بسم الله الرحمن الرحيم

**وزارت علوم، تحقیقات و فناوری**

**دانشگاه تفرش**

**دانشکده مهندسی برق**

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

# تأثیر تولیدات پراکنده بر سیستم حفاظتی شبکه‌های توزیع و بازیابی هماهنگی حفاظتی بعد از نصب منابع تولید پراکنده

**استاد راهنما:**

آقای دکتر فرزاد رضوی

**دانشجو:**

**محمود سرلک**

**۱۳۸۹**

تقدیم به

# مادر عزیز و فداکار و پدر بزرگوارم

## سپاسگذاری

اکنون که به شکرانه ایزد منّان موفق به اتمام این پایان‌نامه شده‌ام، بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای محترم خود، **جناب آقای دکتر فرزاد رضوی** که زحمت راهنمایی پایان‌نامه را عهده‌دار بوده‌اند، اعضای محترم هیئت داوری، **جناب آقای دکتر عسکریان ابیانه و جناب آقای دکتر فتاحی** که داوری این پایان‌نامه را پذیرفته و ضمن حضور در جلسهٔ دفاعیه با سؤالات روشنگر خود، مرا راهنمایی کردند، **خانواده خود** که پشتیبانی و محبت‌های بی‌منت خود را در دوران تحصیل از من دریغ ننموده‌اند، و همچنین از زحمات دوست عزیزم، **آقای مهندس تقی ابراهیمی** که در انجام این پروژه مرا یاری نمودند، تقدیر و تشکر نمایم.

به امید موفقیت و کامیابی همه این عزیزان

**چکیده**

در این پروژه، ابتدا تاثیر منابع تولید پراکنده بر سیستم حفاظتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و سپس بازیابی هماهنگی حفاظتی بین تجهیزات حفاظتی شبکه بعد از نصب منابع از طریق نصب محدودسازهای جریان خطا بررسی می‌گردد. برای این منظور، اندازه این محدودسازهای جریان و تنظیمات تجهیزات حفاظتی بعد از نصب منابع تولید پراکنده به نحوی تعیین می‌گردد که علاوه بر بازیابی هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی، مجموع هزینه‌های ناشی از طرح حفاظتی بهینه گردد. این هزینه‌ها شامل هزینه تعویض تجهیزات حفاظتی، هزینه ناشی از افزایش احتمالیِ سطح مقطع کابل‌ها و قدرت قطع کلیدها و ریکلوزرها و هزینه محدودساز جریان خطا می‌باشد. در واقع در این پروژه برای دستیابی به نتایج بهتری در بازیابی هماهنگی و نیز کاهش هزینه‌های ناشی از طرح حفاظتی، محدودیتِ عدم تغییر تنظیمات حفاظتی برداشته شده است. برای این منظور ظرفیت منابع تولید پراکنده، ثابت و نقاطی برای برای نصب آن‌ها در نظر گرفته شده است و در نهایت، مسئله هماهنگی حفاظتی و کاهش هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

برای شبیه‌سازی طرح ارائه شده از یک شبکه نمونه توزیع شامل سه منبع تولید پراکنده و تجهیزات حفاظتی توزیع شامل رله جریان‌زیاد، ریکلوزر و فیوز استفاده شده و از برنامه‌های هماهنگی کامپیوتری برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم حفاظتی استفاده شده است. برای بهینه‌سازی مسئله نیز تابع هدف مناسب ارائه و از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:**

منابع تولید پراکنده، هماهنگی سیستم حفاظتی، الگوریتم ژنتیک، فیوز، ریکلوزر، رله جریان‌زیاد، محدودساز جریان خطای ابررسانا

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**۱. مقدمه ..... ۱**

۱-۱) مقدمه: ..... ۲

۱-۱-۱) منابع تولید پراکنده ..... ۳

۱-۱-۲) حفاظت شبکه‌های توزیع ..... ۵

۱-۱-۲-۱) تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع ..... ۵

۱-۱-۲-۲) هماهنگی حفاظتی در شبکه‌های توزیع ..... ۸

۱-۲) فعالیت‌های صورت‌گرفته در زمینه حفاظت شبکه‌های توزیع با و بدون حضور منابع تولید پراکنده ..... ۱۲

۱-۳) خلاصه‌ای از کار انجام شده در این پایان‌نامه: ..... ۱۵

۱-۴) فصل‌بندی پروژه: ..... ۱۶

**۲. شرح مشکل ..... ۱۸**

۲-۱) مقدمه ..... ۱۹

۲-۲) تاثیر منابع تولید پراکنده بر حفاظت شبکه‌های توزیع ..... ۱۹

۲-۲-۱) مدلسازی منابع تولید پراکنده در مطالعات حفاظتی ..... ۱۹

۲-۲-۲) تاثیر تولیدات پراکنده بر جریان‌های اتصال‌کوتاه و حفاظت جریان‌زیاد ..... ۲۰

۲-۳) روش‌های کاهش و یا حذف تاثیرات منفی منابع تولید پراکنده بر سیستم‌حفاظتی ..... ۲۶

۲-۳-۱) استفاده از محدودساز جریان‌خطا به منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی با حفظ تنظیمات قبلی ..... ۲۶

۲-۳-۲)تعیین ماکزیمم ظرفیت منبع تولید پراکنده به منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی با حفظ تنظیمات قبلی ۲۹

۲-۳-۳)تقسیم‌بندی شبکه به نواحی جداگانه و استفاده از شبکه عصبی برای برای تشخیص ناحیه بروز خطا ۳۱

۲-۴) شرح مشکلات روش‌های موجود ..... ۳۲

۲-۵) نتیجه‌گیری ..... ۳۳

**۳. روش پیشنهادی برای ایجاد هماهنگی حفاظتی بعد از نصب منبع تولید پراکنده ..... ۳۴**

۳-۱) مقدمه ..... ۳۵

۳-۲) معرفی روش پیشنهادی برای ایجاد هماهنگی حفاظتی بعد از نصب منبع تولید پراکنده ..... ۳۵

۳-۲-۱) هزینه‌های ناشی از نصب منبع تولید پراکنده ..... ۳۵

## فهرست مطالب


۳-۲-۲) تابع هدف جدید ..... ۴۲

۳-۲-۳) الگوریتم برنامه برای تعیین امپدانس محدودساز جریان و تنظیمات جدید حفاظتی ..... ۴۴

۳-۳) نتیجه‌گیری ..... ۴۶

**۴. پیاده‌سازی روش ارائه شده روی شبکه نمونه ..... ۴۷**

۴-۱) مقدمه ..... ۴۸

۴-۲) نرم‌افزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها و برنامه‌ی کامپیوتری ..... ۴۸

۴-۳) سیستم مورد مطالعه در شبیه‌سازی ..... ۴۹

۴-۳-۱) اطلاعات شبکه ..... ۵۱

۴-۳-۲) روند انجام شبیه‌سازی ..... ۵۶

**۵. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها ..... ۵۸**

۵-۱) مقدمه ..... ۵۹

۵-۲) اعمال برنامه هماهنگی تجهیزات حفاظتی شبکه نمونه قبل از نصب منابع تولید پراکنده ..... ۵۹

۵-۳) تاثیر نصب منابع تولید پراکنده برسیستم حفاظتی شبکه نمونه ..... ۶۶

۵-۴) نصب محدودساز جریان مقاومتی، سلفی و سلفی- مقاومتی برای بازیابی هماهنگی حفاظتی ..... ۷۲

۵-۴-۱) تعیین اندازه محدودساز خطا با استفاده از الگوریتم مرحله به مرحله ..... ۷۲

۵-۴-۲) تعیین اندازه محدودساز خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک ..... ۷۹

۵-۴-۳) تعیین امپدانس محدود ساز سلفی- مقاومتی و تنظیمات جدید حفاظتی( $R=2X$ ) ..... ۸۳

۵-۴-۴)تعیین امپدانس محدود ساز سلفی- مقاومتی و تنظیمات جدید حفاظتی با در نظر گرفتن هزینه‌های حاصل از طرح حفاظتی ۸۶

۵-۴-۵) مقایسه نتایج روش‌های مختلف استفاده شده در کاهش تاثیر منابع بر سیستم حفاظتی ..... ۸۹

**۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد ..... ۹۴**

**۷. مراجع ..... ۹۷**

# فهرست شکل‌ها


شکل.....صفحه

شکل ۱-۱) منحنی زمان- جریان انواع رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی .....۶

شکل ۱-۲) منحنی‌های زمان- جریان سریع و تاخیری ریکلوزر .....۷

شکل ۱-۳) منحنی‌های حداقل زمان ذوب و زمان کل رفع خطای فیوزها .....۷

شکل ۱-۴) موقعیت بروز اتصال‌کوتاه‌های مربوط به جفت‌جریان‌های شش‌گانه و منحنی‌های عملکرد دو تجهیز اصلی و پشتیبان .....۹

شکل ۲-۱) مشارکت منبع تولید پراکنده در جریان اتصال‌کوتاه ..... ۲۱

شکل ۲-۲) مدار معادل شبکه شکل ۲-۱ در زمان اتصال‌کوتاه از دید نقطه خطا ..... ۲۱

شکل ۲-۳) شبکه ساده شعاعی برای نشان دادن تاثیرات منبع تولید پراکنده بر جریان‌های خطا ..... ۲۱

شکل ۲-۴) جریان خطای واقع شده در فیدر بالا به ازای فواصل مختلف نقطه بروز خطا از ابتدای فیدر (با نصب منبع در فواصل متفاوت از ابتدای فیدر بالا) .....۲۳

شکل ۲-۵) جریان رله ابتدای فیدر بالا به ازای فواصل مختلف نقطه بروز خطا از ابتدای این فیدر(با نصب منبع در فواصل متفاوت این فیدر) .....۲۳

شکل ۲-۶) جریان خطای واقع شده در فیدر بالا به ازای مقادیر مختلف امپدانس خطا (با نصب منبع در ۲ کیلومتری ابتدای فیدر ) و کور شدن حفاظت .....۲۴

شکل ۲-۷) دو فیدر تغذیه شده از یک پست با وجود یک منبع در یکی از فیدرها .....۲۴

شکل ۲-۸) جریان خطای واقع شده در فیدر بالا به ازای فواصل مختلف نقطه بروز خطا از ابتدای فیدر (با نصب منبع در فواصل متفاوت از ابتدای فیدر پایین) ..... ۲۵

شکل ۲-۹) جریان عبوری از رله ابتدای فیدر دارای منبع در صورت بروز خطا در فیدر مجاور ..... ۲۵

شکل ۲-۱۰) قرار گرفتن منبع تولید پراکنده بین ریکلوزر و فیوز.....۲۶

شکل ۲-۱۱) افزایش جریان فیوز و کاهش جریان ریکلوزر با نصب منبع بین این دو تجهیز.....۲۶

شکل ۲-۱۲) نصب محدودساز برای کاهش مشارکت منبع تولید پراکنده در جریان اتصال‌کوتاه .....۲۷

شکل ۲-۱۳) مدار معادل شبکه شکل ۲-۱۲ ..... ۲۸

شکل ۲-۱۴) منحنی مشخصه دو رله، هماهنگی آنها قبل از نصب منبع و ناهماهنگی بعد از نصب منبع ۲۹

شکل ۲-۱۵) منحنی مشخصه دو رله و جریان بحرانی آن‌ها ..... ۳۰

شکل ۳-۱) طرح حفاظتی شبکه شعاعی قبل از نصب منبع تولید پراکنده .....۳۶

شکل ۳-۲) طرح حفاظتی شبکه شعاعی بعد از نصب منبع تولید پراکنده در شین ۷۰۰۶ .....۳۶

شکل ۳-۳) افزایش جریان اتصال‌کوتاه عبوری از کلید و لزوم افزایش قدرت قطع آن به دلیل نصب منبع در فیدر مجاور .....۳۷

شکل ۳-۴) افزایش قیمت کلید قدرت به ازای افزایش قدرت قطع آن.....۳۸

# فهرست شکل‌ها


شکل ۳-۵) افزایش قیمت ریکلوزر به ازای افزایش قدرت قطع آن ..... ۳۸

شکل ۳-۶) افزایش قیمت کابل XLPE به ازای افزایش سطح مقطع کابل ..... ۴۱

شکل ۳-۷) قیمت یک محدودساز جریان خطای سلفی ابررسانا با ولتاژ نامی ۱۰ کیلوولت و جریان نامی ۴۰۰ آمپر ..... ۴۲

شکل ۳-۸) الگوریتم روش پیشنهادی برای تعیین مقادیر محدودساز جریان و تنظیمات حفاظتی جدید۴۵

شکل ۴-۱) برنامه‌های نوشته شده با DPL در محیط برنامه‌نویسی Digsilent ..... ۴۹

شکل ۴-۲) شبکه نمونه مورد مطالعه برای شبیه‌سازی ..... ۵۰

شکل ۴-۳) منحنی مشخصه سریع و تاخیری ریکلوزرهای مورد استفاده در شبکه نمونه ..... ۵۵

شکل ۴-۴) منحنی مشخصه بینهایت و خیلی معکوس رله‌های مورد استفاده در شبکه نمونه ..... ۵۵

شکل ۴-۵) منحنی حداقل زمان ذوب و حداکثر زمان رفع کامل خطای یک فیوز ۱۰۰ آمپری ..... ۵۶

شکل ۵-۱) تفاوت عملکرد محدودساز نوع سلفی و نوع مقاومتی در افزایش اندازه امپدانس کل ..... ۷۴

شکل ۵-۲) افزایش فاصله زمانی عملکرد جفت تجهیز ۱۰۰۳- ۱۰۰۲ با افزایش امپدانس انواع محدودساز ..... ۷۸

شکل ۵-۳) افزایش فاصله زمانی عملکرد جفت تجهیز ۲۰۰۲- ۲۰۰۱ با افزایش امپدانس انواع محدودساز ..... ۷۸

شکل ۵-۴) افزایش فاصله زمانی عملکرد جفت تجهیز ۳۰۰۶- ۲۰۰۳ با افزایش امپدانس انواع محدودساز ..... ۷۹

شکل ۵-۵) فاصله زمانی عملکرد به ازای جفت‌جریان‌های سوم در روش‌های مختلف مطرح شده(برای تجهیزاتی که دچار ناهماهنگی شده بودند) ..... ۹۰

# فهرست جداول


جدول .....صفحه

جدول ۱-۱) مشخصات انواع منابع تولید پراکنده .....۴

جدول ۱-۲) روابط زمان بر حسب جریان برای انواع رله با منحنی مشخصه کاهشی .....۶

جدول ۱-۳) قواعد هماهنگی تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع مطرح شده در مرجع 5][ ..... ۱۱

جدول ۱-۴) قواعد هماهنگی تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع مطرح شده در مرجع 6][ ..... ۱۲

جدول ۲-۱) جریان‌های اتصال‌کوتاه نمونه برای انواع مختلف منابع تولید پراکنده ..... ۱۹

جدول ۳-۱) جریان مجاز کابل‌های مسی XLPE با غلاف PVC بدون زره ..... ۳۹

جدول ۳-۲) ضریب تصحیح جریان مجاز کابل XLPE برای دماهای مختلف زمین ..... ۳۹

جدول ۳-۳) ضریب تصحیح جریان مجاز کابل XLPE برای مقاومت‌های حرارتی مختلف خاک ..... ۳۹

جدول ۳-۴) ضریب تصحیح جریان مجاز کابل XLPE برای عمق‌های مختلف دفن کابل ..... ۳۹

جدول ۳-۵) جریان مجاز کابل‌های مسی XLPE با غلاف PVC بدون زره با در نظر گرفتن شرایط نصب و بهره‌برداری از کابل در این پایان‌نامه ..... ۴۰

جدول ۳-۶) ماکزیمم جریان اتصال‌کوتاه مجاز کابل‌ها ..... ۴۰

جدول ۳-۷) هزینه یک نمونه محدودساز جریان خطای سلفی ابررسانا با ولتاژ نامی ۱۰ کیلوولت ..... ۴۲

جدول ۴-۱) مشخصات خطوط شبکه ..... ۵۲

جدول ۴-۲) مشخصات رله‌های شبکه ..... ۵۲

جدول ۴-۳) مشخصات ریکلوزرهای شبکه ..... ۵۲

جدول ۴-۴) فیوزهای موجود برای استفاده در شبکه ..... ۵۳

جدول ۴-۵) اعداد مشخص‌کننده منحنی مشخصه عملکرد سریع ریکلوزرها ..... ۵۴

جدول ۴-۶) اعداد مشخص‌کننده منحنی حداقل زمان ذوب و حداکثر زمان رفع کامل خطای یک فیوز ۱۰۰ آمپری ..... ۵۴

جدول ۵-۱) پارامترهای الگوریتم ژنتیک و ضرایب وزنی تابع هدف ..... ۵۹

جدول ۵-۲) جریان اتصال‌کوتاه جلوی کلیدها و ریکلوزرها و قدرت قطع آن‌ها ..... ۵۹

جدول ۵-۳) تنظیمات رله‌ها ..... ۶۰

جدول ۵-۴) تنظیمات ریکلوزرها ..... ۶۰

جدول ۵-۵) نتایج انتخاب فیوزها ..... ۶۰

جدول ۵-۶) سطح مقطع مناسب کابل‌ها از دید جریان مجاز قبل از نصب منبع ..... ۶۰

جدول ۵-۷) سطح مقطع مناسب کابل‌ها از دید جریان اتصال‌کوتاه قبل از نصب منبع ..... ۶۱

# فهرست جداول


جدول ۵-۸) نتایج جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه و فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان قبل از نصب منابع ..... ۶۳

جدول ۵-۹) متوسط زمان اجرای برنامه در هر تکرار الگوریتم ژنتیک ..... ۶۶

جدول ۵-۱۰) جریان اتصال‌کوتاه جلوی کلیدها و ریکلوزرها و قدرت قطع آن‌ها ..... ۶۷

جدول ۵-۱۱) سطح مقطع مناسب کابل‌ها ..... ۶۷

جدول ۵-۱۲) سطح مقطع مناسب کابل‌ها از دید جریان اتصال‌کوتاه بعد از نصب منبع ..... ۶۷

جدول ۵-۱۳) نتایج جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه و فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان بعد از نصب منابع ..... ۶۹

جدول ۵-۱۴) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودساز نوع سلفی ..... ۷۵

جدول ۵-۱۵) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودساز نوع مقاومتی ..... ۷۶

جدول ۵-۱۶) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودساز نوع سلفی- مقاومتی ..... ۷۷

جدول ۵-۱۷) مقادیر انتخاب شده برای انواع محدودسازها توسط الگوریتم ژنتیک ..... ۸۰

جدول ۵-۱۸) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودسازهای نوع سلفی تعیین شده توسط ژنتیک ..... ۸۱

جدول ۵-۱۹) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودسازهای نوع مقاومتی تعیین شده توسط ژنتیک ..... ۸۲

جدول ۵-۲۰) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودسازهای نوع سلفی- مقاومتی تعیین شده توسط ژنتیک ..... ۸۳

جدول ۵-۲۱) پارامترهای الگوریتم ژنتیک و ضرایب وزنی تابع هدف ..... ۸۴

جدول ۵-۲۲) مقادیر انتخاب شده برای محدودسازها توسط الگوریتم ژنتیک ..... ۸۵

جدول ۵-۲۳) تنظیمات رله‌ها ..... ۸۵

جدول ۵-۲۴) تنظیمات ریکلوزرها ..... ۸۵

جدول ۵-۲۵) نتایج انتخاب فیوزها ..... ۸۵

جدول ۵-۲۶) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات اصلی- پشتیبان به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودسازهای نوع سلفی- مقاومتی تعیین شده توسط ژنتیک با تغییر تنظیمات حفاظتی ..... ۸۶

جدول ۵-۲۷) مقادیر انتخاب شده برای محدودسازها توسط الگوریتم ژنتیک ..... ۸۷

جدول ۵-۲۸) تنظیمات رله‌ها ..... ۸۷

# فهرست جداول


جدول ۵-۲۹) تنظیمات ریکلوزرها ..... ۸۷

جدول ۵-۳۰) نتایج انتخاب فیوزها ..... ۸۸

جدول ۵-۳۱) فاصله زمانی عملکرد تجهیزات به ازای جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه سوم با نصب محدودسازهای نوع سلفی- مقاومتی تعیین شده توسط ژنتیک با تغییر تنظیمات حفاظتی و در نظر گرفتن هزینه‌ها ..... ۸۸

جدول ۵-۳۲) جریان اتصال‌کوتاه و قدرت قطع کلیدها و ریکلوزرها قبل و بعد از نصب منابع و بعد از نصب محدودسازهای انتخاب شده با روش‌های مختلف ..... ۹۱

جدول ۵-۳۳) سطح مقطع مناسب کابل‌ها از دید جریان بار و اتصال‌کوتاه قبل و بعد از نصب منابع و بعد از نصب محدودسازهای انتخاب شده با روش‌های مختلف ..... ۹۲

جدول ۵-۳۴) هزینه‌های ایجاد شده با روش‌های مختلف تعیین امپدانس محدودسازهای خطا ..... ۹۳

# ۱

# مقدمه

## ۱-۱) مقدمه:

در سال‌های اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده به سبب مزایای فراوان اقتصادی و زیست‌محیطیِ این منابع به شدت افزایش یافته است. اما با وجود این مزایا، مسایل زیادی در طراحی و بهره‌برداری و اتصال این منابع به شبکه‌های قدرت به وجود می‌آید. در صورتیکه این مسایل بررسی نشود، ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در سیستم‌های قدرت گردد. از جمله مهمترین این مشکلات، ایجاد ناهماهنگی در سیستم حفاظتی شبکه‌های توزیع، امکان ایجاد شرایط جزیره‌ای، مشکلات کنترل ولتاژ و فرکانس می‌باشد.

همچنین، جایابی بهینه و تعیین ظرفیت تولید و تکنولوژی مورد استفاده برای واحدهای تولید پراکنده نیز از جمله مسایل مربوط به نصب این منابع می‌باشد که برای کاهش تاثیرات منفی و افزایش مزایای اتصال آنها به شبکه‌های قدرت باید مورد بررسی قرار گیرد. موقعیت نصب و ظرفیت تولید این منابع می‌تواند باعث تغییر تاثیرات این منابع بر سیستم شود، به نحوی که ممکن است تاثیرات مثبت این منابع در مقایسه با تاثیرات منفی کمتر و یا بیشتر گردد. بنابراین با تعیین این دو پارامتر می‌توان تاثیرات منفی این منابع را کاهش داده و یا به کلی حذف نمود. با در نظر گرفتن شرایطی مانند میزان رشد بار، محدوده حرارتی کابل‌ها، تامین بارهای خاص مثل مجلس و بیمارستان‌ها در مواقع اضطراری، تغییرات اقلیمی و جغرافیایی و توسعه شبکه، جایابی و تعیین ظرفیت تولید منابع تولید پراکنده با ترکیبی از اهداف زیر انجام می‌شود:

- کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع
- آزادسازی ظرفیت خطوط
- بهبود کیفیت برق
- بهبود پروفیل ولتاژ
- کاهش قیمت انرژی الکتریکی
- افزایش قابلیت اطمینان سیستم

در واقع ابتدا موقعیت نصب و ظرفیت منابع تولید پراکنده با اهداف فوق تعیین می‌شود و بررسی تاثیر این منابع بر سیستم حفاظتی بعد از تعیین این دو پارامتر انجام می‌شود.

یکی از مهمترین اصول در طراحی بهینه سیستم‌های حفاظتی، محدود کردن ناحیه بی‌برق شده در اثر بروز اتصال‌کوتاه به کوچکترین قسمت ممکن از شبکه می‌باشد و بر این اساس، سیستم حفاظتی با استفاده از قوانین حفاظتی موجود، به طور بهینه طراحی می‌گردد. سیستم حفاظتی در شبکه‌های توزیع، که عموماً به صورت شعاعی می‌باشند، بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده طراحی و هماهنگ می‌شود. با نصب منابع تولید پراکنده ماهیت شعاعی شبکه از بین می‌شود و سطوح اتصال‌کوتاه، جهت عبور جریان‌ها در خطوط و پخش بار در شبکه- که هر کدام عامل مهمی در طراحی سیستم‌های حفاظتی می‌باشند- تغییر می‌کند و در نتیجه هماهنگی‌های حفاظتی قبلی برقرار نمی‌ماند. بنابراین اصل محدود کردن ناحیه بی‌برق شده در اثر اتصال‌کوتاه، در این شبکه با ساختار جدید برقرار نمی‌باشد. علاوه بر این، در شبکه‌ای که دارای انواع مختلف تجهیزات حفاظتی توزیع شامل رله، ریکلوزر و فیوز می‌باشد، بسته به موقعیت نصب منابع، برخی از تجهیزات حفاظتی نصب شده باید با نوع دیگری جایگزین گردند. در صورتی که این تاثیرات منفی مورد بررسی قرار نگیرد، در اثر

عملکرد نادرست و نابجای تجهیزات حفاظتی، میزان انرژی توزیع نشده افزایش و قابلیت اطمینان سیستم به‌شدت کاهش خواهد یافت که در مجموع نارضایتی مشترکین و زیان اقتصادی بالایی برای شرکت‌های توزیع را در بر خواهد داشت.

مشکلات مطرح شده تحت عنوان ناهماهنگی‌های حفاظتی شناخته می‌شوند و برای برطرف کردن آن‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. مسئله‌ای که در کاهش و یا حذف تاثیر منابع بر هماهنگی سیستم حفاظتی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد، بررسی هزینه‌های ناشی از طرح ارائه شده است. این هزینه‌ها به ساختار شبکه، نوع تجهیزات حفاظتی، قدرت قطع کلیدها و ریکلوزرها و روش مورد استفاده در طرح حفاظتی بستگی دارد.

جهت بررسی تاثیر تولید پراکنده بر سیستم‌های حفاظتی ابتدا باید منابع تولید پراکنده و اصول حفاظتی مورد استفاده برای اعمال تنظیمات حفاظتی به خوبی شناخته شوند. در این فصل ابتدا تکنولوژی‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید پراکنده مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس اصول حفاظتی مورد استفاده برای ایجاد هماهنگی حفاظتی در شبکه‌های توزیع مطرح خواهد شد.

### ۱-۱-۱) منابع تولید پراکنده

در سیستم‌های قدرت سنتی، تولید توان بصورت متمرکز در نیروگاه‌های بزرگ با ظرفیت‌های بالا انجام می‌شود. بنابراین، تمامی انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کنندگان باید از طریق سیستم‌های انتقال پیچیده و طولانی از نیروگاه‌ها به محل مصرف انتقال داده شود. اما در طراحی سیستم‌های قدرت جدید، تمایل بر این است که تا حد ممکن تولید به محل مصرف نزدیک شود. با توجه به نیاز نزدیک شدن تولید و مصرف به یکدیگر بحث منابع تولید پراکنده و سیستم‌های تولید پراکنده مطرح می‌گردد. تولید پراکنده به منابع انرژی با اندازه کوچک نسبت به نیروگاه‌های معمول اطلاق می‌شود که به سیستم توزیع فشارضعیف و یا فشارمتوسط نزدیک به محل مصرف متصل می‌شود [1]-[2].

**الف- تکنولوژی‌های به‌کار رفته در سیستم‌های تولید پراکنده**

در سیستم‌های تولید پراکنده، عمدتاً از تکنولوژی‌های زیر برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود:

- تکنولوژی‌های گاز مانند توربین‌های گازی، میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی
- تکنولوری‌های ذخیره انرژی مانند باتری و ابرخازن‌ها
- تکنولوژی‌های تجدیدپذیر مانند سیستم‌های فتوولتاییک، نیروگاه‌های بادی کوچک، نیروگاه‌های آبی کوچک و نیروگاه‌های بیوماس و...

توربین‌های گازی شامل یک کمپرسور، محفظه احتراق و یک مجموعه موتور- ژنراتور می‌باشد که انرژی چرخشی را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. میکروتوربین ماشینی است که با استفاده از هوا و گاز طبیعی گردش یک محور را ایجاد می‌کند. در واقع میکروتوربین‌ها از انواع کوچکتر توربین‌های گازی می‌باشند که برق را با فرکانس بالا تولید می‌کنند و سپس با استفاده از اینورتر فرکانس برق تولیدی آنها به مقدار قابل استفاده برای مصرف‌کنندگان کاهش داده می‌شود.

پیل سوختی دارای یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. کارکرد پیل سوختی از نظر نداشتن قسمت متحرک شبیه باتری است، اما پیل سوختی بر خلاف باتری نیازی به شارژ شدن ندارد[3].

در سیستم‌های فتوولتائیک، سلول‌های خورشیدی نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. نیروگاه‌های بادی کوچک نیز جزء منابع تولید پراکنده محسوب می‌شوند که محدوده تولید آنها تاکنون به حدود ۵۰۰ کیلووات می‌رسد. در نیروگاه‌های بیوماس برای تولید انرژی الکتریکی از مواد ضایعاتی ستفاده می‌شود.

جدول ۱-۱ توان تولیدی نیروگاه‌های تولید پراکنده و میزان بازده هریک را نشان می‌دهد[4].

جدول ۱-۱) مشخصات انواع منابع تولید پراکنده

| نوع منبع تولید پراکنده | ظرفیت تولیدی (kW) | بازده(٪) |
|---|---|---|
| موتورهای درونسوز | ۵۰-۶۰۰۰ | ۳۳-۳۷ |
| میکروتوربین‌ها | ۱۰-۳۰۰ | ۲۰-۳۰ |
| پیل سوختی اسید فسفریک | ۵۰-۱۰۰۰ | ۴۰ |
| پیل سوختی اکسید جامد | ۵-۳۰۰۰ | ۴۵-۶۵ |
| پیل سوختی پلیمری | <۱-۱۰۰۰ | ۳۴-۳۶ |
| فتوولتائیک | ۱-۱۰۰۰ | - |
| توربین بادی | ۱۵۰-۵۰۰ | - |
| ترکیب نیروگاه‌های تجدیدپذیر | <۱-۱۰۰۰ | ۴۰-۵۰ |

**ب- مزایا و معایب تولیدات پراکنده**

تولید انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر با توجه به مسایل اقتصادی و زیست‌محیطی به سمت استفاده از منابع تولید پراکنده حرکت می‌کند. اکثر این منابع تولید پراکنده از جمله توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتاییک انرژی برق را بدون ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی تولید می‌کنند. توربین‌های گاز طبیعی میزان آلایندگی محیط را به اندازه‌ای کاهش داده‌اند که می‌توان این توربین‌ها را در مناطق مسکونی و یا تجاری نصب کرد.

از نظر اقتصادی در مقایسه با نیروگاه‌های برق، می‌توان به پایین بودن هزینه اولیه نصب و راندمان بالای این منابع اشاره کرد. همچنین نزدیک بودن منبع تولید به محل مصرف و عدم نیاز به انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه‌ها به محل مصرف، علاوه بر کاهش هزینه‌های انتقال، باعث می‌شود که ظرفیت تجهیزات شبکه مانند ترانسفورماتورهای قدرت، ژنراتورها و خطوط، آزاد شده و در نتیجه میزان تلفات انرژی در آنها کاهش یابد و همچنین، نیاز به احداث خطوط انتقال جدید و یا افزایش ظرفیت خطوط انتقال و به‌روز کردن تجهیزات قدیمی(مانند ترانسفورماتورها) برطرف گردد. علاوه بر این، با کاهش میزان بار عبوری از تجهیزات شبکه، عمر مفید آنها نیز افزایش خواهد یافت. استفاده از این منابع همچنین باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش میزان انرژی توزیع نشده و در نتیجه کاهش میزان خسارت ناشی از قطع برق مشترکین می‌گردد. از طرفی با بهبود برخی پارامترهای کیفیت توان مانند پروفیل ولتاژ در اثر نصب منابع تولید پراکنده، میزان نارضایتی مشترکین از شرکت‌های برق کاهش یافته و هزینه‌های ایجاد شده برای این شرکت‌ها را برطرف خواهد کرد. هر یک از این موارد ذکر شده، باعث می‌شود که تولید انرژی الکتریکی توسط این منابع در مقایسه با نیروگاه‌های برق از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر باشد.

از دیگر مزایای این منابع می‌توان به کاهش رزرو در شبکه، استفاده در مواقع ناگهانی قطع اتفاقی یا قطع برنامه‌ریزی شده و پایین آوردن قیمت کلی برق برای مشتریان اشاره کرد[3].

چنانچه قبلاً نیز گفته شد، با وجود منافع فراوانِ استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، باید تاثیر این منابع بر سیستم‌ها مورد بررسی قرار گیرد. یکی از این موارد، تاثیر منابع بر سیستم حفاظتی در شبکه‌های توزیع می‌باشد که رابطه مستقیم با قابلیت اطمینان این شبکه‌ها دارد. برای بررسی این تاثیرات نیاز به شناخت سیستم‌ها و قواعد حفاظتی شبکه‌های توزیع می‌باشد که در ادامه ارائه شده است.

### ۱-۱-۲) حفاظت شبکه‌های توزیع

قوانین حفاظتی در نظر گرفته شده برای سیستم‌های حفاظتی به نحوی تدوین شده‌اند که اولاً اتصال‌کوتاه‌های ایجاد شده در کمترین زمان برطرف گردند و ثانیاً محدوده‌ای که در اثر عملکرد تجهیزات حفاظتی بی‌برق می‌گردد، تا حد امکان کوچک باشد. در این قسمت خلاصه‌ای از تجهیزات حفاظتی به‌کار رفته در طراحی سیستم حفاظتی شبکه توزیع و همچنین قواعد هماهنگی بین این تجهیزات ارائه می‌گردد.

#### ۱-۱-۲-۱) تجهیزات حفاظتی شبکه‌های توزیع

تجهیزات حفاظتی که در شبکه‌های توزیع برای حفاظت در برابر اتصال‌کوتاه استفاده می‌شوند شامل رله‌های جریان‌زیاد، ریکلوزرها، فیوزها و سکشنالایزرها می‌باشند. معمولاً در سیستم‌های توزیع از یک رله جریان‌زیاد به همراه بریکر در ابتدای فیدر اصلی(در داخل پست فوق‌توزیع) استفاده می‌شود. از ریکلوزرها معمولاً در مسیر اصلی فیدر و به عنوان پشتیبانی برای فیوزها استفاده می‌شود. فیوزها نیز معمولاً در ابتدای انشعابات و همچنین در سمت فشار متوسط ترانس‌های توزیع قرار می‌گیرند.

**الف- رله جریان‌زیاد**

رله‌های جریان‌زیاد به دو نوع رله‌های زمان‌ثابت و رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی تقسیم‌بندی می‌شوند. در رله‌های زمان ثابت، زمان عملکرد رله ثابت است و تابعی از دامنه جریان اتصال‌کوتاه نمی‌باشد. در حالیکه در رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی، زمان عملکرد رله رابطه‌ای معکوس با میزان جریان اتصال‌کوتاه دارد. بنابراین جهت رسیدن به هماهنگی بهتر به‌ویژه در فیدرهای شعاعی طولانی که هماهنگی حفاظتی بین تجهیزات اصلی- پشتیبان مطرح می‌باشد، استفاده از منحنی‌های کاهشی برای رله‌ها اجتناب ناپذیر است. رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی خود سه دسته‌اند:

- رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی معمولی
- رله‌های با منحنی مشخصه خیلی کاهشی
- رله‌های با منحنی مشخصه شدیدا کاهشی(بینهایت کاهشی)

روابط زمان بر حسب جریان برای انواع رله با منحنی مشخصه کاهشی در جدول ۱-۲ و منحنی آنها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در جدول ۱-۲:

$TSM$: ضریب تنظیم زمانی رله،

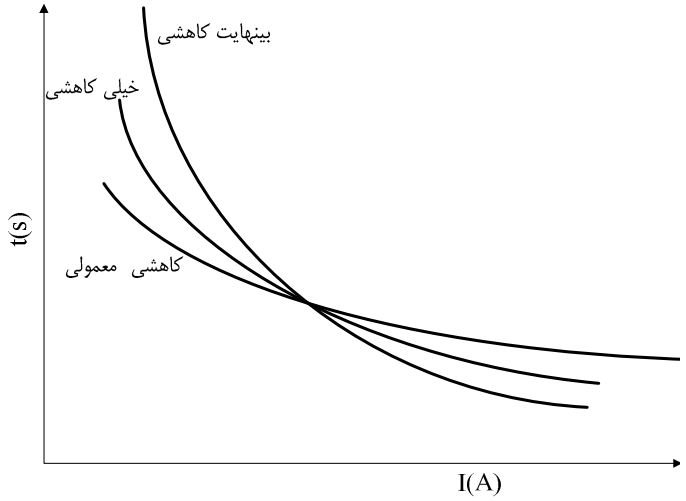
$I$: جریان اتصال‌کوتاه

$I_b$: جریان تنظیمی رله

و $t$ زمان عملکرد رله می‌باشد.

جدول ۱-۲) روابط زمان بر حسب جریان برای انواع رله با منحنی مشخصه کاهشی

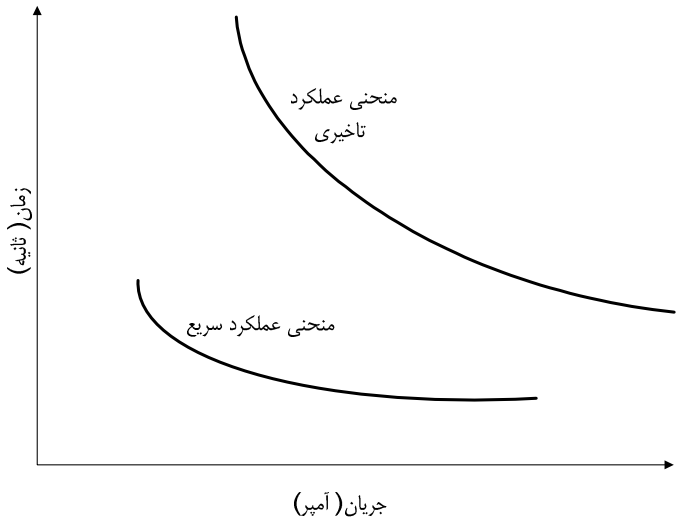
| |
|---|
| رله با منحنی مشخصه کاهشی معمولی<br>$t = \frac{0.14}{(\frac{I}{I_b})^{0.02} - 1} * TSM$ |
| رله با منحنی مشخصه خیلی کاهشی<br>$t = \frac{13.5}{(\frac{I}{I_b})^{1} - 1} * TSM$ |
| رله با منحنی مشخصه بی‌نهایت کاهشی<br>$t = \frac{80}{(\frac{I}{I_b})^{2} - 1} * TSM$ |




شکل ۱-۱) منحنی زمان- جریان انواع رله‌های با منحنی مشخصه کاهشی

**ب- ریکلوزر(کلیدهای بازبست خودکار)**

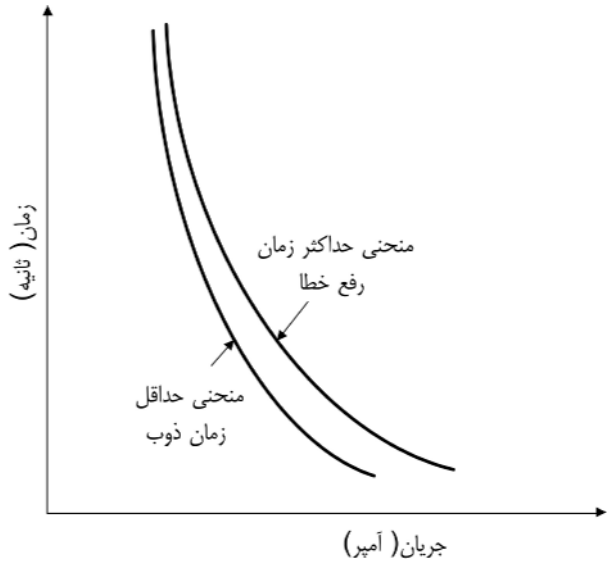
بر اساس استاندارد $ANSI - C - 376 - 1974$ تعریف یک ریکلوزر(بازبست) چنین است: "کلید بازبست، یک وسیله خودکنترل برای قطع و وصل مجدد یک مدار جریان متناوب با توالی از پیش تعیین شده جهت باز شدن و بسته شدن است که با تنظیم وصل مجدد در حالت وصل نگه داشته و یا اینکه در عملکرد قفل نگه داشته می‌شود". ریکلوزرها دارای دو نوع عملکرد سریع(آنی) و تاخیری می‌باشند. از عملکرد سریع برای رفع اتصال‌کوتاه‌های گذرا استفاده می‌شود. معمولاً تعداد عملکردهای سریع ریکلوزر بیش از یک بار انجام می‌شود و در صورتی که خطا ماندگار باشد، بعد از چند بار عملکرد قسمت آنی، بخش تاخیری رله فعال شده و عمل خواهد کرد. عملکردهای تاخیری و آنی ریکلوزر نیز دارای منحنی‌های معکوس کاهشی می‌باشد. مزیت استفاده از دو مشخصه عملکرد در این است که حالت قطع سریع که خطاهای گذرا را رفع می‌کند، به فیوزهای پایین دست کمک می‌کند تا بتوانند جریان خطا را تحمل کنند و در صورتی که خطا ماندگار باشد و با عملکردهای سریع ریکلوزر برطرف نشود، منحنی‌های قطع تأخیری این زمینه را فراهم می‌کنند که فیوزهای پایین دست ذوب شده و خطا را برطرف کنند.




شکل ۱-۲) منحنی‌های زمان- جریان سریع و تاخیری ریکلوزر

### ج- فیوز

فیوزها از اساسی‌ترین تجهیزات حفاظتی اضافه‌جریان هستند. برای فیوزها دو منحنی جریان- زمان در نظر گرفته می‌شود که در مسائل هماهنگی بسیار مهم هستند. یکی از این منحنی‌ها، منحنی حداقل ذوب است که کمترین زمان ذوب فیوز را نشان می‌دهد. مشخصه دیگر، منحنی مربوط به زمان رفع کامل خطاست. فیوزها بر اساس شیب منحنی‌های عملکرد خود به دو نوع تندکار(k) و کندکار(T) تقسیم می‌شوند. منحنی‌های حداقل زمان ذوب و زمان کل رفع خطا برای یک فیوز در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.




شکل ۱-۳) منحنی‌های حداقل زمان ذوب و زمان کل رفع خطای فیوزها

### د- سکشنالایزر

سکشنالایزرها وسایل حفاظتی هستند که قسمتی از شبکه که در معرض خطا قرار گرفته است را به طور خودکار از سیستم جدا می‌کنند. این تجهیزات، منحنی عملکرد زمان- جریان و قابلیت قطع جریان‌های خطا را ندارند و با یک کلید بازبست به عنوان پشتیبان به کار می‌روند. سکشنالایزر عملکرد تجهیز پشتیبان(بازبست) را در مدت خطا شمرده و پس از

تعداد معینی از عملکرد پشتیبان و در زمانی که تجهیز پشتیبان باز است، قسمت معیوب را از شبکه جدا می‌کند. به این ترتیب قسمت‌های باقیمانده که در معرض خطا نبوده‌اند، مجدداً برق‌دار خواهند شد.

**۱-۱-۲-۲) هماهنگی حفاظتی در شبکه‌های توزیع**

تجهیزات حفاظتی موجود در شبکه در صورتی که پشتیبان یکدیگر باشند، با یکدیگر هماهنگ خواهد شد، به نحوی که در صورت عدم عملکرد به‌موقع تجهیز اصلی، تجهیز پشتیبان با یک فاصله زمانی معین ناحیه دچار خطا را از سایر قسمت‌های شبکه جدا کند. بنابراین سیستم حفاظتی به گونه‌ای طراحی می‌شود که تجهیزات حفاظتی هریک دارای پشتیبان باشند تا در صورتی که یک تجهیز در شرایط اتصال‌کوتاه عمل نکرد، تجهیز حفاظتی پشتیبان اتصال‌کوتاه را برطرف کند. به طور کلی در هماهنگی سیستم حفاظتی شبکه‌های توزیع موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

۱. عدم وجود ناهماهنگی: مطالعات هماهنگی باید به نحوی انجام شود که ناهماهنگی بین تجهیزات حفاظتی اصلی و پشتیبان وجود نداشته باشد، به این معنی که همواره تجهیز اصلی قبل از تجهیز پشتیبان عمل کند. این کار ویژگی انتخاب‌پذیری سیستم حفاظتی را تضمین می‌کند.
۲. محافظت از عملکرد فیوزها در شرایط غیر اضطراری: در صورت بروز اتصال‌کوتاه‌های گذرا فیوزها نباید عمل کنند. این کار با استفاده از عملکرد سریع ریکلوزرها انجام می‌شود. به نحوی که در صورت بروز اتصال‌کوتاه گذرای جلوی فیوز، ریکلوزر که پشتیبان فیوز می‌باشد، مدار را بلافاصله قطع و مجدداً وصل می‌کند تا شاید در این دوره زمانی کوتاه، خطا برطرف شده باشد.
۳. امکان برقراری جریان‌های اتصال‌کوتاه از دو طرف: این مشکل برای فیدرهای شعاعی که همگی از یک پست تغذیه می‌شوند، با نصب منبع تولید پراکنده در یک فیدر ایجاد می‌شود. در این شرایط، تجهیزات حفاظتی موجود بر روی فیدری که منبع تولید پراکنده روی آن نصب شده، می‌توانند وجود اتصال‌کوتاه روی فیدرهای مجاور را تشخیص داده و عمل کنند.

در یک شبکه قدرت، تجهیز حفاظتی که نزدیک‌ترین موقعیت به محل بروز خطا را دارد، تجهیز حفاظتی اصلی و تجهیزات حفاظتی پشت سر آن، تجهیزات حفاظتی پشتیبان نامیده می‌شوند. قواعد حفاظتی بین انواع تجهیزات حفاظتی اصلی- پشتیبان در مرجع [5] ارائه شده است. در ادامه به‌خاطر کاربرد وسیع این قواعد در برنامه‌های هماهنگی خلاصه‌ای از این قواعد ارائه خواهد شد. قبل از ارائه این قواعد، جفت جریان‌های اتصال‌کوتاه معرفی می‌شوند.

**الف- جفت‌جریان‌های اتصال‌کوتاه**

تنظیمات رله‌ها و ریکلوزرها و انتخاب فیوزها برای یک شبکه توزیع باید به صورتی انجام شود که هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی اصلی- پشتیبان به ازای تمامی شرایط اتصال‌کوتاه برقرار باشد. بدین منظور برای شش حالتِ اتصال‌کوتاه که بحرانی‌ترین شرایط را در عملکرد تجهیزات حفاظتی اصلی و پشتیبان ایجاد می‌کنند، هماهنگی بین دو تجهیز بررسی می‌گردد. این جریان‌ها، شش‌جفت‌جریان اتصال‌کوتاه نامیده می‌شوند و منظور از جفت‌جریان اتصال‌کوتاه ، جریانهای عبوری از تجهیزات اصلی و پشتیبان به ازای یک اتصال‌کوتاه معین می‌باشد [9].

شکل ۱-۴ موقعیت اتصال‌کوتاه‌های مربوط به جفت‌جریان‌های شش‌گانه و منحنی‌های عملکرد دو تجهیز اصلی و پشتیبان را به ازای این اتصال‌کوتاه‌ها نشان می‌دهد. رله $B$ که به محل خطا نزدیکتر است، رله اصلی و رله $A$ رله پشتیبان است. در ادامه این جفت جریان‌ها معرفی می‌شوند.