بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه

کارشناسی ارشد قدرت

تنظیم وهماهنگی بهینه حفاظت شبکه توزیع

نگارنده

رضا محمدی چبنلو

استاد راهنما

دکتر حسین عسکریان ابیانه

اردیبهشت ۱۳۸۶

به نام خدا

شماره: ۵۵۰/۹۷

تاریخ: ۸۶/۲/۹

دانشکده مهندسی برق
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

برگ ارزیابی پایان‌نامه کارشناسی ارشد (اپکا۲)

نام و نام خانوادگی: *آقای رضا محمدی چیلو*

شماره دانشجویی: ۸۳۱۲۳۱۷۱

رشته و گرایش تحصیلی: *برق قدرت*

دانشکده مهندسی برق

عنوان پایان‌نامه: *تنظیم و هماهنگی بهینه حفاظت شبکه توزیع*

تاریخ دفاع: ۸۶/۲/۳

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	کد انفورماتیک	رتبه علمی	امتیاز	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر حسین عسگریان	۱۰۲۳۵	استاد	۹۸	
استاد راهنمای دوم	-				
استاد مشاور	-				
داور داخلی	دکتر شهرام متصر کوهساری	۱۰۱۸۹	دانشیار	۹۵	
داور داخلی					
داور خارجی	دکتر جمالی	۸۵۰۷۰	استاد	۹۴	
داور سوم	-	-	-		
میانگین نمرات هیئت داوران				۹۷	

این قسمت توسط تحصیلات تکمیلی دانشکده تنظیم خواهد شد.	شرح	نمره به عدد	نمره به حروف
A	میانگین نمرات هیئت داوران (بر مبنای ۲۰)	۱۹	نوزده
B1	کسر نمره دیرکرد	۲	
B2	کسر نمره عدم ارائه مقاله	—	
C	تشویق بابت ارائه مقاله اضافی	۳	
D	B=B1+B2 نمره نهایی (*D=A-B+C*)	۲۰/—	

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده:

امضاء و مهر دانشکده:

تأئید کارشناس:

مدیر کل تحصیلات تکمیلی:

امضاء و مهر:

دفتر تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

تقدیم به پدرم

مادر فداکار و عزیزم

خواهر مهربانم

با سپاس فراوان از استاد گرانقدر دکتر عسکریان ابیانه که در تمام مدت انجام پروژه و در مدت تحصیل راهنما و مشاوری دلسوز بودند

همچنین بر خود لازم می‌دانم از آقای دکتر فرزاد رضوی به خاطر کمکها و راهنماییهای بی‌دریغ تشکر و قدردانی نمایم

چکیده

هدف از این پروژه هماهنگی عناصر حفاظت شبکه توزیع می‌باشد. از آنجاییکه شبکه توزیع مستقیما به مصرف کننده متصل می باشد، حفاظت بهینه شبکه توزیع می‌تواند درکاهش قطعی برق و افزایش قابلیت اطمینان و افزایش عمر تجهیزات نقش بسزایی داشته باشد. دریک سیستم توزیع عناصر حفاظتی شامل رله های جریان زیاد، فیوزها، کلید بازبستها، جداکننده‌ها و کلیدها می باشند که باید به نحو مناسب با هم هماهنگ شوند. این مسئله شامل هماهنگی رله -رله، رله- فیوز، فیوز- فیوز، رله- کلید بازبست، فیوز- کلید بازبست، کلید بازبست- کلید بازبست و جداکننده- کلید بازبست می باشد. برای این منظور باید الگوریتم جامعی به دست آورد که همه این هماهنگی‌ها را بطور همزمان در نظر بگیرد.

برای هماهنگی رله جریان زیاد روشهای زیادی در مقالات مختلف پیشنهاد شده است. در این پروژه ضمن بررسی محدودیتهای روشهای موجود، این روشها بهبود داده شده‌اند به نحوی که علاوه بر رفع محدودیتها در هماهنگی رله- رله، بتوان هماهنگی را به فیوزها و کلید بازبستها نیز تعمیم داد. از جمله این روشها روشهای هماهنگی بهینه می‌باشند که نسبت به روشهای هماهنگی معمولی دارای مزایایی می‌باشند. از میان روشهای هماهنگی بهینه نیز روشهای هوشمند به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده برای مسائل مختلف مناسب‌تر می‌باشد مخصوصاً که انتخاب فیوز از روی جریان آن انجام می‌گیرد که رابطه غیرخطی با زمان دارد و روشهای بهینه ریاضی برای حل آن به مشکلاتی برمی‌خورند. در مقالات از الگوریتم ژنتیک که یک روش بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد برای مسئله هماهنگی استفاده شده است. روش به کار برده شده در این مقالات دو مشکل اساسی دارند: اولی مسئله عدم هماهنگی به خاطر تابع هدف به کار رفته، دومی گسسته یا پیوسته بودن TSM. در اینجا روشی بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه شده که تابع هدف به کار رفته اصلاح شده تا حتی‌الامکان عدم هماهنگی بوجود نیاید و در ضمن روش طوری اصلاح شده که برای رله‌های با TSM گسسته و پیوسته قابل استفاده باشد.

در این پروژه برای رله و کلید بازبست از مدل ساچدو استفاده شده است اما روش هماهنگی بدست آمده برای مدلهای غیرخطی که دقیق‌تر می‌باشند نیز قابل استفاده است. برای اینکه بتوانیم فیوز را نیز در الگوریتم هماهنگی وارد کنیم روشی ابتکاری برای مدل‌سازی فیوز استفاده شده است که همه منحنی‌های یک نوع فیوز با استفاده از یک رابطه بدست می‌آیند. در انتهای پروژه برنامه هماهنگی بدست آمده بر روی دو شبکه نمونه تست شده و نتایج آن در پروژه آمده است.

کلمات کلیدی: هماهنگی($Coordination$)- بهینه‌سازی($Optimization$)- الگوریتم ژنتیک($Genetic\ Algorithm$)- رله جریان‌زیاد($Overcurrent\ Relay$)- فیوز($Fuse$)

فهرست مطالب

فصل اول: حفاظت شبکه توزیع ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- انواع سیستمهای توزیع ۱

۱-۲-۱- سیستم‌های شعاعی ۲

۱-۲-۲- سیستم‌های حلقوی ۳

۱-۲-۳- حلقوی باز ۳

۱-۲-٤- حلقوی بسته ٤

۱-۲-٥- سیستم‌های فشار متوسط شبکه‌ای (غربالی) ٤

۱-۳- حفاظت سیستم توزیع ٥

۱-۴- قواعد هماهنگی تجهیزات حفاظتی شبکه توزیع ۷

۱-٤-۱- هماهنگی فیوز – فیوز ۹

۱-٤-۲- هماهنگی رله – کلید بازبست ۱۰

۱-٤-۳- هماهنگی کلید بازبست – کلید بازبست ۱۱

۱-٤-٤- هماهنگی کلید بازبست – جداکننده(سکشنالایزر) ۱۱

۱-٤-٥- هماهنگی رله – رله ۱۱

۱-٤-٦- هماهنگی رله- فیوز ۱۳

۱-٤-۷- هماهنگی کلید بازبست و فیوز ۱٤

۱-۵- مدلسازی عناصر جریان زیاد ۱٦

۱-٥-۱- مدلهای منحنی مشخصهٔ رله‌ها ۱۷

۱-۶- تعیین محدوده عملکرد و تنظیم جریانی عناصر جریان زیاد ۲۲

۱-۷- جفت جریانهای لازم درانجام عمل هماهنگی عناصر جریان زیاد ۲۳

۱-۸- مختصری در خصوص روشهای هماهنگی ۲٤

۱-۹- ساختار پروژه ۲٦

فصل دوم: روشهای هماهنگی رله های جریانزیاد ۲۸

۲-۱- مقدمه ۲۸

۲-۲- روشهای هماهنگی معمولی ۲۸

۲-۳- روشهای هماهنگی بهینه ۲۹
۲-۳-۱- مزیت روشهای هماهنگی بهینه ۳۰
۲-۳-۲- روشهای ریاضی ۳۱
۲-۳-۳- محدودیتهای روشهای بهینه‌سازی ریاضی ۳۶
۲-۳-٤- روشهای هوشمند ۳۷
۲-۳-٥- الگوریتم ژنتیک ۳۸
فصل سوم: روش جدید هماهنگی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک ٤۱
۳-۱- مقدمه ٤۱
۳-۲- روش جدید هماهنگی بهینه رله های جریان زیاد با استفاده از الگوریتم ژنتیک ٤۱
۳-۲-۱- مسئله عدم هماهنگی ٤۱
۳-۲-۲- در نظر گرفتن TSM گسسته یا پیوسته ٤۲
۳-۲-۳- ارائه راه حل ٤۳
۳-۲-٤- تابع هدف جدید ٤۳
۳-۲-٥- گسسته یا پیوسته بودن TSM ٤٤
۳-۳- روش جدید هماهنگی بهینه برای رله ها، فیوزها و کلید بازبستها ٤٤
۳-۳-۱- مزایای استفاده از روش جدید هماهنگی بهینه برای هماهنگی عناصر جریان زیاد ... ٤٤
۳-۳-۲- مقادیر اولیه و مجهولات الگوریتم ژنتیک ٤٦
۳-۳-۳- تابع هدف الگوریتم هماهنگی: ٤۷
۳-۳-٤- انتخاب مدلهای عناصر جریان زیاد ٥۰
۳-۳-٥- مدلسازی فیوز ٥۱
۳-۳-٦- انتخاب فیوز ٥۳
۳-۳-۷- تنظیم فواصل زمانی کلید بازبست و انتخاب توالیهای عملکرد ٥٤
۳-۳-۸- پیدا کردن ضرایب رابطه منحنی مشخصه رله، فیوز، کلید بازبست ٥۷
فصل چهارم: الگوریتم کامپیوتری هماهنگی عناصر حفاظت توزیع ٦۱
۴-۱- مقدمه ٦۱
۴-۲- فلوچارت الگوریتم ٦۱
۴-۳- خواندن اطلاعات شبکه ٦٤
۴-۴- محاسبه تنظیم جریانی ٦٦
۴-٥- محاسبه جریانهای اتصال کوتاه ٦۷
۴-٦- تابع هدف الگوریتم ژنتیک ٦۸

۴-۷- حل مسأله توسط الگوریتم ژنتیک ۷۰
۴-۸- چاپ نتایج خروجی ۷۰
فصل پنجم: اعمال برنامه کامپیوتری هماهنگی جریان زیاد بر روی شبکه نمونه ۷۲
۵-۱- مقدمه ۷۲
۵-۲- اعمال برنامه بر روی شبکه نمونه ۸ باسه ۷۲
۵-۲-۱- اطلاعات شبکه ۷۲
۵-۳- اعمال برنامه بر روی شبکه نمونه توزیع ۸۱
۵-۳-۱- اطلاعات شبکه ۸۱
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد ۱۰۱
۶-۱- نتیجه گیری ۱۰۱
۶-۲- پیشنهاد برای انجام کارهای آینده ۱۰۲
مراجع ۱۰٤
ضمیمه ۱: مختصری در مورد تجهیزات حفاظت توزیع ۱۰٦
ضمیمه ۲: مقدمه ای بر الگوریتم ژنتیک ۱۲۲

فصل اول

حفاظت شبکه توزیع

حفاظت شبکه توزیع

۱-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا به شرح انواع سیستمهای توزیع می‌پردازیم سپس حفاظت شبکه توزیع و قواعد هماهنگی بین تجهیزات حفاظت توزیع توضیح داده می‌شوند. در ادامه مدل منحنی مشخصه رله‌ها و جریانهای اتصال کوتاه مورد نیاز در عمل هماهنگی توضیح داده می‌شوند و در پایان مختصری راجع به فصول پایان‌نامه خواهد آمد.

۱-۲- انواع سیستمهای توزیع

دریافت انرژی الکتریکی از نیروگاه و تحویل آن به مصرف کننده‌ها، دربردارنده قسمتهای مختلفی است. قسمتی که تحت عنوان توزیع مورد توجه قرار می‌گیرد از پست تغذیه تا وسایل اندازه‌گیر واقع در محل مصرف کننده‌ها را شامل می‌شود.بخش توزیع یک سیستم قدرت می‌تواند به راحتی به دو بخش فرعی تقسیم شود:

۱) توزیع اولیه که در آن بار به ولتاژی بالاتر از ولتاژ مصرف برده می‌شود و از پست توزیع به محلی که در آن ولتاژ به میزان مصرف است پایین می‌آید تا مشترک انرژی مورد نیاز خود را مصرف نماید.

۲) توزیع ثانویه شامل قسمتی از سیستم است که دارای ولتاژ مصرف کننده بوده و به لوازم اندازه‌گیری مصرف کننده‌ها منتهی می‌شود. در این پروژه منظور از شبکه توزیع، سیستم توزیع اولیه می‌باشد. انتخاب فیوزها و تجهیزات حفاظتی قرار گرفته در بخش توزیع ثانویه با توجه به نوع بارهای تغذیه شونده تعیین می‌گردد که در این پروژه مدنظر نمی‌باشد.

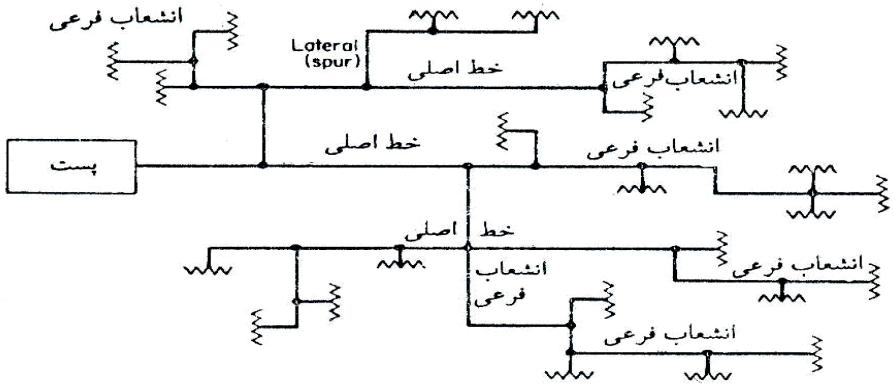
سیستم‌های توزیع اولیه شامل سه نوع اساسی می‌باشد:

- سیستم‌های شعاعی، شامل سیستم‌های دو گانه و تبدیلی
- سیستم‌های حلقوی، شامل حلقوی باز و حلقوی بسته
- سیستم‌های شبکه‌ای

شبکه توزیع در ایران بیشتر شعاعی می‌باشد و در جاهایی کـه از شـبکه حلقـوی بـرای امکـان تغذیه از دو سو در موارد قطعی در نظر گرفته شده حلقوی باز می‌باشد.

۱-۲-۱- سیستم‌های شعاعی

سیستم نوع شعاعی ساده ترین و یکی از عمومی‌ترین نوع مورد استفاده است و شـامل تغذیـه کننده‌ها (فیدرها) و مدارهای شعاعی مجزا بوده که از پست یا منبع منشعب می‌شوند. معمولا هر فیـدر سطح معینی را تغذیه می‌کند. فیدر (تغذیه کننده) شامل قسمت اصـلی یـا تنـه مانـندی اسـت کـه بـا ترانسفورماتور توزیع مرتبط است و از آنجا انشعابات اصلی یا فرعی خارج می‌شود کـه در شـکل۱-۱ نشان داده شده است.



شکل۱-۱: نمودار تغذیه‌کننده فشارمتوسط با خطوط تغذیه اصلی و فرعی

معمولا انشعابات فرعی از طریق فیوز به مدارهای فشار متوسط اصلی متصل می‌شود، به طوری که یک اتصالی در انشعابات فرعی، نمی‌تواند باعث قطع برق در سرتاسر تغذیه کننده بشود. اگر فیـوز از رفع اتصالی خط عاجز بماند یا اتصالی در تغذیه کننده اصلی توسعه یابد کلید قدرت در پـست یـا منبع باز خواهد شد و سرتاسر تغذیه کننده را بی‌برق خواهد کرد. برای پـایین نگـه داشـتن وسـعت و مدت قطعی برق، تجهیزاتی جهت جدا کردن تغذیه کننـده در نظـر گرفتـه مـی‌شـود، بـه طـوری کـه قسمت‌های سالم هر چه سریع‌تر دوباره برق‌دار شود. برای به حداکثر رساندن سرعت بـرق‌دار کـردن مجدد، در هنگام طراحی و ساخت از ارتباط اضطراری به تغذیه کنندههای مجاور اسـتفاده مـی‌شـود. بنابراین هر قسمتی از تغذیه که مشکلی نداشته باشد، می‌تواند به تغذیه کننده‌های مجاور متصل شـود. اغلب برای جلوگیری از اضافه‌بار در فیدرها در زمانی که قسمت‌هایی از فیدرهای مجاور و معیوب به آنها وصل می‌شوند، در آنها ظرفیت ذخیره پیش‌بینی می‌شود.

در بیشتر حالات، غیر همزمانی بارها بین تغذیه کننده‌های مجاور به اندازه کافی موجود بوده تـا نیازی به نصب ظرفیت اضافی برای مواقع اضطراری نباشد.

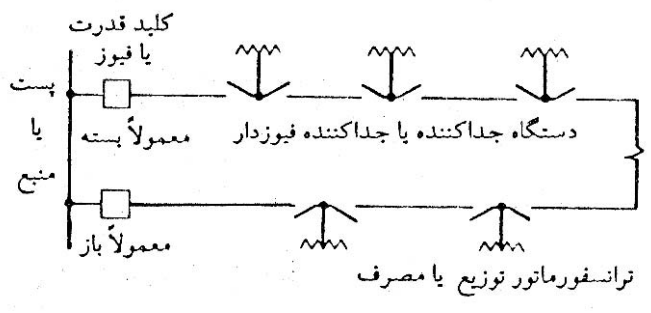
۱-۲-۲- سیستم‌های حلقوی

راه دیگری که طول قطعی برق را محدود می‌سازد، استفاده از تغذیه کننده‌هایی است که به صورت حلقوی طراحی شده و امکان تغذیه از دو سو را برای مصرف کننده‌های بحرانی فراهم می‌سازد. در اینجا اگر تغذیه از یکسو دچار مشکل شود، تمام بار تغذیه کننده از سوی دیگر جریان می‌گیرد. به شرطی که ظرفیت ذخیره کافی در تغذیه کننده در نظر گرفته شود. این نوع سیستم امکان دارد در حالت عادی به صورت حلقوی باز یا حلقوی بسته عمل کند.

۱-۲-۳- حلقوی باز

در سیستم حلقوی باز، بخش‌های متعدد تغذیه کننده از طریق وسایل جدا کننده (فیوز، کلید و غیره) به همدیگر متصل شده و بارها هم به بخش‌های فوق متصل شده‌اند و هر دو سر تغذیه کننده به منبع تغذیه متصل شده است. در یک نقطه از پیش تعیین شده‌ای از فیدر، وسیله جدا کنده به صورت باز نصب می‌گردد. اساسا سیستم حلقوی باز از دو فیدر تشکیل می‌شود که انتهای آنها به وسیله جدا کننده‌ای مانند فیوز، کلید و یا کلید قدرت به هم مرتبط شده باشد.

به هنگام وقوع اتصالی، بخشی از مدار فشار متوسط که اتصالی در آنجا خارج داده‌است، از دو طرف قطع می‌شود و تداوم سرویس‌دهی به قسمت سالم به این صورت انجام می‌شود که ابتدا حلقه در نقطه‌ای که در حالت عادی باز گذاشته شده است، بسته می‌شود و سپس کلید قدرت در پست دیگر وصل می‌شود(شکل ۱-۲).

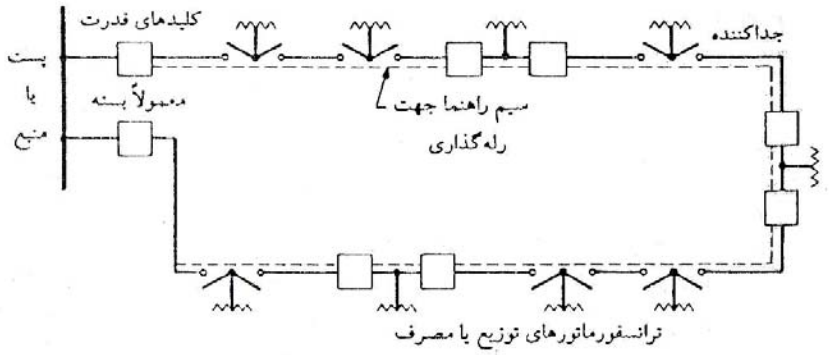


شکل ۱-۲: مدار حلقوی باز

چنین حلقه‌هایی در حالت عادی بسته نمی‌شوند، وقتی اتصالی باعث باز شدن قطع کننده ها (یا فیوزها) در دو طرف شوند، سرتاسر تغذیه کننده بی‌برق شده و معلوم نمی‌شود که اتصالی کجا رخ داده است. وسایل جدا شده بین بخش‌ها به صورت دستی باز و بسته می شوند و می‌توانند فیوزها، جدا کننده‌های فیوزدار (کات اوت) یا کلیدهای نسبتا ارزان باشد.

۱-۲-٤- حلقوی بسته

در جایی که درجه بالاتری از قابلیت اطمینان موردنظر است، فیدر بـه صـورت حلقـوی بـسته مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در اینجا معمولا وسایل جدا کننده کلیدهای قدرت بسیار گران قیمـت می‌باشد. قطع کننده‌ها به وسیله رله‌هایی تحریک می‌شوند تا فقط برای باز کردن کلیدهای قدرت واقع در دو طرف قسمت معیوب عمل نمایند، بقیه قسمت تغذیه کننده سرتاسری برق‌دار باقی می‌مانـد. در بیشتر نمونه‌ها، فعالیت مناسب رله فقط به وسیله سیم‌های راهنما صورت می‌گیرد که از کلیـد قـدرتی به کلید قدرت دیگر کشیده می‌شود که نصب و نگهداری آن پرهزینه می‌باشد. در برخی نمونه‌ها، ایـن سیم‌های راهنما از طریق اجاره خطوط تلفن صورت می‌گیرد(شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: مدار حلقوی بسته

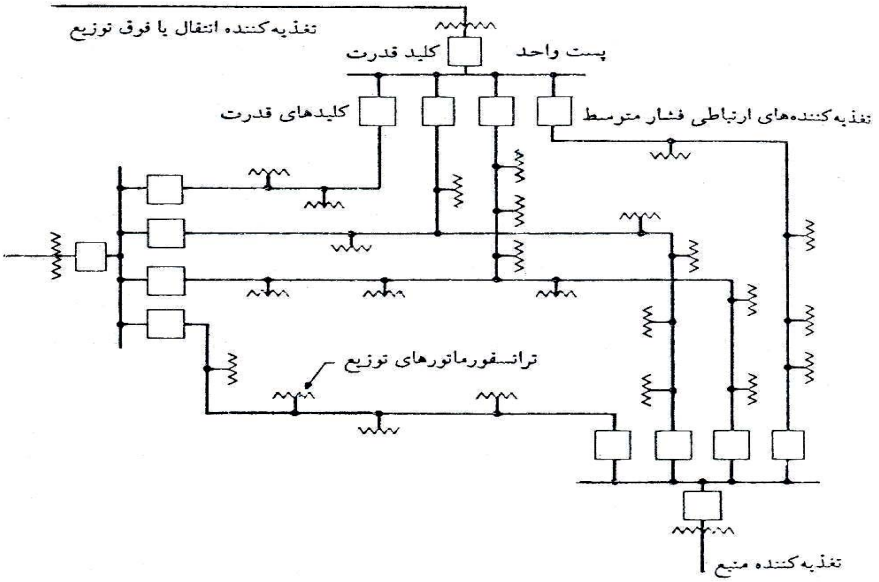
به خاطر پایین نگه داشتن هزینه‌ها، می‌توان فقط بین قسمت‌های معین حلقه تغذیه کننده، کلیـد قدرت نصب کرد و طبق معمول وسایل جدا کننده ارزان قیمت بین قسمت های میانی نصب نمود. به همین خاطر است که با وقوع یک اتصالی پیدا شد وسایل جدا کننده واقع در دو سر بخش اتصالی باز شده و بخش‌های سالم به وسیله بسته شدن کلیدهای قدرت مناسب دوباره برق‌دار می‌شود.

۱-۲-۵- سیستم‌های فشار متوسط شبکه‌ای (غربالی)

اگر چه مطالعات اقتصادی نشان داده است که سیستم شبکه‌ای (غربالی) طرف اولیه در بعـضی از شرایط ممکن است کم هزینه تـر و پایـدارت از سیـستم شـعاعی باشـد، در عمـل تعـداد کمـی از شبکه‌های غربالی در طرف اولیه مـورد بهـره‌بـرداری قـرار گرفتـه‌انـد و فقـط چنـد مـورد از آنهـا در سرویس‌دهی باقی مانده‌اند. این سیستم از طریق به هم پیوستن شبکه‌های فشار متوسطی کـه بـه طـور عادی در سیستم‌های شعاعی یافت می‌شود تشکیل شبکه یا غربال (مش) را می‌دهند. شبکه به وسـیله چندین ترانسفورماتور قدرت تغذیه می‌شود که ترانسفورماتورها به نوبه خود از خطوط فوق توزیـع و انتقال در ولتاژهای فشار قوی تغذیه می‌شوند. یک کلید قدرت کنترل شده با رله‌های جریان معکـوس و وصل مجدد خودکار بین ترانسفورماتور و شبکه قرار دارد و سیـستم فـشار متوسـط شـبکه‌ای را از

جریان اتصالی تغذیه شده از ترانسفورماتور، ناشی از وقوع اتصالی در خطـوط فـوق توزیـع و انتقـال محافظت می‌نماید.

اتصالی‌ها در بخش‌های فشار متوسط که شبکه راتشکیل می‌دهنـد، بـه وسـیله کلیـد قـدرت و فیوزها جدا می‌شود(شکل ۱-٤).



شکل ۱-٤: سیستم فشارمتوسط لحظه‌ای (وسایل جداکننده نشان داده نشده‌اند)

این نوع سیستم، پست‌های معمولی و تغذیه کننده‌های طولانی فشار متوسطی اصـلی را حـذف کرده و آنها را با تعدادی زیادی از پست‌های کیوسکی (واحد) جایگزین نموده کـه بـه طـور حـساس (استراتژیکی) در سرتاسر شبکه قرار می‌گیرد. بدین وسیله مشکل دستیابی به زمین اضافی و ضـروری در پست‌های معمولی را حل کرده است. علاوه بر آن، مشکل نگهداری و بهره‌برداری مناسـب تنظـیم کننده‌های ولتاژ (در جایی که آنها وجود دارند) در تغذیه کننـده‌هـای فـشار متوسـط بـه هـم پیوسـته راتجربه کرده است[۱].

۱-۳- حفاظت سیستم توزیع

اهداف اصلی در حفاظت سیستم توزیع عبارتند از: به حداقل رساندن زمان خطا و بـه حـداقل رساندن تعداد مصرف کنندگانی که تحت تأثیر خطا قرار گرفته اند. اهداف فرعی از حفاظـت سیـستم توزیع عبارتند از:

۱- حذف سریع عواملی که خطرجانی دارند.

۲- حتی المقدور قسمتی از سیستم که بایستی خارج گردد، محدود شود.

۳- حفاظت وسایل برقی مشترکین

۴- حفاظت سیستم در مقابل قطبهای ناخواسته و اختلالات.

۵- خارج کردن خطوط، ترانسفورماتورها و وسایل دیگر خطادار از مدار

سیستمهای توزیع هوایی دارای دو نوع خطا می‌باشند. یکی خطاهای گذرا (غیردائم) و دیگری خطاهای دائم.

بسته به نوع سیستم، تقریباً ۷۵ الی ۹۰ درصد از کلّ خطاها دارای طبیعت غیردائم می‌باشند. معمولاً خطاهای گذرا هنگامیکه سیستمهای یک فاز با فازهای دیگر یا با زمین (مانند درخت، پرندگان و دیگر حیوانات، بادهای شدید، صاعقه و...) تماس پیدا می‌کنند پیش می‌آید. خطاهای گذرا با قطع مدار به اندازهٔ زمانیکه باعث خاموش شدن قوس شود از بین می‌روند. در اینجا زمان خطا به حداقل می‌رسد و از ذوب بی‌مورد فیوز با استفاده از رله‌های آنی یا تریپ بسیار سریع و وصل مجدد بوسیلهٔ کلیدی که با رله کنترل می‌شود ویا تریپ و وصل مجدد توسط وصل مجدد خودکار جلوگیری میگردد سرعت کلید، تنظیم رله و مشخصات وصل مجدد طوری انتخاب می‌شوند که خطا را قبل از آنکه باعث ذوب شدن فیوز گردد (نزدیکترین فیوز به سمت منبع) برطرف کند وگرنه خطای گذرا تبدیل به خطای دائم خواهد شد.

خطاهای دائم آنهایی هستند که نیاز به تعمیر توسط مسئولین به شکلهای زیر دارند:

۱- تعویض سیستمهای سوخته، فیوزهای ذوب شده و یا دیگر وسایل آسیب دیده

۲- جدا کردن شاخه‌های درخت از خط

۳- بستن دستی یک کلید یا یک وصل مجدد

در اینجا تعداد مشترکینی که تحت تأثیر خطا قرار گرفته اند با انتخاب محل صحیح و نوع صحیح وسایل حفاظتی در فیوز اصلی (در محل جداشدن هر شاخه از سیستم یا در نقاط بحرانی سیستم) به حداقل رسانیده می‌شوند. این تجربه باعث کاهش تعداد مشترکینی که تحت تأثیر خطا قرارگرفته اند می‌شود و کمک می‌کند که خطا را با محدود کردن ناحیه ای که شامل خطا شده است برطرف کنیم. در حالت کلی تنها نقطه ای که در شبکهٔ توزیع با فیوز حفاظت نمی‌شود فیدر اصلی و فیدر ارتباطی می‌باشد.

در طرف مقابل اکثر خطاها در یک شبکهٔ زیرزمینی از نوع دائمی‌می‌باشند بنابراین روش حفاظتی دیگری جهت این شبکه‌ها بکار میرود. هرچند که تعداد خطاها در یک شبکهٔ زیرزمینی بسیار کمتر از تعداد خطاها در یک سیستم هوایی است ولیکن چون خطاها از نوع دائمی‌می‌باشند تعداد مشترکینی که تحت تأثیر خطا قرار گرفته اند را افزایش می‌دهد. خطاهایی که دریک شبکهٔ زیرزمینی بروز می‌کنند بوسیلهٔ نزدیکترین فیوز و یا فیوزهای جدا کننده برطرف می‌شوند.

معمولاً هر ترانس توزیع دارای یک فیوز می‌باشد. همچنین گذاشتن یک فیوز در اوّل هر انشعاب تجربهٔ مفیدی است. فیوز می‌بایست که جریان بار مورد انتظار را تحمّل کند و این فیوز

می‌بایست با فیوز طرف بار ترانس و یا وسایل حفاظتی دیگر هماهنگ گردد. می‌توان فیوز هر انشعاب را آنقدر بزرگ گرفت که در صورت بروز خطا ابتدا فیوز ترانس عمل کند. بعلاوه، فیوز انشعاب معمولاً برای حفاظت خطاهای تا انتهای شاخه گذاشته می‌شود. اگر این فیوز نتواند خطاها را برطرف کند آنگاه یک یا چند فیوز دیگر در شاخه نصب خواهد شد.

یک وصل کنندهٔ مجدد یا کلید با رله وصل مجدد در پست جهت ایجاد حفاظت پشتیبان نصب می‌شود. این کلید خطاهای گذرا در ناحیهٔ حفاظتی خود را برطرف می‌کند. در انتهای محدودهٔ حفاظتی، حداقل جریان خطا که توسط محاسبه بدست می‌آید برابر است با حداقل جریانی که (بعنوان جریان حداقل راه انداز نامیده می‌شود) وصل کننده مجدد و یا کلید را به راه می‌اندازد. اما خطای پشت این ناحیه نمی‌تواند کلید یا وصل مجدد را راه بیاندازد. بنابراین در این شرایط یک وصل کننده مجدد دوم با جریان راه انداز کمتر نصب می‌گردد. فاکتورهای اصلی که باعث انتخاب یک وصل کننده مجدد به جای یک کلید می‌گردد عبارتند از: هزینه‌های تجهیزات و هزینهٔ نصب و قابلیت اطمینان. معمولاً یک وصل کننده مجدد هزینه ای کمتر از $\frac{1}{3}$ یک کلید دارد.

اگرچه کلید دارای ظرفیت قطع بالاتری است ولیکن همیشه این خصوصیت مورد نیاز نیست. بنابراین بعضی از مهندسین متخصص توزیع ترجیح می‌دهند بعلت قابلیت انعطاف بیشتر وصل کنندههای مجدد، از آنها به جای کلید استفاده گردد.

۱-۴- قواعد هماهنگی تجهیزات حفاظتی شبکه توزیع

انتخاب تجهیزات حفاظتی جریان زیاد همراه با تنظیم‌های زمان – جریان آنها در طول مدار توزیع جهت برطرف نمودن خطاهای خطوط و دیگر تجهیزات با توجه به ترتیب عملکرد از پیش تعیین شده را هماهنگی تجهیزات حفاظتی می‌نامند. زمانیکه دو وسیله حفاظتی ترتیب عملکرد خاصی برای رفع خطای مشخص داشته باشند به گونه‌ای که در عملکرد همدیگر تداخل نداشته باشند این دو را هماهنگ می‌گوییم. وسیله‌ای که تنظیم شده است تا ابتدا عمل کند را بعنوان حفاظت اصلی یا اولیه می‌نامیم که زودتر وارد عمل می‌شود و معمولا به خطا نزدیکتر است. وسیله دیگر حفاظت پشتیبان را تامین می‌کند و زمانیکه حفاظت اولیه بکار نیفتد وارد عمل می‌شود. هماهنگی مناسب مزیتهای زیر را دارد.

الف) گستره خطا را با به حداقل رساندن مشترکینی که تحت تاثیر خطا قرار گرفته‌اند محدود می‌کند.

ب) قطعیهای ناشی از خطای گذرا را از بین می‌برد.

ج) محل خطا با توجه به وسیله حفاظتی عمل کننده مشخص شود.

د) خطا را در کمترین زمان ممکن رفع می کند.

از آنجا که مسئله هماهنگی به تجربه و قضاوت انسانی و مشخصات وسایل حفاظتی مربوط می‌شود کارخانجات سازنده تجهیزات و طراحان سیستمهای حفاظتی شبکه‌های توزیع الکتریکی هر کدام نظریات و دیدگاههای خاص خود را راجع به نجوه تنظیم و هماهنگ‌نمودن وسایل حفاظتی دارند. برخی از سازندگان برای تنظیم هماهنگ و مطمئن وسایل حفاظتی که تولید نموده‌اند جداولی ارائه می‌نمایند که در شرایط مختلف، اندازه تنظیمات و مقادیر نامی پیشنهادیشان را عرضه می‌کنند. بعلاوه روش‌هایی را نیز با مقایسه منحنی‌های TCC[1] وسایل حفاظتی مختلف معرفی می‌نمایند. تکنیکهای دستی جهت هماهنگی توسط اکثر شرکتهای برق که دارای شبکه‌های توزیع کوچک یا ساده هستند و توسط تعداد محدودی از وسایل حفاظتی، حفاظت می‌شوند کاربرد زیادی دارند. اما برخی از شرکتهای برق از روشهای استاندارد، جداول و یا وسایل کمکی دیگر که به مهندس توزیع و دیگر پرسنل در هماهنگ کردن کمک می‌کند استفاده می‌کنند و برخی از شرکتهای برق از روشهای نیمه خودکار و یا برنامه‌های هماهنگی کامپیوتری که توسط سازندگان تجهیزات و یا پرسنل خود شرکتها تهیه شده‌اند، استفاده می‌کنند[۲].

از آنجا که هماهنگی مجموعه، انتخاب وسایل حفاظتی و تنظیمهای آنها، بوجود آوردن فواصلی حفاظتی برای خطاهای گذرا و محدود کردن قطعی به حداقل ممکن در حالت دائم را شامل می‌شود، جهت هماهنگی تجهیزات حفاظتی در حالت کلی می‌بایست اطلاعات زیر جمع‌آوری گردد:

۱) نقشه آرایش شبکه
۲) تعیین محل یا محلهای وسایل حفاظتی موجود
۳) منحنی‌های مشخصات زمان – جریان وسایل حفاظتی
٤) جریانهای بار (تحت شرایط عادی و اضطراری)
۵) جریانها و یا قدرت اتصال کوتاه (تحت شرایط حداقل و حداکثر تولید) در هر نقطه که احتمالا یک وسیله حفاظتی نصب خواهد شد.

معمولا این اطلاعات همگی با هم قابل دسترس نیستند بنابراین می‌بایست از منابع متعدد تامین گردند.به عنوان مثال مشخصات زمان – جریان وسایل جفاظتی از سازندگان تامین می‌گردد، مقدار جریانهای بار و جریانهای خطا از کامپیوتر توسط برنامه‌های پخش بار و اتصال کوتاه گرفته می‌شوند[۳].

همچنین فاکتورهای دیگری که در هماهنگی وسایل حفاظتی مؤثرند وجود دارند مانند:

۱) تفاوت بین مشخصات زمان – جریان و تلرانسهای سازنده

---

[1] *Time Current Characteristics*

۲) تغییر شرایط بار تجهیزات

۳) درجه حرارت محیط

٤) تاثیر سیکلهای وصل مجدد

در این جا تلاش شده حتی‌الامکان نظریات مختلف بررسی شده و نهایتاً الگوریتم هماهنگی نسبتا جامعی ارائه شود. برای این کار هماهنگی تجهیزات حفاظتی باید دو بدو بررسی شده، قیود و قواعد هماهنگی که بصورت مجموعه‌ای از نامساویها و تساویها است بدست آید. بسته به آنکه وسایل حفاظتی اصلی و پشتیبان از چه نوعی باشند، محدودیت خاصی را برای هماهنگی‌شان باید اعمال نمود. ذیلاً قواعد هماهنگی وسایل حفاظت کننده در شبکه‌های صنعتی آورده می‌شود[٤]:

۱-٤-۱- هماهنگی فیوز – فیوز

هماهنگی یک فیوز با فیوز پشت سرش جهت حفاظت مناسب به موارد زیادی بستگی دارد. اولاًس فیوز انتخابی باید قادر به تحمل جریان بار باشد. ثانیاً فیوز پشتیبان در هنگام خطا در صورت عمل نکردن فیوز اصلی عمل نماید. ثالثاً فیوزها توانایی برطرف کردن یک خطا با حداقل جریان در داخل ناحیه حفاظتی خود را در طی زمان مشخصی داشته باشند. در این بخش چهار روش موجود انتخاب فیوز پشتیبان و اصلی برای انواع فیوزها معرفی می‌شود که عبارتند از :

الف- هماهنگی با استفاده از منحنی زمان – جریان فیوزها

ب) هماهنگی با استفاده از جداول هماهنگی سازنده فیوزها

ج) هماهنگی با استفاده از معیار انرژی

د) روشهای تخمینی.

۱-٤-۱-۱- هماهنگی با استفاده از منحنی زمان – جریان فیوزها

در این روش هماهنگی دو فیوز A و B که بطور سری متصل شده‌اند با مقایسه منحنی کل زمان رفع خطا مربوط به فیوز B با منحنی زمان خرابی فیوز A حاصل می‌گردد. در اینجا ضروریست که زمان نهایی فیوز B (حفاظت اصلی) از ۷۵٪ حداقل زمان ذوب فیوز A (حفاظت پشتیبان) بیشتر نشود حاشیه اطمینان ۲۵٪ به جهت در نظر قرار گرفتن متغیرهایی مانند شرایط بارگیری، درجه حرارت محیط و ذوب جزئی فیوز به علت اتصال کوتاههای گذرا منظور می‌شود. اگر هیچ تقاطعی بین دو منحنی زمان حداقل ذوب و مجموع زمان قطع فیوز نباشد هماهنگی کامل بین دو فیوز صورت گرفته است در غیر این صورت نقطه تقاطع حد ناحیه هماهنگی فیوزها را مشخص می‌کند.

۱-٤-۱-۲- هماهنگی با استفاده از جداول هماهنگی سازنده فیوزها

در این روش هماهنگی فیوزها با استفاده از جداول هماهنگی بر اساس جریان نامی فیوزها که توسط سازنده فیوز تهیه گردیده استفاده می‌شود. این جداول حداکثر جریان خطا را جهت هماهنگی بین فیوزهای مختلف مبنا قرار داده‌اند. بطور مثال در جداول شرکت GEC مقادیر تنظیم پیشنهادی خود را برای فیوزهای کند(T) و فیوزهای تند(K) با اندازه‌های مختلف و با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ۲۵٪ ارائه نموده است. در این حالت به تعیین منحنی کل زمان پاک شدن اتصالی نیازی نمی‌باشد، زیرا برای هر ماکزیمم مقدار جریان خطا، یک جفت فیوز سری با هماهنگی قابل قبول در جدول پیشنهاد شده است که البته به اندازه فیوز انتخابی بستگی دارد.

۱-٤-۱-۳- هماهنگی با استفاده از معیار انرژی

در این روش انرژی عبوری از فیوزتحت شرایط خلا معیار هماهنگی بوده و از نمودارهای مستطیل انرژی برای این کار استفاده می‌شود. ضلع پایین هر مستطیل، انرژی پیش از قوس و ضلع بالای هر مستطیل، انرژی کل جهت سوختن فیوز می‌باشد. برای هماهنگی ضلع پایین مستطیل انرژی مربوط به فیوز پشتیبان باید از ضلع بالای مستطیل انرژی مربوط به فیوز اصلی بالاتر باشد.

۱-٤-۱-٤- روشهای تخمینی

این روشها سریع و آسان ولی غیر دقیق می‌باشند. مثلا یک راه سریع انتخاب فیوزهای هماهنگ با فیوز اصلی، انتخاب یک مرتبه بالاتر از همان نوع فیوز است.

۱-٤-۲- هماهنگی رله – کلید بازبست

کلید بازبست چند بار عمل قطع و وصل را انجام داده و در صورتی که خطا دایمی باشد فرمان وصل رکلوز مسدود می‌شود. کل عملی که در چند بار قطع و وصل کلید بازبست روی می‌دهد به کل زمان جمع شده معروف است. بنابراین رله بایستی در شرایط ناموفق کلید بازبست، حداقل به اندازه کل زمان قطع شده صبر نماید و چنانچه اطمینان حاصل شد که کلید بازبست عمل نمی‌کند در این صورت شروع به عمل نماید. به عبارت دیگر شرط لازم برای هماهنگی رله و کلید بازبست آن است که زمان عملکرد رله به ازای حداکثر جریان خطای واقع شده در جلوی کلید بازبست با کل زمان جمع شده عملکردهای رکلوزو به ازای همان جریان خطا، حداقل به اندازه ۱۰ سیکل فاصله زمانی داشته باشد.با فرض اینکه فرکانس شبکه ۵۰ هرتز باشد این فاصله زمانی برابر ۰/۲ ثانیه می‌شود.

برخی از مهندسین متخصص توزیع از روشهای تخمینی جهت تصمیم گیری در مورد هماهنگی رله و کلید بازبست استفاده می‌کنند. برای مثال اگر زمان عملکرد رله جهت هر مقدار جریان