بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون در سیستم‌های توزیع

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

بابک احمدزاده شوشتری

استاد راهنما

دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت آقای بابک احمدزاده شوشتری

تحت عنوان

تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون در سیستم‌های توزیع

در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۳۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن
۲- استاد داور	دکتر حمید رضا کارشناس
۳- استاد داور	دکتر محمد امین لطیفی
معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود عمومی

تشکر و قدردانی

در ابتدا از استاد راهنمای خودم، دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن، کمال سپاسگزاری را دارم. ایشان روش تحقیق را به من آموختند و با دانش وسیع و نظرات ارزشمندشان، مرا در انجام این پایان‌نامه، حمایت کردند. بدون راهنمایی‌ها و زحمات ایشان، انجام این کار، ممکن نبود. من از کار با ایشان بسیار خرسندم.

همچنین از کمیته داوری این پایان‌نامه، دکتر حمید رضا کارشناس و دکتر محمد امین لطیفی، برای بحث و نظرات مفیدی که در مورد این کار، مطرح کردند، متشکرم.

از تمامی دوستانم در گروه سیستم‌های قدرت دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان، به ویژه مهندس سعید خان‌باباپور، که اطلاعات مربوط به بخشی از شبکه اصفهان را در اختیار من گذاشتند، سپاسگزارم.

در انتها از خانواده عزیزم بسیار ممنونم که شرایط را برای انجام این تحقیق برای من فراهم کردند و همواره در تمام مقاطع تحصیلی، مشوق من بوده‌اند.

بابک احمدزاده

مهرماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

مادر گرانقدرم، پدر بزرگوارم و خواهر عزیزم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و معرفی صورت مساله تحقیق ۲
۱-۲- مرور کارهای انجام شده قبلی ۴
۱-۳- موضوع و اهداف تحقیق ۷
۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۸

فصل دوم: توصیف وقوع حالت جزیره‌ای و انواع روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون

۲-۱- مقدمه ۱۰
۲-۲- توصیف وقوع حالت جزیره‌ای در سیستم‌های توزیع شامل DG ۱۰
۲-۳- تشخیص حالت جزیره‌ای در سیستم‌های توزیع شامل DG ۱۱
۲-۴- روش‌های مطرح در تشخیص حالت جزیره‌ای سیستم‌های توزیع شامل DG سنکرون ۱۳
۲-۴-۱- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس روش‌های پسیو ۱۳
۲-۴-۲- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس روش‌های اکتیو ۱۴
۲-۴-۳- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس روش‌های ترکیبی ۱۴
۲-۴-۴- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس روش‌های مبتنی بر ارتباطات ۱۴
۲-۵- نتیجه‌گیری ۱۵

فصل سوم: روش‌های پسیو مطرح در تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون

۳-۱- مقدمه ۱۶
۳-۲- روش‌های پسیو در تشخیص حالت جزیره‌ای سیستم‌های توزیع شامل DG سنکرون ۱۶
۳-۲-۱- روش‌های مبتنی بر فرکانس ۱۷
۳-۲-۲- روش‌های مبتنی بر ولتاژ ۲۱
۳-۲-۳- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس نرخ تغییر اختلاف زاویه ۲۶
۳-۲-۴- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس نرخ تغییر توان اکتیو تولیدی DG ۲۶
۳-۲-۵- تشخیص حالت جزیره‌ای بر اساس جهت توان راکتیو DG ۲۷
۳-۳- معیارهای ارزیابی عملکرد روش‌های پسیو پرکاربرد در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۲۷
۳-۳-۱- منحنی‌های عملکرد ۲۸
۳-۳-۲- NDZ ۳۴
۳-۴- نتیجه‌گیری ۳۷

فصل چهارم: معرفی و شبیه‌سازی سیستم تست

۴-۱- مقدمه ۳۸
۴-۲- معرفی سیستم تست ۳۸
۴-۳- مدل‌سازی سیستم تست ۳۹
۴-۳-۱- ژنراتور سنکرون ۳۹
۴-۳-۲- سیستم تحریک ژنراتور سنکرون ۴۱
۴-۳-۳- ترانسفورماتورها ۴۳
۴-۳-۴- خطوط سیستم ۴۳
۴-۳-۵- سیستم فوق توزیع ۴۳
۴-۳-۶- بارهای سیستم ۴۴
۴-۴- بررسی رفتار کمیت‌های سیستم تست در حالت جزیره‌ای ۴۵
۴-۴-۱- ولتاژ ترمینال DG سنکرون در سیستم جزیره‌ای ۴۵
۴-۴-۲- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک بر ولتاژ ترمینال DG سنکرون در سیستم جزیره‌ای ۴۹
۴-۴-۳- رفتار فرکانس سیستم در حالت جزیره‌ای ۵۱
۴-۴-۴- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون بر فرکانس سیستم در حالت جزیره‌ای ۵۵
۴-۵- بررسی رفتار کمیت‌های سیستم در برابر اختلالات غیرجزیره‌ای ۵۶
۴-۵-۱- خطای اتصال کوتاه سه فاز ۵۷
۴-۵-۲- حذف و بازیابی بارهای سیستم ۶۰
۴-۶- نتیجه‌گیری ۶۳

فصل پنجم: ارزیابی عملکرد روش‌های پسیو در تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون

۵-۱- مقدمه ۶۴
۵-۲- تعیین و بررسی منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۶۵
۵-۲-۱- نحوه اجرای منطق عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس در MATLAB/Simulink ۶۵
۵-۲-۲- تعیین منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۶۸
۵-۲-۳- تاثیر نوع بار بر منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس ۶۸
۵-۲-۴- تاثیر تنظیمات رله بر منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس ۷۳
۵-۲-۵- تاثیر ثابت اینرسی رتور ژنراتور سنکرون بر منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس ۷۷
۵-۲-۶- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون بر منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس ۸۰
۵-۳- تعیین و بررسی منحنی عملکرد رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۸۳
۵-۳-۱- نحوه اجرای منطق عملکرد رله ولتاژ در MATLAB/Simulink ۸۴
۵-۳-۲- تعیین منحنی عملکرد رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۸۴
۵-۳-۳- تاثیر نوع بار بر منحنی عملکرد رله ولتاژ ۸۵
۵-۳-۴- تاثیر تنظیمات رله بر منحنی عملکرد رله ولتاژ ۸۸

۵-۳-۵- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون بر منحنی عملکرد رله ولتاژ ۸۹
۵-۴- بدست آوردن NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون ۸۹
۵-۵- بررسی NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم تست ۹۱
۵-۵-۱- تاثیر نوع بار بر NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس ۹۱
۵-۵-۲- تاثیر تنظیمات رله بر NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس ۹۴
۵-۵-۳- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون بر NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس ۹۶
۵-۶- بررسی NDZ رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم تست ۹۹
۵-۶-۱- تاثیر نوع بار بر NDZ رله ولتاژ ۹۹
۵-۶-۲- تاثیر تنظیمات رله بر NDZ رله ولتاژ ۱۰۰
۵-۶-۳- تاثیر مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون بر NDZ رله ولتاژ ۱۰۰
۵-۷- نتیجه‌گیری ۱۰۲

فصل ششم: بررسی عملکرد نادرست روش‌های پسیو تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون، به علت وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم

۶-۱- مقدمه ۱۰۳
۶-۲- بررسی عملکرد نادرست رله‌های مبتنی بر فرکانس به علت وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم ۱۰۴
۶-۲-۱- بررسی عملکرد نادرست رله‌های مبتنی بر فرکانس به علت وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فیدر مجاور ۱۰۴
۶-۲-۲- بررسی عملکرد نادرست رله‌های مبتنی بر فرکانس به علت حذف و بازیابی بارهای سیستم ۱۱۵
۶-۳- بررسی عملکرد نادرست رله ولتاژ به علت وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم ۱۲۱
۶-۳-۱- بررسی عملکرد نادرست رله ولتاژ به علت وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فیدر مجاور ۱۲۱
۶-۳-۲- بررسی عملکرد نادرست رله ولتاژ به علت حذف و بازیابی بارهای سیستم ۱۲۳
۶-۴- نتیجه‌گیری ۱۲۶

فصل هفتم: طراحی روش‌های پسیو در تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون

۷-۱- مقدمه ۱۲۸
۷-۲- معرفی روش‌های ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر فرکانس ۱۲۹
۷-۲-۱- ناحیه کاربرد رله‌های مبتنی بر فرکانس ۱۳۰
۷-۲-۲- ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر فرکانس ۱۳۳
۷-۳- تنظیم و ارزیابی رله‌های مبتنی بر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای با استفاده از روش‌های ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان ۱۳۵
۷-۳-۱- تنظیم و ارزیابی رله فرکانس با استفاده از ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان ۱۳۷
۷-۳-۲- تنظیم و ارزیابی رله نرخ تغییر فرکانس با استفاده از ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان ۱۴۴
۷-۴- معرفی روش‌های ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر ولتاژ ۱۵۱
۷-۴-۱- ناحیه کاربرد رله‌های مبتنی بر ولتاژ ۱۵۱

۷-۴-۲- ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر ولتاژ ۱۵۴
۷-۵- تنظیم و ارزیابی رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای با استفاده از روش‌های ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان ۱۵۵
۷-۵-۱- تنظیم رله ولتاژ با استفاده از ناحیه کاربرد ۱۵۵
۷-۵-۲- ارزیابی عملکرد رله ولتاژ با استفاده از ناحیه کاربرد عدم تعادل توان ۱۵۸
۷-۵-۳- بررسی رفتار رله ولتاژ در برابر اختلالات غیرجزیره‌ای ۱۵۹
۷-۶- نتیجه‌گیری ۱۶۲

فصل هشتم: تنظیم رله‌های تشخیص حالت جزیره‌ای برای بخشی از شبکه اصفهان

۸-۱- مقدمه ۱۶۴
۸-۲- معرفی سیستم ۱۶۴
۸-۳- مدل‌سازی سیستم ۱۶۵
۸-۳-۱- ژنراتورهای سنکرون ۱۶۵
۸-۳-۲- ترانسفورماتورها ۱۶۵
۸-۳-۳- سیستم فوق توزیع ۱۶۶
۸-۴- نحوه شبیه‌سازی حالت‌های کمبود و بیشبود توان اکتیو و راکتیو در سیستم جزیره‌ای ۱۶۷
۸-۴-۱- نحوه شبیه‌سازی حالت‌های کمبود و بیشبود توان اکتیو در سیستم جزیره‌ای برای تعیین منحنی عملکرد رله‌های مبتنی بر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۶۷
۸-۴-۲- نحوه شبیه‌سازی حالت‌های کمبود و بیشبود توان راکتیو در سیستم جزیره‌ای برای تعیین منحنی عملکرد رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۶۸
۸-۴-۳- نحوه شبیه‌سازی حالت‌های کمبود و بیشبود توان اکتیو و راکتیو در سیستم جزیره‌ای برای تعیین NDZ رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۶۸
۸-۵- تنظیم و ارزیابی رله‌های مبتنی بر فرکانس مورد استفاده در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۶۸
۸-۵-۱- تنظیم رله فرکانس برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۶۹
۸-۵-۲- ارزیابی عملکرد رله فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۷۱
۸-۵-۳- بررسی رفتار رله فرکانس در برابر وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم ۱۷۳
۸-۵-۴- تنظیم رله نرخ تغییر فرکانس برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۷۴
۸-۵-۵- ارزیابی عملکرد رله نرخ تغییر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۷۶
۸-۵-۶- بررسی رفتار رله نرخ تغییر فرکانس در برابر وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم ۱۷۷
۸-۶- تنظیم و ارزیابی رله ولتاژ مورد استفاده در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۷۸
۸-۶-۱- تنظیم رله ولتاژ برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۷۹
۸-۶-۲- ارزیابی عملکرد رله ولتاژ در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون سیستم ۱۸۱
۸-۷- نتیجه‌گیری ۱۸۴

فصل نهم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۹-۱- نتیجه‌گیری ۱۸۵
۹-۲- پیشنهادات ۱۸۸
مراجع ۱۸۹
ترجمه انگلیسی چکیده ۱۹۱

چکیده

به طور معمول، شبکه‌های توزیع پسیو هستند، بنابراین با قطع ارتباط آنها با شبکه بالادست، بارها و اجزا شبکه بی‌برق می‌شوند. با اتصال تولیدات پراکنده (DG) به فیدرهای توزیع، این شبکه‌ها از حالت پسیو خارج شده و در صورت قطع ارتباط با بالادست، بارها همچنان از طریق تولیدات پراکنده برق‌دار هستند، به عبارتی حالت جزیره‌ای در سیستم رخ می‌دهد. با توجه به اینکه، به طور معمول سیستم‌های توزیع در حالت کار جدا از شبکه دارای امکانات کنترل ولتاژ و فرکانس نیستند، تداوم کار سیستم در حالت جزیره‌ای، قابل قبول نیست و برای اجتناب از خسارت به شبکه، بارها و تولیدات پراکنده، لازم است در کمترین زمان ممکن این منابع از شبکه جدا شوند. به این منظور تولیدات پراکنده به سیستم حفاظت ضدجزیره‌ای مجهز می‌شوند. این سیستم می‌تواند در یک بستر مخابراتی و به شکل سراسری شکل بگیرد و یا بر مبنای کمیت‌های محلی اندازه‌گیری شده در ترمینال تولیدات پراکنده، طراحی شود. روش‌های محلی خود به سه دسته روش‌های پسیو، اکتیو و ترکیبی، تقسیم‌بندی می‌شوند. تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون، به دلایلی همچون توان نامی به نسبت بالا (گاهی بیش از ۳۰ مگاوات)، اینرسی بالا و انعطاف کمتر در کنترل پارامترهای خروجی (ولتاژ ترمینال، سرعت رتور، توان اکتیو و راکتیو خروجی)، نسبت به تولیدات پراکنده اینورتری چالشی‌تر است.

هدف این پایان‌نامه، معرفی و بررسی جوانب مختلف روش‌های پسیو پرکاربرد در تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده سنکرون، همچون رله‌های فرکانس، نرخ تغییر فرکانس، جهش بردار و ولتاژ، است. در این راستا، ضمن تحلیل مبانی نظری و الگوریتم‌های هر رله، ارزیابی عملکرد آنها در تشخیص حالت جزیره‌ای با استفاده از منحنی عملکرد و ناحیه غیرقابل آشکارسازی (NDZ) انجام می‌شود. علاوه بر این رفتار این رله‌ها در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم بررسی می‌شود. به این منظور از دو شبکه تست که یکی به طور معمول در اینگونه مطالعات به کار می‌رود و دیگری بخش کوچکی از شبکه اصفهان است، استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های دوره گذرا به ازای وقوع انواع اختلالات جزیره‌ای و غیرجزیره‌ای در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. به عنوان قدم آخر، تنظیم انواع رله‌ها برای شبکه‌های تست با استفاده از ناحیه کاربرد، با اهداف تشخیص حالت جزیره‌ای در زمان مناسب، برقراری نیازمندی‌های مربوط به تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس و ولتاژ، و توانایی در تفکیک حالت جزیره‌ای از اختلالات غیرجزیره‌ای، انجام و عملکرد آنها با استفاده از ناحیه کاربرد عدم تعادل توان، ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ۱- تشخیص حالت جزیره‌ای ۲- تولیدات پراکنده (DG) سنکرون ۳- رله فرکانس ۴- رله ولتاژ ۵- روش‌های پسیو ۶- منحنی عملکرد ۷- ناحیه غیرقابل آشکارسازی (NDZ)

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و معرفی صورت مساله تحقیق

نگرانی‌های زیست محیطی و رقابتی شدن بازار برق، عوامل رشد قابل توجه استفاده از تولیدات پراکنده[1] (DG) در سیستم‌های توزیع بوده است [۱]. استفاده از DG به طور متناسب با نیازهای سیستم توزیع، می‌تواند کیفیت توان الکتریکی را بهبود دهد. علاوه بر این با تامین توان مورد نیاز سیستم در شرایط بحرانی، مانند زمان‌های اوج مصرف مشترکین، می‌توان قابلیت اطمینان سیستم توزیع را بالا برد.

یکی از قدم‌های مهم در نصب تولیدات پراکنده، بررسی تاثیر آنها روی عملکرد سیستم‌های توزیع است. علاوه بر بهبود برخی شاخص‌ها، افزودن DG به سیستم توزیع، می‌تواند باعث آثار نامطلوبی در سیستم شود. تولید فلیکر، افزایش مولفه‌های هارمونیکی، تغییر سطح جریان خطای اتصال کوتاه و عملکرد نادرست تجهیزات حفاظتی، از جمله این آثار نامطلوب است. بنابراین با ورود DG به سیستم‌های توزیع، چالش‌ها و موضوعات جدیدی برای قانون‌گذاران، دولت، محققان و مهندسان، به وجود آمده است[۲]. به عنوان مثال در سیستم‌های توزیع ممکن است به ایجاد تغییراتی در بعضی از قسمت‌ها، مانند تعویض هادی‌های سیستم، تغییر تنظیمات تجهیزات حفاظتی یا حتی تعویض برخی از آنها، نیاز شود. برای بررسی تاثیر DG در عملکرد سیستم و اتخاذ راه حل‌های اصلی، نیاز به مدل‌سازی سیستم توزیع شامل DG در شرایط دائمی و گذرا است.

---

[1] Distributed Generation

بنابر آنچه گفته شد، ارزیابی تاثیرات تولیدات پراکنده در طراحی و بهره برداری سیستم‌های توزیع ضروری است. در این بین تشخیص حالت جزیره‌ای[1] یک چالش مهم است که در حضور DG در سیستم، باید مورد توجه قرار گیرد. حالت جزیره‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که بخشی از سیستم توزیع از سیستم اصلی بالادست جدا شده و تامین انرژی بخش جدا شده، توسط DG ادامه پیدا کند [۲].

از پیامدهای کارکردن سیستم در حالت جزیره‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۲]:

- امکان تغییر وسیع و خارج از محدوده مجاز ولتاژ و فرکانس سیستم به دلیل عدم کنترل ولتاژ و فرکانس توسط DG و عدم مجهز بودن DG به رله‌های حفاظتی ولتاژ و فرکانس، که می‌تواند باعث آسیب دیدن بارها و دیگر تجهیزات شبکه شود.
- امکان آسیب دیدن افراد، در زمان تعمیرات به علت برق‌دار بودن خطوط.
- عملیات وصل مجدد[2]، بدون برقراری شرایط سنکرونیسم بین سیستم جزیره‌ای[3] و سیستم اصلی که می‌تواند منجر به آسیب دیدن DG و سایر تجهیزات شود. همچنین می‌تواند باعث تریپ مجدد و قطع سیستم اصلی شود.

با توجه به استاندارد [۳] و [۴]، DG باید در کمتر از ۲ ثانیه پس از وقوع حالت جزیره‌ای، از سیستم جدا شود. در واقع هر واحدDG متصل به سیستم توزیع باید به یک سیستم حفاظت ضدجزیره‌ای[4] مجهز باشد تا بتواند DG را در زمان مناسبی پس از وقوع حالت جزیره‌ای، از سیستم جدا نماید.

در صورتی که سیستم توزیع به صورت یک میکروگرید به گونه‌ای طراحی شده باشد تا در حالت جزیره‌ای توانایی کار خودگردان[5] را با برقرار نمودن نیازمندی‌های مربوط به تغییرات غیرعادی فرکانس و ولتاژ [۳]، داشته باشد، تشخیص حالت جزیره‌ای میکروگرید در زمان مناسب، همچنان لازم است. به عنوان مثال در شرایط اتصال میکروگرید به تغذیه اصلی، میزان توان تولیدی واحدهای DG و مود کنترلی آنها با حالتی که میکروگرید در حالت جزیره‌ای کار می‌کند، می‌تواند متفاوت باشد، بنابراین جزیره‌ای شدن میکروگرید باید در زمان مناسب تشخیص داده شود تا تمهیدات لازم شامل توانایی تامین توان مصرفی بارهای الکتریکی موجود در میکروگرید جزیره‌ای توسط واحدهای DG و حفظ ولتاژ و فرکانس میکروگرید در محدوده مجاز، برقرار شود. زمان مناسب تشخیص حالت جزیره‌ای، با توجه به ویژگی‌های سیستم توزیع، زمان‌بندی عملیات وصل مجدد سیستم و با در نظر گرفتن استانداردهای مربوط به تغییرات غیرعادی فرکانس و ولتاژ، تعیین می‌شود.

---

[1] Islanding
[2] Reclosing
[3] Islanded system
[4] Anti-Islanding Protection
[5] Autonomous

ژنراتورهای سنکرون یکی از انواع DG هستند که به طور معمول به فیدرهای اولیه سیستم توزیع متصل می‌شوند. ظرفیت این منابع گاهی به بیش از ۳۰ مگاوات نیز می‌رسد. ژنراتورهای سنکرون توانایی زیادی در تحمل حالت جزیره‌ای دارند. به دلیل توان نامی به نسبت بالا، اینرسی بالا و انعطاف کمتر در کنترل پارامترهای خروجی (ولتاژ ترمینال، سرعت رتور، توان اکتیو و راکتیو خروجی)، گزینه‌های محدودتری برای تشخیص ساده حالت جزیره‌ای این نوع از DG وجود دارد. بنابراین تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون نسبت به DGهای اینورتری چالشی‌تر است [۲].

هدف از اجرای یک طرح تشخیص حالت جزیره‌ای برای سیستم توزیع شامل یک یا چند واحد DG، تشخیص حالت جزیره‌ای در زمان مناسب با در نظر گرفتن استانداردهای مربوط، می‌باشد. علاوه بر این طرح تشخیص حالت جزیره‌ای باید توانایی تفکیک حالت جزیره‌ای از اختلالات غیرجزیره‌ای[1] (مانند وقوع خطای اتصال کوتاه در سیستم) را داشته باشد. روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای به دو گروه کلی روش‌های محلی[2] و مبتنی بر ارتباطات[3] تقسیم می‌شوند [۲]، روش‌های محلی نیز شامل روش‌های پسیو، اکتیو و ترکیبی هستند. تشخیص حالت جزیره‌ای به کمک هریک از روش‌های پسیو، اکتیو، ارتباطاتی و ترکیبی[4] با محدودیت‌ها و موانعی روبرو است. روش‌های پسیو، ارزان و از نظر پیاده‌سازی در سیستم ساده می‌باشند، ولی به ازای عدم تعادل توان[5] کم بین تولید DG و مصرف بارها، قادر به تشخیص حالت جزیره‌ای در زمان مناسب نیستند، به عبارتی این روش‌ها شامل ناحیه غیرقابل آشکارسازی[6] (NDZ) به نسبت بزرگی هستند. روش‌های اکتیو، حالت جزیره‌ای را بهتر از روش‌های پسیو، تشخیص می‌دهند، زیرا دارای NDZ کوچکی هستند، اما کیفیت توان سیستم را به طور نامطلوبی تحت تاثیر قرار می‌دهند. روش‌های ارتباطاتی، NDZ ندارند، ولی هزینه اجرای آنها به دلیل پیچیدگی در ساختار، بالا می‌باشد، که این به عنوان یک مانع مهم در اجرای این روش‌ها، مطرح است.

۱-۲- مرور کارهای انجام شده قبلی

در این قسمت، تاریخچه برخی از مطالعات انجام شده در رابطه با روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای در هریک از گروه‌های پسیو، اکتیو، ارتباطاتی و ترکیبی، قابل کاربرد برای سیستم‌های توزیع شامل DG سنکرون، ارائه می‌شود.

تا سال ۱۹۹۳ میلادی، تمرکز بیشتر تحقیقات علمی روی تاثیر واحدهای DG بر مقدار جریان خطای اتصال

---

[1] Non-Islanding Disturbances
[2] Local
[3] Communication-Based
[4] Hybrid
[5] Power Imbalance
[6] Non-Detection Zone

کوتاه، حفاظت مانند هماهنگی کلیدهای وصل مجدد و کمیت‌های الکتریکی سیستم مانند پروفیل ولتاژ، بود. البته در سال ۱۹۸۹ در [۵]، رفتار سیستم‌های فتوولتائیک در حالت جزیره‌ای به کمک شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت و در سال ۱۹۹۱ در [۶]، با ایجاد عدم تعادل توان راکتیو از طریق نصب خازن در سیستم جزیره‌ای، روشی جهت جلوگیری از ادامه عملکرد سیستم در حالت جزیره‌ای، ارائه شد. در سال ۱۹۹۵، یک روش پسیو در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، بر اساس پایش توان اکتیو تولیدی DG و محاسبه نرخ تغییر توان اکتیو[۱] تولیدی آن، ارائه شد [۷]. در سال ۱۹۹۹ در [۸]، نتایج شبیه‌سازی و تست میدانی[۲] حفاظت ضدجزیره‌ای DG سنکرون، مورد مقایسه قرار گرفت. در سال ۲۰۰۱ در [۹]، یک روش تشخیص حالت جزیره‌ای پسیو، بر اساس محاسبه مشتق جزئی فرکانس نسبت به توان اکتیو مصرفی بارهای سیستم[۳]، مطرح شد.

می‌توان گفت، تمرکز تحقیقات و گزارش‌های فنی بر تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، از سال ۲۰۰۴ افزایش یافت. به عنوان مثال، در [۱۰]، تاثیر نامطلوب توان راکتیو مصرفی بار امپدانس ثابت[۴] (به عنوان یک بار وابسته به ولتاژ) بر عملکرد رله نرخ تغییر فرکانس[۵] در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون مورد مطالعه قرار گرفت، همچنین در این مرجع، محاسبه افت ولتاژ دو سر بار، ناشی از توان راکتیو مصرفی آن در سیستم جزیره‌ای به عنوان یک راه حل در تنظیم موثر رله نرخ تغییر فرکانس، مطرح گردید. در سال ۲۰۰۵، با اعمال حلقه‌های فیدبک مثبت در سیستم گاورنر و تحریک ژنراتور سنکرون، یک روش اکتیو برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، ارائه شد [۱۱]. در [۱۲]، عملکرد رله‌های جهش بردار[۶] و نرخ تغییر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون برای انواع بار شامل توان ثابت[۷]، جریان ثابت[۸] و امپدانس ثابت، و در برابر خطای اتصال کوتاه سه فاز به عنوان یک اختلال اختلال غیرجزیره‌ای، مورد مقایسه قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۶، با ارائه مفهوم ناحیه کاربرد[۹]، روشی برای تنظیم موثر رله‌های مبتنی بر فرکانس، با هدف برقراری همزمان نیازمندی‌های مربوط به تشخیص حالت جزیره‌ای و تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس، مطرح شد [۱۳]. در [۱۴]، پایش توان راکتیو DG سنکرون، به عنوان یک روش برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون مطرح شده است. در سال ۲۰۰۷، یک روش ارتباطاتی برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG ارائه شد [۱۵]. همچنین در این مرجع، نکاتی مربوط به طراحی فرستنده سیگنال آشکارساز حالت جزیره‌ای (سیگنال - ژنراتور) و چند روش برای تشخیص سیگنال آشکارساز حالت جزیره‌ای، در مکان‌های نصب

---

[1] dp/dt
[2] Field Test
[3] $\partial f/\partial P_L$
[4] Constant Impedance
[5] Rate Of Change Of Frequency (ROCOF)
[6] Vector Surge (VS)
[7] Constant Power
[8] Constant Current
[9] Application Region

واحدهای DG در سیستم، مطرح شده است. شایان ذکر است این روش برای سیستم‌های شامل تنها یک واحد DG، ممکن است مقرون به صرفه نباشد. در [۱۶]، با ترکیب روش‌های پایش عدم تعادل ولتاژ (روش پسیو) و تغییر مقدار مرجع فرکانس ژنراتور سنکرون (روش اکتیو) یک روش ترکیبی برای تشخیص حالت جزیره‌ای در یک میکروگرید، ارائه شد. در [۱۷]، عملکرد رله ولتاژ در تشخیص حالت جریره‌ای DG سنکرون مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین با ارائه مفهوم ناحیه کاربرد، روشی برای تنظیم موثر رله‌های مبتنی بر ولتاژ با هدف برقراری همزمان نیازمندی‌های مربوط به تشخیص حالت جزیره‌ای و تغییرات ایمن ولتاژ، معرفی شده است. در سال ۲۰۰۸، تاثیر عواملی مانند تنظیمات رله، نوع بار و مود کنترل سیستم تحریک DG بر NDZ رله‌های ولتاژ و فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، مورد مطالعه قرار گرفت [۱]. همچنین، در این مرجع، نشان داده شده است که NDZ طرح تشخیص حالت جزیره‌ای شامل رله ولتاژ و فرکانس از NDZ طرح تشخیص حالت جزیره‌ای تنها شامل رله ولتاژ یا فرکانس، کوچکتر است. در سال ۲۰۰۹، با استفاده از کمیت‌های نرخ تغییر فرکانس و نرخ تغییر ولتاژ[1]، یک روش ترکیبی برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، ارائه شد [۱۸]. در سال ۲۰۱۰، تحلیل گذراهای الکتریکی ایجاد شده در ولتاژ و جریان ترمینال DG، در زمان وقوع حالت جزیره‌ای در سیستم، به عنوان یک روش تشخیص حالت جزیره‌ای برای سیستم شامل یک یا بیش از یک واحد DG، معرفی شد [۱۹]. در سال ۲۰۱۱، با ارائه مفهوم ناحیه کاربرد عدم تعادل توان[2]، روشی برای تنظیم و ارزیابی رله‌های مبتنی بر فرکانس با هدف برقراری همزمان نیازمندی‌های مربوط به تشخیص حالت جزیره‌ای و تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس، مطرح شد [۲۰]. در [۲۰] تنها تنظیم و ارزیابی رله نرخ تغییر فرکانس با هدف برقراری همزمان نیازمندی‌های مربوط به تشخیص حالت جزیره‌ای و تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس، ارائه شده است. در [۲۱]، پایش کمیت تغییرات اختلاف زاویه بین فازور ولتاژ و جریان ترمینال DG نسبت به زمان، به عنوان یک روش برای تشخیص حالت جزیره‌ای در میکروگرید شامل واحدهای DG از انواع مختلف (سنکرون و اینورتری) مطرح شده است. در [۲۲]، تاثیر عواملی مانند روش اندازه‌گیری فرکانس و پنجره اندازه‌گیری[3] فرکانس، بر عملکرد رله نرخ تغییر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، بررسی شده است، همچنین نرخ تغییر توان اکتیو تولیدی DG به عنوان یک کمیت جهت جلوگیری از عملکرد نادرست[4] رله در برابر اختلالات غیرجزیره‌ای، معرفی شده است. در سال ۲۰۱۲، با پایش نرخ تغییر ولتاژ به به عنوان یک روش پسیو و همچنین تغییر تپ بانک خازنی به عنوان یک روش اکتیو، روشی ترکیبی برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، ارائه شده است [۲۳]. در [۲۴]، شاخصی ارائه شده که با استفاده از آن می‌توان تعیین

[1] Rate Of Change Of Voltage (ROCOV)
[2] Power Imbalance Application Region (PIAR)
[3] Measuring Window
[4] False Operation

نمود، طرح تشخیص حالت جزیره‌ای پسیو مبتنی بر فرکانس یا ولتاژ، برای سیستم شامل DG سنکرون، مناسب است یا نیاز به یک طرح تشخیص حالت جزیره‌ای پیشرفته‌تر می‌باشد. این شاخص بر اساس مدت زمانی از یک دوره زمانی (به عنوان مثال ۲۴ ساعت) که در آن طرح تشخیص حالت جزیره‌ای پسیو ناکارآمد است، تعریف می‌شود.

۱-۳- موضوع و اهداف تحقیق

هدف این پایان‌نامه، معرفی روش‌های اصلی، مهم و پرکاربرد پسیوی است که برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، مطرح شده‌اند. در این معرفی، مبانی تئوری و الگوریتم‌های مربوط به هر روش مرور می‌شود. این روش‌ها در دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر فرکانس و مبتنی بر ولتاژ، قرار می‌گیرند. به منظور مقایسه عملکرد روش‌ها، ابزارهایی همچون منحنی عملکرد[1] و NDZ معرفی می‌شوند. ارزیابی روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، از دو نظر میزان توانایی تشخیص حالت جزیره‌ای یا به عبارتی حداقل عدم تعادل توان اکتیو و راکتیو لازم برای امکان آشکارسازی حالت جزیره‌ای و عدم عملکرد در شرایط وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم، صورت می‌پذیرد. علاوه بر ویژگی ذاتی این روش‌ها، عوامل مربوط به شبکه توزیع و پارامترهای DG سنکرون نیز روی عملکرد آنها موثر هستند. بررسی تاثیر این عوامل، روی عملکرد انواع روش‌ها و چگونگی میزان این تاثیر نیز، یکی از بخش‌های مهم این پایان‌نامه است. در نهایت لازم است، از تمام بررسی‌های انجام شده برای تعیین تنظیمات روش‌های مختلف، استفاده شود. به عبارتی نیاز است، ابزار و فرایندهایی ارائه شوند تا کاربر بتواند، هر رله را به گونه‌ای تنظیم نماید که در مجموع، بهترین عملکرد را از نظر تشخیص سخت‌ترین حالت‌های جزیره‌ای و عدم عملکرد در شرایط وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم، داشته باشد. در این پایان‌نامه، ضمن ارائه این فرایندها، تنظیم انواع رله‌های پسیو برای یک شبکه تست پرکاربرد و همچنین، بخش از شبکه برق منطقه‌ای اصفهان، صورت می‌پذیرد. نکات برجسته این پایان‌نامه عبارتند از:

۱- تدوین و دسته‌بندی همه مباحث مهم در موضوع تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون با استفاده از روش‌های پسیو.

۲- جامعیت بررسی انجام شده، به گونه‌ای که تقریباً همه کارهای انجام شده در رابطه با روش‌های پسیو پرکاربرد در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، گردآوری و جمع‌بندی شده است.

۳- تکمیل برخی از مباحثی که در مراجع، کمتر به آنها پرداخته شده است. مانند در نظر گرفتن نیازمندی‌های مربوط به تغییرات غیرعادی ولتاژ در سیستم‌های توزیع شامل DG، در ناحیه کاربرد رله ولتاژ، ارائه ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر ولتاژ و بررسی عملکرد نادرست رله ولتاژ در برابر اختلالات

[1] Performance Curve

غیرجزیره‌ای، شامل خطای اتصال کوتاه سه فاز و حذف و بازیابی بارهای سیستم.

۴- تنظیم رله‌های فرکانس و ولتاژ با استفاده از ناحیه کاربرد عدم تعادل توان.

۵- تعیین شرایطی که در آن، امکان عملکرد نادرست رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم، بیشتر است.

۶- تنظیم رله‌های تشخیص حالت جزیره‌ای همچون رله فرکانس، رله نرخ تغییر فرکانس و رله ولتاژ، برای تولیدات پراکنده سنکرون موجود در بخشی از شبکه اصفهان، با اهداف تشخیص حالت جزیره‌ای در مدت زمان مناسب، برقراری نیازمندی‌های مربوط به تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس و ولتاژ و توانایی در تفکیک حالت جزیره‌ای از اختلالات غیرجزیره‌ای.

۱-٤- ساختار پایان‌نامه

پس از فصل مقدمه، در فصل دوم، مفاهیم اولیه همچون وقوع حالت جزیره‌ای در سیستم و تشخیص حالت جزیره‌ای، مورد بحث قرار گرفته و انواع روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، به صورت کلی معرفی می‌شوند. در فصل سوم، انواع روش‌های پسیو در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، معرفی می‌شوند. در این راستا، تئوری روش‌های پسیو پرکاربرد و مبانی عملکرد این روش‌ها، شامل رله‌های مبتنی بر فرکانس یعنی رله‌های فرکانس، نرخ تغییر فرکانس و جهش بردار، و رله ولتاژ برای تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرون، ارائه می‌شود. همچنین در این فصل، معیارهای ارزیابی عملکرد رله‌ها معرفی می‌شوند. در فصل چهارم، ضمن معرفی سیستم تست مورد مطالعه، رفتار فرکانس و ولتاژ ترمینال DG، در سیستم جزیره‌ای، از طریق شبیه‌سازی روی سیستم تست، برای انواع بار شامل توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت، انواع کنترل سیستم تحریک DG سنکرون شامل حالت کنترل ولتاژ ترمینال و حالت کنترل توان راکتیو، و مقادیر متفاوت عدم تعادل توان اکتیو و راکتیو در سیستم جزیره‌ای، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. علاوه بر این رفتار این کمیت‌ها، در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم شامل خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین، و حذف و بازیابی بارهای سیستم بررسی می‌شود. با این مطالعه می‌توان تعیین نمود که به طور کلی رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ در چه شرایطی از سیستم، عملکرد مناسب‌تری در تشخیص حالت جزیره‌ای دارند و بر عکس. همچنین تعیین می‌شود که امکان عملکرد نادرست این رله‌ها در برابر اختلالات غیرجزیره‌ای، به ازای چه ترکیبی از نوع بار و مود کنترل سیستم تحریک DG، بیشتر است. در فصل پنجم، تاثیر عوامل مختلف همچون نوع بار، مود کنترل سیستم تحریک DG سنکرون، تنظیمات رله و حالت‌های متفاوت عدم تعادل توان اکتیو و راکتیو در سیستم جزیره‌ای شامل بیشبود توان اکتیو و راکتیو، بیشبود توان اکتیو و کمبود توان راکتیو، کمبود توان اکتیو و راکتیو، و کمبود توان اکتیو و بیشبود توان راکتیو، بر منحنی عملکرد و NDZ رله‌های

مبتنی بر فرکانس و ولتاژ، با هدف ارزیابی و مقایسه توانایی رله‌های مذکور در تشخیص حالت جزیره‌ای، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل ششم، رفتار رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ، همچنین میزان تاثیرپذیری رفتار این رله‌ها نسبت به تغییر ویژگی‌های سیستم مانند قدرت اتصال کوتاه سیستم فوق توزیع، نسبت راکتانس به مقاومت فیدر و میزان بارگذاری[1] سیستم و ژنراتور، در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در یک سیستم تست، به ازای تنظیمات متفاوت، ارزیابی و مقایسه می‌شود. شایان ذکر است بررسی رفتار رله‌های مبتنی بر فرکانس و ولتاژ در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم، در بدترین شرایط انجام می‌شود. بدترین شرایط مربوط به ترکیبی از نوع بار و مود کنترل سیستم تحریک DG است که در آن فرکانس یا ولتاژ ترمینال DG و یا هر دو کمیت، بیشترین دامنه تغییر را در برابر وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم دارند، به عبارتی در این شرایط امکان عملکرد نادرست رله‌های تشخیص حالت جزیره‌ای به علت وقوع اختلالات غیرجزیره‌ای در سیستم، بیشتر است.

در فصل هفتم، رله‌های مبتنی بر فرکانس مورد استفاده در تشخیص حالت جزیره‌ای DG سنکرونِ سیستم تست، با هدف تشخیص حالت جزیره‌ای در زمان مناسب، برقراری نیازمندی‌های مربوط به تغییرات ایمن و غیرعادی فرکانس و توانایی تفکیک حالت جزیره‌ای از اختلالات غیرجزیره‌ای، به کمک ناحیه کاربرد در حالتهای بیشبود و کمبود توان اکتیو، تنظیم می‌شوند. علاوه بر این عملکرد رله‌های فرکانس و نرخ تغییر فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای با استفاده از ناحیه کاربرد عدم تعادل توان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس ضمن ارائه ناحیه کاربرد (در حالتهای بیشبود و کمبود توان راکتیو) و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان رله‌های مبتنی بر ولتاژ، بر طبق استاندارد مربوط به تغییرات غیرعادی ولتاژ، نحوه تنظیم و ارزیابی رله ولتاژ، با استفاده از ناحیه کاربرد و ناحیه کاربرد عدم تعادل توان، ارائه می‌شود. در فصل هشتم، طرح تشخیص حالت جزیره‌ای پسیو، برای تولیدات پراکنده سنکرون بخشی از شبکه اصفهان، پیاده‌سازی و تنظیم می‌شود. فصل نهم نیز، شامل جمع‌بندی مطالب ارائه شده، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار است.

[1] Loading