بسم الله الرحمن الرحیم

شماره پایان‌نامه :۹۳۵۵۵۳۹۱۰۲

دانشگاه شهید چمران اهواز

پردیس دانشگاهی

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق

گرایش قدرت

عنوان :

تنظیم و هماهنگی بهینه رله‌های حذف بار ترکیبی محلی برای بهبود پایداری ولتاژ و فرکانس

نگارنده :

میلاد ربیعی

استاد راهنما:

دکتر علیرضا صفاریان

استاد مشاور:

دکتر **سید قدرت الله سیف السادات**

دی‌ماه سال ۱۳۹۳

باسمه‌تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان‌نامه ارشد)

پایان‌نامه آقای میلاد ربیعی دانشجوی رشته: برق گرایش: قدرت

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی ۹۱۵۵۵۳۹۱۱۵

با عنوان :

تنظیم و هماهنگی بهینه رله‌های حذف بار ترکیبی محلی برای بهبود پایداری ولتاژ و فرکانس

جهت اخذ مدرک : ..... در تاریخ : ..... توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه..... تصویب گردید.

۱.	**اعضای هیئت داوران :**	**رتبه علمی**	**امضاء**
	استاد راهنما:.....	.....	.....
	استاد مشاور :	.....	.....
	استاد داور :.....	.....	.....
	استاد داور :.....	.....	.....
	نماینده تحصیلات تکمیلی :.....	.....	.....
۲.	**مدیرگروه :**	.....	.....
۳.	**معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :**	.....	.....
۴.	**مدیرتحصیلات تکمیلی دانشگاه :**	.....	.....

این پایان نامه را در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به :

پدر و مادر عزیزم

که همواره یاوری دلسوز و فداکار برایم بوده‌اند.

و

برادر مهربانم

که در تمام طول تحصیل همگام و پشتیبان من بوده است.

صمیمانه‌ترین تقدیر و تشکر خود را به استاد ارجمند جناب آقای

دکترعلیرضا صفاریان

تقدیم می‌کنم که با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

نهایت تقدیر و تشکر را دارم:

از استاد گرامی و صبور، جناب آقای **دکتر سید قدرت الله سیف السادات** که پشتیبانی و مشاوره‌ی این پایان نامه را متقبل شدند.

و از استادان عزیز :

جناب آقای **پروفسور محمود جورابیان** و جناب آقای **دکتر مرتضی رزاز** که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

نام خانوادگی : ربیعی	نام: میلاد	شماره دانشجویی : ۹۱۵۵۵۳۹۱۱۵

عنوان پایان‌نامه : تنظیم و هماهنگی بهینه رله‌های حذف بار ترکیبی محلی برای بهبود پایداری ولتاژ و فرکانس

استاد/ اساتید راهنما: دکتر علیرضا صفاریان

استاد/ اساتید مشاور: دکتر سید قدرت الله سیف السادات

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: برق	گرایش: قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه : برق

تاریخ فارغ‌التحصیلی : بهمن ماه ۱۳۹۳ **تعداد صفحه:۱۰۴**

کلیدواژه‌ها : حذف بار ترکیبی، شاخص پایداری ولتاژ، حذف بار فرکانسی، افت ولتاژ

روش‌های حذف بار فرکانسی سنتی که تنها وضعیت فرکانسی شبکه قدرت را در نظر می‌گیرند، در بعضی حوادث بزرگ و ترکیبی قادر به جلوگیری از ناپایداری نیستند. به منظور رفع این مشکلات اخیرا در برخی مقالات روش‌های حذف بار ترکیبی پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها روش حذف بار فرکانسی و ولتاژی به نوعی ترکیب می‌شود. در این پایان‌نامه نیز یک روش حذف بار ترکیبی جدید ارائه می‌گردد. روش‌های قبلی حذف بار ترکیبی که حذف بار را با در نظر گرفتن همزمان وضعیت ولتاژی و فرکانسی سیستم انجام می‌دهند، بدون توجه به ابعاد اقتصادی سیستم را نجات می‌دهند، درحالی‌که ابعاد اقتصادی، بخش غیرقابل‌حذف از صنعت برق می‌باشد. ویژگی اساسی این پایان‌نامه، پیشنهاد الگوریتمی است که علاوه بر حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس، بهترین تنظیم را ازلحاظ اقتصادی برای رله‌ی حذف بار انتخاب می‌کند. به گونه‌ای که همزمان مقدار حذف بار کمینه و وضعیت پایداری ولتاژ و پایداری فرکانس سیستم پس از حذف بار به سمت بهترین حالت سوق داده می‌شود. وضعیت پایداری ولتاژ توسط شاخص استاندارد محلی L ارزیابی می‌گردد و رله‌ها از مقادیر محلی ولتاژ، فرکانس و جریان استفاده می‌کنند. طرح ارائه‌شده، سرعت، مکان و مقدار حذف بار بهینه را به‌صورت خودکار و تطبیق‌پذیر با شرایط افت ولتاژ و فرکانس تعیین می‌کند. طرح حذف بار ارائه‌شده، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار DIGSLIENT (DPL) به‌صورت بهینه تنظیم‌شده و عملکرد آن به ازای حوادث مختلف در یک شبکه‌ی واقعی مدل‌سازی شده در این نرم‌افزار بررسی‌شده است. نتایج شبیه‌سازی، بهبود عملکرد روش ارائه‌شده را نسبت به روش‌های قبلی نشان می‌دهد.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و طرح مسئله

۱-۱ کلیات ۱
۱-۲ خاموشی‌های سراسری ۲
۱-۳ پایداری سیستم قدرت ۴
۱-۴ حالات بهره‌برداری یک سیستم قدرت ۶
۱-۵ اصول کنترل فرکانس در شبکه‌های قدرت ۷
۱-۵-۱ دینامیک سیستم قدرت ۷
۱-۵-۲ راهکارهای کنترل و بازیابی فرکانس سیستم قدرت ۸
۱-۶-۱ بررسی پایداری ولتاژ سیستم ۱۰
۱-۶-۲ فروپاشی ولتاژ ۱۰
۱-۷ انواع طرح‌های حذف بار متداول ۱۱
۱-۷-۱ طرح حذف بار فرکانسی ۱۱
۱-۷-۲ طرح حذف بار ولتاژی ۱۲
۱- ۸ روش‌های حذف بار ترکیبی ۱۳
۱-۹ اهداف پایان‌نامه ۱۳
۱-۱۰ساختار پایان‌نامه ۱۴

فصل دوم: پایداری فرکانس و ولتاژ

۲-۱ اصول پایداری فرکانس ۱۵
۲-۱-۱ اهمیت پایداری فرکانس ۱۵
۲-۱-۲ ابزارهای حفظ فرکانس ۱۶
۲-۱-۳ بررسی پاسخ سیستم به اغتشاشات بار ۱۸
۲-۱-۴ خطرهای کارکرد در فرکانس کم ۱۹
۲-۱-۵ عوامل مؤثر بر کاهش فرکانس ۱۹
۲-۲ علل انجام بار زدایی ۲۰
۲-۳ حذف بار فرکانسی ۲۲

۲-۴ پایداری ولتاژ ۲۳
۲-۴-۱ معیارهای استاتیک تشخیص پایداری ولتاژ ۲۳
۲-۴-۲ تقسیم‌بندی پایداری ولتاژ ۲۷
۲-۴-۳ فروپاشی ولتاژ ۲۷
۲-۵ روش‌های مختلف کنترل ولتاژ ۲۹
۲-۶ حذف بار ولتاژی (بار زدایی کمبود ولتاژ) ۲۹

فصل سوم: مروری بر روش‌های حذف بار فرکانسی، ولتاژی و ترکیبی

۳-۱مقدمه ۳۱
۳-۲ شاخص‌های مورداستفاده رله‌های حذف بار فرکانسی ۳۲
۳-۲-۱ مقدار مطلق فرکانس ۳۲
۳-۲-۲ نرخ تغییرات فرکانس ۳۲
۳-۲-۳ میانگین نرخ تغییرات فرکانس $\Delta f/\Delta t$ ۳۳
۳-۳ انتخاب طرح حذف بار فرکانسی ۳۴
۳-۳-۱ امنیت و قابلیت اطمینان ۳۴
۳-۳-۲ رله فرکانسی اضافی برای منبع ولتاژ چندگانه ۳۴
۳-۳-۲-۱نظارت ولتاژ ۳۴
۳-۳-۲-۲ نظارت جریان ۳۵
۳-۳-۳ نظارت توان جهتی ۳۶
۳-۳-۴ نظارت نرخ تغییر فرکانس ۳۶
۳-۴ اثرات تغییرات ولتاژ بر حذف بار فرکانسی ۳۶
۳-۵ تنظیمات و معیارهای عملکرد ۳۷
۳-۵-۱ معیارهای عملکرد ۳۷
۳-۵-۲ دستورالعمل‌ها برای حذف بار فرکانسی غیر نرمال ۳۹
۳-۶ حذف بار کنترل‌شده‌ی ولتاژی ۴۰
۳-۶-۱ اصول اساسی برای حذف بار کنترل‌شده‌ی ولتاژی ۴۰
۳-۶-۱-۱ شبیه‌سازی حالت ماندگار(steady state) ۴۱
۳-۶-۱-۲ شبیه‌سازی دینامیکی(Dynamic) ۴۱
۳-۷ زمان حذف بار ولتاژی ۴۲
۳-۸ اطلاعات طراحی حذف بار ولتاژی ۴۲

۳-۹ تنظیم رله ۴۳
۳-۱۰ مسائلی در روش‌های حذف بار فرکانسی ۴۳
۳-۱۰-۱حذف بار دستی اسکادا ۴۴
۳-۱۰-۲حذف بار خودکار ۴۴
۳-۱۰-۳ محلی ۴۵
۳-۱۱ روش‌های بازیابی بار(load Restoration) ۴۵
۳-۱۲ رله‌های فرکانسی، اصول اندازه‌گیری و مشخصه‌ها ۴۶
۳-۱۲-۱ رله‌های الکترومکانیکی ۴۶
۳-۱۲-۲ رله‌های استاتیکی ۴۷
۳-۱۲-۳ رله‌های دیجیتال ۴۷
۳-۱۳ حذف بار فرکانسی ۴۷
۳-۱۳-۱ روش حذف بار فرکانسی متداول ۴۸
۳-۱۳-۲ حذف بار فرکانسی نیمه تطبیقی و تطبیقی ۵۰
۳-۱۴ حذف بار ولتاژی ۵۵
۳-۱۵ روش‌های حذف بار ترکیبی فرکانسی – ولتاژی ۵۷

فصل چهارم: مبنای نظری روش‌های حذف بار ترکیبی بهینه پیشنهادی

۴-۱ مقدمه ۶۳
۴-۲ مقایسه روش‌های حفاظتی محلی و متمرکز ۶۳
۴-۳ معرفی روش‌های حذف بار ترکیبی بهینه‌ی پیشنهادی ۶۴
۴-۳-۱ شاخص ارزیابی پایداری ولتاژ ۶۵
۴-۳-۲ ساختار رله‌ی حذف بار ترکیبی بهینه‌شده ۶۸
۴-۳-۲-۱ الگوریتم ۶۸
۴-۳-۲-۲ محاسبه شاخص ولتاژ (بخش دوم رله) ۷۰
۴-۳-۲-۳ تغییر شیب IdU (بخش سوم رله) ۷۲
۴-۳-۲-۴ تصمیم‌گیری برای حذف بار ترکیبی (بخش چهارم رله) ۷۳
۴-۳-۲-۵ تشکیل ناحیه عملکرد رله به روش منطقی ۷۴
۴-۳-۲-۶ تشکیل ناحیه عملکرد رله به روش تکه‌خطی ۷۵
۴-۳-۳ الگوریتم بهینه‌سازی ۷۶

فصل پنجم: شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد روش‌های حذف بار قبلی و روش پیشنهادی

۵-۱ مدل‌سازی و مدل گسترده شبکه ۷۹
۵-۱-۱ مدل‌سازی ژنراتور ۷۹
۵-۱-۲ مدل‌سازی تنظیم‌کننده ولتاژ ژنراتورها ۷۹
۵-۱-۳ مدل‌سازی محرک اولیه ژنراتورها ۸۰
۵-۱-۴ مدل‌سازی بارها ۸۱
۵-۲ شبکه نمونه موردمطالعه ۸۳
۵-۳ طراحی روش حذف بار فرکانسی متداول برای شبکه خراسان ۸۵
۵-۴ طراحی روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی ۸۷
۵-۵ طراحی روش حذف بار ترکیبی بهینه‌ی پیشنهادی ۸۸
۵-۶ نتایج شبیه‌سازی ۸۸
۵-۷ تحلیل نتایج شبیه‌سازی ۹۵

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۷
۶-۲ پیشنهادها ۹۸
مقاله ارائه شده مستخرج از پایان‌نامه ۹۹
فهرست منابع ۱۰۰
چکیده انگلیسی ۱۰۴

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل ۱-۱ طبقه‌بندی و انواع پایداری سیستم قدرت ۵
شکل ۱-۲ حالات بهره‌برداری از سیستم قدرت ۷
شکل ۱-۳ مدل سیستم قدرت ۸
شکل ۱-۴ تغییرات فرکانس با رزرو چرخان کافی ۹
شکل ۱-۵ نوسانات فرکانس با رزرو چرخان ناکافی ۹
شکل ۱-۶ نرخ تغییرات فرکانس برحسب تولید ۱۰
شکل ۲-۱ کاهش فرکانس ناشی از کمبود تولید ۲۰
شکل ۲-۲ مدار تک‌خطی سیستم ساده ۲۴
شکل ۲-۳ مشخصه توان – ولتاژ سیستم (مشخصه p-v) ۲۴
شکل ۲-۴ مشخصه‌های VR-PR با ضریب‌های مختلف توان بار ۲۵
شکل ۲-۵ مشخصه‌های مربوط به سیستم نشان داده‌شده با نسبت‌های مختلف ۲۶
شکل ۳-۱ میانگین نرخ تغییرات فرکانس ۳۳
شکل ۳-۲ نظارت ولتاژ با استفاده از مؤلفه‌های مجزا ۳۵
شکل ۳-۳ نظارت ولتاژ با استفاده از رله‌های میکروپروسسوری ۳۵
شکل ۳-۴ نقطه تنظیمی مجزا(پله‌ای) برای حذف بار و بازیابی بار ۴۶
شکل ۳-۵ روش حذف بار فرکانسی نیمه تطبیقی و تطبیقی ۵۲
شکل ۳-۶ بلوک دیاگرام روش ترکیبی ۵۹
شکل ۳-۷ عملکرد متد حذف بار برای یک رخداد نمونه ۶۰
شکل ۳-۸ بلوک دیاگرام متد حذف بار ترکیبی خطی ۶۱
شکل ۳-۹ مقایسه روش سهمی و خطی ۶۱
شکل ۳-۱۰ منحنی معیار نمونه در روش سه بعدی ۶۲
شکل ۴-۱ سیستم قدرت دو باسه ۶۶
شکل ۴-۲ ساختار کلی رله پیشنهادی ۶۹
شکل ۴-۳ بلوک دیاگرام محاسبه‌ی IdU بر اساس مرجع ۷۰
شکل ۴-۴ ولتاژ (U) سه باس شبکه خراسان پس از حادثه. ۷۱
شکل ۴-۵ شاخص ولتاژ (IdU) سه باس شبکه خراسان پس از حادثه. ۷۱
شکل ۴-۶ بلوک‌های تشکیل‌دهنده‌ی بخش سوم رله ۷۲
شکل ۴-۷ مثالی از تغییر شیب IdU برای حذف بار سریع‌تر ۷۳
شکل ۴-۸ ناحیه تعیین‌شده‌ی بهینه ۷۴
شکل ۴-۹ شاخص IdU برحسب فرکانس و مکان هندسی عملکرد رله به روش منطقی ۷۵
شکل ۴-۱۰ شاخص IdU برحسب فرکانس و مکان هندسی عملکرد رله به روش تکه‌خطی ۷۶
شکل ۴-۱۱ فلوچارت بهینه‌سازی ۷۸
شکل ۵-۱ مدل تنظیم‌کننده ولتاژ IEEE-DC1A ۸۰
شکل ۵-۲ مدل IEEE-G1 برای محرک اولیه ژنراتور ۸۱
شکل ۵-۳ مدار معادل حالت گذرای موتور ۸۳
شکل ۵-۴ دیاگرام تک‌خطی شبکه خراسان ۸۴
شکل ۵-۵ فرکانس ژنراتورهای سیستم برای حادثه خروج واحدهای نیروگاه توس درروش حذف بار سنتی ۸۷

شکل ۵-۶ منحنی عملکرد رله به روش سه‌بعدی.....۸۷
شکل ۵-۷ مقایسه عملکرد روش‌های حذف بار به ازای حوادث مختلف.....۹۳
شکل ۵-۸ وضعیت ولتاژ و فرکانس بعد از وقوع حادثه شماره ۲ با استفاده از حذف بار متداول.....۹۴
شکل ۵-۹ وضعیت ولتاژ و فرکانس بعد از وقوع حادثه شماره ۲ با استفاده از حذف بار ترکیبی بهینه‌ی پیشنهادی....۹۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ نمونه‌ای از طراحی حذف بار فرکانسی متداول..... ۵۰
جدول ۵-۱ اطلاعات کلی شبکه خراسان..... ۸۵
جدول ۵-۲ تنظیمات حذف بار فرکانسی متداول..... ۸۶
جدول ۵-۳ محل و توان بارهای رله گذاری شده در شبکه خراسان به روش متداول..... ۸۶
جدول ۵-۴ حوادث در نظر گرفته‌شده در شبکه خراسان و حاشیه توان اکتیو شبکه پس از وقوع آن‌ها..... ۸۹

فصل اول

مقدمه و طرح مسئله

۱-۱ کلیات

تأمین برق مطمئن مصـــرف‌کنندگان از اهمیت بســـزایی برخوردار اســـت. به‌عبارتی‌دیگر کل تأسیسات، تجهیزات و هزینه‌های انجام‌شده به‌منظور تأمین برق موردنیاز مصرف‌کننده و در کنار آن جلب رضـایت وی می‌باشـد و لا غیر. در این راستا اقدامات اصولی جهت ایجاد شرایط مناسب برای انتقال و توزیع انرژی تولیدی و تحویل درسـت و سـالم آن به مشتری از ضروریات می‌باشد و لازمه اجرای این مهم توجه به پایداری سیستم قدرت است.

به‌طورکلی سیستم‌های قدرت در اثر شرایط اضطراری دچار حادثه خواهند شد، که این مسئله تأمین بار مطمئن را که از عمده تعهدات شـرکت‌های برق در برابر مشتریان است خدشه‌دار ساخته و گاهی ضـررهای اقتصـادی جبران‌ناپذیری را عمدتاً به سیستم قدرت و با ضریب کمتر به مشتری وارد می‌آورد. به‌منظور تأمین برق مطمئن لازم اسـت سیستم قدرت از وضعیت پایداری که از مهم ترین مســائل شــبکه قدرت می‌باشــد، برخوردار باشــد. لذا بایســت عوامل ایجادکننده ناپایداری شـناسایی‌شده، در وهله اول اقدامات پیشگیرانه جهت حفظ سیستم به عمل آید تا از خاموشی‌های موضعی و درنهایت خاموشی سیستم قدرت و در شرایط بسیار نامطلوب از نابودی سیستم جلوگیری شود و در صورت بروز حادثه از پیشروی آن ممانعت گردد.

یکی از عوامل به وجود آمدن ناپایداری مسـئله اضـافه‌بار در سـیسـتم قدرت می‌باشـد. چراکه اضـافه‌بار در خطوط انتقال باعث خارج شـدن خطوط دیگر خواهد شد. تداوم بیشتر اضافه‌بار باعث خارج شدن هرچه بیشتر خطوط و به وجود آمدن خاموشی کامل در سیستم می‌باشد، پس بایستی کاری کرد که بتوان این مشکل را پشت سر گذاشت.

حفظ پایداری ســـیســـتم‌های قدرت و جلوگیری از کاهش بیش‌ازحد فرکانس و ولتاژ بارها از عمده مسـائلی است که متخصصان این رشته همواره آن را مدنظر داشته‌اند زیرا ناپایداری فرکانس علاوه بر خسـارت‌های نسـبتاً سـنگین بر تجهیزات سیستم، ممکن است باعث تکه‌تکه شدن شبکه گردد و همچنین افت ولتاژ بارها امکان فروپاشی ولتاژ را در شبکه باعث گردد و خاموشی‌های نسبتاً طولانی و زیان‌های اقتصادی را به دنبال داشته باشد. لذا ازاین‌رو به هر طریق ممکن باید سعی شود

تـا از این مســـائـل جلوگیری گردد، حتی اگر این عمـل با انجام بار زدایی و قطع موقتی برخی از مصرف‌کننده‌ها همراه باشد[۱].

بار زدایی[1] به معنای قطع تعدادی از بارهای متصل به شبکه و به‌منظور اجتناب از آسیب دیدن تجهیزات خطوط انتقال و حفظ پایداری سـیستم و کنترل فرکانس و ولتاژ شبکه است. آنچه مسلم اســـت، این اســـت که بار زدایی ضـــمن کاهش درآمدهای اقتصـــادی باعث ایجاد نارضـــایتی در مصرف‌کنندگان می‌گردد و لذا سعی می‌شود از آن به‌عنوان آخرین راه‌حل و چاره در کنترل سیستم قدرت اسـتفاده گردد. اما در شـرایطی که حفظ پایداری مطرح باشـد طبیعی است که مسائل فوق تحـت‌الشـــعـاع قرار می‌گیرند و انجام بار زدایی ماهیت منطقی پیدا می‌کند[۲]. ذکر این نکته نیز ضروری است که بار زدایی یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای کنترل شبکه می‌باشد.

از طرفی در سـیسـتم‌های قدرت ایزوله به این نکته توجه کرد که این سیستم‌ها خودشان امنیت و قابلیت اطمینان و صرفه‌جوئی الکتریکی را فراهم می‌کنند و باید بی‌نیاز از بقیه سیستم‌ها این کار را انجام دهند. درنتیجه توجه بیشتری به طراحی حذف بار نیاز است[۳].

۱-۲ خاموشی‌های سراسری

در سال‌های اخیر با خصوصی شدن صنعت برق و محدودیت‌های اقتصادی در راه توسعه زیرساخت‌های صنعت برق، استفاده بهینه از ظرفیت‌های موجود موردتوجه شرکت‌های برق قرارگرفته است و سیستم‌های قدرت با رزرو کمتر و حاشیه پایداری کمتر بهره‌برداری می‌شوند؛ بنابراین حاشیه امنیت شبکه‌ها در مقابل انواع ناپایداری کاهش‌یافته و تأثیر خود را به‌صورت خاموشی‌های متعدد که در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا اتفاق افتاده نشان داده است. این خاموشی‌ها به دلایل متعددی از قبیل پرباری خطوط، افت فرکانس، ناپایداری ولتاژ، عملکرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی و غیره اتفاق افتاده است. بررسی خاموشی‌های سال‌های اخیر، نشان می‌دهد که در بسیاری از حوادث، ناپایداری ولتاژ و فرکانس به‌طور همزمان در سیستم به وقوع پیوسته و منجر به خاموشی شده است. همچنین در بسیاری از حوادث، الگوریتم‌های حذف بار که وظیفه جلوگیری از خاموشی را دارند، به‌درستی عمل‌نکرده‌اند. تحلیل موسسه NERC[2] نشان داده که حدود ۷۰٪ از اغتشاشات گسترده‌ی سیستم که گزارش‌شده‌اند، عملکرد غلط رله‌ها یا سیستم‌های حفاظت خاص از عوامل تشدید اغتشاش بوده است. این اغتشاشات که با وقوع شرایط غیرعادی سیستم، آغاز می‌شود، با عملکرد نامناسب و نابجای سیستم حفاظت تشدید شده و درنهایت سبب ایجاد اغتشاشات بزرگ و گسترده می‌شوند [۴]. عدم‌کفایت و توانایی الگوریتم‌های سنتی طراحی‌شده برای حفاظت و تأمین امنیت سیستم قدرت در شرایط بهره‌برداری جدید، سبب توجه بیشتر به طرح‌های حفاظتی

1 Load Shedding
2 North American Electric Reliability Council

در سال‌های اخیر شده است. در ادامه نمونه‌هایی از خاموشی‌های سال‌های اخیر و عوامل وقوع آن‌ها را عنوان می‌کنیم.

خاموشی ۴ نوامبر ۲۰۰۶ شبکه اروپا (UCTE[1]) که علت آن بهره‌برداری نامطمئن از شبکه و ناکارآمدی سیستم حذف بار فرکانسی عنوان‌شده است [۵].

خاموشی ۱۲جولای ۲۰۰۴ شبکه یونان که علت اصلی حادثه ناپایداری ولتاژ بیان‌شده است[۶].

خاموشی ۲۸ سپتامبر ۲۰۰۳ شبکه ایتالیا که عوامل متعددی مانند پرباری بیش‌ازحد خطوط، اتصال کوتاه خطوط به درختان، عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس، ناپایداری ولتاژ و نهایتاً افت فرکانس در این خاموشی مؤثر بودند[۷].

در خاموشی ۲۳ سپتامبر ۲۰۰۴ شبکه‌های جنوب سوئد و شرق دانمارک، علت حادثه ناپایداری ولتاژ عنوان‌شده است [۸].

در بررسی خاموشی ۱۴ اوت ۲۰۰۳ شبکه آمریکای شمالی، مهم‌ترین عامل مؤثر در حادثه، اتصال کوتاه خطوط به درختان و ازکارافتادن سیستم هشدار در مرکز کنترل بیان‌شده که منجر به خروج زنجیرهای خطوط و واحدهای تولیدی سیستم گردید تحلیل‌های بعد از حادثه نشان داد که در صورت وجود سیستم‌های حذف بار ولتاژی و فرکانسی مؤثر، این حادثه به‌راحتی قابل‌پیشگیری بود[۹].

خاموشی قسمتی از شبکه پتوماک در منطقه واشینگتن در تاریخ ۲۰ ژوئن ۱۹۹۷ که عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس و تنظیم نامناسب رله‌های حذف بار فرکانسی مهم‌ترین علل این حادثه می‌باشند[۱۰].

خاموشی ۱۳۸۰ شبکه ایران[۱۱]: سال ۱۳۸۰ یکی از بزرگ‌ترین خاموشی‌های تاریخ شبکه ایران به وقوع پیوست.

خطای اتصال کوتاه در خط انتقال ۴۰۰kv که شمال کشور (استان مازندران) را به قسمت مرکزی ایران (استان‌های سمنان و تهران) متصل می‌نماید، به وقوع پیوست. این خط یکی از دو خط انتقال موازی ۴۰۰ کیلوولت می‌باشد که منبع تولید بزرگی در شمال کشور (نیروگاه نکا) را به قسمت مرکزی ایران شامل تهران، که مرکز بار بزرگی محسوب می‌شود، متصل می‌نماید. خط موازی دیگر در زمان وقوع خطا، برای تست‌های حفاظتی برنامه‌ریزی‌شده سالانه، خارج از سرویس بود. با وقوع خطا و قطع خط به‌وسیله رله‌های حفاظتی، انتقال توان از خطوط انتقال دیگری که شمال را به مرکز متصل می‌نماید افزایش یافت. افزایش توان انتقالی از قائم به کلان و نکا به حسن کیف منجر به‌اضافه بار در این خطوط گردید. درنتیجه، این دو خط، مدت‌زمان کوتاهی پس از رفع خطای خط ۴۰۰ کیلوولت قطع شدند. بدین ترتیب، تمامی لینک‌های ارتباطی نیروگاه نکا به استان تهران قطع و دو ناحیه کاملاً ایزوله شدند. در پی این اغتشاش، اگرچه سیستم انتقال به‌هم‌پیوسته سعی در

1 Union for the Coordination of Transmission of Electricity

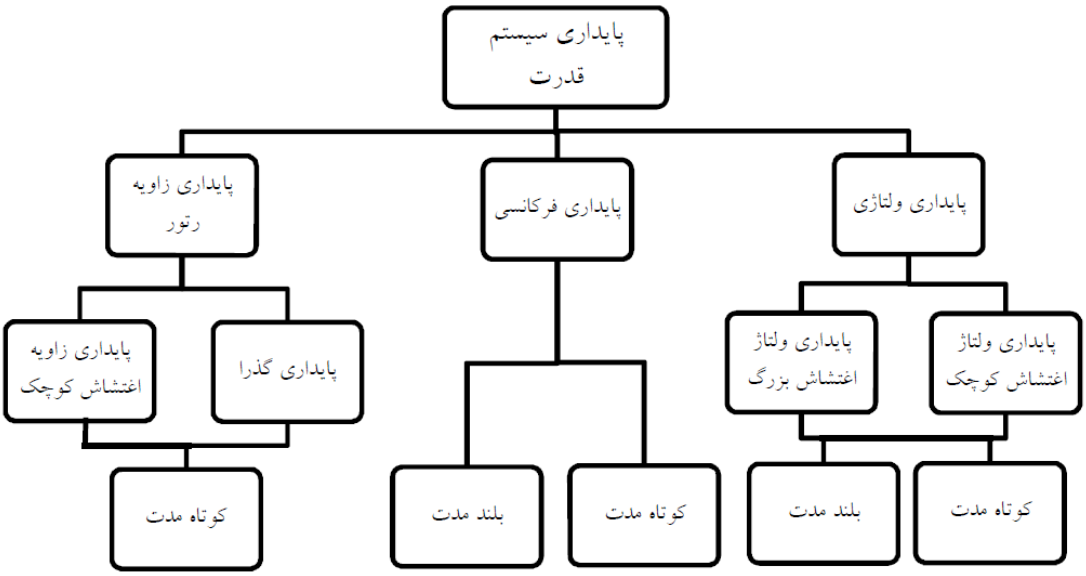
توزیع دوباره تولید داشت، ولتاژ و فرکانس سیستم شروع به افت نمود؛ بنابراین برخی رله‌های حفاظتی سیستم به شرایط افت ولتاژ واکنش نشان داده و به‌صورت خودکار برخی از خطوط انتقال سیستم را قطع نمودند. بعلاوه، به دلیل سوء عملکرد برخی تجهیزات حفاظتی، بخش‌هایی از شبکه شامل برخی خطوط انتقال مهم، متحمل اضافه‌بار شدند. فرکانس شبکه به دلیل کمبود تغذیه توان کاهش یافت. واکنش‌های زنجیروار و تریپ‌های اشتباه توسط برخی تجهیزات حفاظتی به همراه حذف بار ناکافی رله‌های فرکانسی، منجر به خاموشی گسترده شبکه گردید. تقریباً تمامی قسمت‌های شبکه ملی و استان‌های کشور این خاموشی را تجربه کردند که به مدت چند ساعت به طول انجامید.

۱-۳ پایداری سیستم قدرت

خاموشی‌های بزرگ زیادی که به دلیل ناپایداری سیستم به وقوع پیوسته است، نشان از اهمیت موضوع پایداری برای عملکرد ایمن سیستم قدرت دارد. با توجه به گسترش اتصالات در سیستم‌های قدرت، استفاده از فنّاوری‌ها و کنترلرهای جدید و عملکرد سیستم تحت تنش زیاد، انواع مختلف ناپایداری سیستم به وقوع می‌پیوندد. این ناپایداری‌ها به شکل‌های مختلفی از قبیل ناپایداری ولتاژ، ناپایداری فرکانس، نوسانات بین ناحیه‌ای و یا ترکیبی از آن‌ها ظهور می‌کنند[۱۲].

پایداری سیستم قدرت، توانایی سیستم (با داشتن یک شرایط اولیه عملکردی) برای بازیابی عملکرد متعادل و پایدار پس از مواجهه با یک اغتشاش فیزیکی می‌باشد به‌نحوی‌که کل سیستم بدون عیب به کار خود ادامه دهد. چنانچه سیستم ناپایدار گردد، متغیرهای سیستم به‌طور تصاعدی افزایش و یا کاهش می‌یابند، به‌طور مثال، افزایش تصاعدی در تفاوت زاویه‌ای ژنراتورها یا کاهش تصاعدی در ولتاژ باس‌ها. شکل ۱-۱ طبقه‌بندی و انواع پایداری سیستم قدرت را نشان می‌دهد[۱۲].

طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت، تنها به‌منظور سهولت در شناسایی عوامل اصلی ناپایداری، اعمال ابزارهای تحلیلی مناسب و شناسایی راهکارهای تصحیحی صورت می‌گیرند. بااین‌حال، هیچ‌یک از انواع ناپایداری معمولاً به فرم خالص خود، اتفاق نمی‌افتد. این مسئله بخصوص در سیستم‌های تحت تنش شدید و برای رخدادهای متوالی، صحیح می‌باشد؛ زیرا با از دست رفتن یک نوع از پایداری سیستم، نهایتاً نوع دیگری ناپایداری نیز ممکن است به وقوع پیوندد[۱۲].
از میان انواع پایداری، در این پروژه پایداری فرکانس و ولتاژ موردتوجه می‌باشد.



شکل ۱-۱ طبقه‌بندی و انواع پایداری سیستم قدرت

پایداری فرکانسی، به توانایی سیستم قدرت در برقراری فرکانس پایدار در پی یک اغتشاش بزرگ که منجر به عدم تعادل شدید بین تولید و مصرف می‌شود، اطلاق می‌گردد که بستگی به توانایی بازیابی تعادل بین تولید و بار سیستم، با کمترین خروج غیرعمدی بار، دارد. ناپایداری ممکن است به فرم نوسان فرکانس باشد که درنهایت منجر به تریپ واحدهای ژنراتوری و یا بارها گردد. طی تغییرات فرکانس، زمان مشخصه پروسه‌ها و تجهیزات فعال‌شده، بین کسری از ثانیه (مربوط به پاسخ تجهیزاتی مانند رله‌های حذف بار فرکانسی و کنترل‌گر ژنراتورها و تجهیزات حفاظتی ژنراتورها) تا چندین دقیقه مربوط به پاسخ تجهیزاتی مانند محرک اولیه سیستم‌های تغذیه و رگلاتورهای ولتاژ بارها می‌باشد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود، پایداری فرکانسی به‌عنوان پدیده‌ای کوتاه‌مدت و نیز بلندمدت طبقه‌بندی می‌شود. مثالی از ناپایداری فرکانسی کوتاه‌مدت، شکل‌گیری جزیره‌ای با تولید ناکافی و حذف بار فرکانسی ناکافی می‌باشد، به‌نحوی‌که افت فرکانس سریعاً منجر به خاموشی جزیره طی چند ثانیه می‌گردد[۱۲]. در این پروژه، ناپایداری فرکانس از نوع کوتاه‌مدت، موردتوجه است.

پایداری ولتاژ به قابلیت سیستم قدرت در برقراری بازیابی ولتاژهای پایدار در تمامی باس‌های سیستم، پس از وقوع یک اغتشاش، اطلاق می‌گردد که بستگی به توانایی برقراری بازیابی تعادل بین تقاضای بار و تغذیه بار توسط سیستم، دارد. ناپایداری ممکن است به فرم افزایش و یا کاهش تصاعدی ولتاژ در برخی بارها باشد. پیامد ناپایداری ولتاژ می‌تواند به‌صورت از دست رفتن بار در یک ناحیه، تریپ خطوط انتقال یا تریپ المان‌های دیگر توسط تجهیزات حفاظتی و خروج‌های متوالی باشد. نیروی پیش برنده ناپایداری ولتاژ، معمولاً بارها می‌باشند؛ در پاسخ به اغتشاش، توان مصرفی بارها ابتدا کاهش‌یافته و سپس با عملکرد تنظیم لغزش موتورها، رگلاتورهای

ولتاژ سیستم توزیع، ترانسفورماتورهای تپ چنجردار و ترموستات‌ها، تمایل به بازیابی دارد. بارهای بازیابی شده، با مصرف بیشتر توان راکتیو منجر به افزایش فشار و کاهش بیشتر ولتاژ در شبکه فشارقوی می‌گردند. وضعیت افت پیش‌رونده ولتاژ که منجر به ناپایداری ولتاژ می‌گردد زمانی رخ می‌دهد که دینامیک بار تلاش به بازیابی توان مصرفی خود، فراتر از توانایی و ظرفیت شبکه انتقال و تولید متصل به آن، نماید.

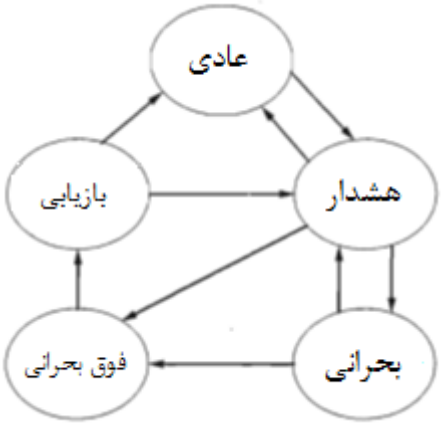
عامل مهمی که در ناپایداری ولتاژ نقش دارد، افت ولتاژی است که به دلیل عبور توان اکتیو و راکتیو از راکتانس اندوکتیو خطوط انتقال به وجود می‌آید. این امر، ظرفیت خطوط انتقال را برای انتقال توان و پشتیبانی ولتاژ، محدود می‌نماید. همچنین ممکن است انتقال توان و پشتیبانی ولتاژ توسط محدودکننده جریان ژنراتورها نیز ممکن است محدودشده باشد. پایداری ولتاژ، زمانی که وقوع اغتشاش منجر به تقاضای توان راکتیو فراتر از ظرفیت منابع توان راکتیو گردد، درخطر خواهد بود. دوره زمانی مطالعه مسئله پایداری ولتاژ بین چند ثانیه تا ده‌ها دقیقه متغیر است؛ بنابراین پایداری ولتاژ به‌عنوان پدیده‌ای کوتاه‌مدت و نیز بلندمدت شناسایی می‌شود. پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، شامل عملکرد دینامیکی سریع اجزای بار مانند موتورهای القایی، بارهای با کنترل الکترونیکی و مبدل‌های HVDC می‌باشد. دوره زمانی مطالعه کسری از ثانیه تا چند ثانیه می‌باشد. پایداری ولتاژ بلندمدت، شامل تجهیزات با دینامیک کندتر، مانند ترانسفورماتورهای تپچنجردار، بارهای کنترل‌شده با ترموستات و محدودکننده جریان ژنراتور، می‌باشد[۱۲].

همان‌طور که پیشتر عنوان شد، اگرچه تمایز بین انواع مختلف ناپایداری برای شناسایی دلایل اساسی مسئله به‌منظور توسعه راهکارهای طراحی و عملکردی مناسب ضروری می‌باشد، اما چون این ناپایداری‌ها مستقل از هم نیستند، همواره باید پایداری کلی سیستم قدرت مدنظر قرار گیرد؛ بنابراین به هنگام ارائه یک الگوریتم، بایستی عملکرد آن در حضور دیگر انواع ناپایداری سنجیده شود و مفید و مخرب بودن اثر الگوریتم به دیگر انواع ناپایداری سنجیده شود.

۱-۴ حالات بهره‌برداری یک سیستم قدرت

به‌منظور بررسی قابلیت اطمینان سیستم قدرت و طراحی سیستم‌های مناسب کنترلی، مفید است اگر حالات بهره‌برداری سیستم را به پنج حالت، عادی[۱]، هشدار[۲]، بحرانی[۳]، فوق بحرانی[۴] و بازیابی[۵]، تقسیم کرد. شکل ۱-۲ این حالت‌ها و نیز نحوه انتقال از یک حالت به حالت دیگر را به تصویر کشیده است.

1 Normal
2 Alert
3 Emergency
4 In Extremes
5 Restoration



شکل ۱-۲ حالات بهره‌برداری از سیستم قدرت[۱۳].

۱-۵ اصول کنترل فرکانس در شبکه‌های قدرت

عملکرد سیستم قدرت نیازمند برابری توان تولیدی با مجموع توان مصرفی و تلفات می‌باشد. درگذر زمان نقطه‌ی کار سیستم قدرت همواره تغییر می‌کند و بنابراین ممکن است فرکانس و توان تخصیص داده‌شده به واحدها دچار انحرافاتی شود. این انحرافات می‌تواند باعث ایجاد تأثیرات ناخواسته‌ای در شبکه شود. کنترل بار فرکانس[۱] به همراه کنترل خودکار تولید[۲] یکی از مهم‌ترین راهکارها می‌باشد[۱۳] . اهداف اصلی کنترل بار فرکانس را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود[۱۳]:

- اطمینان از صفر بودن انحراف فرکانس
- حداقل کردن انحرافات ناخواسته‌ی توان در خطوط بین ناحیه‌ای تعقیب مناسب بار و اغتشاشات

وقتی بارها به‌صورت گسترده و تجمیع شده در سیستم قدرت وجود داشته باشند، می‌توانند باعث نوسانات شدید فرکانس شوند. این کنترل دائماً در سیستم قدرت انجام می‌گیرد تا سیستم را پایدار نگه دارد ولی در برابر اغتشاشات سخت برای حفظ پایداری شبکه راهگشا نیست و چنانچه سیستم به موقعیت بحرانی برسد، بار زدایی است که می‌تواند سیستم را نجات دهد.

۱-۵-۱ دینامیک سیستم قدرت

سیستم قدرت مشابه یک سیستم مکانیکی در حال چرخش رفتار می‌کند. توان مکانیکی حاصل از آب و بخار، گشتاور مکانیکی T_{mech}، متصل به توربین ژنراتور را می‌سازد.
ژنراتور توان مکانیکی را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. باری که به ژنراتور متصل است گشتاور الکتریکی T_{elec} را روی شافت ایجاد می‌کند. تغییر در تقاضا و تولید موجب انحراف سرعت ژنراتور

1 Load frequency Control (LFC)
2 Automatic Generation Control (AGC)