ششمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

ایمنی و حوادث

حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه‌های شعاعی توسط یک رله میکروپروسسوری در منبع

صادق جمالی ابوالفضل شیخ محمدی

دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده:

این مقاله روش جدیدی را برای حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه‌های شعاعی ارائه می‌دهد که در آن همه ترانسفورماتورها توسط یک رله میکروپروسسوری در منبع کنترل و حفاظت می‌گردند و در نتیجه نیازی به حفاظت محلی ترانسفورماتور مانند فیوز کات‌اوت نخواهد بود.

الگوریتم مورد استفاده رله براساس اندازه‌گیری تغییرات مؤلفه‌های متقارن کمیتهای الکتریکی در هنگام وقوع خطا کار می‌کند. با استفاده از برنامه حالت گذرای الکترومغناطیسی (EMTP) خطاهای داخلی ترانسفورماتورهای توزیع در یک فیدر ۲۰ کیلوولت نمونه از شبکه ایران شبیه‌سازی می‌گردد و نشان داده خواهد شد که رله میکروپروسسوری دارای قدرت تشخیص بسیار مطلوبی می‌باشد و می‌تواند خطاهای ضعیف بین حلقه‌ای و یا حلقه به زمین ترانسفورماتورها را تشخیص دهد، در صورتیکه این نوع خطاها توسط حفاظتهای متداول مانند فیوزهای کات‌اوت، قبل از گسترش و تبدیل آنها به خطاهای شدید قابل تشخیص نمی‌باشد.

شرح مقاله:

انگیزه استفاده از رله‌های کامپیوتری همزمان با استفاده از کامپیوتر در پستهای برق در دهه پنجاه میلادی بوجود آمد. اما بعلت مسائل اقتصادی و عدم قابلیت اعتماد در بکارگیری از یک کامپیوتر مرکزی برای همه مقاصد حفاظتی درپست، استفاده عملی از حفاظت کامپیوتری تا ورود میکروپروسسورها در دهه هفتاد میلادی به تعویق افتاد. در نتیجه تحقیقات و ارائه الگوریتمهای مختلف حفاظتی، از اوائل دهه هشتاد میلادی رله‌های میکروپروسسوری بتدریج از نظر قیمت و تواناییهای حفاظتی قابلیت رقابت با سایر انواع رله‌ها را پیدا کردند. در حال حاضر با افزایش قدرت پردازش میکروپروسسورها و کاهش قیمت آنها، بتدریج این رله جایگزین سایر انواع رله‌ها می‌گردند.

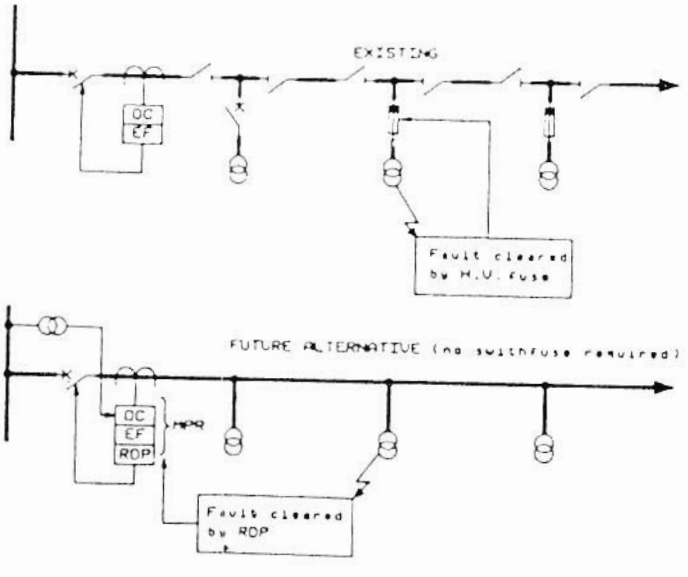
رله‌های میکروپروسسوری علاوه بر انجام وظایف حفاظتی خود دارای تواناییهای دیگری مانند ثبت اطلاعات مربوط به خطا و یا شرایط غیرعادی سیستم، تنظیم وقفه‌ای مطابق با تغییر وضعیت سیستم وهمچنین توان مصرفی بسیار کمی می‌باشد که می‌توانند با ترانسفورماتورهای جریان مدرن نوری نیز کار کنند. درکشور ما با توجه به عدم وجود تکنولوژی ساخت رله‌های متداول الکترومکانیکی، استفاده از رله‌های میکروپروسسوری این امکان را بوجود آورده است تا در زمینه حفاظت سیستمهای قدرت منطبق با پیشرفت تکنولوژی خودکفائی حاصل گردد.

اصولاً رله میکروپروسسوری از دو قسمت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تشکیل می‌گردند که قسمت سخت‌افزاری رله‌ها تقریباً مشابه می‌باشند و آنچه که کاربردهای متنوع برای یک رله میکروپروسسوری بوجود می‌آورد طراحی نرم‌افزاری آن با توجه به نیازهای حفاظتی و محدودیتهای سخت‌افزاری می‌باشد. این مقاله در راستای کاربرد رله‌های میکروپروسسوری در حفاظت شبکه‌های توزیع در ایران به ارائه یک الگوریتم نوین برای حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه‌های شعاعی می‌پردازد.

روش متداول حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع به توسط کات‌اوت فیوز می‌باشد. در ترانسفورماتورهای بزرگتر از رله‌های جریان زیاد و خطای زمین استفاده می‌گردد. در حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع به توسط کات‌اوت فیوز باید این نکته مهم را در نظر داشت که اصولاً این فیوزها در مقابل بیشتر خطاهایی که در ترانسفورماتور توزیع پیش می‌آید دارای حساسیت لازم نمی‌باشند. از طرف دیگر از آنجایی که در بیشتر حالات کات‌اوت فیوزها در فضای باز قرار دارند اغلب دچار فرسودگی وخرابی می‌شوند که این خود باعث قطع ناخواسته ترانسفورماتور می‌گردد. با

توجه به‌اینکه فیوزکات‌اوت باعث قابلیت اعتماد بالای ترانسفورماتورهای توزیع نمی‌گردد با برداشتن کات‌اوت فیوزها قابلیت اعتماد کل شبکه توزیع تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد کرد، مخصوصاً در شبکه‌های توزیع شعاعی که معمولاً نیاز به قابلیت اعتماد بالایی نیست.

در روش جدید حفاظتی با استفاده از یک رله دیجیتالی در شین اصلی توزیع، همه ترانسفورماتورهای در یک شاخه شعاعی محافظت می‌گردند. این محافظت جدید دارای حساسیت بسیار بالایی می‌باشد که اغلب خطاهای ترانسفورماتور را تشخیص میدهد. هر چند که در صورت بروز خطا در یک ترانسفورماتور کل شاخه شعاعی بی‌برق میشوداما پیداکردن محل ترانسفورماتورآسیب‌دیده و جداکردن آن از شبکه مشکل نخواهد بود. در عوض از نظر اقتصادی با حذف کات‌اوت فیوزها و در نتیجه حذف هزینه نگهداری و نظارت آنها بسیار مقرون به صرفه خواهد شد. در شکل ۱ روش متداول و روش جدید حفاظتی مقایسه شده‌اند. چنانچه در شکل ۱ دیده می‌شود رله میکروپروسسوری (MPR) علاوه بر حفاظت شبکه شعاعی (RDP) شامل حفاظتهای جریان زیاد (OC) و خطای زمین (EF) نیز می‌تواند باشد.



شکل ۱: مقایسه حفاظت متداول و حفاظت دیجیتالی ترانسفورماتورهای توزیع

۱ - تئوری عملکرد رله میکروپروسسوری

در روش جدیدی که در این مقاله ارائه می‌گردد عملکرد رله براساس اندازه‌گیری تغییرات کمیتهای الکتریکی در هنگام خطا می‌باشد. علت این امر وجود تغییرات سریع و ناگهانی در هنگام بروز خطا در مقایسه با تغییرات بار یا شرایط کاری سیستم می‌باشد. با توجه به اندازه دامنه تغییرات در هنگام خطا، هماهنگی رله میکروپروسسوری در هر سیکل کمیتهای مورد نظر را اندازه‌گیری نموده و با کمیتهای مربوط به دو سیکل قبل که در حافظه خود ذخیره نموده است مقایسه می‌نماید و در نتیجه وضعیت سیستم را با توجه به ستینگ تعیین شده تشخیص می‌دهد. کمیتهای مورد اندازه‌گیری بر اساس تغییرات مؤلفه‌های متقارن در هنگام بروز خطا به شرح زیر می‌باشند [۱و۲]:

- بیشتر خطاهای ترانسفورماتور نامتقارن بوده و در نتیجه مؤلفه منفی قابل ملاحظه‌ای در هنگام وقوع خطابوجود می‌آید.درحالیکه‌مؤلفه‌منفی ناشی‌از عدم تقارن بار نسبتاً کوچک می‌باشد. در نتیجه بهترین روش برای حفاظت ترانسفورماتورها براساس اندازه‌گیری مؤلفه منفی می‌باشد.
- برای تشخیص خطاهای متقارن (سه فاز) از مؤلفه مثبت استفاده می‌گردد.
- حفاظت خطای زمین برای حفاظت سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور (اتصال مثلث) و فیدر اصلی در مقابل خطاهای درگیر با زمین بکار می‌رود.

نرم افزار پیشنهادی برای رله میکروپروسسوری شامل تکنیکی برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های متقارن از کمیتهای فاز جهت استفاده در حفاظتهای مذکور می‌باشد که بترتیب تشریح می‌گردند.

۱-۱ حفاظت مؤلفه مثبت

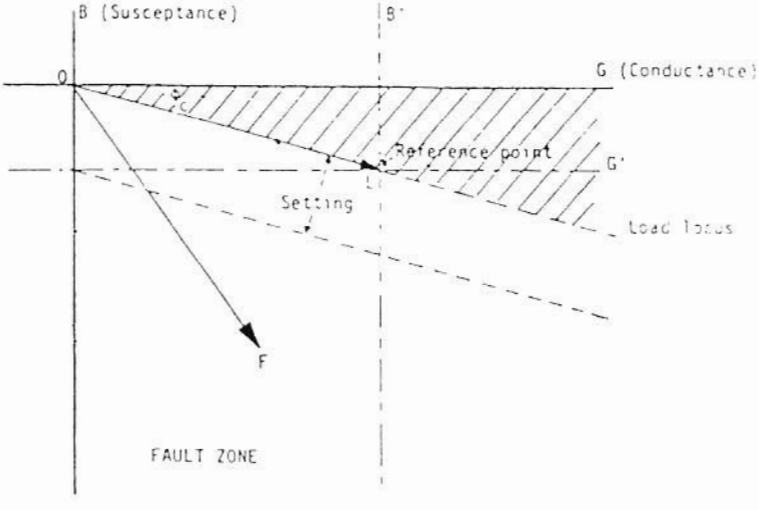
از تغییرات مولفه مثبت جریان نمی‌توان برای تشخیص خطا استفاده نمود زیرا بار نیز می‌تواند تغییرات بزرگی در مؤلفه مثبت جریان بوجود آورد. البته در هنگام تغییرات جریان ناشی از کلیدزنی فیدر اصلی می‌توان اطلاعات مربوط به وضعیت کلید را به رله داد تا دچار عملکرد اشتباه نشود.

بطور کلی برای تعیین وضعیت‌شبکه در هنگام تغییرات جریان باید تغییرات ولتاژ را نیز در نظر گرفت. دراینصورت یک‌کمیت قابل اندازه‌گیری که تغییرات ولتاژ و جریان را در بر خواهد داشت، تغییرات در امپدانس و یا ادمیتانس مدار میباشد. در هنگام کار عادی شبکه، ادمیتانس با تغییرات بار خیلی آهسته تغییر می‌کند و همچنین تغییرات ولتاژ برآن تقریباً اثری ندارد. در هنگام خطا،تغییرات‌شدیدی‌درمقدارادمیتانس مشاهده‌می‌گردد.ازآنجائی‌که خطاهای طرف فشار ضعیف تأثیربسیارکمی در ولتاژ طرف فشار قوی دارند، در نتیجه تغییرات در ادمیتانس ناشی از

تغییرات جریان بوده و بدین ترتیب امکان هماهنگی با فیوزهای فشار ضعیف وجود خواهد داشت.

دراندازه‌گیری ادمیتانس، جهت در نظر گرفتن تغییرات ولتاژ، استفاده از تغییرات زاویه فاز بسیار سودمند خواهد بود. تغییرات درادمیتانس بعلت تغییرات بار در ضریب توان حدود یک (مقاومتی) می‌باشد. در حالیکه خطاها مخصوصاً خطاهای ترانسفورماتور، باعث ضریب توان پس فازحدود صفر (سلفی) می‌شوند. در نتیجه می‌توان به حفاظت حساستری با استفاده از تغییرات ادمیتانس دست یافت. حساسیت بالاتر در اینحالت با در نظر گرفتن ضریب توان بدست می‌آید. بعنوان مثال تغییرات بار تا حداقل دوبرابر ستینگ جریان رله نمی‌تواند باعث عملکرد آن گردد. این موضوع با استفاده از دیاگرام ادمیتانس مؤلفه مثبت در شکل ۲ قابل اثبات می‌باشد.

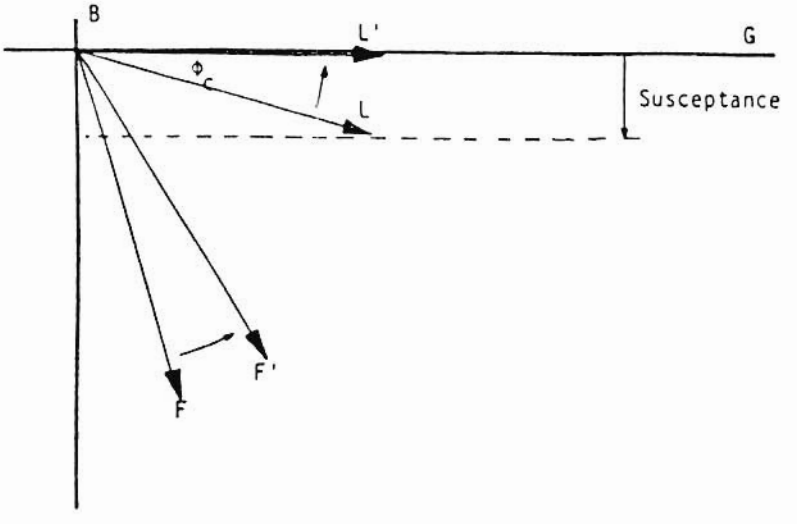
بدترین حالت در عملکرد رله وقتی است که یک مدار در حالت بارداری کامل تمام بار خود را بعلت قطع تغذیه کننده از دست بدهد و خطایی در ترانسفورماتور اتفاق بیفتد. در صورت دوباره برقدارشدن، ادمیتانس در شکل ۲ در نقطه F خواهد بود که در ناحیه عملکرد رله قرار دارد.



شکل ۲: دیاگرام ادمیتانس مؤلفه مثبت

محاسبه تغییرات ادمیتانس در رله میکروپروسسوری شامل تبدیلاتی از مختصات قطبی به‌قائم وبالعکس می‌باشد. اطلاعات ورودی باید بصورت قطبی باشد تا دامنه ادمیتانس محاسبه گردد. سپس باید این اطلاعات به مختصات قائم تبدیل گردد تا تغییرات ادمیتانس اندازه‌گیری شود. برای استفاده از دیاگرام مؤلفه مثبت تغییرات ادمیتانس باید بصورت قطبی درآید.

- همانطوریکه در دیاگرام شکل ۲ دیده می‌شود، بردار تغییرات ادمیتانس در هنگام خطا از نقطه L تا F می‌باشد و بنابراین دامنه آن متفاوت با ادمیتانس خطای ترانسفورماتور یعنی OF می‌باشد. این موضوع ممکن است در هماهنگی با فیدرهای طرف فشار ضعیف اشکال ایجاد نماید. یک روش که تا حدی این مسئله را حل می‌نماید این است که دیاگرام‌برداری طوری چرخانده شود که بردار مربوط به بار در امتداد محور G قرار گیرد و در اینحالت تغییرات در سوسپتانس بجای تغییرات ادمیتانس برای حفاظت مؤلفه مثبت در نظر گرفته شود. این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: چرخش دیاگرام‌برداری

این چرخش را می‌توان با اضافه نمودن زاویه جبران‌سازی F_c به زاویه اندازه‌گیری شده بصورت زیر بدست آورد:

$$Y=\frac{I}{V}<\phi+\phi_c$$

که ϕ_c در رله قابل تنظیم می‌باشد .و مقدار آن می‌تواند مقدار متوسط در حالتهای مختلف کار عادی و یااینکه مقدار زاویه ϕ قبل از خطا باشد. در اثر این چرخش مقدار سوسپتانس در حالت بار بسیار

کوچک خواهد بود، اما در هنگام خطا مقدار سوسپتانس بسیار قابل ملاحظه می‌گردد، هر چند که در اثر چرخش اندکی کوچکتر شده است.

با توجه به نکات فوق الگوریتم حفاظت مثبت بسیار ساده خواهد شد. در واقع فقط نیاز است که مقدار سوسپتانس محاسبه گردد و تغییرات آن را بدست آورد و دیگر نیازی به تبدیلهای قطبی و قائم و محاسبه بردار تغییرات ادمیتانس نمی‌باشد.

۲-۱ حفاظت مؤلفه منفی

برای حفاظت در مقابل خطاهای نامتقارن از حفاظت مؤلفه منفی استفاده می‌شود. مانند حفاظت مؤلفه مثبت، در اینجا نیز باید اثر تغییرات ولتاژ را که می‌تواند باعث ایجاد جریان مؤلفه منفی شود در نظر گرفت. نکته مهم در اینجا این است که خطا در هر طرف محل رله اتفاق بیفتد ولتاژ مؤلفه‌منفی‌ایجادمی‌گرددوخطای نامتقارن درطرف‌منبع محل رله‌باعث عبورجریان‌مؤلفه منفی بطرف بار می‌گردد ویک رله ادمیتانسی دراین حالت ادمیتانس مؤلفه منفی بار را اندازه می‌گیرد. بهمین ترتیب خطا در طرف بار باعث عبور جریان مؤلفه منفی ازمنبع میگردد ورله ادمیتانسی دراینحالت ادمیتانس مؤلفهٔ منفی منبع را اندازه می‌گیرد. چون ادمیتانس منبع مستقل از خطا در طرف بار می‌باشد بنابراین روش حفاظت مؤلفه مثبت نمی‌تواند در اینجا برای خطاهای نامتقارن در طرف بار رله بکار رود.

در حالت کلی خطا در طرف منبع محل رله احتیاج به ولتاژ مؤلفه منفی بزرگی دارد تا بتواند جریان قابل ملاحظه‌ای از بار عبور کند، در حالیکه خطا در طرف بار محل احتیاج به ولتاژ بسیار کوچکتری دارد.

با توجه به مطالب فوق، الگوریتم حفاظت مؤلفه منفی تشریح می‌گردد. این الگوریتم همانطوریکه قبلاً ذکر گردید براساس اندازه‌گیری تغییرات کمیت مؤلفه منفی و مقایسه آن با بایاس باضافه ۵۰ درصدستینگ‌مؤلفه‌مثبت‌می‌باشدبایاس عبارت است از ۱۲/۵ درصد تغییرات مؤلفه مثبت جریان و ۲۰۰ درصد تغییرات مؤلفه منفی ولتاژ، علت انتخاب این تنظیم‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- برای برقدارکردن یک مدار با بار کامل ۱۲/۵ درصد عدم تقارن در نظر گرفته شده است. معمولاً حداکثر تغییرات در مؤلفه منفی جریان در حالت کار عادی شبکه بیش از ۸ درصد نمی‌باشد و بهمین جهت با یک حاشیه امنیت، در نظر گرفتن حداکثر ۱۰ درصد عدم تقارن بسیار مناسب است. ولیکن ازنظر عملیاتی برای میکروپروسسورها عدد ۱۲/۵ درصد مناسب می‌باشد، یعنی میکروپروسسور

براحتی می‌تواند تغییرات مؤلفه مثبت جریان را بر ۸ تقسیم نماید.

- همانطوریکه گفته شد در هنگام خطاهای خارج از ناحیه حفاظتی مقدار قابل ملاحظه‌ای ولتاژ لازم است تاباعث عبور جریان مؤلفه منفی به اندازه خطاهای داخلی شود. ۲۰۰ درصد ولتاژ مؤلفه منفی حاشیه امنیت خوبی برای پایداری رله در هنگام خطاهای خارجی بوجود می‌آورد و از نظر عملیاتی نیز برای میکروپروسسور به سادگی انجام می‌پذیرد.

- ستینگ جریان مؤلفه مثبت معمولاً دوبرابر جریان نامی ترانسفورماتور در رله‌های جریان زیاد می‌باشد. در اینجا ۵۰ درصد ستینگ جریان مثبت انتخاب می‌گردد که بدین ترتیب ستینگ مؤلفه منفی دارای حساسیت بیشتری می‌باشد و برابر با جریان نامی ترانسفورماتور می‌گردد.

۲ - شرح عملکرد رله میکروپروسسوری

قسمتهای اصلی مربوط به عملکرد رله میکروپروسسوری از لحظه دریافت نمونه‌های موجهای جریان و ولتاژ بترتیب در این قسمت توضیح داده می‌شوند.

۲-۱- پردازش سیگنالهای ورودی

نمونه‌های موجهای ولتاژ و جریان از طریق ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان دریافت می‌گردند. سرعت نمونه‌برداری با توجه به نوع میکروپروسسور بکار رفته و ملاحظات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بین ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ نمونه در ثانیه می‌باشد. بعد از دریافت نمونه‌های مربوط به یک سیکل کامل با استفاده از الگوریتم تمام سیکل فوریه مؤلفه‌های اصلی ولتاژ و جریان بدست می‌آیند [۳]. معمولاً به علت عدم وجود مسئله پایداری و قدرت اتصال کوتاههای شدید، سرعت عملکرد رله‌ها در حفاظت توزیع پایین می‌باشد تا از نظر مسائل اقتصادی و قدرت تشخیص حفاظت مناسبی بدست آید.

۲-۲ محاسبه تغییرات سوسپتانس

همانطوریکه در مبحث حفاظت مؤلفه مثبت شرح داده شد از تغییرات سوسپتانس برای این نوع حفاظت استفاده می‌گردد که مقدار آن در هر سیکل از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$S_{pso}=-(I_{spo}/V_{spo})SIN(\phi_{Iv}+\phi)$$

سپس تغییرات سوسپتانس با مقدار محاسبه شده آن در دو سیکل قبل محاسبه گردیده و در صورت وجود تغییرات بیش از ستینگ، علامت عملکرد حفاظت مؤلفه مثبت داده می‌شود.

۳-۲ محاسبه تغییرات مؤلفه منفی جریان

مؤلفه منفی جریان محاسبه و تغییر آن نسبت به مقدار مؤلفهٔ منفی جریان دردوسیکل قبل محاسبه میگردد درصورت وجود تغییرمؤلفهٔ منفی جریان بیش‌ازمقدار ستینگ به‌اضافه بایاس جریان و ولتاژ، که در حفاظت مؤلفه منفی تشریح گردید، علامت عملکرد حفاظت مؤلفه منفی داده می‌شود.

۴-۲- محاسبه ضریب کمیت رله (Q)

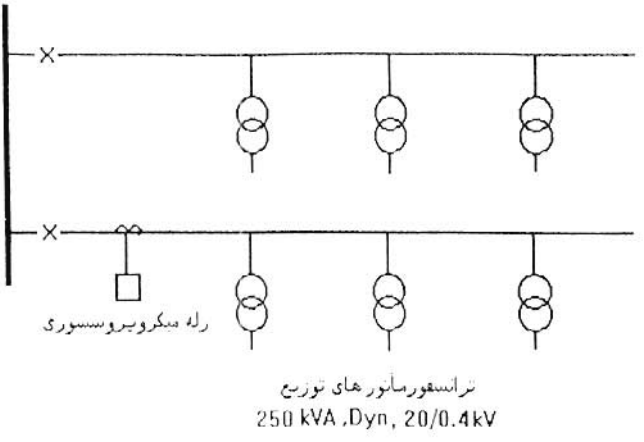
در صورت وجود تغییرات بیش از مقدار ستینگ در حفاظتهای مؤلفه مثبت و منفی، ضریب کمیت Q که در واقع تعیین کننده زمان عملکرد رله است از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Q = ۱/۲۵\ Q_{ps} + ۰/۷۵ Q_{ns}$$

در رابطه فوق Q_{ps} و Q_{ns} به ترتیب مقادیر تغییرات مربوط به حفاظتهای مؤلفه مثبت و منفی میباشند باتوجه به منحنی زمان جریان حفاظت طرف ثانویه ترانسفورماتوریک جدول درحافظهٔ میکروپروسسور قرار دارد که برای هر مقدار Q بدست آمده یک عدد برای SPIN بدست می‌آید و از روی آن زمان عملکرد رله تعیین می‌گردد. در واقع SPIN مشابه دیسک گردان رله‌های الکترومغناطیسی اضافه جریان می‌باشد و توسط Q سرعت چرخش دیسک با توجه به شدت خطا تعیین می‌گردد.

۳- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

با استفاده از برنامه EMTP یک شبکه شعاعی ۲۰ کیلوولت مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است برای خطوط انتقال از مدل خط کوتاه و طبق مشخصات خطوط ۲۰ کیلوولت ایران استفاده گردیده است. ترانسفورماتورهای توزیع ۲۰/۰/۴ کیلوولت، ۲۵۰ کیلوولت آمپر و با اتصال Dyn می‌باشند که در شبکه‌های ایران استفاده می‌گردد و مشخصات آن طبق کاتولوگ کارخانه‌سازنده در نظر گرفته شده است [۴].



شکل ۴ - شبکه نمونه توزیع مورد استفاده در شبیه‌سازی کامپیوتری

خطاهای داخلی ترانسفورماتور با استفاده از قابلیتهای برنامه EMTP و برنامه پشتیبان BCTRAN و SATURA و همچنین نرم‌افزار PCMATLAB شبیه‌سازی گردیده‌اند [۵]. حالات مختلف خطاهای ترانسفورماتور شبیه‌سازی گردیدند که برای نمونه منحنی‌های مربوط به دو نوع خطا در سیم پیچی‌های ثانویه ارائه می‌گردند.

شکل ۵ خطای حلقه به حلقه در فاز Aکه ۹۰ درصد حلقه‌ها را شامل می‌شود را نشان می‌دهد. این شکل تغییر مؤلفه‌های مثبت ومنفی جریان وتغییرات سوسپتانس و مؤلفه منفی ولتاژ را در اثر این خطا در محل رله میکروپروسسوری نشان می‌دهد.

شکل ۶ خطای حلقه به زمین در فاز A را در حالیکه محل خطا به زمین ۴۰ درصد حلقه‌های سیم‌پیچی ثانویه را شامل می‌شود را نشان می‌دهد. تغییرات کمیتهای مختلف در این حالت در محل رله را نشان داده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی عملکرد رله در حالتهای مختلف خطای ترانسفورماتور توزیع در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول در ستون آخر زمان عملکرد رله که هماهنگ با عملکرد حفاظت ثانویه با فاصله تشخیص ۲/۰ ثانویه می‌باشد را نشان می‌دهد.

٤ - جمع‌بندی

در این مقاله یک‌روش مدرن حفاظت برای شبکه‌های توزیع تشریح گردید که در آن ترانسفورماتورهای توزیع بجای حفاظت محلی توسط کات‌اوت فیوزها، به توسط یک رله میکروپروسسوری در منبع حفاظت می‌شوند که از نظر اقتصادی با حذف کات‌اوت فیوزها بسیار مقرون به صرفه خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری بر روی شبکه نمونه توزیع ایران که ارائه گردیدند و به دقت وحساسیت بالای روش جدید حفاظتی می‌باشد. هر چند این روش حفاظتی برای شبکه‌های شعاعی قابل کاربرد می‌باشد ولی باید در نظر داشت که بسیاری از شبکه‌های حلقوی درحالت کار عادی بصورت شعاعی کار میکنندو استفاده ازچنین روشی درآن شبکه‌هانیز امکان‌پذیر است.

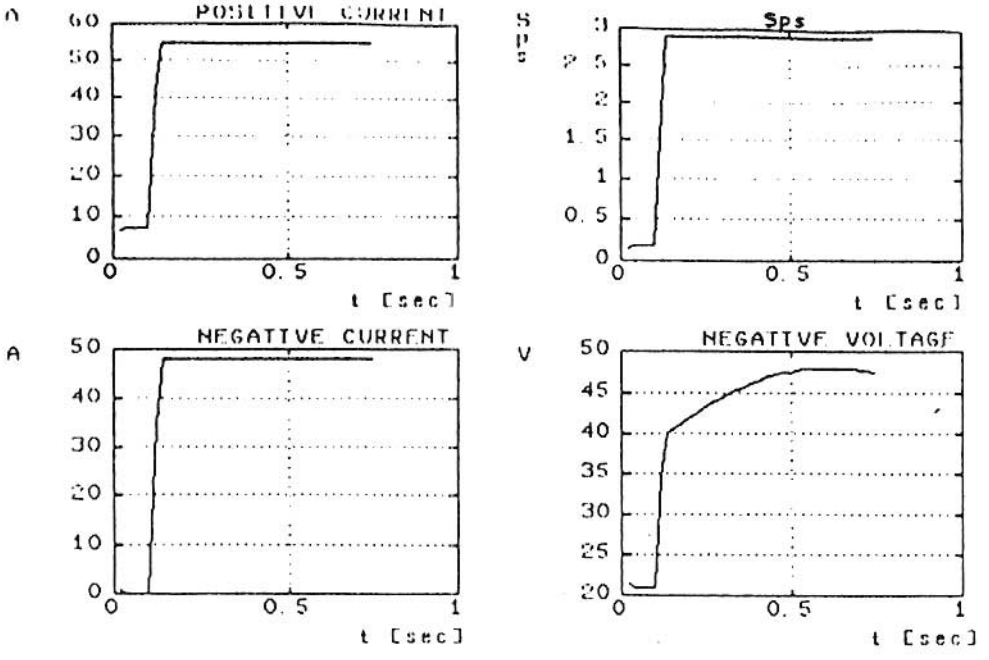
٥ - مراجع

1.Hampson, J.T.,"New thinking on radial protection", Distribution Development, Issue No. 83/3,pp.14-16,sept.1973.

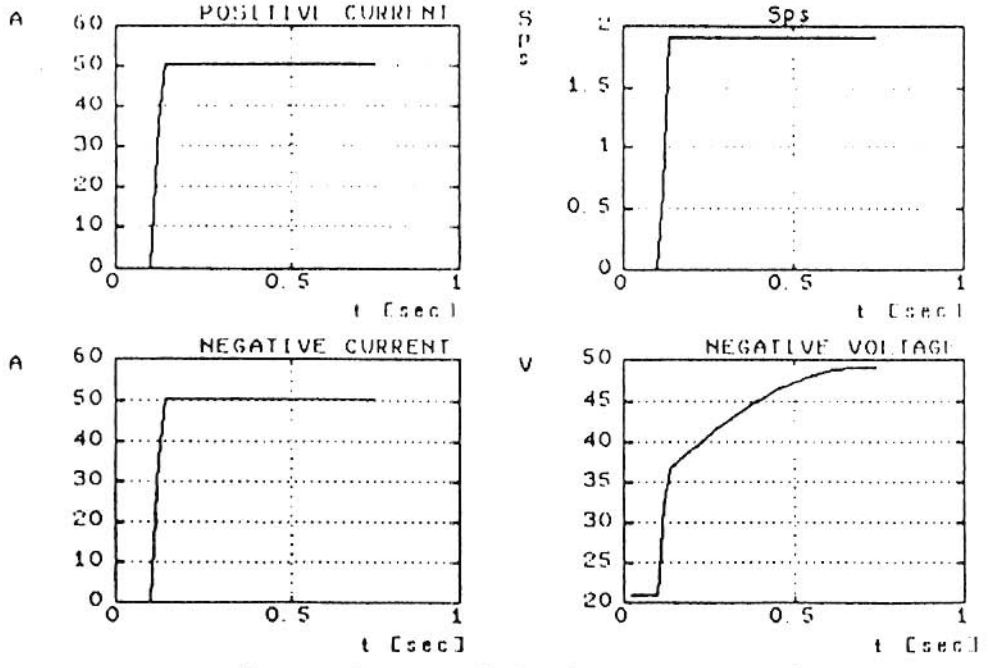
2.Jamali,S.,"Simulation oF 11KV source protection on a mainframe computer" , M.Sc.Dissertation,Umist,1986

3."Computer relaying",IEEE tutorial course, 1988 4.Iran Transfo public Stoch Co.,"OiL immersed distribution transformers 25 to 2000KVA operation instruction".

٥ - ابوالفضل شیخ محمدی، "بررسی حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه شعاعی توسط رله دیجیتالی در منبع" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران بهمن ۱۳۷۴.



شکل ۵ـ تغییرات کمیتهای رله در اتصال بین حلقه‌ای ثانویه شامل ۹۰درصد حلقه‌ها



شکل ۶ـ تغییرات کمیتهای رله در اتصال ۴۰درصد حلقه به زمینه ثانویه

نوع اتصال کوتاه در ترانسفورماتور(T۳)	تغییرات $\|\Delta S_{ps}\|$	تغییرات مولفه منفی جریان $\|\Delta I_{ns}\|$	کمیت رله (Q)	SPIN	زمان قطع t(S)
فاز B زمین در ثانویه	۳/۲	۵۰	۵/۸۸	۱۶۳۸	۰/۸
فازهای C,A زمین در ثانویه	۶/۲	۲۶	۹/۳۶۳	۳۷۲۴	۰/۳۵
فازهای C,B,A زمین در ثانویه	۹/۳	۰	۱۱/۶۳	۲۳۶۹	۰/۳
فاز A زمین در اولیه	۱۰/۷	۲۸۰	۲۳/۵۲	۶۵۵۳۵	۰/۰۶
فاز A,B در اولیه	۱۶	۴۲۰	۳۴/۳۵	۳۲۷۶۷	۰/۰۶
فاز C,B,A در اولیه	۳۱	۰	۳۸/۲۶	۶۵۵۳۵	۰/۰۶
اتصال حلقه‌ای ۹۰ درصد اولیه	۱۱	۳۸۰	۲۶/۴	۲۶۲۱۴	۰/۰۶
اتصال حلقه‌ای ۴۵ درصد اولیه	۰/۲	۱۵۰	۱۲/۵۴	۱۵۹۸۴	۰/۰۸۲
اتصال حلقه‌ای ۲۰ درصد اولیه	۰/۴	۴۰	۳/۰۱۸	۱۴۵۶	۰/۹
اتصال حلقه زمین ۵۰ درصد اولیه	۰/۴	۶۰	۶/۱۶	۳۲۷۲	۰/۴
اتصال حلقه زمین ۳۰ درصد اولیه	۰/۷۸	۹۰	۲۳/۸	۲۱۸۴۵	۰/۰۶
اتصال حلقه زمین ۵ درصد اولیه	۷/۱	۲۴۵	۱۷/۰۷	۱۸۷۲۴	۰/۰۷
اتصال حلقه‌ای ۹۰ درصد ثانویه	۲/۹	۴۹	۵/۳۸	۱۵۲۴	۰/۸۶
اتصال حلقه‌ای ۶۰ درصد ثانویه	۲/۱	۵۶	۴/۵۶	۱۵۰۶	۰/۷۸
اتصال حلقه‌ای ۳۰ درصد ثانویه	۱	۴۸	۳/۴	۱۴۵۶	۰/۹
اتصال حلقه‌ای ۱۰ درصد ثانویه	۰/۰۵	۲۳	۰/۸۶	۸۷۳	۱/۵
اتصال حلقه‌ای ۵ درصد ثانویه	۰/۲	۱۲/۵	۰/۵۸	۳۷۴	۳/۵
اتصال حلقه‌زمین ۴۰درصد ثانویه	/۸	۵۰	۴/۱۲	۱۴۸۹	۰/۸۸
اتصال حلقه‌زمین ۲۰درصد ثانویه	۰/۶۴	۳۸	۲/۱	۱۲۸۵	۱/۰۲
اتصال حلقه‌زمین ۱۰درصد ثانویه	۰/۰۵	۲۳	۰/۸۶	۸۷۳	۱/۵
اتصال حلقه زمین ۵ درصد ثانویه	۰/۰۷	۱۲/۵	۰/۵۲	۳۷۴	۳/۵

جدول (۱) : نتایج شبیه سازی رله در انواع خطاهای ترانسفورماتور