ سایه‌خورده قرار بگیرد رله تصمیم به‌قطع‌کردن می‌گیرد.



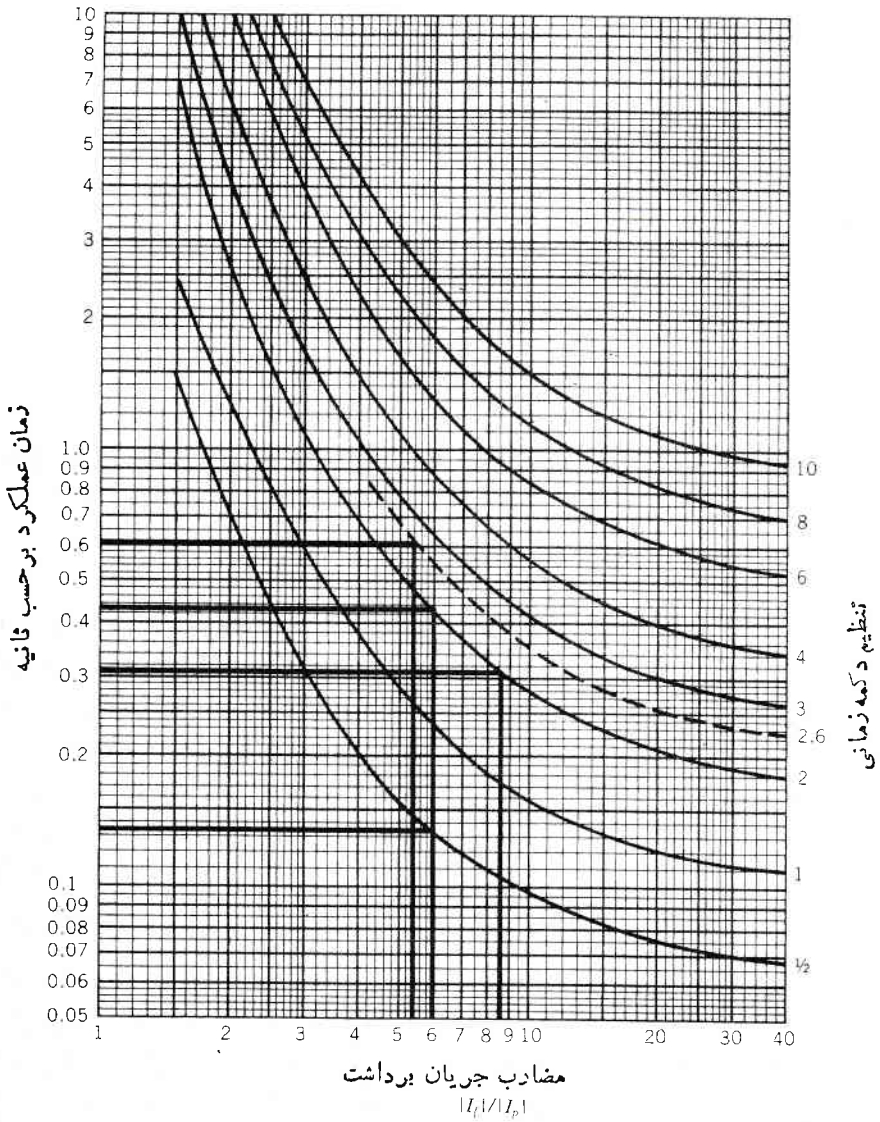
شکل ۱۳–۶ نمایش ترسیمی نواحی عملکرد و سدکرد یك رلهٔ اضافه جریان زمانی درصفحهٔ مختصات مختلط. رسم فازبردار جریان پیچك عمل‌کنندهٔ رله برروی این نمودار، عملکرد یا سدکرد و زمان عملکرد را نشان خواهد داد. زمان T_2 کوچکتراز T_1 است.

فازبردارهای نمایشگرمقدار جریان عیبهای کوچکتراز $|I_p|$ در داخل دایره قرار خواهند گرفت و به ازای آلفای رله تصمیم به سدکردن می‌گیرد. چنین نمودارهایی، در درك مشخصات رله بسیار مفیدند و در نوشته‌های مربوط به رله‌گذاری فراوان به‌کار می‌روند.

چنانکه خواهیم دید دربسیاری ازحالات، این شکل‌سادهٔ رلهٔ اضافه جریان به‌اندازهٔ کافی جامع نخواهد بود. ضروری است پارامتر دیگری را در نظر بگیریم این پارامتر، زمانی‌است‌که طول می‌کشد تا پس ازتجاوز $|I_f|$ از $|I_p|$، رله عمل‌کند. می‌توان شرایط (۱۳–۱) را با معادلهٔ زیر تکمیل کرد:

$$T=\phi(|I_f|-|I_p|) \quad \text{آنگاه} \quad |I_f|>|I_p| \quad \text{اگر} \qquad (۱۳–۲)$$

که درآن T زمان عملکرد رله و ϕ تابعی است که وابستگی آن را به‌سطح جریان عیب بیان می‌کند. چنانکه دیده می‌شود با افزودن دوایر زمانی نظیر T_1 و T_2 به‌نمودار فازبرداری شکل۱۳–۶، این وابستگی تابعی به‌نمایش درمی‌آید. بنابراین طول فازبردار $|I_f|$ روی یك‌خط زمانی(یا بین دوخط زمانی)قرار می‌گیردکه نمایشگرزمان عملکرد رله به‌ازای‌آن جریان عیب‌است. شیوهٔ مرسوم نمایش‌مشخصه‌های یك رلهٔ اضافه‌جریان زمانی، در شکل ۱۳–۷ دیده می‌شود. تنظیم برداشت رله، $|I_p|$، از طریق سرکهای سیم‌پیچ ورودیش قابل درجه‌بندی است. برای مثال رلهٔ IFC-53 (شرکت جنرال الکتریك) که منحنیهای مشخصه‌اش را درشکل۱۳–۷ می‌بینیم دارای سرکهای تنظیم ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۱۵، ۰٫۲، ۰٫۳، ۰٫۴، ۰٫۵، ۰٫۶، ۰٫۷، ۰٫۸، ۰٫۱۰، ۰٫۱۲ آمپراست. به‌ازای $|I_f|>|I_p|$ تابع ϕ معمولا با مقدار برداشت، مجانب است و با توان معکوسی از مقدار جریان کاهش می‌یابد. در رسم منحنیهای مشخصه عموماً مضارب جریان برداشت (نمونه‌برداری شده)



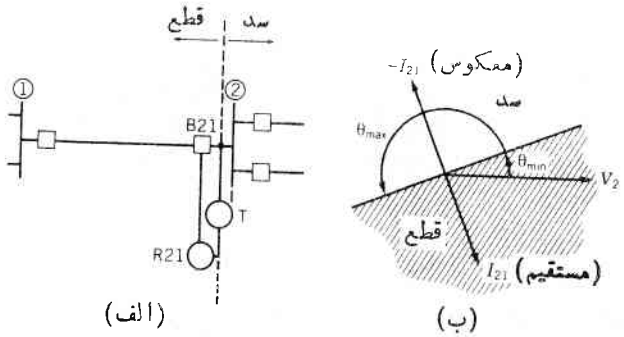
شکل ۱۳–۷ منحنیهای مشخصهٔ رله‌های اضافه جریان زمانی نوع IFC-۵۳.

روی محورطول و زمان عملکرد روی محور عرض درنظرگرفته می‌شود. مضربهای جریان برداشت به‌معنای نسبت جریان رله به‌جریان برداشت است. مشخصهٔ زمان معکوس به‌وسیلهٔ درجه‌بندی معروف به‌تنظیم درجهٔ زمان، به‌طرف بالا یا پایین جا به‌جا می‌شود. در شکل ۱۳–۷ به‌ازای یك جریان معین، تنظیم‌گر زمان ۱/۲، سریعترین عملکرد رلـه را تولید

می‌کند درحالی‌که تنظیم ۱۰، کندترین عملکرد را به‌وجود می‌آورد. اگرچه درجه‌بندیهای تنظیم درجهٔ زمان گسسته‌اند بـا این حال **می‌توان** بـا درون‌یابی بین منحنیهای گسسته، مقادیری میانی به‌دست آورد.

۳. رله‌های سودار: در بعضی کاربردها، ناحیهٔ رله، فقط قسمتی ازسیستم قدرت را دربرمی‌گیرد که در یك طرف رله قرار دارد. برای مثال، رلهٔ R21 شکل ۱۳–۸(الف)، را درنظر بگیرید. این رله ملزم است که به‌ازای عیبهای طرف چپ محل خود عمل و در همهٔ وضعیتهای دیگرسد کند. ازآنجاکه امپدانس خط انتقال غالباً واکنشی است. جریانهای ناشی از عیبهای واقع در طرف چپ R_{21} و گذرنده ازشینهٔ ۲ به‌سمت شینهٔ ۱، تقریباً ۹۰ درجه نسبت به‌ولتاژ شینهٔ ۲ پس‌افت دارند. ازطرف دیگر به‌ازای عیبهای واقع در سمت راست شینهٔ ۲ جریان گذرنده از این شینه به‌طرف شینهٔ ۱ تقریباً ۹۰ درجه نسبت به‌ولتاژ شینهٔ ۲، پیش‌افت دارد. عملکرد رلـه بـا تقسیم صفحهٔ مختلط نمودار فـازبرداری شکل ۱۳–۸(ب) توصیف می‌شود به این صورت کـه رله به‌ازای همهٔ عیبهایی کـه فازبردار جریانهای واقع درناحیهٔ سایه‌خورده را تولید می‌کنند (ولتاژشینهٔ ۲ به‌عنوان مرجع به‌کار می‌رود) قطع و به‌ازای همهٔ عیبهای دیگرسد می‌کند. چنین رله‌ای را سودار می‌نامند زیرا برای عملکرد خود به‌جهت جریان نسبت به‌ولتاژ وابسته است. کمیتی که فازبردار مرجع را تهیه می‌کند کمیت قطع‌کننده خوانده می‌شود. به‌این‌ترتیب این رلهٔ سودار از یك ولتاژ قطبی‌کننده استفاده می‌کنند. گاهی نیزمی‌توان سیگنالهای جریان خاصی را به‌عنوان سیگنال قطبی‌کننده به‌کار برد. با تعریف ناحیهٔ باریکتری دراطراف فازبردار جریان عیب می‌توان گزینندگی رله را افزایش داد. به‌طورکلی اصل عملکرد رلهٔ سودارمی‌تواند با رابطهٔ زیر توصیف شود:

$$\begin{aligned} &\text{قطع کرد} && \text{حداکثر}\,\theta < \theta_{\text{کار}} < \text{حداقل}\,\theta \\ &\text{سد کرد} && \text{حداکثر}\,\theta > \theta_{\text{کار}} > \text{حداقل}\,\theta \end{aligned} \qquad (۱۳–۳)$$



شکل ۱۳–۸ اصل عملکرد یك رلهٔ سودار: (الف) نمودار تك خطی برای نمایش موقعیت و (ب) مشخصهٔ کار رله درصفحهٔ مختلط.

که در آن کار θ، زاویهٔ فازکمیت عمل‌کننده نسبت به مرجع یعنی فازبردار عمل‌کننده است، و حداقل θ و حداکثر θ دو زاویهٔ فازی‌هستندکه مرز مشخصه‌های‌کارکرد را توصیف می‌کنند.

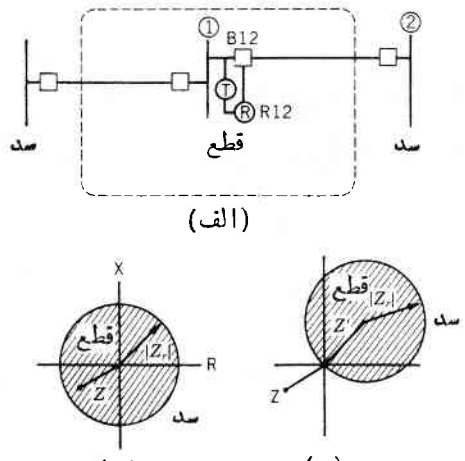
۳. رله‌های نسبتی : رلهٔ R۱۲ شکل ۱۳–۹(الف) را درنظر بگیرید. دربعضی از کاربردها ضروری است‌که رله به‌ازای عیبهای واقع در فاصلهٔ معینی ازمحل خود ــ روی هرکدام ازخطوط انشعاب یافته از شینهٔ ۱ ــ عمل‌کند. مجاورت را با فاصله درطول خط یا به‌عبارت دیگربا امپدانس بین شینهٔ ۱ ومحل عیب توصیف می‌کنند. به‌این ترتیب ناحیهٔ حفاظت، پهنه‌ای است‌کــه طول خط انشعاب یافته از شینهٔ ۱، و دارای امپدانسی کمتراز تنظیم مورد نیاز $|Z_2|$، درآن پهنــه قرارگیرد. این امر می‌تواند به‌راحتی به‌صورت یك شرط برای نسبت ولتاژ و جریان محل قرارگرفتن R۱۲ بیان شود. فرض کنید این نسبت (که دارای دیمانسیون امپدانس است) چنین باشد:

$$Z=\frac{V_1}{I_{12}} \qquad (۴–۱۳)$$

پس عملکرد رله به‌این صورت مشخص می‌شود:

$$\begin{aligned} |Z|<|Z_2| \quad & \text{قطع‌کرد} \\ |Z|>|Z_2| \quad & \text{سدکرد} \end{aligned} \qquad (۵–۱۳)$$

وآن‌را رلهٔ امپدانس یا فاصله می‌نامند. مکان هندسی $|Z_2|$ ثابت درصفحهٔ‌امپدانس مختلط،



شکل ۱۳–۹ مشخصه‌های رلــهٔ امپدانس (الف) ناحیهٔ حفــاظت R۱۲، (ب) رسم امپدانس اندازه‌گیری‌شده برای رلهٔ بی‌سو درصفحهٔ مختلط، و(ج) رسم امپدانس اندازه‌گیری شده برای رلهٔ mho، در (ب) و (ج)، امپدانس به‌ازای عیب واقع درطرف چپ R۱۲ است.

دایره است شکل۱۳–۹(ب). دقت کنیدکه امپدانس Z درمعادلهٔ(۱۳–۴) به‌صورت نسبت ولتاژ و جریان رله در محل ۱ تعریف شده است. درطی شرایط عادی سیستم، این نسبت، یك عدد مختلط خواهد بودکه زاویهٔ فازش را ضریب توان بار، معین می‌کند.ازآنجا که جریان بار معمولا بسیارکوچکتراز جریان عیب است در طی شرایط عادی سیستم، نسبت Z، دارای مقداری بسیار بزرگ (و زاویهٔ فازی دلخواه) خواهدبود. بنابراین Zی‌که در صفحهٔ مختلط در شرایط عادی سیستم رسم شود درخارج دایرهٔ به‌شعاع $|Z_r|$ قرار خواهد گرفت ودرنتیجه مدارشکن درطی شرایط عادی سیستم قطع نخواهدکرد. درشرایط عیب، Z برای رله به‌صورت باری ظاهر می‌شود که امپدانس آن امپدانس خط بین محل رله و عیب است. درمدار شکل ۱۳–۹(الف)، بسته به‌اینکه عیب درطرف راست یا چپ شینهٔ۱ باشد زاویهٔ مربوط به Z برابر θ یا $\pi+\theta$ است.

یك شکل‌سادهٔ دیگررله امپدانس، اغلب بسیارکارسازاست. دایرهٔ شکل ۱۳–۹(ب)، به‌مرکزمبدأ مختصات می‌تواند به‌میزان Z' جابه‌جا شود ومشخصه رلهٔ امپدانس جابه‌جاشدهٔ شکل ۱۳–۹(ج)، را تولیدکند. عملکرد این نوع رله چنین توصیف می‌شود:

$$\begin{aligned} |Z-Z'| &< |Z_r| \qquad \text{قطع کرد} \\ |Z-Z'| &> |Z_r| \qquad \text{سدکرد} \end{aligned} \tag{۶–۱۳}$$

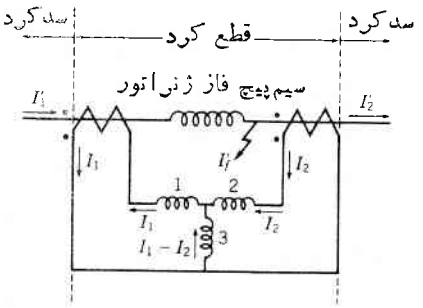
با انتخاب $|Z'|$ مساوی $|Z_r|$ می‌توان مشخصهٔ رله را ازمبدأ مختصات گذراند. این همان حالت شکل ۱۳–۹(ج)، ومعروف به‌مشخصهٔ «mho» است. رلهٔ امپدانس دارای مشخصهٔ شکل ۱۳–۹(ب)، سودار نیست بدین معناکه عیب درهردوطرف راست یا چپ محل رله (وبا $|Z|$ کوچکتراز $|Z_r|$) باعث خواهدشدکه رله تصمیم به‌قطع بگیرد. ازطرف دیگر، یك رلهٔ mho با مشخصهٔ شکل۱۳–۹(ج)، ذاتاً سودار است. یك عیب درطرف چپ رلهٔ شینهٔ ۱، صرف‌نظرازنزدیکی‌آن به‌شینهٔ (۱) باعث خواهد شدکه رله تصمیم به‌قطع نگیرد زیرا همان‌طورکه معادلهٔ (۱۳–۴) توصیف می‌کند Z در ربع سوم قرار خواهد گرفت. بعداً خواهیم دیدکه در بسیاری از کاربردها این یك مشخصهٔ بسیار مطلوبی است.

۴. رله‌های تفاضلی: وقتی تمام ناحیهٔ حفاظت رله، فضای نسبتاً کوچکی را نزدیك رله اشغال می‌کند می‌توان با استفاده از اصل پیوستگی جریـان،طرحوارهٔ رله‌ای مؤثر و بسیارساده را ابداع کرد. ناحیهٔ حفاظت یك فاز ازسیم‌پیچ ژنراتور شکل ۱۳–۱۰ را در نظربگیرید. درمرزهای ناحیهٔ حفاظت، دو ترانسفورماتورجریان با نسبت دورهای مساوی قرارگرفته‌اند (دوتا برای هرفاز یك واحدسه‌فاز). پس، درشرایط‌عادی ونیز برای عیبهای خارج ناحیهٔ حفاظت، داریم:

$$I_1 - I_2 = 0$$

درحالی‌که به‌ازای عیب داخل ناحیهٔ حفاظت:

$$I_1 - I_2 = I_f$$



شکل ۱۳–۱۰ نمودار اتصالات حفاظت تفاضلی سیم‌پیچ ژنراتورها.

که در آن، I_f جریان عیب ازدیدگاه ثانویهٔ CTهاست. باید تصدیق کرد که درعمل به‌غلت خطاهای ترانسفورماتورهای جریان این معادله‌ها دقیقاً برقرار نخواهند بود. برای درنظر گرفتن این خطاها جریان $|I_p|$ را می‌توان چنان کوچك گرفت که به‌ازای شرایط عادی سیستم یا به‌ازای عیبهای خارج ازناحیهٔ حفاظت داشته باشیم

$$|I_1 - I_2| < |I_p|$$

و به‌ازای عیبهای داخلی داشته باشیم

$$|I_1 - I_2| > |I_p|$$

بنابراین اصل عملکرد رله چنین تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} |I_1 - I_2| &> |I_p| \qquad \text{قطع کرد} \\ |I_1 - I_2| &< |I_p| \qquad \text{سد کرد} \end{aligned} \tag{۷–۱۳}$$

اگر یك رلهٔ اضافه جریان ازنوعی که قبلا شرح دادیم، طوری به‌کار بریم که پیچك عمل کننده‌اش در وضعیت شکل ۱۳–۱۰، پیچك ۳ باشد خواهیم دید که جریان گذرنده از پیچك۳ برابر $I_1 - I_2$ است و رله مطابق با اصل رله‌گذاری تفاضلی بیان شده در روابط (۷–۱۳) با قطع یك یا چند مدارشکن، از سیم‌پیچ ژنراتور حفاظت می‌کند. چنانکه در بخش ۳–۱۳ گفتیم اغلب با ازدیاد مقادیر I_1 و I_2 خطای ترانسفورماتورهای جریان افزایش می‌یابد. در این حالات ممکن است مقدار I_p را به‌میانگین I_1 و I_2 وابسته کرد. می‌توان رله را با این اصل عملکرد طراحی کرد

$$\begin{aligned} |I_1 - I_2| &> k|(I_1 + I_2)|/2 \qquad \text{قطع کرد} \\ |I_1 - I_2| &< k|(I_1 + I_2)|/2 \qquad \text{سد کرد} \end{aligned} \tag{۸–۱۳}$$

این رله را رلهٔ تفاضلی درصدی گویند. جریان $|I_1+I_2|/2$ جریان بازدارنده و جریان $|I_1-I_2|$ جریان قطع‌کنندهٔ رله نامیده می‌شود. I_1 و I_2، جریان پیچکهای ۱ و ۲ در رلهٔ شکل ۱۳–۱۰اند. اگر یك رلهٔ تفاضلی طوری ساخته شودکه جریان پیچکهای ۱و۲ با اثر جریان پیچك ۳ مخالفت‌کنند این رله، مشخصهٔ تفاضلی درصدی بیان شده با روابط (۱۳–۸) را ارائه خواهد داد. کارایی نسبی پیچکهای ۱ و ۲ در مقایسه بـا پیچك ۳ را ثابت رلهٔ تفاضلی درصدی، k تعیین می‌کند. در یك رلهٔ تفاضلی درصدی الکترومکانیکی، پیچکهای ۱، ۲، و ۳ روی یك هستهٔ مغناطیسی مشترك در جهتی پیچیده می‌شوندکه محرکهٔ مغناطیسی ناشی از جریانهای ۱ و ۲ محرکهٔ مغناطیسی ناشی از جریان ۳ مخالفت‌کند، در یك رلـهٔ الکترونیکی، مشخصهٔ درخواستی از ضرایب تقویت در مسیر سیگنالهای مقتضی به‌دست می‌آید.

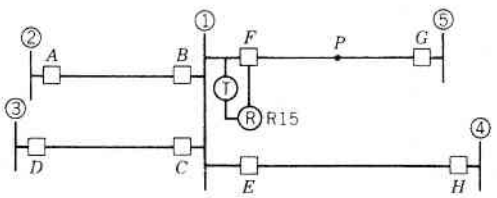
این نوع رله می‌تواند برای حفاظت شینه و نیز موتور به‌کار رود.

۵. رله‌های پیلوتی: برای رله‌های تفاضلی بررسی شده در بالا، لازم است‌که نقاط مرزی نواحی حفاظت شده، از نظر مکانی چنان به‌یکدیگر نزدیك باشند که سیگنالهای این نقاط مـرزی بتوانند با رله ارتباط یابند. این فقط وقتی امکان دارد کـه ناحیهٔ حفاظت، تجهیزات قدرت با ابعاد محدودی مانند ترانسفورماتور، ژنراتور، یا شینه را دربرگیرد. وقتی حفاظت خطهای انتقال با رله مطرح باشد ممکن است سرهای آنها صدها مایل بـا یکدیگر فاصله داشته باشند و ارتباط سیگنالهای دوسرخط به‌رله عملی نیست. رله‌گذاری پیلوتی فن مخابرهٔ اطلاعات از مرز یك ناحیهٔ دور به رلهٔ واقع درهرسـررافراهم می‌کند. هرچندگذاردن مستقیم کانالهای مخابراتی پیلوتی به‌جای هرسیستم سیگنال جریان تفاضلی، نه اقتصادی است و نه از نظر فنی میسر بـا این حال طرحواره‌های معادلی برای انتقال اطلاعات ابـداع شده است. واسطهٔ فیزیکی به‌کار رفته بـرای کانالهای پیلوتی می‌تواند سیمهای مدار تلفن، سیگنالهای فرکانس-بالای تزویج شده روی خـود خط انتقال قدرت (به‌نام کاریـر خط قدرت)، یـا کانالهای میکروموج باشد.کاربرد رله‌گذاری پیلوتی در بخش ۱۳–۶ بررسی خواهد شد.

۱۳–۵ حفاظت مقدم و پشتیبان

درآغاز فصل، گوشزد شدکه سیستم حفاظت، چندین زیرسیستم دارد و حذف موفقیت‌آمیز عیب، نیازمند آن است‌که هر زیرسیستم و هر جزء به‌درستی عمل‌کند. سیستمهای حفاظتی که تا اینجا بررسی‌کردیم درحالی‌که انرژی‌کمترین بخش لازم از سیستم را قطع می‌کنند در درجـهٔ اول عهده‌دار حذف هرچه زودتر عیب‌اند. ایـن سیستمهای حفاظت،معروف به‌سیستمهای حفاظت مقدم‌اند. البته قابل تصور است کـه برخی از زیرسیستمها یا اجزاء سیستمهای حفاظت مقدم نتوانند به‌درستی عمل‌کنند و اقدام معمول این است‌که یك سیستم حفاظت پشتیبان نیز در نظر بگیرند تا وقتی سیستم حفاظت مقدم نتواند عیب را برطرف

کند کار حفاظت را به‌عهده بگیرد.سیستم قدرت شکل۱۳–۱۱ را درنظر بگیرید. با بروز عیب در P، سیستم حفاظت مقـدم (اصلی) باید مدار مدارشکنهای F و G را باز کند. یك روش پشتیبانی سیستم حفاظت مقدم، دوتایی کردن کامل آن (یا دوتایی کردن مقداری از آن که ازنظراقتصادی امکان دارد) است به‌نحوی‌که ناکامی یك سیستم مقدم، مانع‌حذف عیب نشود. از این‌رو، این سیستم حفاظت پشتیبان را جانشین مقدم می‌گویند و درمدارهای مهمی‌که هزینهٔ اضافی آن موجه است، به‌کار می‌رود. البته اجزاء معینی وجود دارند کـه ناچار بین سیستم حفاظت مقدم اول و مقدم جانشین مشترك‌اند.(نمونهٔ آنها عبارت‌اند از مدارشکنها، باتریهایی‌که پیچك قطع مدارشکنها رابه‌کارمی‌اندازند، CTها وCVTها.) بنابراین ممکن است نقص یکی ازاین اجزاء مشترك،روی هردو سیستم مقدم اثربگذارد و باید برای مهیا کردن حفاظت پشتیبان از راه دور، که احتمال نقصی که بین آن و سیستم حفاظت مقدم مشترك باشد کم است، پیش‌بینی صورت بگیرد. ایـن وظیفهٔ پشتیبانی از راه دور به‌سادگی درسیستم حفاظت مقدم واقع درمحل دورگنجانده می‌شود. برای مثال فرض کنیدکه درشکل ۱۳–۱۱، سیستم حفاظت مقدم شینهٔ ۱ نتوانسته باشد عیب واقع در P را برطرف کند. (فرض می‌شود سرشینهٔ ۵ ، درست کار مـی‌کند)باشناخت این‌نقص می‌توانیم ترتیبی بدهیم‌که سیستم حفاظت مقدم در شینه‌های ۲، ۳، ۴ به‌ترتیب مدارشکنهای A، D، و Hرا قطع‌کند. سیستمهای حفاظت شینه‌های ۲، ۳، و ۴ علاوه‌برتأمین حفاظت مقدم برای خطهای ۲–۱، ۳–۱، و ۴–۱ خود، یك حفاظت پشتیبان از راه دور نیز در سیستم حفاظت مقـدم شینهٔ (۱) برای خط ۱–۵، به‌وجود می‌آورند. عملکرد سیستم پشتیبان از راه دور، نسبت به‌سیستم حفاظت مقدم، بخش بسیار بزرگتری از سیستم قـدرت را از مدار خارج می‌کند. درمثال بالا وقتی سیستم حفاظت پشتیبان از راه دور، عیب را رفع می‌کند علاوه‌بر خط عیب‌کردهٔ اصلی ۱–۵، خطهای ۲–۱، ۳–۱ و ۴–۱ نیزقطع می‌شوند. این ممکن‌است بر برق‌رسانی به‌بارهای وصل به‌شینه‌های ۲، ۳، و ۴ اثر بگذارد و شینهٔ ۱ ازمدار خارج خواهد شد. ثانیاً سیستم پشتیبان باید به سیستم حفاظت مقدم فرصت‌کافی بدهدتا به‌طورعادی عمل کند. عملکرد عجولانهٔ حفاظت پشتیبان ممکن است منجر به‌خارج ساختن غیرضروری بخش بزرگتری ازسیستم قدرت شود. پس برای ایجاد تأخیر بین حداکثرزمان لازم برای اینکه سیستم مقدم،عیب را رفع‌کند وسریعترین پاسخ ممکن سیستم پشتیبان، عملکرد سیستم پشتیبان را کندتر می‌سازند. این تـأخیر را تأخیر زمان هماهنگی می‌نامند و برای کمك



شکل ۱۳–۱۱ نمودار تك‌خطی یك سیستم دارای حفاظت پشتیبان.

به‌هماهنگی عملکرد سیستم حفاظت مقدم و پشتیبان لازم است.

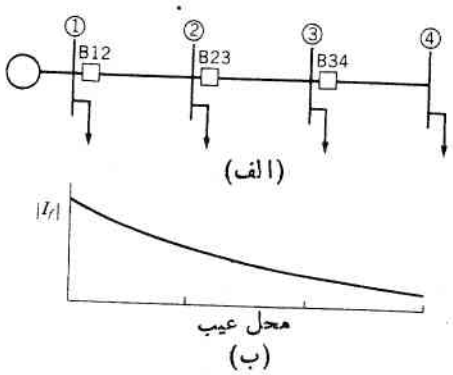
نگاه دیگری به‌شکل ۱۳ـ۱۱ نشان می‌دهد که با ناکامی حفاظت مقدم شینهٔ ۱، مربوط به‌خط ۱ـ۵، ممکن است یك سیستم پشتیبانی که معادل سیستم پشتیبانی از راه دور توصیف شدهٔ پیش است طراحی شود تا همهٔ مدارشکنهای واقع درشینهٔ ۱ یعنی B، C، و E را قطع کند. این سیستم حفاظت را حفاظت پشتیبانی موضعی می‌گویند وعموماً برای پشتیبانی در برابر ناکامی مدارشکنهای مسئول برطرف‌سازی عیب (دراین مثال مدارشکن F) پیش‌بینی می‌شود. از این‌رو، سیستم حفاظت پشتیبان موضعی، حفاظت در برابر ناکامی مدارشکن نیز خوانده می‌شود. ازآنجا که امکان دارد سیستم حفاظت مقدم و سیستم حفاظت موضعی در برابر ناکامی مدارشکن، در زیرسیستمهای خاصی مشترك باشند ـ نظیر باتری خانه ـ انواع معینی از ناکامیها در هردو سیستم مشترك‌اند و نوعی حفاظت پشتیبان از راه دور برای هر سیستم حفاظت خوب طراحی شده از ضروریات است.

۱۳ـ۶ حفاظت خط انتقال

حفاظت خط‌انتقال، درحفاظت سیستم‌قدرت، دارای نقش اصلی است زیرا خطهای انتقال برای شبکهٔ اتصال نیروگاهها بمراکز بار، عناصر اساسی‌اند. همچنین به‌علت مسافتهای بین شهری زیادی که خطهای انتقال طی می‌کنند این خطها در معرض بروز بیشتر عیبهای سیستم قدرت‌اند. در سیستمهای ولتاژ پایین، ساده‌ترین سیستم حفاظت متداول، فیوز است که به‌نوعی عمل رله ومدارشکن را انجام می‌دهد. ما دراین‌کتاب، حفاظت به‌وسیلهٔ فیوزها و دوباره بندها را (که در مدارهای توزیع نیز به‌کار می‌روند) بررسی نخواهیم‌کرد. در عوض به‌حفاظت خطهای انتقال ولتاژ‌متوسط و ولتاژ‌بالا بیشتر توجه خواهیم‌کرد. سیستم حفاظت متداول در خطهای ولتاژ‌متوسط، قدری ساده‌تراست تا در خطهای HV و EHV که بخش اعظم وسایل انتقال اصلی را تشکیل می‌دهند. از آنجا که اثر خروج یك خط ولتاژ‌بالا بسیار وخیمتراز خروج یك خط توزیع یا خط انتقال فرعی است، حفاظت خط انتقال قدرت عموماً پیچیده‌تر، پرشاخ و برگتر، وهمچنین گرانتراست.

الف) حفاظت خطهای انتقال فرعی

وقتی سیستم تولید‌ـبار از نوع شعاعی است می‌توان ساده‌ترین شکل سیستم حفاظت را پی‌ریزی کرد. سیستم قدرت شکل ۱۳ـ۱۲(الف)، را در نظر بگیرید. ژنراتور واقع در شینهٔ ۱ (که ممکن است نمایش معادل یك یاچند ترانسفورماتوری باشد که ازنقطهٔ باولتاژ بالاتری شینهٔ ۱ را تغذیه می‌کنند) بارهای واقع درشینه‌های ۱، ۲، ۳، و ۴ را ازطریق سه خط انتقال تغذیه می‌کند. چنین سیستمی را سیستم شعاعی می‌گویند زیرا خطهای انتقال از **هرمنبع به صورت شعاعی‌خارج می‌شوند وبارها را تغذیه می‌کنند. از آنجاکه منبع قدرت** فقط در یك سر هرخط انتقال قرار دارد کافی است که برای هر خط فقط یك مدارشکن در



شکل ۱۳-۱۲ حفاظت یك سیستم شعاعی: (الف) نمودار تك‌خطی سیستم و (ب) منحنی کیفی نمایش جریان عیب $|I_f|$ به‌ازای عیبهای واقع درطول خط.

سرطرف مولد قرارداده شود. واضح است که به‌ازای هرعیب روی خط ۱-۲ باید مدارشکن B۱۲ باز شود. در این‌حالت همهٔ بارهای واقع درشینه‌های ۲، ۳، و ۴ و پایین مدارشکن ۱ قطعی خواهند داشت.

برای حفاظت خطهای انتقال این سیستم می‌توان از رله‌های اضافه جریان زمانی‌که قبلا توصیف شد استفاده‌کرد. جریان ناشی ازعیب واقع روی هرخط، بستگی به‌محل عیب خواهد داشت واز آنجا که با افزایش فاصلهٔ عیب از ژنراتور، امپدانس مسیر عیب زیاد خواهد شد جریان عیب متناسب با عکس این فاصله خواهد بود. شکل ۱۳-۱۲(ب)، جریان عیب I_f را برحسب فاصله تـا شینهٔ ۱، به‌صورت کیفی نشان می‌دهد. به‌علاوه بسته به‌نوع عیب و میزان تولید مربوط به‌شینهٔ ۱، اندازهٔ جریانهای عیب تغییر خواهند کرد. برای مثال اگرژنراتور شینهٔ ۱ نمایش معادل دو ترانسفورماتور موازی باشد پس، وقتی به‌هردلیل یکی از ترانسفورماتورها خارج ازمدار باشد جریانهای عیب کوچکتر خواهند بود. به‌طورکلی به‌ازای هردوحالت: (۱) سطوح جریان عیب حداکثر(وقتی تولیدحداکثر وعیب سه‌فاز مطرح باشد) و (۲) سطوح جریان عیب حداقل (وقتی تولید حداقل و عیب خط-به-خط یا خط-به-زمین، به‌همراه امپدانس تا زمین یـا بدون آن، مطرح باشد) منحنی اندازهٔ جریان عیب همانند شکل۱۳-۱۲(ب)، خواهدبود. می‌توان دراین سیستم، رله‌های اضافه جریان زمانی قبلا توصیف شده را طوری تنظیم کردکه برای یك‌خط، حفاظت‌مقدم، و درعین حال برای خط مجاور از سیستم، پشتیبانی راه دور فراهم‌کند. رله‌های واقع در هرکدام از شینه‌های ۱، ۲، ۳ به‌این منظور نصب می‌شوندکه برای خطهای مربوط به‌خود **حفاظت مقدم و برای خط پایین دست‌خود، حفاظت پشتیبانی راه دورفراهم آورند. به‌این‌ترتیب** رلهٔ شینهٔ ۱، علاوه برفراهم‌کردن حفاظت مقدم برای خط ۱-۲، حفاظت پشتیبانی راه دور برای خط ۲-۳ نیز ایجاد می‌کند. رلهٔ شینهٔ ۳، برای خط ۳-۴ فقط حفاظت مقدم فراهم می‌کند زیرا هیچ خط دیگری در طرف راست این خط وجـود ندارد. وقتی رلهٔ شینهٔ ۱

برای خط ۲–۳ حفاظت پشتیبان فراهم می‌کند باید طوری تنظیم شود که با تأخیر زمان کافی کار کند (تأخیرزمان هماهنگی آن) به‌نحوی‌که برای عیبهای واقع برروی خط ۲–۳ همیشه انتظارمی‌رود که رلهٔ شینهٔ۲ زودترعمل کند. پیش‌بینی حفاظت پشتیبان برای هرخطی که درآن سوی شینهٔ ۳ باشد نه ضروری است ونه عملی. با مثالهای عددی زیراین مفاهیم را روشن خواهیم ساخت.

مثال ۱۳–۲ بخشی از یك سیستم شعاعی ۱۳٫۸ کیلوولتی را شکل ۱۳–۱۳ نشان می‌دهد. سیستم – در شرایط کار معین – ممکن است به‌جای دو ترانسفورماتور فقط یك ترانسفورماتور تغذیه داشته باشد. فرض کنید شینهٔ ولتاژ-بالای ترانسفورماتور، شینهٔ بی‌نهایت است. سیستم حفاظت باید به‌ازای اتصالیهای خط-به-خط و سه‌فاز طراحی شود. در شکل ۱۳–۱۳، رئکتانسهای خط انتقال برحسب اهم داده شده‌اند و رئکتانس ترانسفورماتورها برحسب اهم و ارجاع شده به‌طرف ۱۳٫۸ kV است. از مقاومت صرف‌نظرکنید و به‌ازای اتصالی درشینهٔ ۵، ماکزیمم و مینیمم جریان اتصالی را بیابید.

حل: ماکزیمم‌جریان اتصالی وقتی‌خواهدبودکه اتصالی سه‌فاز وهردوترانسفورماتور درحال کار باشند دراین حالت درشینهٔ ۵:

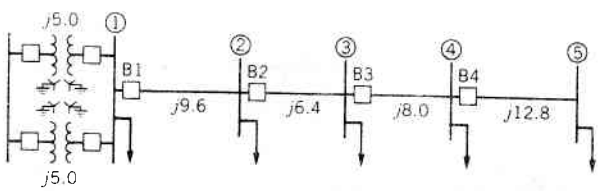
$$I_f = \frac{13800/\sqrt{3}}{j(2{,}5 + 9{,}6 + 6{,}4 + 8{,}0 + 12{,}8)} = -j2027{,}5 \quad \text{A}$$

به‌ازای اتصالی خط-به-خط و کارکردن فقط یك ترانسفورماتور، مینیمم جریان اتصالی را خواهیم داشت. به‌ازای اتصالی سه‌فاز وتنها یك ترانسفورماتور داریم:

$$I_f = \frac{13800/\sqrt{3}}{j(5{,}0 + 9{,}6 + 6{,}4 + 8{,}0 + 12{,}8)} = -j1906 \quad \text{A}$$

اما اتصالی خط-به-خط، جریانی معادل $\sqrt{3}/2$ برابرجریان اتصالی سه‌فاز تولید می‌کند. این رابطه با حل مسئلهٔ ۱۲–۲ می‌تواند اثبات شود. بنابراین به‌ازای اتصالی در شینهٔ ۵، مینیمم جریان اتصالی برابراست با:

$$I_f = \frac{\sqrt{3}}{2}(-j1906) = -j1651 \quad \text{A}$$



شکل ۱۳–۱۳ نمودار تك‌خطی سیستم شعاعی مثالهای ۱۳–۲ و ۱۳–۳. مقدار رئکتانس ترانسفورماتور وخط برحسب اهم داده شده‌اند.

بـا محاسبات مشابهی، ماکزیمم و مینیمم جریان اتصالیهای آورده شده در جدول ۱۳–۲ به‌دست می‌آیند. □

چنانکه درمثال ۱۳–۳ خواهیم دید برای هر رلهٔ X –که از رلهٔ پایین دست بعدی یعنی Y پشتیبانی می‌کند– اصل حفاظت پشتیبان به‌کمك رله‌های اضافه جریان به‌آن معنی است که X باید درموارد زیر برداشت کند:

الف) به‌ازای یك سوم مینیمم جریانی که Y می‌بیند.

ب) به‌ازای ماکزیمم جریانی که Y می‌بیند، اما نه زودتر از ۰٫۳ ثانیه پس از زمانی که Y می‌بایست به‌ازای آن جریان، برداشت کرده باشد.

مثال ۱۳–۳ برای سیستم مثال ۱۳–۲، نسبت CTها، تنظیم سرك (برداشت) رله‌ها، وتنظیم زمان رله‌ها را انتخاب کنید. در همه‌جا رلهٔ IFC-۵۳ را که منحنیهای مشخصه‌اش درشکل ۱۳–۷ داده شده‌اند وتنظیم سرکهایش در بخش ۱۳–۴ فهرست شده‌اند به‌کار ببرید. از آنجا که هر خط فقط در یك سر، مدارشکن دارد با مشخص کردن رلهٔ شینه‌های ۱، ۲، ۳، و ۴ به‌ترتیب با R۱، R۲، R۳، و R۴، نشانه‌گذاری را ساده کنید. مدارشکن هـر شینه به‌هنگام دریافت فرمان قطع از هرکدام از سر رلهٔ وابسته، هرسه فاز را باز خواهد کرد. به‌عنوان مثال هرسه رلهٔ شینهٔ ۱ با R۱ مشخص خواهند شد.

حل: تنظیمهای رلهٔ R۴: این رله باید به‌ازای همهٔ جریانهای بیشتراز A ۱٫۶۵ عمل کند، اما برای اطمینان، رله‌ای انتخاب می‌شود که به‌ازای جریان خط برابر یك سوم مقدار مینیمم، عمل کند:

$$I_p' = \frac{۱٫۶۵}{۳} = ۵۵ \text{ A}$$

به‌ازای این جریان، نسبت ترانسفورماتور جریان ۵۰/۵ (جدول ۱۳–۱)، جریان زیررا برای رله تولید می‌کند.

$$I_p = ۵۵ \times \frac{۵}{۵۰} = ۵٫۵ \text{ A}$$

جدول ۱۳–۲ ماکزیمم و مینیمم جریان اتصالیهای مثال ۱۳–۳

اتصالی درشینهٔ	۱	۲	۳	۴	۵
ماکزیمم جریان اتصالی، A	۳۱۸۷٫۲	۶۵۸۵٫	۴۳۰۷٫	۳۰۰۷٫	۲۰۲۷٫
مینیمم جریان اتصالی، A	۱۳۸۰٫۰	۴۷۲٫۶	۳۲۸٫۶	۲۳۷٫۹	۱۶۵٫۱

بنابراین تنظیم سرك A ۵ر۰ برای رله، مقدار مناسبی است.

ازآنجا که این رله در انتهای یك سیستم شعاعی قرار دارد هماهنگی با رلهٔ دیگر ضروری نیست. در نتیجه، سریعترین عملکرد ممکن، بهتر است. بنابراین تنظیم درجهٔ زمان برابر ۱/۲ انتخاب می‌شود.

تنظیمهای رله R۳: این رله باید از رلهٔ R۴ پشتیبانی‌کند و بنابراین باید به‌ازای کوچکترین جریان اتصالی‌که R۴ می‌بیند یعنی A ۱ر۱۶۵ بااطمینان برداشت‌کند. به‌این ترتیب برای R۳ نیز درست همانند R۴ از نسبت ترانسفورماتور جریان ۵۰/۵ و تنظیم سرك رلهٔ A ۵ استفاده می‌کنیم.

معمولا برای تعیین تنظیم درجهٔ زمان، مقتضی است زمان عملکرد رلهٔ پشتیبان (در این حالت R۳) حداقل s ۳ر۰ پس‌از زمانی باشدکه رلهٔ پشتیبانی‌شونده عمل‌کرده است. این‌فاصله، تأخیرزمان هماهنگی است. چنانکه بزودی خواهیم‌دید به‌ازای بالاترین جریان عیبی‌که R۴ می‌تواند ببیند (ونه پایین‌ترین‌جریان عیب) باید برای R۳ یك تأخیر s ۳ر۰ پیش‌بینی‌کنیم. به‌این ترتیب به‌ازای هرعیب ممکنی‌که R۴ می‌تواند ببیند رلهٔ R۳ دست کم ۳ر۰ ثانیه پس از R۴ عمل خواهدکرد.

بالاترین جریان عیبی که R۴ می‌تواند ببیند جریانی است‌که به‌ازای عیبی درست درطرف راست R۴ به‌وجود می‌آیدکه بنابرجدول ۱۳–۲ برابر A ۳۰۰ر۷ است. بنابر این جریان هردو رلهٔ R۳ و R۴ عبارت است از:

$$۳۰۰ر۷ \times \frac{۵}{۵۰} = ۳۰ر۱ \text{ A}$$

و برای هر دو رله به‌ازای تنظیم سرك ۵، نسبت جریان رله به‌تنظیم سرك، برابراست با ۶ر۰ = ۵/۱ر۳۰. بنابرشکل ۱۳–۷، چون تنظیم درجهٔ زمان مساوی ۱/۲ است زمان عملکرد R۴ برابر s ۱۳۵ر۰ می‌شود. به‌این ترتیب درصورت ناکافی R۴، رلهٔ R۳ باید در زمان زیرعمل کند:

$$۰ر۱۳۵ + ۰ر۳ = ۰ر۴۳۵ \text{ s}$$

و بنابرشکل ۱۳–۷، تنظیم درجهٔ زمان لازم برای R۳ برابر با ۰ر۲ است.

اگر برای R۳، تأخیر s ۳ر۰ را، به‌ازای پایین‌ترین ونه به‌ازای بالاترین جریان عیبی‌که R۴ می‌تواند ببیند پیش‌بینی کرده بودیم تنظیم درجهٔ زمان را کمتراز ۰ر۲ تعیین می‌کردیم‌که تأخیر s ۳ر۰ را برای بالاترین جریان عیبی که R۴ می‌تواند ببیند فراهم نمی‌کرد.

تنظیم رلهٔ R۲ : کوچکترین جریان عیبی‌که R۲ باید به‌ازای آن برداشت‌کند تا از R۳ پشتیبانی‌کند مطابق جدول ۱۳–۲، برابر با A ۲۳۷ر۹ است. ممکن است نسبت CT را ۱۰۰/۵ انتخاب‌کنیم. بنابراین با اطمینان لازمی‌که به‌ما حکم می‌کند طراحی را

برای برداشت در یك سوم مینیمم جریـان عیب انجام دهیم تنظیم برداشت را به‌صورت زیرمحاسبه می‌کنیم:

$$\frac{۱}{۳} \times ۲۳۷٫۹ \times \frac{۵}{۱۰۰} = ۳٫۹ \text{ A}$$

و تنظیم سرك را روی ۴٫۵ قرار می‌دهیم.

برای یافتن تنظیم درجهٔ زمـان رلهٔ R۲ چنانکه می‌بینیم ماکزیمم جریان عیب در شینهٔ ۳، بـرابـر ۴۳۵٫۷ A است. به‌ازای این جریان، نسبت جریان رلهٔ R ۳ به تنظیم برداشت آن برابر خواهد بود با:

$$۴۳۵٫۷ \times \frac{۵}{۵۰} \times \frac{۱}{۵} = ۸٫۶$$

چـون تنظیم درجهٔ زمان R۳ مساوی ۲٫۵ است همان‌طور کـه از شکل ۱۳–۷ خوانده می‌شود این رله در ۰٫۳۱ s عمل خواهد کرد. به‌این ترتیب برای هماهنگی درست بـا R۳، رلهٔ R۲ باید در زمان زیرعمل کند:

$$۰٫۳۱ + ۰٫۳ = ۰٫۶۱ \text{ s}$$

رلهٔ R۲ درموقع پشتیبانی از R۳، جریان عیب ۴۳۵٫۷ A را نیز می‌بیند، که در این حالت نسبت جریان رله به‌تنظیم برداشت عبارت است از:

$$۴۳۵٫۷ \times \frac{۵}{۱۰۰} \times \frac{۱}{۴} = ۵٫۴$$

ازشکل ۱۳–۷، تنظیم درجهٔ زمان را ۲٫۶ می‌خوانیم.

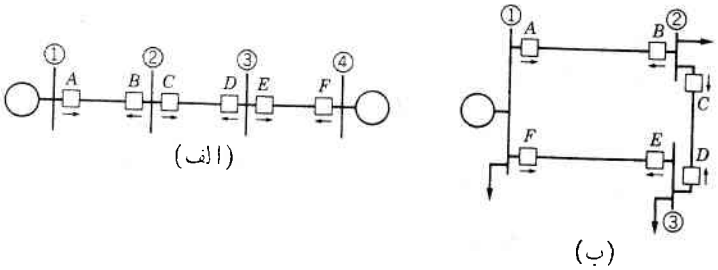
رلهٔ R۱، به‌روش مشابهی تنظیم می‌شود. نسبت نهایی CT، مقدار برداشت وتنظیم درجهٔ زمان همهٔ رله‌ها درجدول ۱۳–۳ داده شده است.

جدول ۱۳–۳ تنظیم رله‌های مثال ۱۳–۳

	R۱	R۲	R۳	R۴
نسبت CT	۱۰۰ : ۵	۱۰۰ : ۵	۵۰ : ۵	۵۰ : ۵
تنظیم برداشت، A	۵	۴	۵	۵
تنظیم درجهٔ زمان	۲٫۹	۲٫۶	۲٫۵	۱/۲

بجاست اشاره کنیم که اگر به‌ازای بارهای سنگین یا عیبهای سبك، جریان خط ۴–۵ به‌مقدار برداشت رله نزدیك شود این خطر کوچك وجود دارد که رلهٔ R۳ پیش از R۴ عمل کند. هر دو رلهٔ R۳ و R۴ یك جریان را می‌توانند ببینند (زیرا نسبت CTها و تنظیم برداشتهای برابری دارند) و موقعی که R۴، جریانی قدری کوچکتر از مقدار برداشت خود را می‌بیند این امکان وجود دارد که خطای موجود در CTها یا رله‌ها درست به‌اندازه‌ای باشد که R۳ این جریان را به عنوان وضعیت عیب (قطع) مشاهده کند. برای جلوگیری از این‌قبیل مسائل ممکن، مقدار تنظیم سرك برداشت در R۳ باید قدری بزرگتر از R۴ باشد.

چون سیستم نشان داده شده در شکل ۱۳–۱۳ یك سیستم شعاعی است می‌تواند با رله‌های اضافه جریان زمانی (که ساده و نسبتاً ارزان‌اند) حفاظت شود. سیستم چندمنبعهٔ شکل ۱۳–۱۴(الف)، و سیستم شکل ۱۳–۱۴(ب)، را در نظر بگیرید. هردو آنها باید دارای روش حفاظت مشابهی باشند زیرا هردو سیستم حلقوی‌اند. دراین‌سیستمها به‌ازای عیب روی خط، جریان عیب از دوسر خط انتقال جاری خواهد شد. بنابراین برای حذف خط عیب‌دار از سیستم، باید در دو سر هرخط، مدارشکن گذاشت. اما اگر هر رله چنانکه پیکانهای شکل ۱۳–۱۴ نشان می‌دهند فقط به‌عبور جریان در جهت مستقیم (به‌طرف ناحیهٔ حفاظت خود) پاسخ دهد و به‌ازای جریان در جهت عکس هیچ‌گونه عملی انجام ندهد آن‌گاه سیستم حلقوی می‌تواند تا حد زیادی مانند سیستم شعاعی، حفاظت شود. رله‌های وابسته به مدارشکنهای A، C، E باید با یکدیگر و رله‌های F، D، B باید با یکدیگر هماهنگ باشند. برای سودارکردن رله‌های اضافه جریان، در هرمحل از یك رلهٔ سودار اضافی استفاده می‌کنند و به‌خروجی واحدهای اضافه جریان و سودار چنان‌آرایشی می‌دهند که یك عملکرد «اشتراك» منطقی[1] بین خروجی‌آنها اجرا شود. تا وقتی که هردو رله، سیگنال قطع تولید کنند مدارشکنهای وابسته به‌آنها عمل نخواهند کرد.



شکل ۱۳–۱۴ نمودارهای تك‌خطی سیستمهای حلقوی. پیکانهای کنار هر مدار شکن طرفی را نشان می‌دهد که وقتی عیب در آنجا باشد رله پاسخ خواهد داد. همهٔ رله‌هایی که در دور حلقه پیکانهای هم جهت دارند بایکدیگر هماهنگ‌اند.

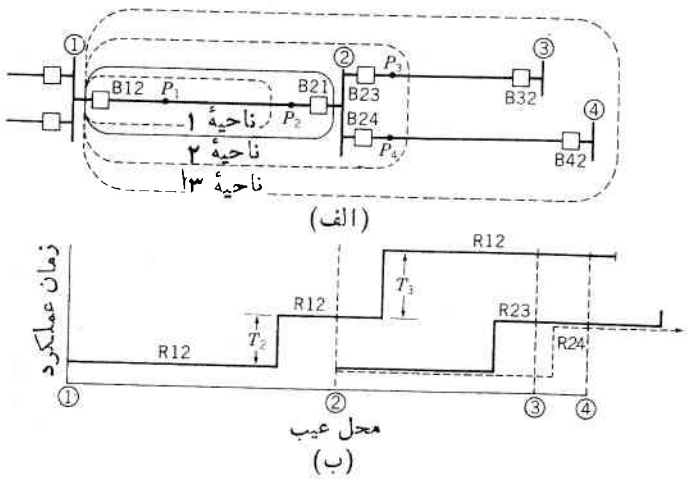
1. logical «and»

ب) حفاظت خطهای انتقال HV و EHV

در یك شبکهٔ وسیع قدرت، سیستمهای شعاعی یا تك‌حلقوی وجود ندارد. برای تشکیل یك شبکه، نیروگاهها ونقاط تغذیهٔ انتقال فرعی زیادی به‌هم می‌پیوندند به‌طوری که هیچ حلقهٔ ساده‌ای دیده نمی‌شود. در یك چنین سیستمی، هماهنگ کردن رله‌های اضافه‌جریان سودار برای حفاظت خطهای انتقال ناممکن می‌شود زیرا به‌ازای هر محل معین عیب، جریانی که رله می‌بیند بسته به‌شرایط کار سیستم در پهنهٔ بسیار وسیعی تغییر می‌کند.

رلهٔ امپدانس توصیف‌شدهٔ قبلی، روشی برای حفاظت خطهای انتقال به‌هم پیوسته‌در شبکه فراهم می‌کند. این رله برای پاسخ‌دادن به‌امپدانس بین محل‌خود ونقطهٔ عیب،ساخته شده است. این امپدانس متناسب بـا فاصله تامحل عیب است ـ نام رلهٔ فاصله از اینجاست ـ وبه‌سطح جریان عیب بستگی ندارد. فرض کنید سیستم شکل۱۳ـ۱۵(الف)، قسمتی از یك سیستم بـزرگ بـاشد. بـه‌ازای عیب در P_1، رلهٔ R۱۲ کـه جهت مستقیمی از شینهٔ ۱ به‌سمت شینهٔ ۲ دارد برای پاسخ‌دادن بـه امپدانس ترتیب‌ـمثبت (یا فاصله) بین شینهٔ ۱ و P_1 طراحی می‌شود. به همین روش، رلهٔ مشخص‌شده بـا R۲۱ طوری روی شینهٔ ۲ قرار می‌گیردکه جهت مستقیم آن از شینهٔ ۲ به‌شینهٔ ۱ باشد.

رله‌های امپدانسی کـه به ولتاژهای خط ـ به ـ خط (نظیر $V_a - V_b$) و اختلاف بین جریان خطها (نظیر $I_a - I_b$ بـه نام جریانهای مثلثی) پـاسخ می‌دهند بـه رله‌های فاز معروف‌اند. آنها امپدانس ترتیب‌ـمثبت بین نقطهٔ عیب و محل رله را ردیابی می‌کنند. سه رلهٔ فاز به همهٔ عیبهای ممکن خط ـ به‌ـخط، دو خط ـ به‌ـزمین، و سه فاز بـه درستی پاسخ



شکل ۱۳ـ۱۵ هماهنگی رله‌های فـاصله (امپدانس). در (الف) نواحی ۱ و۲ مشخص‌شده با خطچین، جانشین ناحیهٔ حفاظت نشان داده شده با خطهای ناچیده می‌شوند. ناحیهٔ ۳، حفاظت پشتیبانی برای‌سیستمهای حفاظت مجاور فـراهم مـی‌کند تأخیر زمان و زمان عملکرد R۱۲، R۲۳،R۲۴ در (ب) نشان داده شده است.

می‌دهند. اما این رله‌ها به عیبهای خط ـ به‌زمین درست پاسخ نمی‌دهند. برای همهٔ عیبهای خط شامل اتصالی زمین، سه رلهٔ اضافی پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از: ولتاژهای خط به‌خنثای V_a، V_b، V_c، جریانهای خط I_a، I_b، I_c، و جریان ترتیب ـ صفر I_0، امپدانس ترتیب ـ مثبت بین عیب ومحل رله را ردیابی می‌کنند.

مشابه رلهٔ اضافه جریان سودار با نهادن یك واحد سودار، رله‌های فاصله را سودار می‌کنند. رله‌های فاصله‌ای وجود دارد کـه نیازی به‌واحد سودار اضافی ندارند زیرا در طراحی خود ذاتاً خاصیت سوداری دارند. نمونهٔ عمدهٔ چنین رله‌ای رلهٔ mho پیشتر توصیف شده است. خاصیت سودار بودن ضروری است به‌طوری که رله به‌فاصلهٔ جهت مستقیم (با نگاه به‌ناحیهٔ حفاظت خود) پاسخ خواهد داد و به‌ازای همهٔ عیبهای واقع درجهت معکوس از عمل کردن خودداری خواهد ورزید.

درشکل ۱۳ـ۱۵ (الف)،کاربرد رله‌های فاصلهٔ سودار را حفاظت خط ۱ـ۲ درنظر بگیرید.ناحیهٔ حفاظت رله‌های R۱۲ و R۲۱ که این‌خط را حفاظت می‌کنند با خط ناچیده نشان داده شده است. برای رلهٔ R۱۲،عیبهای واقع در P_2، P_3، P_4 همگی دریك فاصله از شینهٔ ۱ به‌نظر می‌آیند با این‌حال، عیبهای واقع در P_3 و P_4 به‌وضوح خارج ازناحیهٔ حفاظت R۱۲اند. درنتیجه، اگر رلهٔ فاصله برای پاسخ به عیب واقع در P_2 تنظیم شود، به‌عیبهای واقع در P_3 و P_4 نیز پاسخ خواهد داد. این عملکرد برای رلهٔ R۱۲ نادرست است. برای حل این مشکل اساسی، نـاحیهٔ حفاظت رلهٔ فـاصلهٔ R۱۲ به‌صورت خط‌چین مطابق شکل ۱۳ـ۱۵ (الف)، اصلاح می‌شود. دو ناحیهٔ حفاظت ۱ و ۲، جانشین تك‌ناحیهٔ نشان‌داده شده با خط ناچیده می‌شوند. ناحیهٔ ۱ نسبت بـه ناحیهٔ با خط ناچیده تا مسافت کمتری امتداد می‌یـابد. و معمولاً درحدود ۸۰٪ طول خط است. برای عیبهای داخل این ناحیه، رلهٔ فاصلهٔ واقع در شینهٔ ۱ به‌طور عادی (یعنی هرچه زودتر) عمل می‌کند. ناحیهٔ کوتـاه‌شدهٔ ۱ را عموماً ناحیهٔ کم‌برد می‌نامند. از طرف دیگر، ناحیهٔ ۲ را که تا آن‌سوی ته‌خط وکاملا به داخل خط وصل به‌شینهٔ دوردست امتداد یافته است ناحیه پربرد می‌گویند. رلهٔ R۱۲ به عیب ناحیهٔ ۲ با تأخیر زمان پاسخ می‌دهد به‌طوری که ممکن است با R۲۳ و R۲۴ هماهنگ باشد.

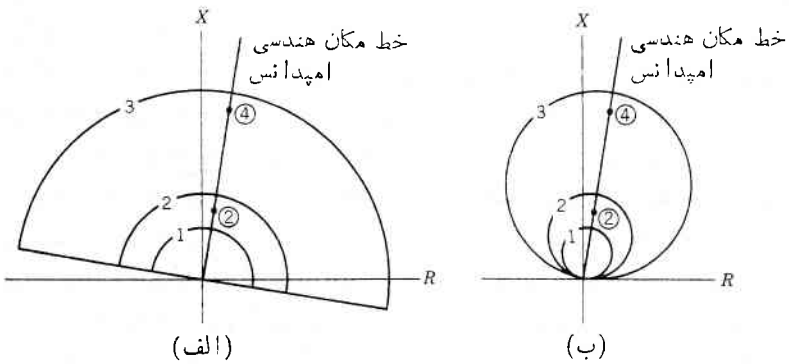
نواحی ۱ و ۲ رلهٔ R۱۲ درشینهٔ ۲ به‌همین صورت تنظیم شده‌اند. به‌ازای عیبی‌در P_1، هردو رلهٔ R۱۲ و R۲۱ هرچه زودتر عمل می‌کنند زیرا این عیب در ناحیهٔ ۱ هردو رله‌واقع است. عیب واقع در P_2 در ناحیهٔ ۱ رلهٔ R۲۱ قرار دارد و درنتیجه مدارشکن B۲۱ به‌سرعت قطع می‌شود.ولی رلهٔ R۱۲ عیب را به‌سرعت برطرف نخواهدکرد زیرا این عیب در نـاحیهٔ ۲ آن قرار دارد. پس‌از سپری‌شدن تأخیر زمان ناحیهٔ ۲، رلهٔ R۱۲ عمل می‌کند ومدارشکن B۱۲ قطع می‌شود. بنابراین به‌ازای عیبهای نظیر P_2، رفع عیب از شینهٔ ۱ با تأخیر صورت می‌گیرد درحالی‌که سر شینهٔ ۲ به‌سرعت قطع می‌شود.

حال عیبی را در P_3 درنظر بگیرید. این عیب را کـه در ناحیهٔ ۱ رلهٔ R۲۳ قرار دارد R۲۳ و مدارشکن B۲۳ به‌سرعت برطرف می‌کنند. اگر B۲۳ مـوفق به‌عمل نشود

رلهٔ R۱۲، مدار شکن B۱۲ در شینهٔ ۱ را قطع خواهد کرد تا عیب را در زمان ناحیهٔ ۲ رفع کند. واضح است که زمان پاکسازی ناحیهٔ ۲ باید بیشتر از بیشترین زمان ممکن پاکسازی ناحیهٔ ۱ رلهٔ R۲۳ باشد، به‌نحوی که به‌ازای عیب واقع در P_3، رلهٔ R۱۲ زودتر عمل نکند. در شینهٔ ۴، تنظیم ناحیهٔ ۲ رلهٔ R۴۲ و مدار شکن B۴۲ نیز به‌همین‌صورت است. عیب واقع در P_4، در ناحیهٔ ۲ رلهٔ R۴۲ قرار می‌گیرد.

شکل ۱۳–۱۵(ب)، زمان پاسخ رله‌های R۱۲، R۲۳، و R۲۴ را به عیبهای واقع در نواحی ۱ و ۲ آنها به‌طور طرحواره‌ای نشان می‌دهد. محورهای طولها و عرضها در نمودار زمان پاسخ به‌ترتیب عبارت‌اند از: محل عیب روی خطهای مربوط و زمان‌عملکرد رله. زمان عملکرد ناحیهٔ ۱ درحدود ۱ سیکل است درحالی‌که زمان عملکرد ناحیهٔ ۲ بین ۱۵ تا ۳۰ سیکل تغییر می‌کند.

در بیشتر موارد برای رله‌های فاصله، ناحیهٔ حفاظت دیگری به‌نام ناحیهٔ ۳ پیش‌بینی می‌شود تا برای خطهای مجاور، پشتیبانی راه دور فراهم کند. برد ناحیهٔ سوم هر رله باید تا آن سوی طویلترین خطی باشد که از شینهٔ واقع در ته‌خط حفاظت شده‌اش خارج می‌شود. عملکرد پشتیبانی راه دور باید با حفاظت مقدمی که از آن پشتیبانی می‌کند هماهنگ باشد. بنابراین ناحیهٔ سوم رلهٔ R۱۲ باید با ناحیهٔ دوم رله‌های شینهٔ ۲ (R۲۳ و R۲۴) هماهنگ شود. همچنین توجه کنید که شکل ۱۳–۱۵(ب)، به یك اصل مهم هماهنگی رله‌ها اشاره می‌کند. هماهنگی هم از نظر زمان وهم از نظر فاصله انجام می‌گیرد. ناحیهٔ حفاظت سریعتر باید از حیث فاصله تا آن سوی برد ناحیهٔ حفاظت پشتیبان کندتر خود امتداد بیابد. بنابراین برد ناحیهٔ ۲ رلهٔ R۱۲، کوتاهتر از برد ناحیهٔ ۱ رلهٔ R۲۳ یا R۲۴ است. همچنین برد ناحیهٔ سوم رلهٔ R۱۲ از برد ناحیهٔ دوم R۲۳ و R۲۴ کوتاهتر است. اگر این هماهنگی صورت نمی‌گرفت درمورد بعضی از عیبها، رفع عیب با زمان پشتیبانی کند، بی‌آنکه لازم باشد، جانشین رفع عیب سریع می‌شد. زمان هماهنگی ناحیهٔ ۳ عموماً در حدود یك ثانیه است. سه ناحیهٔ حفاظت رلهٔ R۱۲ و زمان عملکرد آنها را شکل



شکل ۱۳–۱۶ مشخصه‌های (الف) رلهٔ امپدانس سودار و (ب) رلهٔ mho برای مثال ۱۳–۴.

۱۳–۱۵(ب) طرح وارانه نشان می‌دهد.

شکل ۱۳–۱۶(الف)، مشخصهٔ یك رلهٔ فاصلهٔ سودار را درصفحهٔ مختلط R-X نشان می‌دهد. دراین شکل، خط مستقیمی به‌نام خط مکان هندسی امپدانس دیده می‌شود. می‌توان روی این خط، امپدانسهای ترتیب‌مثبت خط حفاظت‌شده را بـه همان صورتی‌که رله بین محل خود ونقاط مختلف‌خط‌حفاظت‌شده می‌بیند ترسیم‌کرد. واحد سودار رله باعث تفکیك نواحی‌قطع وسد درمشخصهٔ رلهٔ شکل۱۳–۱۶(الف)–توسط‌کشیدن خطی عمود برخط مکان هندسی‌امپدانس–می‌شود. شماره‌های داخل دایره، امپدانس اندازه‌گیری شده از شینهٔ ۱ تا شینهٔ۲و ۴ روی،خط مکان هندسی امپدانس را نشان می‌دهند.شعاع دایره‌های‌ناحیه‌که مرکز آنها مبدأ صفحهٔ R-X است‌برابر با اندازهٔ امپدانس خط حفاظت‌شده‌ای است‌که R۱۲ از شینهٔ۱ تا ته ناحیهٔ مشخص‌شده با شمارهٔ داخل دایره می‌بیند. بدین سان محل برخورد دایرهٔ یك ناحیه با خط مکان هندسی امپدانس، امپدانس‌خط بین رله وته ناحیه را به‌دست‌می‌دهد. امپدانسی‌که رله بعداز وقوع عیب می‌بیند درمقایسه با امپدانس باری‌که درحین‌کار عادی می‌بیند بسیار کوچك است. وقتی امپدانسی که رله می‌بیند در داخل دایرهٔ یك ناحیه قرار گیرد رله عمل می‌کند. برای امپدانسهای درون دایرهٔ نـاحیهٔ ۱، عملکرد درمیانیم زمـان صورت می‌گیرد. برای عملکردهای بعدی –به‌ازای عیبهای ناحیهٔ ۲ و سپس ۳– تـأخیر زمان‌گذارده می‌شود.

شکل ۱۳–۱۶(ب)، مشخصهٔ یك رلهٔ mho را نشان می‌دهدکه درآن، مراکزدوایر ناحیه، روی خط مکان هندسی امپدانس واقع‌اند. توجه‌کنیدکه به‌ازای امپدانسهای‌مساوی، شعاع دایره‌های‌ناحیه برابر نصف شعاع دایره‌های‌ناحیهٔ متناظر در رلهٔ فاصلهٔ سودار است زیرا هنوز هم محل برخورد دایرهٔ یك ناحیه بـا خط مکان هندسی امپدانس باید امپدانس خطی را بدهدکه رله بین محل خود وته ناحیه می‌بیند.

طرحوارهٔ رله‌گذاری‌فاصله‌ای سه‌مرحله‌ای‌که دراینجا توصیف شد یك سیستم‌حفاظت کامل برای خطهای انتقال ولتاژ–بالا فراهم می‌کند. این‌حفاظت، توأم با اصلاحات اندکی برای تطبیق با ویژگی هرسیستم، تقریباً درهمه‌جا برای حفاظت خط انتقال شبکه‌های‌قدرت امروزی به‌کار می‌رود. دربسیاری از حالات، نوعی از رله‌های اضافه‌جریان زمانی سودار پیشتر توصیف شده، عیبهای اتصالی زمین را تشخیص می‌دهند درحالی‌که عیبهای‌سه‌فاز و خط ـ به ـ خط را رله‌های **فاصله**، زیر پوشش می‌گیرند. گاهگاهی– به‌خصوص در سطوح EHV– هماهنگ‌کردن زمان نـاحیهٔ سوم یك رله بـا زمان نواحی دوم خطهای مجاور، بسیار دشوار می‌شود. درچنین حالتهایی ممکن‌است عملکرد پشتیبانی راه دور (ناحیهٔ‌سوم) رله‌های فاصله را حذف‌کرد.

درحین شرایط اضطراری پخش بار، وقتی‌که بار نسبتاً زیاد است امپدانسی که رله می‌بیندکوچك است وبا انجام بررسی باید اطمینان یافت که این امپدانس در داخل یکی از دایره‌های ناحیهٔ مشخصهٔ رله قرار نمی‌گیرد.

مثال ۱۳–۴ باز هم قسمتی از سیستم انتقال ۱۳۸ کیلوولتی شکل ۱۳–۱۵(الف)

را درنظر بگیرید. طول خطهای ۱ـ۲، ۲ـ۳، و ۲ـ۴ بـه‌ترتیب ۶۴، ۶۴ و ۹۶ کیلومتر (۴۰، ۴۰ و ۶۰ مایل) است. امپدانس تـرتیب ـ مثبت خط انتقال برابر $۰٫۵+j۰٫۵$ اهم برکیلومتر است. مـاکزیمم باری کـه در شرایط اضطراری، خط ۱ـ۲ تغذیـه می‌کند ۵۰ MVA است. یك سیستم رله‌گذاری فاصله‌ای سه ناحیه‌ای را تا مرحلهٔ تنظیم نواحی R۱۲ یعنی تعیین مقدار امپـدانسها برحسب کمیتهای ثانویـهٔ CT و CVT طراحی کنید. تنظیم نواحی، نقاطی از صفحهٔ R-X راکه دایرهٔ نواحی رله باید از آنها بگـذرد، مشخص می‌کند.

حل: امپدانسهای ترتیب‌ـمثبت سه خط عبارت‌اند از:

خط ۱ـ۲ $۳٫۲+j۳۲٫۰\ \Omega$

خط ۲ـ۳ $۳٫۲+j۳۲٫۰\ \Omega$

خط ۲ـ۴ $۴٫۸+j۴۸٫۰\ \Omega$

از آنجاکه رله‌های فاصله، وابسته به‌نسبت ولتاژ برجریان‌اند هر فاز هم به CT و وهم به CVT نیاز خواهد داشت. ماکزیمم جریان بار عبارت است از

$$\frac{۵۰\times۱۰^{۶}}{\sqrt{۳}\times۱۳۸\times۱۰^{۳}}=۲۰۹٫۲\ \mathrm{A}$$

نسبت CT را ۲۰۰/۵ انتخاب می‌کنیم کـه در شرایط بارکرد مـاکزیمم تقریباً ۵ A در سیم‌پیچ ثانویه تولید خواهدکرد.

ولتاژ سیستم نسبت به‌خنثی عبارت است از

$$\frac{۱۳۸\times۱۰^{۳}}{\sqrt{۳}}=۷۹٫۶۷\times۱۰^{۳}\ \mathrm{V}$$

در بخش ۱۳ـ۳ دیدیم کـه استاندارد صنعتی ولتاژ ثـانویـهٔ CVT، برای ولتاژهـای خط ـ به ـ خنثی، برابر ۶۷ V است. درنتیجه نسبت CVT را چنین انتخاب می‌کنیم:

$$\frac{۷۹٫۶۷\times۱۰^{۳}}{۶۷}=۱۱۸۹٫۱/۱$$

که دراین حالت، ولتاژ عادی‌سیستم، درهرفاز ثانویهٔ CVT، ۶۷ ولت تولید خواهدکرد. اگر ولتاژهای اولیه و ثانویهٔ CVT در شینهٔ ۱ را V_p وجریان اولیهٔ CT را I_p درنظر بگیریم، برای امپدانسی‌که رله اندازه می‌گیرد خواهیم داشت

$$\frac{V_p/۱۱۸۹٫۱}{I_p/۴۰}=Z_{\text{line}}\times۰٫۰۳۳۶$$

بدین ترتیب امپدانسهای سه خط از دید رلهٔ R۱۲، تقریباً برابرند با:

خط ۱–۲ ثانویه $0.11+j0.1\ \Omega$,

خط ۲–۳ ثانویه $0.11+j0.1\ \Omega$,

خط ۲–۴ ثانویه $0.16+j0.6\ \Omega$,

ماکزیمم جریان بار A ۲۰۹٫۲ به‌فرض‌ضریب توان ۰٫۸ پس‌افتی ازدید رله‌چنین است

$$Z_{\text{بار}}=\frac{67}{209.2(5.200)}(0.8+j0.6)$$

$$=1.52+j7.7\ \Omega \text{ ثانویه،}$$

تنظیم ناحیهٔ ۱ رلهٔ R۱۲ که باید برای خط ۱–۲ بـا بردکم باشد عبارت است از

$$0.8\times(0.11+j0.1)=0.088+j0.088\ \Omega \text{ ثانویه،}$$

تنظیم ناحیهٔ ۲ باید بردی فراتر از سر ۲ خط ۱–۲ داشته باشد. برای منظورکردن خطاهای گوناگون ممکن سیستم مبدل‌ـرله، تنظیم ناحیهٔ ۲ رلهٔ R۱۲ معمولاً حدود ۱٫۲ برابرطول خطی است‌که باید حفاظت شود بدین قرار:

$$1.2\times(0.11+j0.1)=0.13+j0.132\ \Omega \text{ ثانویه،}$$

تنظیم ناحیهٔ ۳ نیزکه باید بردی تا آن سوی بلندترین خط وصل بـه شینهٔ ۲ داشته بـاشد عبارت است از

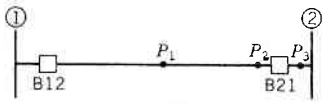
$$0.16+j0.6)\times 1.2+(0.11+j0.1)=0.302+j0.302\ \Omega \text{ ثانویه،}$$

توجه داشته‌باشیدکه یکبار دیگر ضریب ۱٫۲ به‌عنوان مضربی برای امپدانس بلندترین خط وصل به شینهٔ ۲ به‌کار می‌رود تا تضمین شود که حتی با وجـود خطاهای مطرح در سیستم رله‌گذاری، ناحیهٔ ۳ رلهٔ R ۱۲ تا فراتر از شینهٔ ۴ برد خواهد داشت. می‌توان از یك رلهٔ امپدانس سودار با مشخصهٔ شکل ۱۳–۱۶ (الف)، استفاده‌کرد.

هر دو شکل ۱۳–۱۶ (الف) و ۱۳–۱۶ (ب) در مـورد این مثال صدق می‌کنند و نقاط ۲ و۴ ازخط مکان هندسی امپدانس، متناظر با امپدانسهای محاسبه شدهٔ شینهٔ ۱ تا شینه‌های ۲ و ۴ اند. امپدانس بار از دید رله، بیشتر از۳ برابر امپدانس خط‌ـازشینهٔ ۱ تا شینهٔ ۴ـ است و کاملا در خارج دایـرهٔ ناحیهٔ ۳ رلهٔ امپدانس سودار و رلهٔ mho قـرارمی‌گیرد. نتیجتاً درحین نوسانات بارکه ممکن است درخط انتقال روی دهد، خطرقطع شدن خط وجود ندارد. اگربار ماکزیمم بیش ازحد به تنظیم ناحیهٔ ۳ رلهٔ امپدانس سودارنزدیك بود امکان داشت ضروری‌باشدکه رلهٔ mho جانشین‌آن شودکه دایرهٔ ناحیهٔ ۳ اش سطح‌کوچکتری از صفحه R-X را در برمی‌گیرد، شکل ۱۳–۱۶. □

ج) حفاظت خط به‌کمك رله‌های پیلوتی

در بخش پیش گوشزدکردیم‌که هـرخط (نظیر خط ۱–۲ در شکل ۱۳–۱۷) را ناحیهٔ ۱



شکل ۱۳-۱۷ خطی که با رلهٔ پیلوتی حفاظت می‌شود.

و ۲ی رلهٔ فاصله حفاظت می‌کند و بـرد معمولی ناحیهٔ ۱ در حدود ۸۰ درصد طول خط است. این ناحیه، اغلب ناحیهٔ قطع مستقیم یا ناحیهٔ پرسرعت نامیده می‌شود و زمان عملکرد رله برای عیبهای این ناحیه معمولا حدود یك سیکل است. در شکل ۱۳-۱۷، عیبی نظیر P_2، در ناحیهٔ ۲ رلهٔ R۱۲ قرار می‌گیرد. این عیب را رلهٔ R۱۲ در زمـان ناحیهٔ دومش برطرف خواهد کرد. البته درشینهٔ ۲ نیز یك دسته رلهٔ مشابه وجود دارند که عیب P_2 را در ناحیهٔ ۱ خود مشاهده می‌کنند. در نتیجه به ازای عیب P_2، مدارشکن شینهٔ ۲ در زمان پرسرعت رله‌گذاری عمل خواهدکرد. به این ترتیب به‌ازای عیبهای واقع در ۶۰ درصد وسط خط،هردو انتها عیب را به‌سرعت برطرف می‌سازند. درحالی‌که به‌ازای‌عیبهای واقع در ۲۰ درصد طول خط ــ از هر سر ــ نزدیکترین سر، عیب را به‌سرعت وسر دورتر، عیب را با تأخیر زمان ناحیهٔ دوم بر طرف خواهد کرد.

در سیستمهای HV و EHV به علت پیچیدگی ذاتی شبکهٔ به هم پیوستهٔ امروزی و محدودهٔ پایداری باریك، این رفع عیب تأخیردار از سر دورتر، اغلب ناپذیرفتنی است. پس پیش بینی حفاظت سریع سراسرخط (به جای ۶۰ درصد وسط) ضروری است. حفاظت سریع سراسرخط، به‌کمك رلهٔ پیلوتی، ازنوع توصیف شده دربخش۱۳-۴، فراهم می‌شود. به‌ازای عیب در هر نقطه از خط حفاظت شده، رله‌های سودار R۱۲ و R۲۱ یك وضعیت را می‌بینند یعنی هر دو رله، عبور جریان عیب را درجهت مستقیم می‌بینند. این اطلاعات، وقتی از طریق یك‌کانال پیلوت به‌سر دور مخابره می‌شوند در واقع وجودعیب بر روی خط حفاظت شده را تأیید می‌کنند. عیبهای P_2 و P_3 را روی خط ۱-۲ در شکل ۱۳-۱۵ در نظر بگیرید. اگرچه رلهٔ R۱۲ بین دو عیب، اختلافی نمی‌بیند رلهٔ R۲۱ ، P_2 را به‌عنوان عیب داخلی و P_3 را به عنوان عیب خارجی (واقع درجهت معکوس ناحیهٔ حفاظت خود) می‌بیند. رلهٔ R۱۲ با دریافت این اطلاعات سودارخواهد توانست به‌ازای عیب P_3،قطع شدن را سدکند. (توجه‌کنیدکه عیب P_3 درناحیهٔ حفاظت شینهٔ ۲ قرار دارد اما خارج از ناحیهٔ حفاظت خط۱-۲ است). عیب P_2 به‌سرعت به‌طورهمزمان ازهردوسر قطع می‌شود. چنین‌سیستمی‌طرحوارهٔ پیلوتی «مقایسهٔ سو» نام‌دارد. می‌توان با مقایسهٔ زاویهٔ فاز، جریانهای عیب‌دیده‌شده‌دردوسرخط‌ومبادلهٔ این اطلاعات زاویهٔ فاز، ازطریق‌کانال‌پیلوت، همین‌عملکرد را به دست آورد. چنین سیستمی طرحوارهٔ «مقایسه فاز» می‌گویند. بحث درمورد مزایا و معایب‌این دو طرحواره از حوزهٔ بحث این‌کتاب خارج است هر چند بـاید دانست‌که در عمل از هر دو این طرحواره‌های حفاظت استفاده می‌شود.

۱۳-۷ حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت

نوع حفاظت به‌کار رفته در ترانسفورماتور قدرت-همانند خطهای انتقال-بستگی به: بزرگی، اندازهٔ نامی ولتاژ، و ویژگی کاربرد آنها دارد. ممکن است برای ترانسفورماتورهای کوچك (حدوداً کوچکتر از MVA ۲) حفاظت با فیوز کافی باشد، در حالی که برای ترانسفورماتورهای با ظرفیت بیشتر از MVA ۱۰ ممکن است از رله‌های تفاضلی با تضعیف هارمونیك استفاده شود.

ابتدا حفاظت تفاضلی ترانسفورماتور قدرت دوسیم پیچهٔ تکفازشکل ۱۳-۱۸ را در نظر بگیرید. اگر ترانسفورماتور قدرت در سیم پیچهای یکمین و دومین، حامل جریانهای بار I'_1 و I'_2 باشد، با صرف نظرکردن از جریان مغناطنده داریم

$$\frac{I'_1}{I'_2}=\frac{N_2}{N_1} \qquad (۹-۱۳)$$

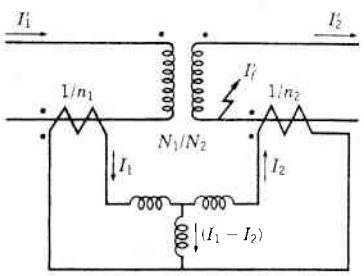
که در آن، N_1 و N_2 به‌ترتیب، تعداد دور سیم‌پیچهای اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتورقدرت است. I_1 و I_2 جریان ثانویهٔ CT ها هستند و نسبت دور CTهای طرف اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتور قدرت به ترتیب عبارت انداز n_1 و n_2 (یك دور در اولیهٔ CT مستلزم n دور در ثانویهٔ آن است). بنابراین:

$$I_1=\frac{I'_1}{n_1} \quad I_2=\frac{I'_2}{n_2} \qquad (۱۰-۱۳)$$

در شرایط عادی، که معادلهٔ (۱۳-۹) برقرار است، برای جلوگیری از قطع باید جریان (I_1-I_2) که از پیچك قطع می‌گذرد صفر باشد، یعنی I_1 باید مساوی I_2 باشد. بنابراین از روی معالادت (۱۳-۹) و (۱۳-۱۰) داریم

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{N_2}{N_1} \qquad (۱۱-۱۳)$$

به ازای عیب داخلی در طرف ثانویهٔ ترانسفورماتور قدرت و جریان عیب I'_f:



شکل ۱۳-۱۸ نمودار همبندی حفاظت دیفرانسیل یك ترانسفورماتور.

$$I_1 - I_2 = \frac{I'_f}{n_2} \qquad (۱۲-۱۳)$$

به ازای عیب در طرف اولیهٔ ترانسفورماتور، سمت راست معادلهٔ (۱۲-۱۳) برابر با I'_f/n_1 خواهد بود. اگر رله برای یك جریان برداشت $|I_p|$ به اندازهٔ کافی کوچك تنظیم شود، رلهٔ تفاضلی در حالی‌که به ازای عیبهای خارجی یا بارعادی سد می‌کند به ازای عیبهای داخلی قطع خواهدکرد.

چنانکه در بخش ۸-۱۰ گفتیم ترانسفورماتور قدرت معمولا سرکهای تنظیم متغیری دارد، که امکان تنظیم ولتاژ ثانویهٔ آن را در یك پهنهٔ معین فراهم می‌سازند. تنظیمها معمولا در مراحل کوچکی تا دامنهٔ $\pm$ ۱۰ درصد نسبت به دور نامی N_1/N_2 تغییر می‌کنند. اگر تنظیم سرکها منجر به نسبت دور ورای عادی شوند، رله در شرایط بار عادی، یك جریان تفاضلی خواهد دید. در این حالت برای جلوگیری از عملکرد نابه‌جا باید از رلهٔ تفاضلی درصدی استفاده شود.

ترانسفورماتور سه فاز با سیم‌پیچ ستاره-مثلثی (Y/Δ) نیازمند بحث بیشتری است. چنانکه در بخش ۱۱-۴ دیدیم درطی شرایط کار عادی، جریانهای اولیه و ثانویهٔ چنین ترانسفورماتورهایی از نظر اندازه و فاز با هم متفاوت‌اند. بنابراین ترانسفورماتورهای جریان را باید طوری وصل کرد که جریان خط ثانویهٔ CT هایی که رله می‌بیند با یکدیگر همفاز باشند و همچنین نسبت CT ها باید طوری تنظیم شود که مقدار جریانهایی که رله می‌بیند در شرایط عادی (بی‌عیب) مساوی باشند. با اتصال CT های طرف ستاره‌ای ترانسفورماتور قدرت به صورت مثلثی و اتصال CT های طرف مثلثی به صورت ستاره‌ای، رابطهٔ درست زاویهٔ فاز به دست می‌آید. بدین روش، اتصال CT ها تغییر فاز ناشی از ترانسفورماتور قدرت اتصال-ستاره-مثلثی را جبران می‌کند. این ملاحظات را مثال زیر روشن می‌کند.

مثال ۱۳-۵ یك ترانسفورماتور سه‌فاز ۳۴۵/۳۴٫۵kV دارای مقدار نامی ۵۰MVA و مقدار نامی حالت اضطراری کوتاه مدت ۶۰ MVA است. با استفاده از نسبت CT های استاندارد قابل دسترس، هرگاه طرف ۳۴۵-kV، اتصال-ستاره‌ای و طرف ۳۴٫۵-kV، اتصال-مثلثی باشد، نسبت CT ها، اتصال CT ها و جریان در ترانسفورماتور قدرت و در CT ها را تعیین کنید.

حل: وقتی ترانسفورماتور، ماکزیمم بار مورد انتظار خود را حمل می‌کند جریانهای طرف ۳۴۵-kV و ۳۴٫۵-kV عبارت اند از

$$\frac{۶۰\times۱۰^۶}{\sqrt{۳}\times۳۴۵\times۱۰^۳} = ۱۰۰٫۴\,A \quad \text{و} \quad \frac{۶۰\times۱۰^۶}{\sqrt{۳}\times۳۴٫۵\times۱۰^۳} = ۱۰۰۴٫۱\,A$$

در طرف ۳۴٫۵-kV، نسبت CT را ۱۰۰۰/۵ در نظر می‌گیریم. از آنجاکه CT های این طرف، اتصال-ستاره‌ای‌اند جریانهای گذرنده از این طرف به‌سمت رلهٔ تفاضلی چنین خواهد بود:

$$۱۰۰۴ \times \frac{۵}{۱۰۰۰} \cong ۵ر۰ \text{ A}$$

برای متعادل ساختن این جریان، جریانهای خط ناشی از CT های اتصال-مثلثی درطرف ۳۴۵-kV نیز باید ۵ر۰ A باشند. این امر ایجاب می‌کند که هر سیم‌پیچ ثانویهٔ CTهای اتصال-مثلثی دارای جریان زیر باشد.

$$\frac{۵ر۰}{\sqrt{۳}} \cong ۲ر۹ \text{ A}$$

این‌جریان درسیم‌پیچهای ثانویه CTهای طرف ۳۴۵- kV، این‌نسبت CT را لازم دارد:

$$\frac{۱۰۰ر۴}{۲ر۹} = ۳۴ر۶۴$$

نزدیکترین نسبت استاندارد قابل دسترس CT، ۲۰۰/۵ است. با به کار بردن این نسبت، جریان ثانویهٔ CTها برابر خواهد بود با:

$$۱۰۰ر۴ \times \frac{۵}{۲۰۰} = ۲ر۵۱ \text{ A}$$

و جریان خط از CTهای اتصال-مثلثی به طرف رلهٔ تفاضلی چنین خواهند بود:

$$۲ر۵۱ \times \sqrt{۳} = ۴ر۳۵ \text{ A}$$

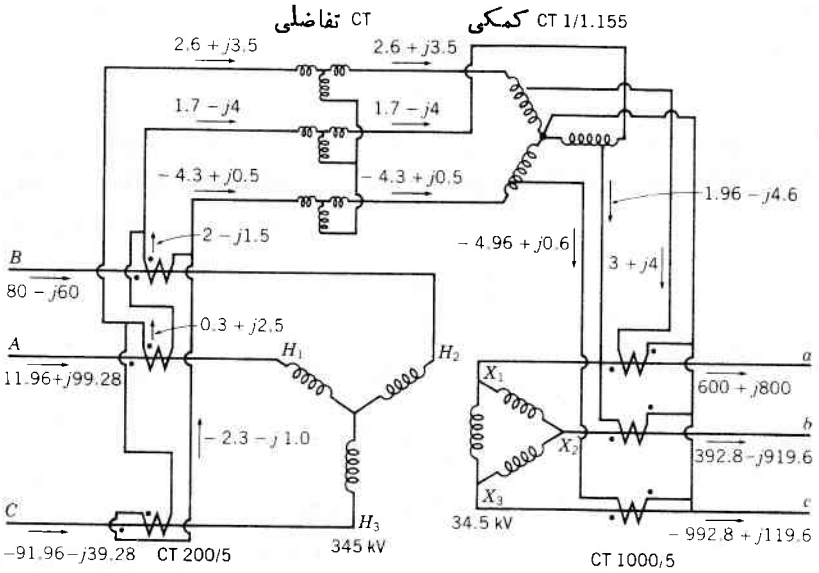
مسلماً این جریان نمی‌تواند ۵ر۰ A تولید شدهٔ طرف ۳۴ر۵-kV متوازن شود.

وقتی از نسبت CTهای استاندارد استفاده می‌شود این وضعیت جریانهای نامتوازن، در طراحی سیستم حفاظت برای ترانسفورماتورهای اتصال-ستاره-مثلثی بسیار پیش می‌آید. ترانسفورماتور جریانهای کمکی دارای پهنهٔ وسیع نسبت دور، راه حل مناسبی فراهم می‌آورند. این CT های کمکی، دستگاههایی کوچك و ارزان‌اند زیرا سیم پیچ اولیه و ثانویهٔ آنها مدارهایی کم ولتاژ وکم‌جریان‌اند. وقتی ترانسفورماتور قدرت بار عادیش را دارد، استفاده از سد CT کمکی با نسبت دورهای:

$$\frac{۵ر۰}{۴ر۳۵} = ۱ر۱۵۵$$

یك‌دسته جریان متعادل در رلهٔ تفاضلی تولید خواهدکرد. شکل ۱۳-۱۹، جریانهای ترانسفورماتور قدرت و CT های مختلف را برای ضریب توان مفروض ۸ر۰ پس‌افتی نشان می‌دهد. □

اگرچه بنابر بحث بالا می‌توان از ترانسفورماتورهای کمکی استفاده کرد،عموماً بهتر است که آن را به‌عنوان آخرین راه‌حل به‌کار ببریم. CT های کمکی، توان‌خروجی‌خود را



شکل ۱۳–۱۹ نمودار اتصال نشان دهندهٔ جریان مدارهای قدرت و رله‌گذاری مثال ۱۳–۵، برحسب آمپر.

به CT های اصلی اضافه می‌کنند و همچنین خطای تبدیل کل را افزایش می‌دهند. یك راه بسیار مناسبتر، استفاده از سرکهای تنظیم برروی پیچکهای خود رله است که همان‌کار CT کمکی با نسبت دور متغیر را انجام می‌دهند. در بیشتر حالات، تنظیم سرکهای پیچك رله در عمل، محدودهٔ احتیاط قابل‌قبولی برای تصحیح ناهمخوانی نسبتهای تبدیل، فراهم می‌کند.

البته وقتی رابطهٔ بین جریانهای اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتور قدرت را براساس نسبت دورها می‌گیریم، فرض می‌کنیم که جریان مغناطندهٔ آنها ناچیز است. این تقریب، هنگامی معقول است که ترانسفورماتور به صورت عادی‌کار می‌کند و جریان مغناطنده خیلی کوچك است. اما وقتی ترانسفورماتور برق‌دار می‌شود، می‌تواند جریانهای مغناطندهٔ سنگینی (به نام جریانهای مغناطنده هجومی) بکشدکه باگذشت زمان تا مقدار مانای بسیار کوچکی میرا می‌شوند. در هنگام انرژی رسانی به ترانسفورماتور، این جریان هجومی بزرگ به‌صورت جریان تفاضلی ظاهر می‌شود زیرا فقط از سیم‌پیچ اولیه می‌گذرد. تشخیص دادن این وضعیت و باز داشتن رلهٔ تفاضلی از قطع ترانسفورماتور ضروری است. یکی از رایجترین روشها برای انجام این‌کار برمبنای این واقعیت است که جریان مغناطندهٔ هجومی، پر از هارمونیك است در حالی که جریان عیب یك موج سینوسی خالص‌تر با فرکانس اصلی است. برای بهره‌گیری از این واقعیت، علاوه برجریان محدودکنندهٔ فرکانس اصلی $(I_1+I_2)/2$، یك سیگنال محدودکنندهٔ دیگر نیز، متناسب باموَلفهٔ هارمونیك‌جریان

تفاضلی، در رلهٔ تفاضلی تولید می‌شود. هرچند امکان دارد به‌واسطهٔ جریان مغناطندهٔ هجومی، یك جریان قطع‌کنندهٔ قابل توجه تولید شود ممکن است با انتخاب یك ضریب وزندهی مناسب برای مؤلفهٔ هارمونیك، رلهٔ تفاضلی را از قطع ترانسفورماتور درهنگام برق‌دارشدن باز داشت.

۱۳ـ۸ سخت‌افزار رله

در بخش ۱۳ـ۴ طراحی منطقی انواع معینی از رله‌ها را شرح دادیم. اغلب رله‌هایی که تا به‌حال بررسی کردیم، با وسایل الکترومکانیکی ساخته‌شده‌اند. برخی انواع متداولتر آنها عبارت‌اند از: رله‌های نوع پیستونی، رله‌های نوع آلاکلنکی، ورله‌های با فنجان چرخان (یاصفحه‌ای) که به وات ساعت سنجهایی شبیه‌اند که در مدار بیشتر خانه‌ها یافت می‌شوند. رله‌های الکترومکانیکی ازهمان آغاز، خوب کار کرده‌اندوهنوزهم یکی ازاجزای مهم کارطراحی سیستمهای حفاظت‌اند. این رله‌ها بادوام، ارزان، و دریك پست برق نسبتاً از مخاطرهٔ محیط درامان‌اند. زمان پاسخ آنها در مقایسه با نیاز سیستمهای قدرت امروزی قدری کند است وهمچنین طراحی آنها برحسب مشخصات قابل دسترس، ظرفیت بارکشی، و تنظیم سرکها تا اندازه‌ای غیرقابل انعطاف است.

دراواخر سالهای ۱۹۵۰ با استفاده از مدارهای نیمرسانایی، رله‌هایی عرضه شدند که مدارهای قیاسی را بـه‌همراه مدارهای منطقی بـه‌کار می‌برند تا مشخصهٔ مورد نظر را تولیدکنند. رله‌های نیمرسانایی قادرند مشخصه‌هایی شبیه مشخصهٔ رله‌های الکترومکانیکی فراهم کنندودر حقیقت به‌کمك رله‌های نیمرسانایی یك تعداد انواع مشخصه‌های جدیدتر تهیه می‌شود. اگرچه نمونه‌های اولیه این رله‌ها درمخاطرهٔ محیط‌کار پستها درمعرض‌خرابی همیشگی قطعات قرار داشتند، نمونه‌های جدیدتر خیلی خوب کار می‌کنند و خدمت بسیار خوبی در سیستمهای قـدرت HV و EHV ارائـه مـی‌دهند. اخیراً رله‌هـایی برمبنای میکروکامپیوترها طرح شده‌اند ودراین زمان، فعالانه بررسی می‌شوند.

۱۳ـ۹ خلاصه

دراین فصل توجه خود را به‌بحث دربارهٔ سیستمهای رله‌گذاری حفاظتی، برای شبکه‌های قدرت ولتاژ‌بالای امروزی معطوف ساختیم. مـا کاربرد فیوزها و بازبندها را که عموماً بیشتر درسیستمهای توزیع به‌کار می‌روند بررسی نکردیم. هماهنگی این تجهیزات‌ازجریان زیادی شبیه به‌رله‌های اضافه جریان زمانی بحث شده در بخشهای ۱۳ـ۴ و ۱۳ـ۶ است. دربخش۱۳ـ۷، حفاظت‌ترانسفورماتور را زیر عنوان حفاظت تجهیزات، مورد بحث قرار دادیم. حفاظت ژنراتورها در رابطه با رلهٔ تفاضلی مطرح شد کـه در حفاظت شینه‌ها نیز می‌تواند بـه‌کار رود. سیستمهای حفاظتی دستگاهها وخطوط، درگیریهای عجیبی را تولید

می‌کنند که شایستهٔ بررسی جامعی است.*

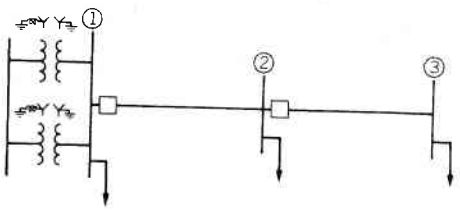
مسائل

۱۳–۱ در سیستمی که نمودار تک‌خطی و نواحی حفاظت آن درشکل ۱۳–۳(ب) دیده می‌شود: مدارشکنهای قطع‌شده به‌صورت زیر ند محل‌عیب را پیدا کنید.
الف) G و C؛ ب) F، G و H؛ ج) F، G، H، و B؛ و د) D، C، و E.

۱۳–۲ درمثال ۱۳–۳، تنظیم درجهٔ زمان R۳ را با این شرط تعیین کنید که تنظیم به‌ازای کمترین جریان عیبی که R۴ می‌بیند معین شده باشد. چرا تنظیم به‌جای بیشترین جریان به‌ازای کمترین جریان عیبی که R۴ می‌بیند صورت می‌گیرد؟

۱۳–۳ درمثال ۱۳–۳ فرض کنید که یك عیب خط ـ به ـ خط در نقطهٔ وسط خط ۲–۳ رخ می‌دهد. کدام رله دربرابر این عیب عمل خواهد کرد؟ زمان عملکرد آن چقدر خواهد بود؟ هرگاه این رله ازحذف عیب باز بماند کدام رله برای رفع عیب، وارد عمل خواهد شد؟ چقدر طول خواهد کشید تا عمل کند؟

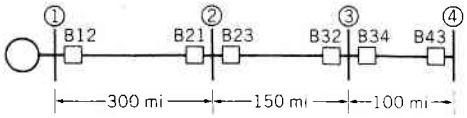
۱۳–۴ شکل ۱۳–۲۰، یك سیستم شعاعی ۱۱ کیلوولتی را نشان می‌دهد. امپدانسهای ترتیب‌ـ مثبت و صفر خط ۱–۲ به‌ترتیب $0.8\,\Omega$ و $2.5\,\Omega$ اند. امپدانسهای خط ۲–۳، سه برابر همین مقادیرند. امپدانسهای ترتیب‌ـمثبت و صفر هرکدام از دو ترانسفورماتور به ترتیب $j2.0$ اهم و $j3.5$ اهم است. درشرایط اضطراری، ممکن‌است سیستم بایك ترانسفورماتور کار بکند. نسبت CTها، مقادیر برداشت، و تنظیمهای درجه زمان را برای رله‌های IFC-۵۳ که برای حفاظت این سیستم در مقابل عیب تك خط ـ به ـ زمین طراحی شده‌اند بیابید. فرض کنید شینهٔ فشار قوی، شینهٔ بی‌نهایتی است که درحالت بی‌باری، ۱۱ kV در شینهٔ فشار ضعیف ایجاد خواهد کرد.



شکل ۱۳–۲۰ نمودار تك خطی مسئلهٔ ۱۳–۱۴.

* برای مثال مراجعه کنید، به:
C. R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*, John Wiley and Sons. Inc., New York, 1956; Westinghouse Electric Corporation, *Applied Protective Relaying*, Relay Instruments Division, Newark, N. J., 1976.

۵-۱۳ شکل ۱۳-۲۱، بخشی از یك شبکهٔ ۷۶۵ کیلوولتی را نشان می‌دهد. امپدانسهای ترتیب-مثبت وصفر خطهای انتقال به‌ترتیب: $0{,}6j + 0{,}52$ اهم و $1{,}8j + 1{,}0$ اهم برمایل است. فرض کنید امپدانسهای ترتیب-مثبت، منفی وصفر ژنراتور به‌ترتیب $0{,}15j$ اهم، $0{,}15j$ اهم، و $0{,}20j$ اهم است.



شکل ۱۳-۲۱ نمودار تك-خطی مسئلهٔ ۱۳-۵.

(الف) رله‌های R۱۲، R۲۳، و R۳۴ برای حفاظت این سیستم درمقابل عیب تك خط - به - زمین، از رله‌های اضافه جریان سودار زمان معکوس IFC - ۵۳ استفاده می‌کنند. جریان عیب لازم برای تنظیم مقدار برداشت رلهٔ زمین R۱۲ را تعیین کنید. در این محاسبه از مقاومت خط صرف نظر کنید.

(ب) نسبت CTها و CVTها را برای رله‌های فاصلهٔ فاز در شینهٔ ۱ انتخاب کنید. فرض کنید پیچك جریان رله‌ها می‌توانند ۱۰ A را به‌طور دائم حمل کنند و حد بارکرد اضطراری خط، ۳۰۰۰ MVA است. نسبت CTهای استاندارد را به‌کار ببرید.

(ج) برای حفاظت در برابر عیب فاز، سه ناحیهٔ حفاظت رلهٔ امپدانس سودار شینهٔ ۱ را تعیین و (سپس) روی نمودار R-X نشان دهید.

(د) همچنین محل امپدانس معادل بار اضطراری را روی نمودار R-X نشان دهید. آیا درمورد خطی که زیر بار اضطراری است مشکلی وجود دارد؟ چه راه‌حلی برایش پیشنهاد می‌کنید؟

۶-۱۳ درشکل ۱۳-۱۹، یك عیب سه‌فاز درسرهای سیم‌پیچ مثلثی و داخل ناحیهٔ حفاظت رلهٔ تفاضلی رخ می‌دهد. فرض کنید که امپدانس ترتیب مثبت ترانسفورماتور، از دیدگاه طرف ۳۴۵ kV، برابر $250j$ اهم است و سیستم قدرت تغذیه‌کنندهٔ طرف ۳۴۵-kV، ظرفیت اتصال کوتاه بی‌نهایت دارد. دراین حالت چه جریانهایی از قسمتهای مختلف شکل ۱۳-۱۹ می‌گذرد؟ جریان پیش از عیب را درنظر بگیرید و فرض کنید که جریان عیب به‌قسمت فشار-ضعیف سیستم سرایت نمی‌کند.