بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی برق

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق
گرایش کنترل

حذف بار هوشمند در سیستم های قدرت توسط الگوریتم تکاملی تفاضلی خود تطبیق

مؤلف :
مجتبی محسنی گوکی

استاد راهنما :
دکترعلی‌اکبر قره‌ویسی

استادمشاور :
دکتر محسن محمدیان

اسفندماه ۱۳۹۰

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو :مجتبی محسنی گوکی

استاد راهنما :دکتر علی‌اکبر قره‌ویسی

استاد مشاور :دکتر محسن محمدیان

داور ۱ :دکتر مسعود رشیدی نژاد

داور۲ :دکتر سید محمد علی محمدی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

آنانکه وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر

تقدیم به **مهربانترین مادر** و تقدیم به **صبورترین پدر**

تشکر و قدردانی:

سپاس خدای را که منت نهاد، هستی بخشید و توفیق کسب علم و دانش داد. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته ام برخود لازم می دانم از تمامی عزیزانی که در این پروژه از راهنمایی ها و مساعدت های ایشان بهره برده ام، قدر دانی نماییم.

بدین وسیله از کلیه اساتید گرانقدرم که در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی من بوده اند، بی نهایت سپاسگزارم؛بویژه از استاد گرامی **جناب آقای دکتر قره ویسی** که درس های بسیاری از ایشان گرفته ام، صمیمانه سپاسگزارم و لازم است از زحمات ایشان در انجام این پایان نامه حداکثر تشکر را داشته باشم. همچنین از **جناب آقای دکتر محمدیان** که از مشاوره های ایشان حداکثر بهره را برده ام، کمال قدردانی را دارم. در پایان از کلیه عزیزانی که تا بدین جا زحمات فراوانی را برایم کشیده اند تشکر می کنم؛ از خانواده خوبم که از آغاز تاکنون با تمام وجود برایم زحمت کشیده و همواره مشوق و پشتیبانم بوده اند. امید که توانسته باشم در سایه لطف خداوند گامی هر چند کوچک در راستای تعالی و توسعه کشورم بردارم.

مجتبی محسنی گوکی

۱۳۹۰

چکیده:

یکی از ملزومات اولیه کنترل هر سیستمی، تامین پایداری آن در شرایط کاری مختلف و بروز اختلال است و شبکه های قدرت نیز از این امر مستثنی نبوده و با توجه به اهمیت آنها این مهم دو چندان است.

حذف واحدهای مصرف یا اصطلاحا حذف بار(LS)[1] یکی از روش های اضطراری کنترل شبکه قدرت است که برای بازیابی تعادل سیستم در هنگام اختلالات شدید و زمانیکه ژنراتورها نتوانند تفاوت انرژی ایجاد شده در سیستم را جبران کنند، بکار گرفته می شود. روش های کلاسیک حذف بار همچون حذف بار دستی، حذف بار بوسیله رله آندرفرکانسی وحذف بار بوسیله رله آندرولتاژیاطلاعاتی از عملکرد کلی سیستم نداشته و مبتنی بر تجربه و سعی و خطا و یا پارامترهای محلی و ناهماهنگ با سایز اجزا می باشندکه می تواند منجر به حذف ناکافی یا بیش از اندازه بار شود.

در پایان نامه حاضر روشی برای مسئله حذف بار بصورت هوشمند ارائه گردیده است که در آن با در نظر گرفتن تابع هدف مبتنی بر کمینه حذف بار و ماکسیمم حاشیه پایداری و منظور نمودن محدودیت های بهره برداری و قابلیت اطمینان سیستم، سعی شده حذف باری بهینه و کارآمد داشته باشیم. برای بهینه سازی از الگوریتم ابتکاری[2] تکاملی تفاضلی خودتطبیق (SADE)[3]استفاده شد و روش پیشنهادی بر روی سیستم های ۱۴ و ۳۰ باس استاندارد IEEEتست گردید و در نهایت مقایسه ای با روش پیشنهادی و روش های موجود حذف بار و کارهای انجام شده در این زمینه صورت گرفت که نتایج بدست آمده نشاندهنده کارایی روش ارائه شده می باشد.

کلید واژه:حذف بار، بهینه سازی، الگوریتم DE.

[1]Load shedding
[2]Heuristic
[3]Self-Adaptive Differential Evolutionary Algorithm

فهرست مطالب

تشکر و قدردانی ه

چکیده و

فهرست مطالب ز

فهرست شکل ها ط

فهرست جداول ک

فصل اول. مقدمه ۱

فصل دوم. مروری بر روشهای حذف بار ۴

۲- ۱. مقدمه ۵

۲- ۲. مروری بر روش های حذف بار ۵

۲- ۲- ۱. حوادث پی در پی ۵

۲- ۲- ۲. استراتژی حذف بار یک روش کنترل اضطراری ۶

۲- ۲- ۲- ۱. زمان حذف بار ۷

۲- ۲- ۲- ۲. محل حذف بار ۱۱

۲- ۲- ۲- ۳. مقدار حذف بار ۱۳

۲- ۲- ۲- ۴. مدت زمان لازم برای حذف بار ۱۴

۲- ۲- ۳. روش های مرسوم حذف بار ۱۵

۲- ۲- ۳- ۱. حذف بار دستی ۱۵

۲- ۲- ۳- ۲. حذف بار بوسیله رله آندر فرکانسی ۱۵

۲- ۲- ۳- ۳. حذف بار بوسیله رله آندر ولتاژی ۱۷

۲- ۲- ۳- ۴. حذف بار بوسیله PLC ۱۷

۲- ۳. مروری بر کارهای انجام شده ۱۷

۲- ۴. جمع بندی ۱۹

فصل سوم. الگوریتم تکاملی تفاضلی خود تطبیق ۲۰

۳- ۱. مقدمه ۲۱

۳- ۲. مروری بر الگوریتم تکاملی تفاضلی ۲۱

۳- ۳. الگوریتم تکاملی تفاضلی خودتطبیق ۲۴

۳- ۳- ۱. روند الگوریتم ۲۴

۳- ۳- ۲. تست الگوریتم ۲۶

۳- ۴. جمع بندی ۲۸

فصل چهارم. حذف بار هوشمند با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی خود تطبیق .. ۲۹

۴- ۱. مقدمه ۳۰

۴- ۲. بیان مسئله حذف بار بهینه ۳۰

۴- ۲- ۱. فرمول بندی مسئله ۳۰

۴- ۳. پیاده سازی روش پیشنهادی ۳۲

۴- ۳- ۱. پیاده سازی بر روی شبکه ۱۴ باس IEEE ۳۳

۴- ۳- ۱- ۱. اختلال اول: خروج ژنراتور دوم و خط ۵- ۱ ..... ۳۴

۴- ۳- ۱- ۱. اختلال دوم: خروج خط ۲- ۱ ..... ۳۷

۴- ۳- ۲. پیاده سازی بر روی شبکه ۳۰ باس IEEE ۴۱

۴- ۲- ۱. اختلال: خروج خط ۲- ۱ ..... ۴۲

۴- ۴. جمع بندی ۴۶

فصل پنجم. جمع بندی و پیشنهادات ۴۷

۵- ۱. جمع بندی ۴۸

۵- ۲. پیشنهادات ۴۸

مراجع ۴۹

فهرست شکل ها

شکل (۲- ۱).حالات گذرای یک سیستم قدرت. ۱۰

شکل (۲- ۲). فرکانس شبکه بر حسب زمان و تغییرات H شبکه ۹

شکل (۲- ۲). فرکانس شبکه بر حسب زمان و تغییرات $P_{dist.}$ شبکه. ۹

شکل (۲- ۴). نمودار P-V در شرایط متفاوت بهره برداری ۱۰

شکل (۲- ۵). یک رله آندرفرکانسی نوعی ۱۷

شکل(۳- ۱). فلوچارت الگوریتم تکاملی تفاضلی ۲۲

شکل (۳- ۲). عملکرد SADEبر روی ذرات ۲۶

شکل (۴- ۱). فلوچارت حل مسئله حذف بار بهینه با استفاده از الگوریتم SADE. ۳۲

شکل (۴- ۲). شبکه ۱۴ باس استاندارد IEEE. ۳۴

شکل (۴- ۳). درصد حذف بار هر باس شبکه ۱۴ باس توسط روش پیشنهادی در اختلال اول ۳۵

شکل (۴- ۴). مقدار ولتاژ هر باس شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار توسط روش پیشنهادی در اختلال اول ۳۵

شکل (۴- ۵). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار با روش پیشنهادی در اختلال اول ۳۵

شکل (۴- ۶). میانگین تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۱۴ باس در اختلال اول ۳۷

شکل (۴- ۷). بهترین نتایج تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۱۴ باس در اختلال اول. ۳۸

شکل (۴- ۸). درصد حذف بار هر باس شبکه ۱۴ باس توسط روش پیشنهادی در اختلال دوم. ۳۹

شکل (۴- ۹). مقدار ولتاژ هر باس شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار توسط روش پیشنهادی در اختلال دوم ۳۹

شکل (۴- ۱۰). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار با روشپیشنهادی در اختلال دوم ۳۹

شکل (۴- ۱۱). میانگین تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۱۴ باس در اختلال دوم ۴۱

شکل (۴- ۱۲). بهترین نتایج تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۱۴ باس در اختلال دوم ۴۲

شکل (۴- ۱۳). شبکه ۳۰ باس استاندارد IEEE. ۴۳
شکل (۴- ۱۴). درصد حذف بار هر باس شبکه ۳۰ باس توسط روش پیشنهادی ۴۴
شکل (۴- ۱۵). مقدار ولتاژ هر باس شبکه ۳۰ باس بعد از حذف بار توسط روش پیشنهادی. ۴۴
شکل (۴- ۱۶). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۳۰ باس بعد از حذف بار با روش پیشنهادی ۴۴
شکل (۴- ۱۷). میانگین تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۳۰ باس ۴۷
شکل (۴- ۱۸). بهترین نتایج تابع هدف در ۱۰ بار اجرا برای شبکه ۳۰ باس ۴۷

فهرست جداول

جدول (۲- ۱). طرح حذف بار آندرفرکانسی شبکه ایران بر اساس دستورالعمل توانیر . . . ۱۶

جدول (۲- ۲). روند مسئولیت در شرایط آندرفرکانسی بر اساس دستورالعمل توانیر ۱۶

جدول (۳- ۱). توابع تست استاندارد ۲۶

جدول (۳- ۲). بهترین جواب بدست آمده برای توابع تست استاندارد بعد از ۱۰ اجرا ۲۷

جدول (۴- ۱). بهترین مقدار حذف بار در هر باس شبکه ۱۴ باس برای اختلال اول در ۱۰ بار اجرا ۳۶

جدول (۴- ۲). داه های باس های شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE(اختلال اول) ۳۶

جدول (۴- ۳). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE(اختلال اول) ۳۶

جدول (۴- ۴). بهترین مقدار حذف بار در هر باس شبکه ۱۴ باس برای اختلال دوم در ۱۰ بار اجرا. ۴۰

جدول (۴- ۵). داه های باس های شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE(اختلال دوم). ۴۰

جدول (۴- ۶). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۱۴ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE(اختلال دوم) ۴۱

جدول (۴- ۷). بهترین مقدار حذف بار در هر باس شبکه ۳۰ باس در ۱۰ بار اجرا ۴۵

جدول (۴- ۸). داه های باس های شبکه ۳۰ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE. ۴۵

جدول (۴- ۹). توان انتقالی بین خطوط شبکه ۳۰ باس بعد از حذف بار هوشمند توسط الگوریتم SADE. ۴۶

فصل اول

مقدمه

مقدمه:

امروزه با توجه به رقابتی شدن صنعت برق، بهره برداری شبکه های قدرت در بیشینه حد بارگذاری و کمینه حد پایدرای صورت می گیرد و با توجه به پیچیدگی ذاتی این شبکه ها، احتمال از دست رفتن پایدرای و خاموشی[1] جزئی یا حتی سراسری سیستم بسیار بالا می باشد که در خاموشی های ۱۹۷۸ ایتالیا و فرانسه، ۱۹۸۳ جنوب سوئد، ۱۹۹۹ برزیل، ۲۰۰۳ ایتالیا، کانادا و شمال آمریکا، ۲۰۰۵ روسیه و ۲۰۰۷ اسپانیا شاهد آن بودیم. در چنین شرایطی و برای جلوگیری از بروز خطاها و خروجی های پی در پی[2] و نتیجتا خاموشی گسترده سیستم یا جزیره ای شدن[3] آن، طراحی و بکارگیری روشهای تشخیص ناپایداری و روش های حفاظتی[4] به شکل کارآمد یکی از ضروریات حیاتی شبکه های قدرت است [۱- ۱۰].

عدم تعادل انرژی سیستم یا همان عدم تعادل تولید و مصرف (تقاضا و تلفات) ناشی از اختلالاتی چون خروج ژنراتور[5]، خروج خط[6]، خطا در المانها و تجهیزات شبکه و یا افزایش ناگهانی بار می باشد که سیستم را به حالت ناپایدرای برده (پخش بار واگرا می شود) و یک طرح حفاظتی با تشخیص شرایط غیر نرمال و بکارگیری روش های تصحیح کننده[7] ، سعی می کند سیستم را به حالت قابل قبول بهره برداری برگرداند [۲و۴].

تشخیص شرایط غیرنرمال می تواند بر اساس پارامترهای سیستم همچون فرکانس ولتاژ یا جریان باس ها، اندازه ولتاژ باس ها و توان عبوری خطوط و خروج آنها از محدوده مجاز و شاخص های پایداری چون نمودارهای P-V و مقادیر ویژه[8] ماتریس ژاکوبین پخش بار سیستم و یا مشاهده یک اختلال شدید همچون خروج ژنراتور و خروج یک فیدر اصلی، صورت گیرد. روش های کنترلی تصحیح کننده نیز به صورت تغییر در پارامترهای سیستم همچون تولید یا مصرف، تغییر تنظیمات تجهیزات کنترلی و یا تغییر در توپولوژی شبکه می باشد. همچنین تغییرات را می

[1] Black out
[2] Cascade failures and outages
[3] Islanding
[4] System protection schemes (SPS)
[5] Generator outage
[6] Line outage
[7] Corrective actions
[8] Eigen values

توان به شکل محلی[1] (یا اصطلاحا غیرمتمرکز) و یا با توجه به پیشرفت تکنولوژی مخابراتی و مانیتورینگ، به صورت گسترده[2] (یا اصطلاحا متمرکز) اعمال نمود [۱– ۵].

حذف واحدهای مصرف یا اصطلاحا حذف بار (LS) یکی از روش های کنترل اضطراری است که بعنوان آخرین استراتژی و زمانیکه سایر روش های کنترلی کارآیی نداشته باشند، بکار گرفته شده و شبکه را به حالت پایدار و با سطح انرژی پایینتر برمی گرداند [۲و۷]. موارد قابل تامل در مسئله حذف بار، زمان اعمال آن، مقدار حذف بار، محل حذف بار و مدت زمان لازم برای اجرای آن است.

در پایان نامه حاضر، مسئله حذف بار با هدف رسیدن به پایداری و محدودیت های بهره برداری و در عین حال کمینه حذف بار، به یک مسئله بهینه سازی غیر خطی مقید تبدیل می شود که با انواع روش های تحلیلی و ابتکاری قابل حل خواهد بود و انتخاب روش بستگی به دقت و سرعت مورد نیاز دارد که در این پایان نامه با توجه به اینکه کنترل آفلاین در نظرگرفته شده است، دقت جواب مورد توجه قرار گرفته است.

بنابراین پایان نامه حاضر را می توان در ۵ فصل تقسیم بندی نمود. فصل دوم اشاره ای به پایه های نظری حذف بار داشته و مروری بر روش های مرسوم حذف بار و کارهای انجام شده را شامل می شود. در فصل سوم مروری بر الگوریتم تکاملی تفاضلی صورت گرفته و سپس فرمول بندی و روندالگوریتم تکاملی تفاضلی خودتطبیق بیان گردیده است و در انتهای فصل عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی ۸ تابع تست استاندارد ارزیابی شده است. فصل چهارم شامل بیان مسئله حذف بار بهینه و روش پیشنهادی و در آخر پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه های ۱۴ و ۳۰ باس استاندارد IEEE می باشد و نهایتا فصل پنجم به نتیجه گیری و پیشنهاد اختصاص یافته است.

[1] Local
[2] Wide area schemes

فصل دوم

مروری بر روش های حذف بار

۲ – ۱. مقدمه

در این فصل سعی شده است ضرورت حذف بار تفهیم شده و مروری بر انواع روش های قابل تامل در مسئله حذف بار داشته باشیم. بنابراین در ابتدا مختصری درخصوص حوادث پی در پی بیان می گردد. سپس روش های ممکن و روش های متداول حذف بار توضیح داده شده و در پایان مروری بر یک سری مطالعات انجام شده در این زمینه در سال های اخیر آورده شده است.

۲ – ۲. مروری بر روش های حذف بار

بمنظور درک ضرورت مسئله حذف بار[1]، در این بخش ابتدا مروری بر خطاها و خروجی های پی رد پی[2] داریم. سپس جنبه های مختلف استراتژی حذف بار بررسی و مفاهیم مربوط به آن بیان می گردد و در آخر روش های مرسوم حذف بار و بیان نقاط قوت و ضعف آنها آورده شده است.

۲ – ۲ – ۱. حوادث پی در پی

عناصر سیستم های قدرت دارای محدودیت های الکتریکی و مکانیکی هستند و درصورتیکه در اثر اختلال ، عنصری بدلیل تخطی از محدودیت ها توسط تجهیزات حفاظتی از سیستم جدا شود در نتیجه تعامل موجود در شبکه و برقراری تعادل میان تولید و مصرف، سایر اجزاء بار آن تجهیز را متحمل می شوند و این می تواند باعث تخطی عنصر دیگری و روندی مشابه باشد و نتیجتا آغازگر خطاها و خروجی های پی در پی و اگر این روند کنترل نشود می تواند منجر به خاموشی[3] گسترده شبکه قدرت شود [۱۱و۱۲].

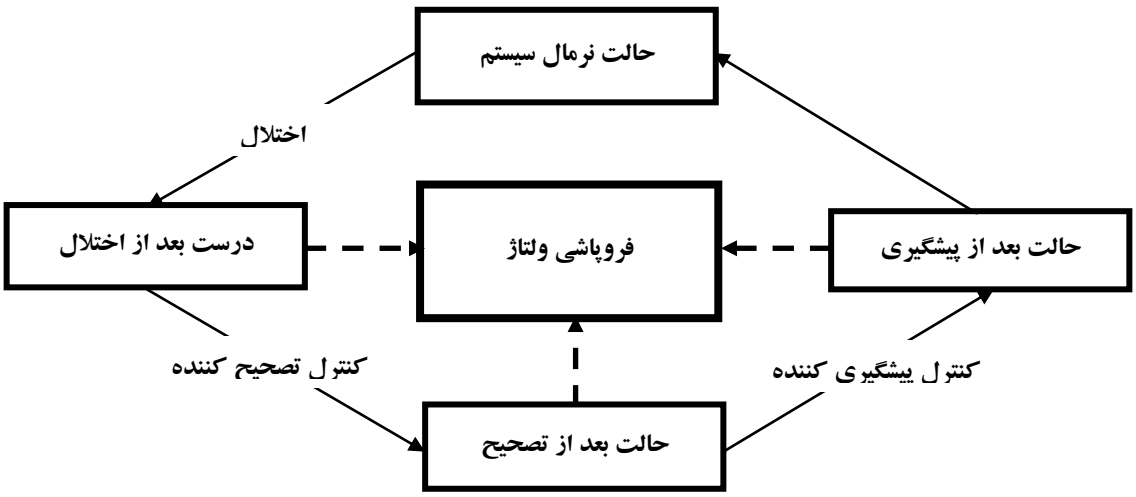
بطور معمول حوادث پی در پی در دو مرحله رخ می دهند؛ در ابتدا حوادثی کوچک واقع می شوند که با آنالیز های حالت ماندگار همچون شاخص های انحراف ولتاژ و فرکانس، توان انتقالی خطوط و شاخص های پایداری چون نمودار P-V یا مقادیر ویژه[4] ماتریس ژاکوبین پخش بار سیستم، قابل ارزیابی اند و در این مرحله است که می توان با طرح های حفاظتی[5] حادثه را

[1] Load shedding
[2] Cascade failures and outages
[3] Black out
[4] Eigen values
[5] System protection schemes (SPS)

کنترل کرد و در غیر اینصورت در مرحله دوم حوادثی بسیار سریع و شدید را خواهیم داشت که سیستم را به سمت خاموشی خواهند برد [۱۳و۱۴].

برای بررسی پدیده آشوبناک حوادث پی در پی می توان به مدل ها و تحلیل های مختلفی همچون مدل آبشاری[1]، تحلیل خطای پنهان رله ها[2]، تحلیل درخت تصمیم گیری دینامیک[3]، مدل OPA، مدل TRELSS و مدل Manchester اشاره کرد [۱۳و۱۵]. به عنوان مثال در مدل آبشاری اغتشاش اولیه بصورت اضافه بار d به ۱۰۰۰ عنصر اولیه کاملا برابر داده می شود و در صورت تخطی هر یک از عناصر از مقدار مجازش، این عنصر خارج شده و بار p به بار بقیه عناصر اضافه می گردد و این روند دنبال می شود [۱۵]. بر اساس ادعای مرجع [۱۳] این مدل ها و تحلیل ها هنوز فاصله زیادی تا حل مسئله حوادث پی در پی دارند.

در شکل (۲- ۱) روند حالات گذرای سیستم بعد از یک اختلال آورده شده است؛ همانطور که دیده می شود درست بعد از اختلال شدید در سیستم، اگر کنترل تصحیح کننده بصورت اورژانسی صورت نگیرد سیستم فرو خواهد پاشید. بعد از آن سیستم آرامتر شده و سپس باید با روش های جلوگیری کننده همچون تغییر تپ ترانس ها، تنظیمات رله ها و ... شبکه را به حالت نرمال و کاملا پایدار برگرداند.



شکل (۲- ۱). حالات گذرای یک سیستم قدرت

۲ - ۲ - ۲. استراتژی حذف بار یک روش کنترل اضطراری

[1] Cascade model
[2] Relay hidden failure analysis
[3] Dynamic decision-event tree analysis

همانطور که قبلا نیز گفته شد در سال های اخیر بدلیل خصوصی سازی و رقابتی شدن صنعت برق و هزینه بالای تجهیزات و گسترش شبکه، بهره برداری سیستم های قدرت در حاشیه پایداری و رزرو کمینه صورت می گیرد و لاجرم نیازمند روش های کنترلی کارآمدی است. استراتژی حذف بار بعنوان معمول ترین روش در زمانیکه سیستم دچار اختلال شدید گردد شناخته شده است. در روش حذف بار برای برگشتن شبکه به حالت پایدار که همان تعادل انرژی و برابری تولید و مصرف می باشد، قسمتی از بارهای شبکه به صورت دستی یا اتوماتیک از سیستم جدا می گردد. در این تکنینک چهار فاکتور زمان حذف بار، مقدار آن، محل حذف بار و مدت زمان لازم برای اجرای روش قابل بحث اند و کارایی این روش کنترل اضطراری منوط به درک و تعیین صحیح این چهار پارامتر است.

۲ – ۲ – ۲ – ۱. زمان حذف بار

اختلالات شدید همچون خروج ژنراتور (GO)[۱]، خروج خط (LO)[۲]، خطا در المانها و تجهیزات شبکه و یا افزایش ناگهانی بار باعث برهم خوردن تعادل انرژی در سیستم قدرت و ناپایداری آن می گردند و بصورت افزایش ناگهانی توان عبوری برخی از خطوط شبکه یا اصطلاحا تراکم[۳] خطوط و نتیجتا افت ولتاژ در بعضی باس ها نمود می یابد؛ همچنین افت فرکانس ولتاژ و جریان شبکه که ناشی از تغییرات انرژی در سیستم است از دیگر مشخصه های حالت اضطراری شبکه است که در تمام شبکه دیده خواهد شد.

از طرف دیگر شاخص های پایداری همچون نمودارهای P-V یا Q-V و یا مقادیر ویژه[۴] ماتریس ژاکوبین پخش بار سیستم می توانند تعیین کننده حالت ناپایدار سیستم باشند.

بنابراین در پاسخ به اینکه چه زمانی باید دست به روش کنترل اضطراری حذف بار زد می توان مشاهده یک اختلال شدید همچون خروج ژنراتور ها یا فیدر های اصلی شبکه و یا پارامترهای سیستم یعنی فرکانس، ولتاژ، تراکم خطوط و شاخص های پایداری را ملاک قرار داد. در ادامه مختصرا هر یک از این شاخص ها در تعیین زمان حذف بار مورد بحث قرار می گیرند.

۲ – ۲ – ۲ – ۱ – ۱. شاخص فرکانس شبکه در تعیین زمان حذف بار

[1] Generator outage
[2] Line outage
[3] Congestion
[4] Eigen values

رابطه (۲- ۱) [۱۶] که به معادله سوینگ[1] معروف است نشاندهنده تغییرات فرکانس زمانیکه انرژی مکانیکی ورودی ژنراتور از طریق محرکهای اولیه[2] کمتر از انرژی الکتریکی روی شفت آن است می باشد و به عبارت دیگر همان قانون سوم نیوتن.

$$\frac{2H}{f_0}\frac{df}{dt} = P_m - P_e = P_{dist.} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه فوق f_0 فرکانس نامی شبکه، P_m توان مکانیکی ورودی سیستم به پریونیت، P_e توان الکتریکی سیستم به پریونیت و $P_{dist.}$ نشاندهنده شدت اختلال به پریونیت است. H معرف ثابت اینرسی معادل سیستم می باشد که مجموع ثابت اینرسی تک تک ژنراتورهای فعال شبکه است و به عبارتی نشاندهنده انرژی جنبشی ذخیره شده در شفت توربین های واحدهای تولیدی بصورت پریونیت می باشد، رابطه (۲- ۲).

$$H = \sum_{i=1}^{N} H_i \quad , \quad H_i = \frac{W_{Ki}}{system\ base\ MVA} \qquad (۲-۲)$$

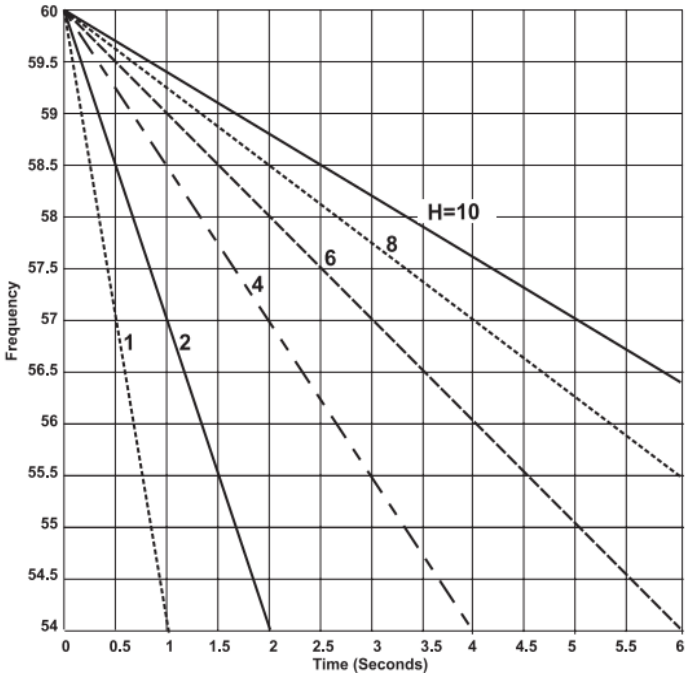
در رابطه (۲- ۲) W_{Ki} مجوع انرژی جنبشی توربین ژنراتور i ام می باشد.

از رابطه (۲- ۱) آشکار است که سرعت تغییر فرکانس $\frac{df}{dt}$ با شدت اختلال $P_{dist.}$ متناسب است. با اتگرال گیری از رابطه (۲- ۱) به رابطه (۲- ۳) می رسیم که $f(t)$ را بدست می دهد.

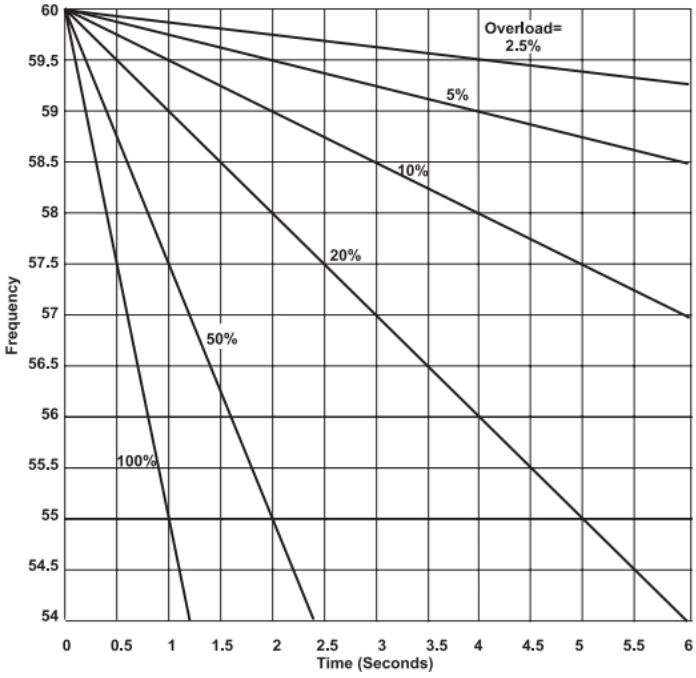
$$f(t) = f_{\,0}(1 + (\frac{P_{dist.}}{2H}t)) \qquad (۳-۲)$$

شکل های(۲- ۲) و (۲- ۳) تغییرات فرکانس سیستم را در نتیجه تغییرات $P_{dist.}$ و H به نمایش می گذارند.

[1] Swing equation
[2] Prime movers



شکل (۲- ۲). فرکانس شبکه بر حسب زمان و تغییرات H شبکه



شکل (۲- ۳). فرکانس شبکه بر حسب زمان و تغییرات $P_{dist.}$ شبکه

توجه شود شرایط آندرفرکانسی خصوصا در نیروگاه های گرمایی[1] که تجهیزات تغذیه کننده و جانبی آنها همچون پمپ های آب بویلر، زغال پودر کن ها، فن ها و ... از خروجی ژنراتور تغذیه می شوند، باعث کاهش کارایی این تجهیزات و نتیجتا کاهش مضاعف توان خروجی و آغاز حلقه ناپایدرای می گردد [۱۷].

۲ - ۲ - ۲ - ۱ - ۲. شاخص تراکم خطوط در تعیین زمان حذف بار

خطوط مجراهای انتقال توانند و در حالت نرمال آرایش تولید و مصرف به گونه ای است که محدودیت های گرمایی آنها یعنی بیشینه جریان عبوری و به عبارتی بیشینه توان رعایت می گردد. یک اختلال شدید می تواند این بالانس توان را بهم زده و نتیجتا باعث تراکم خطوط گردد؛ در این حالت احتمال عمل کردن تجهیزات حفاظتی خطوط چون رله های اضافه جریان، رله های دیستانس و ... بالا بوده و خارج شدن خط یعنی تشدید شرایط ناپایداری. بنابراین یکی از بارزترین نشانه های ناپایداری، تراکم غیر عادی یک یا چند خط از شبکه است.

۲ - ۲ - ۲ - ۱ - ۳. شاخص ولتاژ در تعیین زمان حذف بار

[1] Thermal power plants