

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی برق قدرت

عنوان:

**بارزدایی با استفاده از رله های زیر فرکانس به منظور جلوگیری از
خاموشی شبکه در سیستم قدرت**

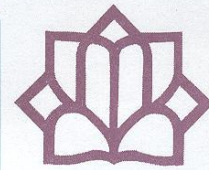
استاد راهنما:

دکتر عباس کتابی

توسط:

مسعود حاجی اکبری فینی

خرداد ماه ۱۳۹۲



دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:
پوست:

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صور تجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی: مسعود حاجی اکبری فینی	شماره دانشجویی: ۸۹۱۳۵۱۰۰۰۳
رشته: مهندسی برق	دانشکده: مهندسی
عنوان پایان نامه: "پارزدایی با استفاده از رله های زیر فرکانس به منظور جلوگیری از خاموشی شبکه در سیستم قدرت"	
تعداد واحد پایان نامه: ۶ واحد	تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۰۳/۰۴

این پایان نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارائه می گردد. دفاع از پایان نامه در تاریخ ۱۳۹۲/۰۳/۰۴ مورد تأیید و ارزیابی هیات داوران قرار گرفت و با نمره ۱۹,۵۷ و درجه عالی به تصویب رسید.

اعضاء هیات داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر عباس کتابی	دانشیار	
۲- استاد داور داخل دانشگاه	دکتر حمیدرضا محمدی	استادیار	
۴- استاد داور داخل از دانشگاه	دکتر محسن رحیمی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دکتر حمیدرضا محمدی	استادیار	

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه

آدرس: کاشان-پلوار قطب راوندی

کد پستی: ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

تلفن: ۵۵۵۱۱۳۰-۵۵۵۱۱۳۰ دو رنکار

http://www.kashanu.ac.ir

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاورانی دلسوز و خداکار

و پشتیبانانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

پس فراوان ایزدمنان را که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. در اینجا بر خود لازم می دانم که از تمامی اساتید بزرگوار دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد که حسب وسع خویش از دانش ایشان بهره برده ام، قدردانی نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر عباس کتابی که راهنمایی اینجانب را در انجام این پژوهش و نگارش این پایان نامه تسلیل نموده اند سپاسگزار می نمایم.

همچنین از آقایان دکتر محسن رحیمی و دکتر حمیدرضا محمدی به عنوان اساتید داور که در جلسه دفاع اینجانب شرکت نموده و این پایان نامه را مورد مطالعه قرار داده اند تشکر می نمایم.

چکیده

فرکانس یکی از کمیت های مهم سیستم قدرت است که اگر از محدوده مجاز خارج شود، می تواند عملکرد تجهیزات الکتریکی، توربین ها و ژنراتورها را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین نگه داشتن فرکانس در محدوده مجاز اهمیت ویژه ای دارد. در شرایط عادی، کنترل فرکانس توسط کنترل کننده های بار-فرکانس انجام می شود. اما اگر نرخ افت فرکانس زیاد باشد، این کنترل کننده ها توانایی فراهم کردن توان لازم برای متوقف کردن افت فرکانس را نداشته و نیاز به بکارگیری طرح بارزدایی خواهد بود. در سال های اخیر رخدادهای زیرفرکانس متعددی در سرتاسر جهان روی داده است. مرور این رخدادهای نمایانگر اهمیت طرح های بارزدایی زیرفرکانس در حفظ پایداری سیستم است.

در طول دهه های اخیر، طرح های بارزدایی زیرفرکانس متعددی ارائه شده است. نسل اول این طرح ها، بارزدایی سنتی می باشد که بدون توجه به مقدار کسری توان با عبور فرکانس از مقادیر آستانه، مقدار از پیش تعیین شده ای بار را قطع می نماید. در نتیجه ممکن است بار قطع شده بیشتر یا کمتر از مقدار لازم باشد و فرکانس در مقداری خارج از محدوده مجاز قرار گیرد.

بنابراین در نسل بعدی بارزدایی سعی شد تا بارزدایی بر اساس مقدار کسری توان تخمین زده شده، انجام شود. در مقالات روش های متعددی برای بارزدایی وفقی ارائه شده است. در برخی از این روش ها بارزدایی تنها بر اساس اطلاعات فرکانس صورت می گیرد و در برخی دیگر از ولتاژ نیز به همراه فرکانس استفاده می شود. مشکل اصلی این طرح های بارزدایی، وابستگی آنها به تعدادی پارامترهای سیستم می باشد. یعنی تغییر این پارامترها می تواند عملکرد این طرح های بارزدایی را تحت تاثیر قرار دهد. پس ارائه طرح بارزدایی که مستقل از پارامترهای سیستم باشد، بسیار سودمند است.

در این پایان نامه دو طرح بارزدایی زیرفرکانس ارائه شده است. در یکی از طرح ها، پس از وقوع اغتشاش برای مدت کوتاهی از فرکانس نمونه برداری شده و با استفاده از آن حداقل فرکانس تخمین زده می شود. سپس بر اساس حداقل فرکانس تخمین زده شده، بارزدایی انجام می شود. در طرح دیگر با استفاده از مشتق فرکانس در لحظه پس از وقوع اغتشاش، کسری توان تخمین زده می شود و بارزدایی براساس کسری توان تخمینی در چهار مرحله صورت می گیرد. یکی از مزیت های طرح های بارزدایی پیشنهادی عملکرد مناسب آنها با تغییر پارامترهای سیستم است. همچنین اگر در حین بارزدایی نیز یک کسری توان اضافی رخ دهد، طرح های پیشنهادی قابلیت مقابله با آن را دارند. با شبیه سازی های انجام شده در نرم افزار متلب، کارایی طرح های بارزدایی پیشنهادی، در سیستم های قدرت مرسوم و ریزشبکه ها به اثبات رسیده است.

کلمات کلیدی: بارزدایی زیرفرکانس - ریزشبکه - کسری توان - منابع تولید پراکنده

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱
۱	مقدمه
۲-۱	۱-۱. مقدمه.....
۲-۱	۲-۱. مروری بر پیشامدهای زیر فرکانس.....
۸-۱	۳-۱. مدل مرتبه پایین برای بررسی پاسخ فرکانسی سیستم قدرت.....
۱۹-۱	۴-۱. مدل مرتبه پایین برای بررسی پاسخ فرکانسی ریز شبکه.....
۱۹-۱	۱-۴-۱. مدل توربین بادی.....
۲۰-۱	۲-۴-۱. مدل فتوولتاییک.....
۲۲-۱	۳-۴-۱. مدل پیل سوختی.....
۲۲-۱	۴-۴-۱. مدل دیزل ژنراتور.....
۲۲-۱	۵-۴-۱. مدل آکوا الکترو لایزر.....
۲۳-۱	۶-۴-۱. مدل سیستم ذخیره ساز باتری.....
۲۳-۱	۷-۴-۱. انحراف توان و فرکانس در ریز شبکه.....
۲۴-۱	۵-۱. نتیجه گیری.....
۲۵	فصل ۲
۲۵	مروری بر روش های پیشنهاد شده برای بارزدایی زیرفرکانس
۲۶-۲	۱-۲. مقدمه.....
۲۷-۲	۲-۲. بارزدایی سنتی.....
۳۰-۲	۳-۲. محدودیت های روش سنتی برای تنظیم رله های زیرفرکانس.....
۳۱-۲	۴-۲. بارزدایی وفقی.....
۳۹-۲	۵-۲. نتیجه گیری.....
۴۰	فصل ۳
۴۰	روش های بارزدایی پیشنهادی
۴۱-۳	۱-۳. مقدمه.....
۴۱-۳	۲-۳. بارزدایی زیرفرکانس با تخمین حداقل فرکانس سیستم.....
۴۲-۳	۲-۲-۳. پاسخ فرکانسی سیستم پس از وقوع اغتشاش.....
۴۴-۳	۳-۲-۳. تخمین مینیمم فرکانس با استفاده از الگوریتم PSO.....
۴۸-۳	۴-۲-۳. محاسبه کسری توان و انجام بارزدایی.....
۵۰-۳	۳-۳. بارزدایی براساس تخمین کسری توان بوسیله مشتق اول فرکانس.....

۴-۳. نتیجه گیری..... ۵۴

فصل ۴

نتایج شبیه سازی

۱-۴. مقدمه.....	۵۷
۲-۴. بررسی عملکرد طرح بارزدایی مبتنی بر تخمین مینیمم فرکانس.....	۵۷
۲-۲-۴. وقوع کسری توان $0/8$ P.U.....	۵۹
۳-۲-۴. وقوع کسری توان $0/8$ P.U. همراه با کاهش و افزایش ثابت اینرسی سیستم.....	۶۰
۴-۲-۴. افزایش کسری توان در حین بارزدایی.....	۶۳
۳-۴. بررسی عملکرد طرح بارزدایی مبتنی بر مشتق فرکانس.....	۶۴
۲-۳-۴. جدا شدن ریز شبکه از شبکه اصلی.....	۶۶
۳-۳-۴. کاهش توان تولیدی PV در حین پروسه بارزدایی.....	۶۶
۴-۳-۴. خارج شدن ژنراتور توربین بادی از مدار در حین بارزدایی.....	۶۷
۵-۳-۴. تغییر ثابت اینرسی سیستم.....	۶۸
۴-۴. نتیجه گیری.....	۷۱

فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵. نتیجه گیری.....	۷۳
۲-۵. پیشنهادات.....	۷۴

مراجع..... ۷۵

پیوست الف

الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

۱-الف. مقدمه.....	۷۹
۲-الف. منسبهای الگوریتم ازدحام ذرات.....	۷۹
۱-۲-الف. شبیه سازی رفتار دسته پرندهگان.....	۷۹
۱-۲-الف. بهینه سازی تابع.....	۸۱
۱-۲-الف. الگوریتم بهینه سازی.....	۸۲
۲-۱-۲-الف. معادلات الگوریتم PSO.....	۸۳
۳-۱-۲-الف. ازدحام ذرات.....	۸۴
۳-الف. مقایسه با محاسبات تکاملی.....	۸۵
۱-۳-الف. رقابت در مقابل همکاری.....	۸۶
۲-۳-الف. خط سیر ذرات.....	۸۶
۴-الف. برتری ها.....	۸۷
۵-الف. انتخاب پارامترها.....	۸۷

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۱۱	جدول ۱-۱. پارامترهای سیستم
۲۹	جدول ۱-۲. تنظیمات آزمایشی رله با استفاده از روش سنتی
۳۳	جدول ۲-۲. تاثیر تاخیر اندازه گیری فرکانس بر مشتق فرکانس
۴۲	جدول ۱-۳. پارامترهای انتخاب شده برای الگوریتم PSO
۵۸	جدول ۱-۴. پارامترهای سیستم قدرت
۵۹	جدول ۲-۴. نتایج عملکرد طرح بارزدایی مبتنی بر مینیمم فرکانس به ازای کسری توان ۰/۴ تا ۱ P.U.
۶۰	جدول ۳-۴. نتایج عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U.
۶۱	جدول ۴-۴. نتایج عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U. با افزایش پانزده درصدی 1/H شبکه
۶۱	جدول ۵-۴. نتایج عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U. با کاهش ده درصدی 1/H شبکه
۶۲	جدول ۶-۴. نتایج عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U. با کاهش پانزده درصدی 1/H شبکه
۶۵	جدول ۷-۴. پارامترهای منابع پراکنده موجود در ریزشبکه
۷۰	جدول ۸-۴. جزییات عملکرد طرح جدید با تغییر ثابت اینرسی

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱. انحراف فرکانسی در کالیفرنمای شمالی در اثر اغتشاش ۱۰ آگوست ۱۹۹۶	۴
شکل ۱-۲. دیاگرام نشان دهنده جزیره های ایجاد شده شبکه ایران در پی اغتشاش سال ۲۰۰۲	۶
شکل ۱-۳. پاسخ فرکانسی سیستم سه ماشینه پس از جزیره ای شدن	۸
شکل ۱-۴. سیستم کنترل فرکانس واحد متصل به شبکه	۹
شکل ۱-۵. سیستم گاورنر توربین	۹
شکل ۱-۶. مدل مرتبه کاهش مرتبه یافته پاسخ فرکانسی سیستم	۱۰
شکل ۱-۷. مدل مرتبه ساده شده پاسخ فرکانسی سیستم	۱۰
شکل ۱-۸. پاسخ فرکانسی سیستم به ازای کسری توان های متفاوت	۱۱
شکل ۱-۹. مشخصه افنی گاورنر	۱۲
شکل ۱-۱۰. تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای مقادیر مختلف R	۱۲
شکل ۱-۱۱. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف R	۱۳
شکل ۱-۱۲. تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای مقادیر مختلف H	۱۳
شکل ۱-۱۳. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف H	۱۴
شکل ۱-۱۴. تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای مقادیر مختلف T_R	۱۵
شکل ۱-۱۵. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف T_R	۱۵
شکل ۱-۱۶. تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای مقادیر مختلف F_H	۱۶
شکل ۱-۱۷. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف F_H	۱۶
شکل ۱-۱۸. تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای مقادیر مختلف D	۱۷
شکل ۱-۱۹. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف D	۱۸
شکل ۱-۲۰. انحراف فرکانسی به ازای مقادیر مختلف D با فرض ثابت بودن توان مکانیکی	۱۸
شکل ۱-۲۱. پاسخ فرکانسی سیستم با رفع کسری توان در $t=20s$ به ازای مقادیر مختلف D با فرض ثابت بودن توان مکانیکی	۱۹

- شکل ۱-۲۲. رابطه توان تولیدی توربین بادی با سرعت باد ۲۰
- شکل ۱-۲۳. تغییر نقطه حداکثر توان سلول خورشیدی با تغییر: الف) دما ب) شدت تابش ۲۱
- شکل ۲-۱. تاثیر عدم هماهنگی مناسب رله ها بر عملکرد طرح بارزدایی ۳۰
- شکل ۳-۱. افت فرکانس در اثر کسری توان ۴۳
- شکل ۳-۲. تخمین انحراف فرکانس تا سه ثانیه پس از وقوع اغتشاش به ازای کسری توان $0.2 P.U.$ ۴۵
- شکل ۳-۳. تخمین انحراف فرکانس تا سه ثانیه پس از وقوع اغتشاش به ازای کسری توان $0.4 P.U.$ ۴۵
- شکل ۳-۴. تخمین انحراف فرکانس تا سه ثانیه پس از وقوع اغتشاش به ازای کسری توان $0.6 P.U.$ ۴۶
- شکل ۳-۵. تخمین انحراف فرکانس به ازای کسری توان $0.2 P.U.$ ۴۷
- شکل ۳-۶. تخمین انحراف فرکانس به ازای کسری توان $0.3 P.U.$ ۴۷
- شکل ۳-۷. تخمین انحراف فرکانس به ازای کسری توان $0.4 P.U.$ ۴۸
- شکل ۳-۸. تخمین مقدار بارزدایی مورد نیاز برای نگه داشتن فرکانس در محدوده مجاز بر اساس مینیمم فرکانس ۴۹
- شکل ۳-۹. فلوچارت طرح بارزدایی با استفاده از تخمین مینیمم فرکانس ۴۹
- شکل ۳-۱۰. تغییر مشتق فرکانس در اثر تغییر بار و تولید ۵۲
- شکل ۳-۱۱. فلوچارت طرح بارزدایی مبتنی بر مشتق فرکانس ۵۴
- شکل ۴-۱. پاسخ فرکانسی سیستم پس از عملکرد طرح بارزدایی به ازای کسری توان های 0.4 تا $1 P.U.$ ۵۸
- شکل ۴-۲. مقایسه عملکرد طرح بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان $0.8 P.U.$ ۵۹
- شکل ۴-۳. مقایسه عملکرد طرح بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان $0.8 P.U.$ با افزایش پانزده درصدی $1/H$ شبکه ۶۱
- شکل ۴-۴. مقایسه عملکرد طرح بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان $0.8 P.U.$ با کاهش ده درصدی $1/H$ شبکه ۶۲
- شکل ۴-۵. مقایسه عملکرد طرح بارزدایی جدید و وفقی به ازای کسری توان $0.8 P.U.$ با کاهش پانزده درصدی $1/H$ شبکه ۶۲
- شکل ۴-۶. مقایسه عملکرد طرح بارزدایی جدید و وفقی به ازای وقوع یک کسری توان $0.2 P.U.$ ، 0.3 ثانیه پس از کسری توان $P.U.$ 0.8 اولیه ۶۳
- شکل ۴-۷. نمایش شماتیک ریز شبکه ۶۵
- شکل ۴-۸. عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی در هنگام جزیره ای شدن ریز شبکه ۶۶

- ۶۷ شکل ۴-۹. عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی با کاهش توان تولیدی PV در حین پروسه بارزدایی
- ۶۸ شکل ۴-۱۰. عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی با خارج شدن WTG از مدار در حین پروسه بارزدایی
- ۶۹ شکل ۴-۱۱. عملکرد طرح های بارزدایی جدید و وفقی با تغییر ثابت اینرسی ریزشبه
- ۷۰ شکل ۴-۱۲. عملکرد طرح بارزدایی جدید با تغییر ثابت اینرسی

فصل ۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

عوامل مختلفی می تواند باعث افت سریع فرکانس و ایجاد شرایط زیرفرکانس شود. در چنین شرایطی عدم عملکرد مناسب رله های زیرفرکانس ممکن است منجر به خاموشی شبکه شود. بررسی جزئیات این حوادث و عوامل بوجود آورنده آنها می تواند بسیار آموزنده باشد. در این فصل تعدادی از این حوادث که در سال های اخیر رخ داده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین برای بررسی پاسخ فرکانسی سیستم پس از وقوع حوادث مختلف که منجر به کسری توان و افت فرکانس می شود، وجود یک مدل ساده ضروری است. بنابراین در این فصل دو مدل پاسخ فرکانسی، یکی برای سیستم های قدرت مرسوم و دیگری برای ریزشبکه مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل ها می توانند برای بررسی کارایی طرح های بارزدایی که در فصل های بعد پیشنهاد می شود، مورد استفاده قرار گیرند.

۱-۲. مروری بر پیشامدهای زیر فرکانس

پس از وقوع خاموشی سراسری سال ۱۹۶۵، بکارگیری طرح های بارزدایی زیرفرکانس در تمام نواحی سیستم قدرت ایالات متحده توصیه شد [۱]. در حال حاضر طرح های بارزدایی در تمامی نواحی آمریکا به منظور جلوگیری از فروپاشی سیستم قدرت به کار گرفته شده اند. به عنوان مثال در شمال شرق آمریکا که هدف طرح بارزدایی به صورت زیر تعریف می شود [۲]:

هدف از به کارگیری طرح بارزدایی خودکار، پایدارنمودن فرکانس پس از وقوع یک پیشامد منجر به افت فرکانس در یک ناحیه با شناخت مشخصات تولید هر ناحیه می باشد. این طرح باید در هنگام وقوع

کسری توان هایی تا حداکثر ۲۵٪ بار، قابلیت متوقف نمودن افت فرکانس و بازگرداندن فرکانس به ۵۸/۵ هرتز در مدتی کمتر از ۱۰ ثانیه و به ۵۹/۵ هرتز در مدتی کمتر از ۳۰ ثانیه را داشته باشد.

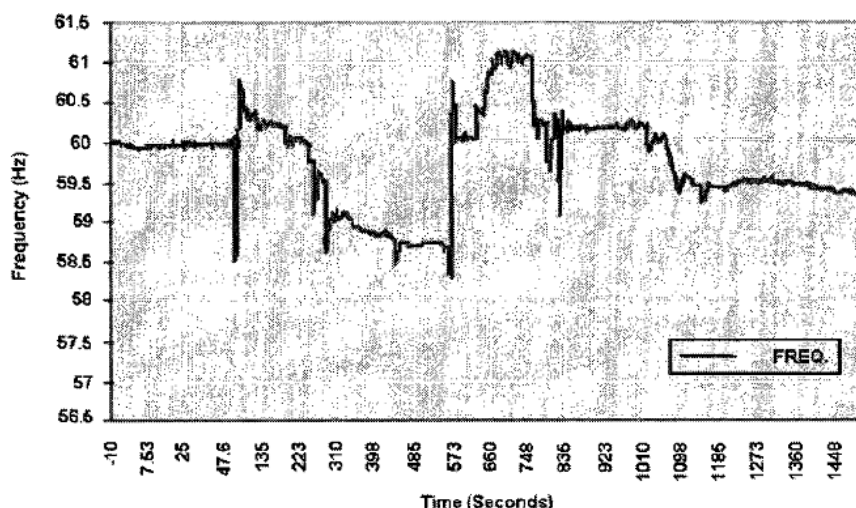
در ادامه به بررسی عملکرد رله های زیرفرکانس در هنگام وقوع اغتشاشاتی که در چند سال اخیر منجر به افت شدید فرکانس شده اند می پردازیم.

کسری توان ایجاد شده در ۱۰ آگوست ۱۹۹۶ منجر به قطع برق ۷/۵ میلیون مشترک بین چند دقیقه تا ۷ ساعت شده است. در اثر از دست رفتن پی در پی تولید، ۴ جزیره تشکیل شده است و کمترین فرکانس ثبت شده ۵۸/۳ هرتز می باشد. در هر جزیره افت فرکانس پس از انجام بارزدایی توسط رله های زیرفرکانس، متوقف شده است. در این پیشامد در اثر کسری توانی برابر ۲۷/۳GW، مقدار بار قطع شده توسط این رله ها ۳۰/۵GW بوده است. شکل (۱-۱) تغییرات فرکانس در جزیره کالیفرنیا شمالی را نشان می دهد.

همانطور که در شکل مشاهده می شود، بارزدایی زیرفرکانس در جلوگیری از وقوع خاموشی سراسری در جزیره موفق بوده است. اما به علت قطع بار بیش از حد نیاز، ۷۴۸ ثانیه پس از وقوع اغتشاش، فرکانس به ۶۱/۲ هرتز رسیده است. که این منجر به تریپ رله های اضافه فرکانس برخی از ژنراتورها شده است و فرکانس نهایتاً در مقدار ۵۹/۵ هرتز نشست کرده است. این مورد اهمیت تنظیم مناسب رله های زیرفرکانس را نشان می دهد. عدم تنظیم مناسب این رله ها می تواند منجر به افزایش فرکانس به بالاتر از حد مجاز و نهایتاً تریپ تعدادی از ژنراتورها منجر شود.

در بهار سال ۲۰۰۱ مهمترین خاموشی سراسری شبکه برق ایران رخ داد. این خاموشی ساعت ۱۶:۱۲ بعد از ظهر شروع شد و بازوصل کامل سیستم ۹ ساعت به طول انجامید [۳].

وقوع اتصال کوتاه روی یکی از دو خط ۴۰۰KV که وظیفه انتقال توان از نیروگاه نکا به مرکز ایران را بر عهده داشتند، منجر به قطع شدن این خط انتقال شد. قبل از وقوع خطا، ۵۵۰MW توان از نکا به آهوان منتقل می شده است. قطع شدن این خط، منجر به اضافه بار دیگر خطوط منتقل کننده توان از شمال به مرکز ایران شده است. توان های انتقالی از قائم به کلان و از نکا به حسن-کیف به ترتیب به مقادیر ۲۲۰MW و ۷۵۰MW افزایش یافته است که این باعث اضافه بار و در نتیجه قطع شدن هر دو خط شده است. در نتیجه تمامی خطوط انتقال توان از نیروگاه نکا به مرکز ایران قطع شده و این دو ناحیه ایزوله شده اند. این اتفاق باعث افزایش فرکانس در ناحیه شمال و کاهش آن در ناحیه جنوب شده است.



شکل ۱-۱. انحراف فرکانسی در کالیفرنیا شمالی در اثر اغتشاش ۱۰ آگوست ۱۹۹۶

پس از آن، تعدادی از خطوط انتقال در نتیجه افت شدید ولتاژ و فرکانس قطع شده اند. علاوه بر این در پی عملکرد اشتباه بعضی از تجهیزات حفاظتی، قسمتی از شبکه، شامل تعدادی از خطوط انتقال دچار اضافه بار شده اند. فرکانس شبکه نیز دچار افت شدید شده است. در چنین شرایطی، تریپ اشتباه چهار واحد تولید توان نیروگاه منتظر قائم در جنوب ایران باعث بغرنج تر شدن شرایط و فروپاشی قسمت جنوبی سیستم قدرت شد.

در این رخداد، واکنش های زنجیره ای و تریپ اشتباه بعضی تجهیزات حفاظتی همراه با انجام بارزدایی

کمتر از حد لازم توسط رله های زیر فرکانس منجر به فروپاشی بخش عمده ای از شبکه ایران شده است. تقریباً تمامی بخش های شبکه ایران و تمامی استان ها دچار خاموشی شده اند که این به مدت چند ساعت ادامه داشته است. شبکه برخی از استان های شمال شرق و شمال غرب کشور به صورت جزیره هایی مستقل توانستند تعادل بین تولید و مصرف را حفظ نمایند و پایدار ماندند. لازم به ذکر است که قبل از وقوع اغتشاش، توان از بعضی جزیره ها به بیرون منتقل می شده است. یعنی در این جزیره ها تولید بیش از مصرف بوده و پس از جزیره ای شدن توانسته اند با کاهش توان تولیدی، تعادل بین تولید و مصرف را حفظ نمایند.

در نوروز ۲۰۰۲ سیستم قدرت ایران یک خاموشی گسترده دیگر را تجربه کرد. فروپاشی سیستم در حدود ساعت ۲۱:۲۰ رخ داد [۴]. باید توجه نمود که پیک بار شبکه ایران در فصل تابستان می باشد و در

هنگام این خاموشی سیستم در شرایط بار پیک نبوده است.

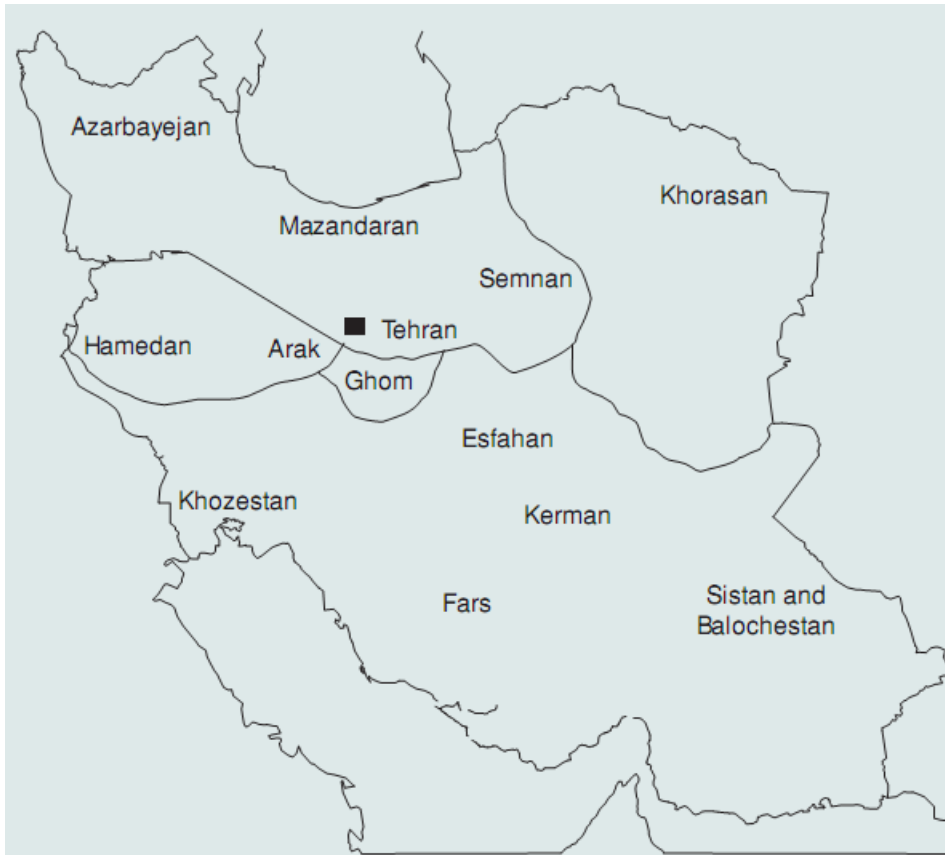
بررسی ها نشان می دهد که فروپاشی در اثر اتصال کوتاه خط انتقال 230 kV متصل کننده پست اراک و پست اراک ۲ آغاز شده است. پست اراک در مرکز ایران واقع شده است و یکی از پست های اصلی است که بخش های مختلف شبکه را به هم متصل می نماید. خطوط انتقال از طریق این پست $63\text{ kV}/230/400$ بخش های شمالی، جنوبی، غربی و مرکزی کشور را به هم متصل می نمایند. این پست دارای چهار ترانسفورماتور $230\text{ kV}/400$ و دو ترانسفورماتور $63\text{ kV}/230$ می باشد.

در هنگام وقوع خطا افت ولتاژ شدیدی در پست اراک ایجاد شده است. این نشان دهنده وقوع اتصال کوتاه در نزدیکی این پست می باشد. بررسی ها نشان می دهد که خطا به درستی توسط رله های خط انتقال خطادار تشخیص داده شده است. اما مدارشکن خط 230 kV در پست اراک عمل نکرده و در نتیجه دیگر تجهیزات حفاظتی سیستم به خطا واکنش نشان داده اند.

گزارش های منتشر شده نشان می دهد که در هنگام وقوع خطا، باس 230 kV دارای رله حفاظت باس بار نبوده است. همچنین مدارشکن های خطا دیده مجهز به رله عدم عملکرد مدارشکن نبوده اند. بنابراین به دلیل عدم عملکرد رله خط خطادار، حفاظت های پشتیبان در مکان دوردست با کمی تاخیر عمل کرده اند. در نتیجه تعدادی از خطوط انتقال قطع شده اند. برای نمونه: خط انتقال 230 kV متصل کننده اراک به نیروگاه قم و خط انتقال 230 kV متصل کننده پست های ساوه و شهید مفتح. با توجه به قطع شدن خطا با یک تاخیر ۱۰ تا ۱۵ سیکلی، ژنراتورها در این بازه شتاب گرفته اند و این تاخیر سیستم قدرت را به سمت ناپایداری سوق داده است.

همچنین رله های خطای زمین نصب شده در نوترال ترانسفورماتورهای $230\text{ kV}/400$ ، باعث تریپ مدارشکن های 400 kV و جدا شدن بخش خطادار از بقیه سیستم شده اند. قبل از قطع این ترانسفورماتور، تعدادی از خطوط انتقال 400 kV متصل به پست اراک از سمت دوردست قطع شده بوده اند.

پس از عملکرد رله ها و مدارشکن های مختلف، پست اراک بطور کامل ایزوله شده است. علاوه بر این، خطوط انتقال 400 kV که مراکز بار در قسمت های مرکزی را از طریق پست اراک به نیروگاه های جنوب کشور متصل می کنند، قطع شده اند. قطع تعداد زیادی از خطوط انتقال 400 kV و 230 kV که شالوده ی انتقال انرژی در شبکه ایران را تشکیل می دهند، باعث وارد شدن یک شک بزرگ به سیستم قدرت شده است. سیستم قدرت با بازآرایی انتقال توان به اغتشاش پاسخ داده است که این باعث اضافه بار



شکل ۱-۲. دیاگرام نشان دهنده جزیره های ایجاد شده در شبکه ایران در پی اغتشاش سال ۲۰۰۲

ترانسفورماتورهای ۲۳۰kV/۴۰۰ پست نیروگاه شهید مفتح و تریپ رله های اضافه جریان آنها شده است. سرانجام تریپ تعداد زیادی از رله های خطوط انتقال و پست ها، شبکه را به چهار جزیره مجزا تقسیم نموده است. دیاگرام ساده شده نشان دهنده این جزیره ها در شکل (۱-۲) آورده شده است [۴].

یکی از جزیره های بزرگ که جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی ایران را در بر می گرفت، مقدار زیادی توان (کمتر از ۲۰۰۰MW) به بقیه شبکه تحویل می داده است. پس از جزیره ای شدن، این جزیره با اضافه توان مواجه شده است و در نتیجه آن فرکانس به ۵۲Hz افزایش یافته و منجر به عمل نمودن رله های اضافه فرکانس می شود. بدین طریق، با قطع شدن بخشی از تولید، تعادل توان برقرار شده و فرکانس به نزدیکی مقدار نامی اش می رسد. در این ناحیه مشترکان چندان تحت تاثیر اغتشاش قرار نمی گیرند.

جزیره بزرگ دیگر شامل تهران، شمال غربی و بعضی از بخش های مرکزی کشور بوده است. این ناحیه توان از بقیه شبکه دریافت می کرده و پس از جزیره ای شدن با کسری توان و افت فرکانس مواجه

شده است. فرکانس به $47/5\text{Hz}$ کاهش یافته و منجر به عملکرد رله های زیرفرکانس شده است. اگرچه مقدار بار جدا شده کافی نبوده و بارزدایی نتوانسته است فرکانس سیستم را به محدوده مجاز بازگرداند. در نتیجه رله های زیرفرکانس ژنراتورها عمل کرده و این جزیره دچار خاموشی سراسری شده است. بازگردانی این بخش از شبکه بلافاصله آغاز شده است و برق تمامی مشترکین پس از چندین ساعت دوباره وصل شده است.

جزیره سوم در بخش غربی کشور شامل همدان در نزدیکی نیروگاه شهید مفتاح ایجاد شده است. در این ناحیه نیز بعضی از ژنراتورها در اثر تریپ رله های اضافه فرکانس عمل نموده و فرکانس سیستم به محدوده مجاز بازگردانده شده است.

ناحیه چهارم که یک جزیره کوچک است در بخش مرکزی ایران و در نزدیکی نیروگاه سیکل ترکیبی قم ایجاد شده است. یکی از واحدهای تولیدی این نیروگاه شامل دو توربین گازی و یک توربین بخار، بوسیله رله های اضافه فرکانس از مدار خارج شده اند. پس از آن جزیره با کسری توان مواجه شده و با قطع 30 MW بار توسط رله های زیر فرکانس، فرکانس به نزدیکی مقدار نامی رسیده است.

لازم به ذکر است که تنها خط انتقال متصل کننده شبکه خراسان به بقیه سیستم قدرت ایران را در بعضی از مواقع قطع می کنند. پیش از وقوع اغتشاش نیز این خط انتقال متصل نبوده است و شبکه خراسان تحت تاثیر اغتشاش قرار نگرفته است.

عامل اصلی این خاموشی سراسری، عدم قطع مدارشکن خط خطادار و در نتیجه قطع تعداد زیادی از خطوط انتقال پست اراک بوده است که در اثر آن شبکه به چهار جزیره تقسیم شده و در بعضی جزیره ها، عدم قطع بار به مقدار نیاز توسط رله های زیرفرکانس منجر به خاموشی تمام جزیره شده است.

در ۲۸ سپتامبر ۲۰۰۳ پیشامدهای متوالی در سیستم قدرت ایتالیا رخ داد: اتصال شاخه درخت منجر به قطع یکی از خطوط اصلی متصل کننده ایتالیا و سوئیس شده است. این اتفاق باعث اضافه بار تمام خطوط انتقال موازی و در نتیجه قطع تمام اتصالات اصلی بین شبکه ایتالیا و کشورهای همجوارش شده است. این وقایع باعث ایجاد کسری توان 6400 MW و افت سریع فرکانس شد. طرح بارزدایی زیرفرکانس نتوانست افت فرکانس را سریع متوقف نماید و تمام ژنراتورهای سیستم در اثر افت شدید فرکانس تریپ کردند و سیستم قدرت ایتالیا دچار خاموشی سراسری شد.

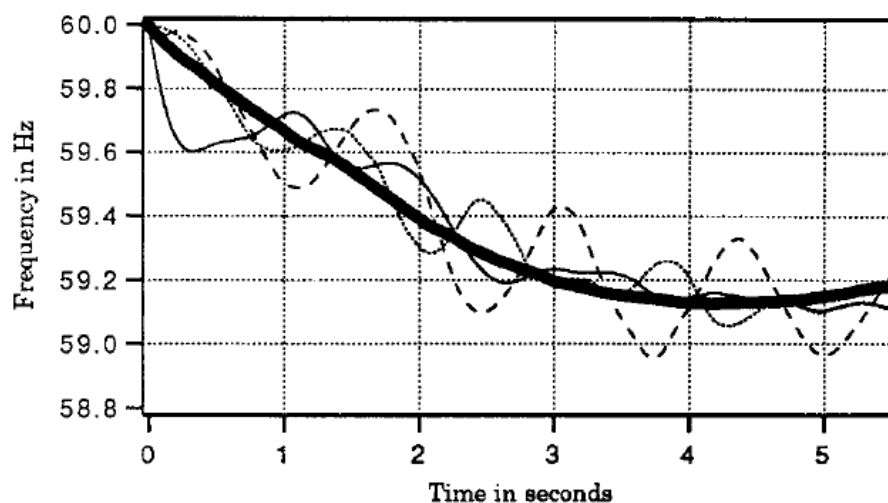
در ۱۵ می ۲۰۰۳، اصابت رعدوبرق باعث آسیب دیدن یک خط انتقال 345 kV نزدیک به یک نیروگاه بزرگ در شمال تگزاس شد. این اتفاق منجر به از دست رفتن تولید معادل 4500 MW و در نتیجه

کاهش فرکانس به ۵۹/۲۵ Hz شد. طرح بارزدایی برق ۴۰۰/۰۰۰ مشترک معادل ۲۰۲۰ MW را قطع نمود و مانع وقوع خاموشی سراسری شد.

۳-۱. مدل مرتبه پایین برای بررسی پاسخ فرکانسی سیستم قدرت

برای بررسی کارایی طرح های بارزدایی زیرفرکانس وجود یک مدل ساده که پاسخ فرکانسی سیستم را با دقت خوبی تخمین میزند، بسیار مفید است. در [۵] یک مدل مرتبه پایین برای تخمین پاسخ فرکانسی سیستم پیشنهاد شده است و در [۶] برای تخمین پاسخ فرکانسی سیستم از این مدل استفاده شده است. مبنای این مدل بدست آوردن فرکانس متوسط سیستم با صرفنظر از نوسانات سنکرون کننده بین ژنراتورهاست. در شکل (۳-۱) خط ضخیم نشان دهنده فرکانس متوسط و خطوط دیگر فرکانس در باس های ژنراتورهای سنکرون در یک سیستم ۳ ماشینه را نشان می دهد.

مدل پاسخ فرکانسی، رفتار دینامیکی متوسط تمام ماشین های سیستم را توسط یک ماشین معادل مدل می کند. در یک سیستم قدرت که اکثر نیروگاه ها از واحدهای بخار بازگرمایشی تشکیل شده اند، ما می خواهیم تمام این واحدها را بصورت یک واحد معادل که رفتار فرکانسی متوسط سیستم را بیان



شکل ۳-۱. پاسخ فرکانسی سیستم سه ماشینه پس از جزیره ای شدن