



دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
گروه قدرت

# بارزدایی به روش فرکانسی در شبکه های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده

دانشجو: سیدمحمد محیطی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

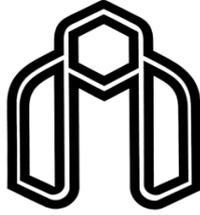
استاد مشاور:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

# بارزدایی به روش فرکانسی در شبکه های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده

دانشجو: سید محمد محیطی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۰۵۲/آ.ت.ب  
تاریخ: ۹۱/۱۲/۴  
ویرایش: \_\_\_\_\_

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:  
سید محمد محیطی رشته: برق گرایش: قدرت  
تحت عنوان: بارزدایی با روش فرکانسی در شبکه های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده  
که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز: ۱۹,۳۹  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	سید محمد باقر داد	۱- استاد راهنما
	رئیس	احمد رارابی	۲- استاد مشاور
	استادیار	مرتضی حسین	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	محسن اصغری	۴- استاد ممتحن
	استادیار	حمید رحمانی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:

تقدیم به:

خانواده عزیزم

## تشکر و قدردانی

وظیفه خود می‌دانم در ابتدا از اساتید راهنما و مشاور خود جناب آقایان دکتر مهدی بانژاد و دکتر احمد دارابی کمال تشکر را داشته باشم. همچنین از تمامی اساتیدگرامی و دوستانم در دانشگاه صنعتی شاهرود، خصوصا جناب آقایان مهندس هادی لمعی و مهندس جواد برسلانی تشکر می‌نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب .....سیدمحمد محیطی..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته .....برق / قدرت..... دانشکده .....برق و رباتیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه .... بارزدایی به روش فرکانسی در شبکه های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده.... تحت راهنمایی...دکتر مهدی بانژاد...متعهد می شوم .

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## تعهد نامه

اینجانب دکتر مصطفی شاهرود دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق و انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان:

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی برق - موضوع: تحلیل و طراحی سیستم های انرژی در شبکه های توزیع - تولید برق

تحت راهنمایی آقای دکتر مصطفی شاهرود متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

۹۱، ۱۱، ۲۹

تاریخ:

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

• متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

بارزدایی فرکانسی یکی از مهمترین سیستمهای حفاظتی، جهت حفظ پایداری سیستمهای قدرت در برابر کسری توان<sup>۱</sup> ناشی از اغتشاشات شدید است. امروزه با توجه به حضور مهم منابع پراکنده در بسیاری از شبکه‌های کوچک، مسئله حفظ فرکانس، خصوصاً هنگامی که میزان تقاضا از تولید بیشتر می‌شود اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است.

به منظور بهبود طرح‌های بارزدایی سنتی، تلاش‌های بسیاری جهت استفاده از شیب فرکانس بعنوان شاخصی برای تعیین میزان کسری توان در سیستم قدرت صورت گرفته است. استفاده همزمان از نرخ تغییرات فرکانس<sup>۲</sup> به همراه اندازه‌گیری لحظه‌ای فرکانس سیستم در روشهای بارزدایی فرکانسی به میزان قابل توجهی کارایی آنها را در تعیین میزان دقیق کسری توان افزایش داده و پروفایل فرکانس را بهبود بخشیده است. این تحقیق روشهایی را ارائه می‌کند که در آنها با اندازه‌گیری مداوم فرکانس و متوسط نرخ تغییرات فرکانس، مقدار بهینه‌ای از بار برای ثابت نگه داشتن فرکانس از سیستم قطع می‌شود. شبیه‌سازی دو سیستم تست نمونه جزیره‌ای و اجرای روشهای بارزدایی پیشنهادی بر روی آنها، کارایی روشهای پیشنهادی را در حذف مقدار بهینه‌ای از بار جهت پایداری فرکانس سیستم نشان می‌دهد. از ویژگی مهم این روشها می‌توان به سرعت آنها در قطع مقدار بهینه‌ای از بار در لحظه اغتشاش و بهبود پاسخ منحنی فرکانسی سیستم نسبت به طرح‌های مشابه اشاره کرد.

کلمات کلیدی: بارزدایی فرکانسی، شبکه‌های کوچک جزیره‌ای شده، مدل بار، نرخ تغییرات

فرکانس.

---

<sup>۱</sup> Power Deficit

<sup>۲</sup> Rate of Change of Frequency

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- [۱] سیدمحمد محیطی، مهدی بانژاد و احمد دارابی، " بارزدایی فرکانسی در سیستمهای توزیع جزیره‌ای شده با درنظر گرفتن مدل بار، " هفتمین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم-های قدرت، دانشگاه صنعت آب و برق، دی ماه ۱۳۹۱.
- [۲] سیدمحمد محیطی، مهدی بانژاد و احمد دارابی، " بارزدایی فرکانسی در سیستم های توزیع جزیره ای شده متصل به منابع تولید پراکنده "، پنجمین کنفرانس ملی نیروگاههای برق، نیروگاه اهواز، زمستان ۱۳۹۱.
- [۳] مهدی بانژاد، سیدمحمد محیطی و احمد دارابی ، " بارزدایی فرکانسی در سیستم های توزیع جزیره‌ای با استفاده از نرخ تغییرات فرکانس و مدل بار"، هجدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، اردیبهشت ۱۳۹۲.

## فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- تعریف موضوع	۲
۱-۲- مروری بر فصل های پایان نامه	۶
<b>فصل ۲: مقدمه ای بر بارزدایی و اهمیت آن در سیستمهای قدرت</b>	<b>۷</b>
۱-۲- مقدمه فصل	۸
۲-۲- مدل واحدهای تولیدی و تعیین معادله نوسان	۹
۳-۲- توزیع توان کسری بین ژنراتورهای سیستم	۱۲
۴-۲- عوامل تاثیر گذار بر فرکانس سیستمهای قدرت	۱۳
۵-۲- مشخصه های پاسخ فرکانسی سیستم قدرت	۱۶
۲-۵-۱- تاثیر اضافه بار و ثابت اینرسی سیستم بر روی پاسخ فرکانس	۱۷
۲-۵-۲- مشخصه فرکانسی در گشتاورهای ثابت بار و ژنراتور	۱۹
۶-۲- پیامدهای کاهش فرکانس	۲۳
۲-۶-۲- راهکارهای حفظ پایداری فرکانس	۲۵
۷-۲- اهداف و فلسفه بارزدایی فرکانسی	۲۶
۸-۲- انواع روشهای بارزدایی	۲۷
۱-۸-۲- بارزدایی ولتاژی (UVLS)	۲۷
۲-۸-۲- بارزدایی فرکانسی	۲۹
۳-۸-۲- نیازهای اساسی در طراحی بارزدایی فرکانسی	۳۲
۹-۲- روشهای بارزدایی فرکانسی متداول در سیستمهای قدرت	۳۷
۱-۹-۲- معیارهای بارزدایی فرکانسی در NERC	۳۹
۲-۹-۲- معیارهای بارزدایی فرکانسی در منطقه اروپای شمالی (Nordel)	۴۱
<b>فصل ۳: مروری بر کار دیگران در روشهای بارزدایی فرکانسی</b>	<b>۴۳</b>
۱-۳- مقدمه فصل	۴۴
۲-۳- بارزدایی فرکانسی در سیستمهای قدرت بزرگ	۴۴
۳-۳- بارزدایی فرکانسی در شبکه های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده	۴۸
۴-۳- مروری بر مدل های بار و تاثیر آنها بر روی بارزدایی	۵۲
۱-۴-۳- مفهوم بار در سیستم های قدرت	۵۲
۲-۴-۳- انواع مدل های بار	۵۴

- ۳-۴-۳- مقادیر نمونه پارامترهای مدل بار..... ۵۸
- ۳-۵- تاثیر تغییرات ولتاژ بر روی بارزدایی فرکانسی ..... ۵۹
- ۳-۶- اثر مدل بار بر تعیین دقیق میزان کسری توان ..... ۶۱

#### فصل ۴: طرح‌های بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی پیشنهادی ..... ۶۵

- ۴-۱- مقدمه فصل ..... ۶۶
- ۴-۲- نرخ تغییرات فرکانس (df/dt) ..... ۶۶
- ۴-۲-۱- متوسط نرخ تغییرات فرکانس ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ) ..... ۶۷
- ۴-۳- طرح بارزدایی فرکانسی تطبیقی پیشنهادی ..... ۶۸
- ۴-۳-۲- 4-3- سیستم تست نمونه شماره ۱ (قسمتی از سیستم توزیع دانمارک) ..... ۷۲
- ۴-۳-۳- نتایج شبیه سازی ..... ۷۵
- ۴-۳-۴- سناریو شماره ۱ (مدل استاتیکی بارها) ..... ۷۶
- ۴-۳-۵- سناریو شماره ۲ (مدل توان ثابت بارها) ..... ۷۸
- ۴-۳-۶- سناریو شماره ۳ (اولویت بندی بارها بر اساس  $K_{PV}$  کوچکتر) ..... ۸۰
- ۴-۳-۷- سناریو ۴ (اولویت بندی بارها بر اساس  $K_{PV}$  بزرگتر) ..... ۸۲
- ۴-۳-۸- تحلیل نتایج حاصل از بارزدایی فرکانسی تطبیقی ..... ۸۶
- ۴-۴- طرح بارزدایی فرکانسی نیمه تطبیقی پیشنهادی ..... ۸۸
- ۴-۴-۲- سیستم تست شماره ۲ (سیستم تست IEEE با ۳۷ فیدر) ..... ۹۱
- ۴-۵- نتایج شبیه سازی ..... ۹۳
- ۴-۵-۱- سناریو شماره ۱ (بارزدایی هنگام جزیره‌ای شدن) ..... ۹۴
- ۴-۵-۲- سناریو شماره ۲ (از مدار خارج شدن پیل سوختی در جزیره) ..... ۹۵
- ۴-۵-۳- سناریو شماره ۳ (بارزدایی برنامه ریزی شده) ..... ۹۷
- ۴-۵-۴- سناریو شماره ۴ (در نظر گرفتن مدل بار در اولویت بندی) ..... ۹۹
- ۴-۵-۵- تحلیل نتایج حاصل از بارزدایی نیمه تطبیقی ..... ۱۰۳
- ۴-۶- بارزدایی به روش نیمه تطبیقی برای سیستم تست شماره ۱: ..... ۱۰۴
- ۴-۶-۲- مقایسه بین دو روش بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی ..... ۱۰۶

#### فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۷

- ۵-۱- نتیجه گیری ..... ۱۰۸
- ۵-۲- پیشنهادات ..... ۱۰۸
- مراجع ..... ۱۰۹
- پیوست‌ها ..... ۱۱۲

## فهرست شکلها

- شکل (۱-۲) مدل سیستم قدرت [۵]. ..... ۹
- شکل (۲-۲) مشتق مرتبه اول فرکانس برای تک تک ژنراتورها و COI در طی نوسان داخلی ژنراتورها [۸]. ..... ۱۳
- شکل (۳-۲) تغییرات فرکانس با یک مقدار رزرو چرخان کافی [۵]. ..... ۱۴
- شکل (۴-۲) نوسانات فرکانس در پی یک اغتشاش و میزان رزرو چرخان ناکافی [۵]. ..... ۱۴
- شکل (۵-۲) نرخ تغییرات فرکانس در برابر انواع کسری توان [۵]. ..... ۱۵
- شکل (۶-۲) تغییرات فرکانس در برابر انواع اضافه بار [۷]. ..... ۱۶
- شکل (۷-۲) منحنی مشخصه فرکانس بعد از یک کسری توان ۵ درصدی [۹]. ..... ۱۸
- شکل (۸-۲) منحنی مشخصه فرکانس بعد از یک کسری توان ۱۵ درصدی [۹]. ..... ۱۹
- شکل (۹-۲) تغییرات فرکانس برای مقادیر مختلف اضافه بار در شرایط گشتاورهای بار و تولید ثابت [۷]. ..... ۲۰
- شکل (۱۰-۲) تاثیر ثابت اینرسی بر روی نرخ تغییرات فرکانس در حالتی گشتاور بار و تولید ثابت هستند [۷]. ..... ۲۱
- شکل (۱۱-۲) تاثیر مقادیر مختلف بارزدایی بر روی منحنی مشخصه فرکانس [۹]. ..... ۲۲
- شکل (۱۲-۲) اثر قطع اضافه بار سیستم در چندین مرحله بر روی منحنی مشخصه فرکانس [۹]. ..... ۲۳
- شکل (۱۳-۲) فرکانسهای تشدید توربین [۹]. ..... ۲۴
- شکل (۱۴-۲) نحوی اجرای بارزدایی ولتاژی توسط کنترلرها [۱۰]. ..... ۲۸
- شکل (۱۵-۲) تعداد مراحل بارزدایی را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود [۱۲]. ..... ۳۴
- شکل (۱۶-۲) تعداد مراحل بارزدایی را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود [۱۲]. ..... ۳۵
- شکل (۱-۳) رابطه خطی بین میزان کسری توان و کل مقدار بار قطع شده در فرایند بارزدایی [۸]. ..... ۴۷
- شکل (۲-۳) تاثیر حضور منابع تولید پراکنده در فرایند بارزدایی [۲۳]. ..... ۴۹
- شکل (۳-۳) اثر زمان تاخیر در پاسخ فرکانسی سیستم [۲۵]. ..... ۵۱
- شکل (۴-۳) مفهوم حساسیت نسبت به ولتاژ [۲۷]. ..... ۵۳
- شکل (۵-۳) اثر تغییرات ولتاژ بر روی میزان توان مصرفی مشخصه های مختلف بار [۲۸]. ..... ۵۷
- شکل (۶-۳) تغییرات توان اکتیو دو بار شماره ۱ و ۲ با تغییرات ولتاژ ..... ۶۰
- شکل (۷-۳) تغییرات ولتاژ سیستم در پی اغتشاش ..... ۶۰
- شکل (۱-۴) نحوی محاسبه متوسط نرخ تغییرات فرکانس [۵]. ..... ۶۷
- شکل (۲-۴) فلوچارت مربوط به روش بارزدایی پیشنهادی ..... ۷۱
- شکل (۳-۴) سیستم تست نمونه [۳۳]. ..... ۷۲
- شکل (۴-۴) سیستم تست نمونه شبیه سازی شده در نرم افزار DigSILENT ..... ۷۳
- شکل (۵-۴) فرکانس سیستم تست نمونه شماره ۱ در پی جزیره های شدن و بدون اجرای فرایند بارزدایی ..... ۷۵

- شکل (۶-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۱ ..... ۷۷
- شکل (۷-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲ ..... ۷۸
- شکل (۸-۴) پاسخ فرکانس سیستم در طی فرایند بارزدایی برای سناریوهای شماره ۱ و ۲ ..... ۷۹
- شکل (۹-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۳ ..... ۸۱
- شکل (۱۰-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴ ..... ۸۳
- شکل (۱۱-۴) پاسخ فرکانس سیستم در طی فرایند بارزدایی برای سناریوهای شماره ۳ و ۴ ..... ۸۴
- شکل (۱۲-۴) تغییرات توان تولیدی واحد CHP در طی فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۳ و ۴ ..... ۸۵
- شکل (۱۳-۴) تغییرات ولتاژ در باسهای ۹ و ۵ در طی فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۳ و ۴ ..... ۸۵
- شکل (۱۴-۴) فلوچارت استراتژی بارزدایی نیمه تطبیقی پیشنهادی ..... ۹۰
- شکل (۱۵-۴) سیستم توزیع نمونه IEEE با ۳۷ فیدر [۳۵] ..... ۹۳
- شکل (۱۶-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۱ ..... ۹۵
- شکل (۱۷-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲ ..... ۹۶
- شکل (۱۸-۴) تغییرات توان اکتیو واحد CHP در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲ ..... ۹۷
- شکل (۱۹-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۳ ..... ۹۸
- شکل (۲۰-۴) تغییرات توان اکتیو واحد CHP در طی فرایند بارزدایی سناریو شماره ۳ ..... ۹۸
- شکل (۲۱-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴ ..... ۱۰۱
- شکل (۲۲-۴) توان اکتیو واحد CHP در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴ ..... ۱۰۱
- شکل (۲۳-۴) فرکانس سیستم در طی بارزدایی برای سناریو شماره ۱ و ۴ ..... ۱۰۲
- شکل (۲۴-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۵ ..... ۱۰۵

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) مقادیری از ثابت های اینرسی نمونه برای واحدهای تولیدی [۷]..... ۱۲
- جدول (۲-۲) خلاصه ای از معیارهای بارزدایی فرکانسی در NERC [۵]..... ۳۸
- جدول (۳-۲) مراحل بارزدایی در FRCC [۱۵] . ..... ۴۰
- جدول (۴-۲) مراحل بارزدایی در MACC [۱۵] . ..... ۴۱
- جدول (۵-۲) برنامه کنترل فرکانس در سیستم Nordel [۵]..... ۴۲
- جدول (۶-۲) مراحل بارزدایی در سیستم Nordel [۵]..... ۴۲
- جدول (۱-۳) پنج توزیع مختلف کسری توان در مراحل بارزدایی [۸]..... ۴۶
- جدول (۲-۳) پارامترهای نمونه بار (IEEE,1993) [۲۷]..... ۵۹
- جدول (۳-۳) تاثیر تغییرات ولتاژ و فرکانس بر روی توان اکتیو و راکتیو بارهای مختلف [۵]..... ۶۱
- جدول (۱-۴) داده های مربوط به پیک بار سیستم تست شماره ۱ [۱۴]..... ۷۳
- جدول (۲-۴) جدول اولویت بندی بارها در سناریو شماره ۱..... ۷۶
- جدول (۳-۴) مقایسه بین مراحل بارزدایی در دو سناریو شماره ۱ و ۲..... ۷۹
- جدول (۴-۴) اولویت بندی بارها با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  برای سناریو ۳..... ۸۰
- جدول (۵-۴) اولویت بندی بارها با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  برای سناریو ۴..... ۸۲
- جدول (۶-۴) مقایسه بین مراحل بارزدایی در دو سناریو شماره ۳ و ۴..... ۸۴
- جدول (۷-۴) مقایسه بین مراحل بارزدایی در سناریوهای ۱ تا ۴ در روش بارزدایی تطبیقی..... ۸۷
- جدول (۸-۴) داده های مربوط به بارهای سیستم تست نمونه شماره ۲ [۳۵]..... ۹۲
- جدول (۹-۴) جدول اصلاح شده اولویت بندی بارهای سیستم تست شماره ۲ برای سناریو شماره ۲..... ۹۶
- جدول (۱۰-۴) جدول اولویت بندی بارهای سیستم تست شماره ۲ برای سناریو شماره ۴..... ۱۰۰
- جدول (۱۱-۴) مقایسه بین مراحل بارزدایی..... ۱۰۲
- جدول (۱۲-۴) اطلاعات مربوط به نرخ تغییرات متناسب با هر بار در سیستم تست شماره ۱..... ۱۰۴
- جدول (۱۳-۴) مقایسه بین میزان بار قطع شده در بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی..... ۱۰۵

## فصل ۱: مقدمه

## ۱-۱- تعریف موضوع

در سالهای اخیر با توجه به افزایش روز افزون تقاضای انرژی الکتریکی، سیستمهای قدرت در حال توسعه می باشند و ظرفیت تولید متناسب با افزایش بارهای سیستم افزایش می یابد، از اینرو اهمیت امنیت و پایداری سیستمهای قدرت بیش از پیش مطرح می شود. انتقال توانهای بالا در سراسر شبکه، نقطه بهره برداری خطوط انتقال را به سمت استفاده حداکثر از ظرفیت خطوط انتقال هدایت می کند، بعلاوه با توجه به مسائل اقتصادی، میزان رزرو چرخان در سیستم بسیار محدود می باشد. بنابر دلایل بیان شده هنگام وقوع اغتشاشاتی که منجر به کسری توان می شوند، سیستم های قدرت بیش از پیش در معرض فروپاشی<sup>۱</sup> قرار می گیرند. از طرفی مسئله تجدید ساختار صنعت برق و ایجاد رقابت بین تولید کنندگان باعث شده است که سیستمهای قدرت نزدیک به محدوده پایداری خود مورد بهره برداری قرار گیرند که این امر امنیت و پایداری سیستمهای قدرت را در پی اغتشاشات کوچک کاهش می دهد، همچنین تجدید ساختار صنعت برق مسئله تامین پیوسته انرژی الکتریکی مصرف کنندگان را به یک هدف مهم در میان تولید کنندگان تبدیل کرده است.

از اغتشاشات معمول که پایداری سیستم های قدرت را تهدید می کنند می توان به انواع خطاها، خروج واحدهای تولیدی و سوئیچ ناگهانی بارها (اضافه بار) اشاره کرد. این اغتشاشات در لحظه وقوع از لحاظ شدت بسیار متفاوت بوده و ممکن است برخی از آنها منجر به ناپایداری و در نهایت خاموشی سیستم شوند.

با توجه به مطالب بیان شده ضروری است که همواره فرکانس و ولتاژ سیستم را تحت نظر قرار داد. دو پارامتر مهم سیستم که همواره باید تحت نظر قرار بگیرند ولتاژ و فرکانس سیستم است که باید همواره در محدوده مجاز خود قرار گیرند تا از پایداری سیستم اطمینان حاصل شود. اساسا فرکانس با توان اکتیو و ولتاژ با توان راکتیو متناسب است. بطور ویژه فرکانس به اختلاف توان ایجاد شده بین تولید و مصرف بسیار وابسته می باشد. این اختلاف توان به علت اغتشاشاتی است که ظرفیت تولید را کاهش و یا میزان تقاضا را افزایش می دهد. بعنوان مثال با خروج ناگهانی

<sup>۱</sup> Blackout

یک واحد تولیدی و یا سوئیچ ناگهانی یک بار بزرگ و اتصال آن به شبکه تعادل بین تولید و مصرف از بین خواهد رفت و کسری توان ایجاد خواهد شد. در این شرایط اگر سایر واحدهای تولیدی قادر به تامین توان از دست رفته نباشند، فرکانس سیستم کاهش می یابد و برای بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز خود باید بارزدایی<sup>۱</sup> در سیستم انجام شود. بدلیل اهمیت حفظ پایداری سیستم های قدرت، بارزدایی موضوع مهمی در تحقیقات بشمار می آید.

امروزه بدلیل کاهش ذخایر سوختی و مسائل زیست محیطی و همچنین مسائل اقتصادی، استفاده از منابع تولید پراکنده بجای احداث واحدهای نیروگاهی حرارتی و خطوط انتقال توان مطرح شده است. هرچند استفاده از واحدهای تولید پراکنده<sup>۲</sup> (DG) در سیستم های قدرت به دلیل مزایای مختلف بهره برداری و اقتصادی مورد توجه فراوانی قرار گرفته است، اما با توجه به استانداردهای IEEE STD 929-2000 [۱] و IEEE STD 1547-2003 [۲] از موانع بسیار مهم توسعه این نوع منابع، مسئله چند تکه ای شدن یا جزیره ای شدن<sup>۳</sup> سیستم قدرت (قطع از شبکه اصلی) و پدیده های غیرمطلوب ناشی از آن مانند خروج از سنکرونیزم واحد می باشد. با این حال امروزه جهت بهبود امنیت و قابلیت اطمینان سیستم های توزیع، جزیره سازی تعمدی شبکه های توزیع متصل به منابع تولید پراکنده به یک موضوع و مبحث مهم تبدیل شده است.

در سالهای اخیر گروه برنامه ریزی IEEE 1547 یک سری پیشنویس های راهنما تحت عنوان P1547.4، جهت طراحی، بهره برداری و یکپارچگی سیستم های توزیع جزیره ای شده با سیستم های قدرت الکتریکی تهیه کرده اند که خدمتی جهت راهنمایی و استفاده از شرایط بهره برداری تعمدی از سیستم جزیره ای شده بعنوان یک سیستم قدرت الکتریکی می باشد. برای بهره برداری در حالت جزیره ای نیاز به ترکیب تکنولوژی دیجیتال پیشرفته و تجهیزات ارتباطی مطمئن و سریع در سیستم توزیع است [۳].

در لحظه ای که جزیره شکل می گیرد تا حد امکان سعی می شود تا از عدم تعادل به وجود آمده چه اضافه توان یا کاهش توان جلوگیری بعمل آید. در واقع بهره برداری از یک سیستم جزیره شده تعمدی، پیوستگی تغذیه را فراهم میکند که به موجب آن واحدهای تولید پراکنده باید بتوانند بصورت مستقل نقش شبکه را ایفا کرده و تغذیه همه شبکه را فراهم کنند. هرچند این چنین

<sup>۱</sup> Load Shedding

<sup>۲</sup> Distributed Generation

<sup>۳</sup> Islanding

شرایط بهره‌برداری در حال حاضر بدلیل پیامدهای زیان بار ناشی از فرایند جزیره ای شدن ممنوع می باشد، اما بهره برداری از این شرایط، افزایش نفوذ استفاده از منابع تولید پراکنده را در آینده نزدیک فراهم می کند و این امر می تواند منافع زیادی را عرضه کند.

اغتشاشات کوچک و گذرا ممکن است باعث ایجاد عدم تعادل ناچیزی بین توان تولیدی و توان مصرفی در سیستم قدرت گردد که در این شرایط نرخ کاهش فرکانس کند بوده و فرصت کافی به منظور عکس العمل سیستم گاورنر توربین وجود دارد. در این شرایط به عنوان مثال شیرهای مکانیکی دریچه‌های بخار ورودی به توربین، توسط گاورنر به آرامی کنترل شده و قبل از افت فرکانس به زیر محدوده قابل قبول میزان تولید به مقدار مناسبی افزایش می‌یابد. اما در پی اغتشاشات بزرگ مانند خروج واحدهای تولیدی مهم و یا اتصال ناگهانی بارهای بزرگ به سیستم قدرت عدم تعادل توان زیاد باشد این مورد مطرح نیست. برای مثال بعد از گذر به حالت جزیره‌ای یک تغییر ناگهانی و نسبتاً بزرگ در میزان توان تولیدی و بار رخ داده و باعث چالش در تغییرات فرکانسی سیستم می‌شود. در چنین موقعیت‌هایی گاورنر ژنراتور سنکرون نمی تواند پاسخ فرکانس را پایدار سازد و تنها راه پایدار سازی پاسخ فرکانس در محدوده مجاز آن، قطع چندین بار می باشد. در این چنین شرایطی بدون استفاده از بارزدایی اتوماتیک<sup>۱</sup> معمولاً فرکانس افت کرده و وضعیت آن بدتر می‌شود که ادامه این روند باعث آسیب رسیدن به واحدهای تولیدی شده و در پی آن با خروج سایر واحدهای تولیدی میزان کسری توان بیشتر و سیستم ناپایدارتر خواهد شد.

حفظ پایداری و بهره برداری از شبکه‌های کوچک در برابر هر نوع از اغتشاش نسبت به سیستمهای بزرگ بسیار حساستر است، بنابراین استراتژی بارزدایی برای شبکه‌های کوچک جزیره‌ای شده با سیستم قدرت بزرگ از نظر رفتار متفاوت می‌باشد، چون این دو سیستم مشخصه‌های متفاوتی دارند. شبکه‌های کوچک جزیره‌ای شده اغلب ژنراتورهای کوچک داشته و از اینرو اینرسی<sup>۲</sup> کمتری دارند. بنابراین افت فرکانس در پی اغتشاشات و کسری توان بسیار سریعتر است. امروزه برای بارزدایی در سیستمهای قدرت از دو روش بارزدایی ولتاژی<sup>۳</sup> و بارزدایی فرکانسی(UFLS)<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. در بارزدایی ولتاژی از شاخص ولتاژ جهت تخمین کسری

<sup>۱</sup> Automatic Load Shedding

<sup>۲</sup> Inertia

<sup>۳</sup> Under Voltage Load Shedding

<sup>۴</sup> Under Frequency Load Shedding

توان و شروع فرایند بارزدایی استفاده می‌شود، در حالی که در بارزدایی فرکانسی شاخصی که برای تعیین میزان کسری توان و شروع مراحل بارزدایی استفاده می‌شود فرکانس سیستم است. در ادامه با توجه به موضوع بحث، انواع روشهای بارزدایی فرکانسی موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد. بطور کلی روشهای بارزدایی فرکانسی (UFLS) را می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد [۴]:

طرحهای بارزدایی سنتی<sup>۱</sup>

طرحهای بارزدایی نیمه تطبیقی<sup>۲</sup>

طرحهای بارزدایی تطبیقی<sup>۳</sup>

روشهای بارزدایی معمول که در گذشته برای سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار می‌گرفت از نوع طرح های بارزدایی سنتی بود. در این روشها از رله های فرکانسی به منظور فرایند بارزدایی استفاده می‌شود و بارهای سیستم باید تحت نظر رله های فرکانسی نصب شوند تا در شرایط اضطراری با قطع این بارها از فروپاشی شبکه جلوگیری بعمل آید، با تنظیم محدوده مجاز فرکانس در این رله ها با افت فرکانس به زیر مقدار مجاز، مقدار معینی بار(بر حسب درصدی از کل مقدار اضافه بار) از شبکه قطع می‌شود.

علیرغم موفقیت های بدست آمده در زمینه طرح های بارزدایی سنتی این روشها معایبی دارند که از جمله مهمترین آنها میتوان به قطع بار بیشتر یا کمتر از مقدار مورد نیاز اشاره کرد. اکثر طرح های بارزدایی سنتی قابلیت انعطاف پذیری در برابر افزایش تعداد مراحل بارزدایی را ندارند بنابراین استفاده از این روشها تغییرات ناگهانی را در فرکانس سیستم ایجاد می کند که نامطلوب است. امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و گسترش تجهیزات ارتباطی و اهمیت امنیت سیستم- های قدرت به روشهای بارزدایی تطبیقی توجه بیشتری می‌شود.

در طرحهای تطبیقی و نیمه تطبیقی بر پایه استفاده از شیب فرکانس برای تعیین کسری توان در سیستم قدرت استفاده می‌شود، اکثر این طرح ها بر اساس استفاده از معادله نوسان<sup>۴</sup> استوار هستند. در این روشها با استفاده از فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس مقدار دقیقتری از

<sup>۱</sup> Traditional Load Shedding

<sup>۲</sup> Semi-adaptive Load Shedding

<sup>۳</sup> Adaptive Load Shedding

<sup>۴</sup> Swing Equation

کسری توان تخمین زده می شود. پس از تعیین مقدار کسری توان، مقداری از بارهای غیر ضروری در طی چند مرحله و پس از گذشت یک زمان تاخیر از سیستم قدرت قطع می شوند. در این پایان نامه با توجه به مطالب بیان شده در مورد انواع روشهای بارزدایی و ضرورت حفظ فرکانس در سیستمهای جزیره ای شده، دو روش بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی برای سیستمهای جزیره ای شده ارائه می شود. با شبیه سازی دو سیستم تست نمونه و جزیره سازی تعمدی آنها، روشهای بارزدایی فرکانسی پیشنهادی بر روی آنها اجرا می شود. نتایج شبیه سازی کارایی این دو روش را در بازگرداندن سریع فرکانس سیستم به محدوده مجاز با قطع مقدار بهینه ای از بارهای سیستم مورد تأیید قرار می دهند.

## ۱-۲- مروری بر فصل های پایان نامه

در ادامه در فصل دوم اهمیت طرح های بارزدایی در سیستمهای قدرت، عوامل موثر بر میزان نرخ تغییرات فرکانس، انواع روشهای بارزدایی فرکانسی، استانداردهای موجود در این زمینه و همچنین برخی از روشهای بارزدایی موجود که در سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار می گیرند مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل سوم انواع طرحهای بارزدایی ارائه شده در مقالات، کارهای تحقیقاتی مطرح شده و راهکارهای ارائه شده توسط این مراجع مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه این فصل، تاثیر مدل بار بر روی فرایند بارزدایی در تعیین دقیق میزان کسری توان بیان می گردد.

با توجه به مطالب بیان شده در این سه فصل در فصل چهارم دو طرح بارزدایی فرکانسی تطبیقی و نیمه تطبیقی برای شبکه های کوچک جزیره ای ارائه می شود. سپس با شبیه سازی دو سیستم تست نمونه و جزیره سازی تعمدی آنها، در طی چندین سناریو کارایی روشهای ارائه شده در حفظ پایداری فرکانسی مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل پایانی نتیجه گیری از این تحقیق و پیشنهاداتی جهت بهبود ادامه کار در این دو طرح ارائه خواهد شد.

## **فصل ۲: مقدمه ای بر بارزدایی و اهمیت آن در**

### **سیستمهای قدرت**

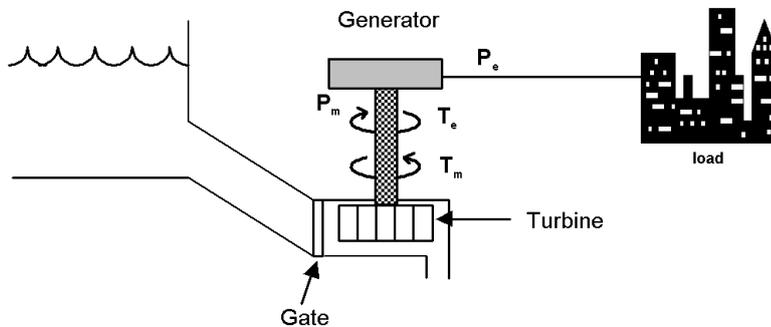
## ۲-۱- مقدمه فصل

به دلیل اهمیت و جایگاه صنعت برق، حفظ پایداری و امنیت سیستمهای قدرت و افزایش قابلیت اطمینان آنها همواره مد نظر می باشد. برای رسیدن به این هدف سیستمهای قدرت طوری طراحی و بهره برداری می شوند که در هر شرایط همواره میزان ظرفیت تولید و انتقال در سیستم متناسب با میزان مصرف و رشد تقاضا باشد. هر چند در شرایط خاص و غیر قابل پیش بینی مانند خروج ناگهانی واحدهای تولیدی، سوئیچ ناگهانی بارهای بزرگ، تریپ خطوط انتقال و انواع خطاها در سیستم باعث می شود که تعادل بین تولید و مصرف در سیستم از بین برود. بنابراین ضروری است که کسری توان در سیستم سریعاً شناسایی شده و اقدامات ضروری برای توقف اثرات نامطلوب این کسری توان در سیستم صورت گیرد.

ایجاد تعادل می تواند با افزایش تولید و یا قطع اتوماتیک قسمتی از بارهای سیستم صورت گیرد. بطور کلی اولین راه حل یعنی افزایش تولید همیشه نمی تواند به اندازه کافی موثر واقع شود و افت فرکانس را متوقف نماید، چون در شرایطی با میزان اضافه بار زیاد ظرفیت تولیدی در دسترس (رزرو چرخان) به اندازه کافی برای جبران کسری توان وجود ندارد، از طرفی در مدار آوردن واحدهای تولیدی زمان زیادی صرف می کند و سرعت عمل کافی برای توقف افت فرکانس و فروپاشی سیستم را ندارد. بنابراین راه حل دوم یعنی بارزدایی اتوماتیک در شرایط افت فرکانس یک راه حل مناسب و سریع برای برقرار کردن تعادل بین تولید و مصرف و بازگرداندن فرکانس سیستم به مقدار نامی است. بکارگیری رله های فرکانسی در نواحی مختلف سیستم و کنترل بارها توسط این رله ها یک روش موثر و ساده برای از بین بردن اضافه بار در سیستم می باشد. چون اکثراً اضافه بار در سیستم در پی وقوع اغتشاشات غیر قابل پیش بینی ایجاد می شود سیستم می تواند به سرعت ناپایدار شده و بنابراین باید بارزدایی اتوماتیک سریعاً بکار گیری شود. هدف این فصل بحث در مورد فاکتورهای تاثیر گذار بر روی فرایند بارزدایی و توصیف تنظیمات رله ها و کاربرد آنها در سیستمهای قدرت است.

## ۲-۲- مدل واحدهای تولیدی و تعیین معادله نوسان<sup>۱</sup>

رفتار سیستم قدرت همانند رفتار یک سیستم چرخان است، توان مکانیکی سیستم از انرژی جنبشی آب یا انرژی بخار آب تامین می شود و باعث ایجاد گشتاور مکانیکی<sup>۲</sup>  $T_{mech}$  بر روی شفت متصل به توربین ژنراتور می شود. ژنراتور توان مکانیکی را به توان الکتریکی تبدیل می کند و بارهای الکتریکی نیز یک گشتاور الکتریکی<sup>۳</sup>  $T_{elec}$  را بر روی شفت اعمال می کنند. شکل (۱-۲) یک سیستم قدرت نوعی را نشان می دهد.



شکل (۱-۲) مدل سیستم قدرت [۵].

یک تغییر در میزان توان مصرفی و یا توان تولیدی توسط ژنراتور سبب ایجاد نوساناتی در سرعت توربین ژنراتور می شود و در پی این تغییر سرعت، فرکانس سیستم نیز نوسان (تغییر) خواهد کرد. اختلاف بین گشتاور الکتریکی  $T_{elec}$  و مکانیکی  $T_{mech}$  یک گشتاور شتاب دهنده<sup>۴</sup>  $T_a$  ایجاد می کند که از معادلات زیر تعیین می شود [۵]:

$$T_a = T_{mech} - T_{elec} \quad (1-2)$$

معادله حرکت در ماشینها، ارتباط بین گشتاور شتاب دهنده و شتاب زاویه ای توربین را

<sup>۱</sup> Swing Equation

<sup>۲</sup> Mechanical Torque

<sup>۳</sup> Electrical Torque

<sup>۴</sup> Accelerating Torque

بیان می‌کند که معادله (۲-۲) این ارتباط را نشان می‌دهد:

$$T_a = T_{mech} - T_{elec} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-2)$$

در رابطه بالا  $J$  ممان اینرسی ( $\text{Kg-m}^2$ )،  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور ( $\text{Rad/s}$ )،  $\frac{d\omega}{dt}$  شتاب زاویه‌ای ( $\text{Rad/s}^2$ ) و  $T_a$  گشتاور منتهی یا شتاب دهنده ( $\text{N.m}$ ) است.

این معادله، ارتباط بین گشتاور شتاب دهنده و شتاب زاویه‌ای روتور را بیان می‌کند و به معادله نوسان معروف است. از آنجایی که حاصل ضرب سرعت زاویه‌ای در گشتاور برابر با توان است، رابطه (۲-۲) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$T_{mech} \cdot \omega_m - T_{elec} \cdot \omega_m = J \cdot \omega_m \frac{d\omega}{dt} \quad (3-2)$$

$$P_{mech} - P_{elec} = J \cdot \omega_m \frac{d\omega}{dt}$$

اگر مقدار  $J \cdot \omega_m$  را با  $M$  نشان دهیم رابطه بین  $M$  و انرژی جنبشی قطعات دوار ( $W_K$ ) بصورت زیر است:

$$W_K = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (4-2)$$

مقدار  $M$  هنگامی که روتور از سرعت سنکرون فاصله می‌گیرد، ثابت نمی‌باشد. با این وجود چون  $\omega_m$  قبل از خروج از پایداری تغییرات زیادی نمی‌کند مقدار  $M$  در سرعت سنکرون محاسبه گردیده و ثابت در نظر گرفته می‌شود. نوشتن معادله نوسان بر حسب زاویه الکتریکی راحت تر و ساده تر است، بنابراین با تعریف ثابت اینرسی بصورت رابطه زیر داریم [۶]:

$$H = \frac{W_K}{VA_{rated}} \quad (5-2)$$

در این رابطه  $H$  ثابت اینرسی برحسب ثانیه و معیاری از لختی<sup>۱</sup> ژنراتور در برابر عدم تعادل توان است و بصورت نسبت انرژی جنبشی روتور در سرعت نامی به ولت آمپر نامی ژنراتور تعریف می شود. رابطه بین ثابت اینرسی و لختی ژنراتور بصورت زیر می باشد:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{rated}^2}{VA_{rated}} \quad (۶-۲)$$

با جایگذاری روابط بالا در رابطه (۳-۲) داریم:

$$P_{mech} - P_{elec} = \frac{2H}{f_n} \cdot \frac{df}{dt} \quad (۷-۲)$$

برای یک سیستم تک ماشینه، ارتباط توان ورودی - خروجی و فرکانس آن بنابر معادله توان (معادله نوسان) بصورت رابطه (۷-۲) خواهد بود. در این رابطه  $P_{elec}$  و  $P_{mech}$  بترتیب توان مکانیکی و توان الکتریکی بر حسب پریونیت،  $H$  ثابت اینرسی برحسب ثانیه و  $f_n$  فرکانس نامی سیستم است. ثابت اینرسی برای سیستم چند ماشینه از رابطه زیر بدست می آید:

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (۸-۲)$$

بنابراین معادله نوسان برای یک سیستم چند ماشینه بصورت زیر نوشته می شود:

$$\Delta P = P_{mech} - P_{elec} = \frac{H_{eq}}{f_n} \cdot \frac{df_c}{dt} \cdot S_{eq} \quad (۹-۲)$$

در رابطه (۹-۲)،  $df_c/dt$  نرخ تغییرات فرکانس معادل<sup>۲</sup> سیستم (COI) است. با توجه به اینکه در پی هر اغتشاش ژنراتورهای سیستم هر کدام با یک نرخ تغییرات خاص نوسان می کنند، نرخ

<sup>۱</sup> Inertia

<sup>۲</sup> Center Of Inertia(COI)

تغییرات فرکانس معادل سیستم، بصورت میانگینی از نوسانات ژنراتورها در نظر گرفته می شود. با توجه به رابطه (۲-۹) هر گونه تغییر در  $P_{elec}$  یا  $P_{mech}$  بر روی فرکانس سیستم قدرت تاثیر گذار خواهد بود.

مقدار H برحسب نوع نیروگاه و طراحی توربین ژنراتور متفاوت است. واحدهای جدید بدلیل برخورداری از تکنولوژی ساخت بهتر دارای وزن کمتر، ابعاد کوچکتر و در نتیجه H کوچکتر هستند. بعنوان مثال یک توربین بخاری امروزی دارای H در حدود ۳ است اما یک توربین بخار قدیمی با همان توان نامی دارای H در حدود ۱۰ است. در جدول (۲-۱) مقادیر نمونه H برای انواع واحدهای تولیدی آمده است [۷].

جدول (۲-۱) مقادیری از ثابت های اینرسی نمونه برای واحدهای تولیدی [۷].

نوع ژنراتور	ثابت اینرسی (ثانیه)
دیزل ژنراتور	۱-۳
توربین احتراق داخلی	۲-۵
توربین احتراق داخلی، سیکل ترکیبی	۲-۷
توربین بخار	۳-۱۰
توربین آبی	۲-۵

## ۲-۳- توزیع توان کسری بین ژنراتورهای سیستم

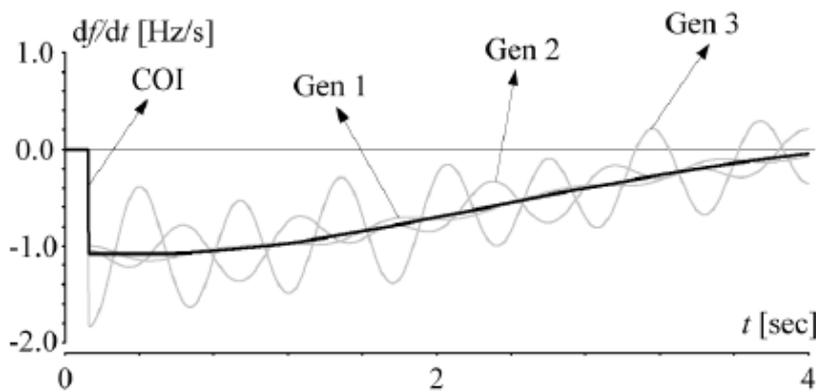
در پی اغتشاشات، نوسانات داخلی در ژنراتورهای سیستم اتفاق می افتد، که این نوسانات متناسب با موقعیت و ثابت اینرسی ژنراتور می باشد. در پی اغتشاشات گذرا<sup>۱</sup> عدم تعادل توان<sup>۲</sup> (کسری توان) بین ژنراتورها با توجه به  $H_i$  هایشان توزیع می شود. توان نامتعادل توزیع شده میان ژنراتورها طبق رابطه (۲-۱۰) تعیین می شود.

<sup>۱</sup> Transient

<sup>۲</sup> Power Imbalance

$$P_{imb,i,pu} = \left( \frac{H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \right) P_{imb,pu} \quad (۱۰-۲)$$

در رابطه بالا  $P_{imb,pu}$  کل توان نامتعادل کننده سیستم برحسب پریونیت و  $P_{imb,i,pu}$  سهم  $i$ امین ژنراتور در توان نامتعادل است [۸]. این توان نامتعادلی توزیع شده بین ژنراتورها باعث می شود که هر ژنراتور شروع به نوسان کرده در نتیجه سرعت ژنراتور کمی از مقدار نامی خود منحرف شود، بنابراین فرکانس معادل سیستم دچار نوسان می شود. شکل (۲-۲) نوسانات مشتق مرتبه اول فرکانس سه واحد تولیدی که در امتداد مشتق فرکانس معادل سیستم (COI) نوسان می کنند را نشان می دهد.

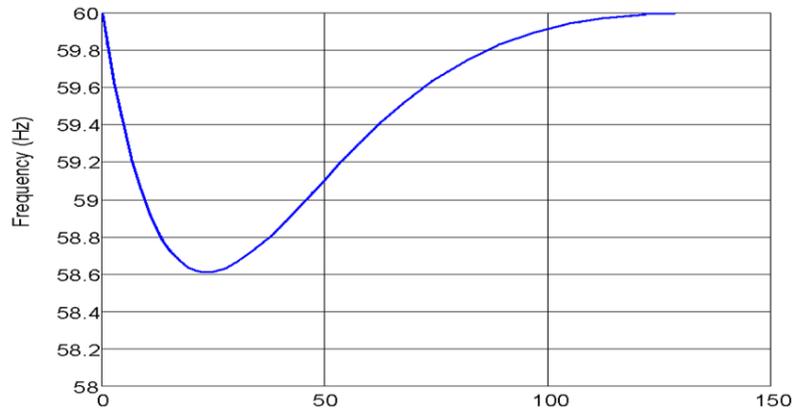


شکل (۲-۲) مشتق مرتبه اول فرکانس برای تک تک ژنراتورها و COI در طی نوسان داخلی ژنراتورها [۸].

## ۲-۴- عوامل تاثیر گذار بر فرکانس سیستمهای قدرت

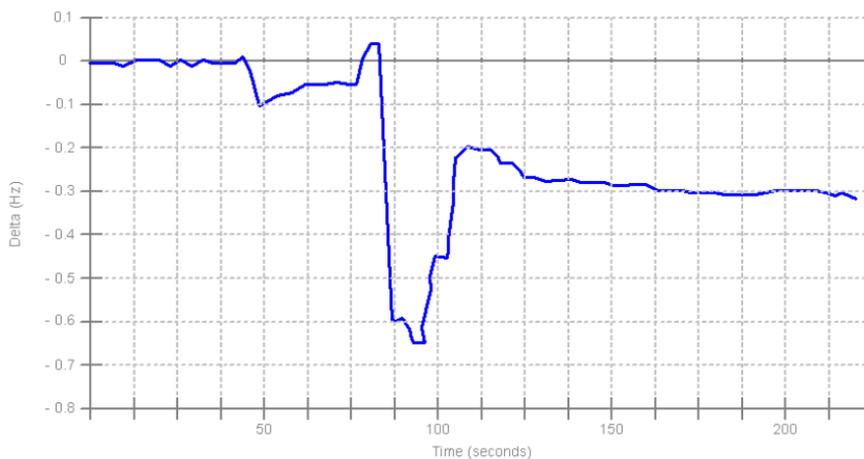
در قسمت قبل بیان شد که چطور فرکانس سیستم تحت تاثیر تغییرات توان تولیدی یا توان مورد تقاضا قرار می گیرد. اگر در سیستم قدرت بزرگ با چندین واحد تولیدی، یکی از ژنراتور از مدار خارج شود یا اضافه بار ناگهانی به سیستم تحمیل شود فرکانس سیستم افت خواهد کرد، در این شرایط با عملکرد مناسب سیستم گاورنر و رزرو چرخان سایر واحدهای تولیدی افت فرکانس متوقف شده و فرکانس به مقدار نامی خود باز خواهد گشت البته این شرایط برای حالتی است که میزان رزرو چرخان بتواند میزان کسری توان یا اضافه بار تحمیل شده به سیستم قدرت را جبران

کند. شکل (۳-۲) نمونه ای از این شرایط را نشان می دهد.



شکل (۳-۲) تغییرات فرکانس با یک مقدار رزرو چرخان کافی [۵].

هر چند اگر میزان کسری توان زیاد و افت فرکانس بسیار شدید باشد رله های فرکانسی<sup>۱</sup> باید بارزدایی را در سیستم انجام دهند تا افت فرکانس متوقف شده و فرکانس به محدوده مجاز خود بازگردد. اگر میزان کسری توان ناشی از خروج واحد تولیدی بسیار بیشتر از میزان رزرو چرخان باشد بعد از اعمال رزرو چرخان در نهایت فرکانس در یک مقدار جدید پایین تر از مقدار نامی خود به حالت پایدار خواهد رسید. شکل (۴-۲) نوسانات فرکانس در پی یک اغتشاش و میزان رزرو چرخان ناکافی را نشان می دهد.



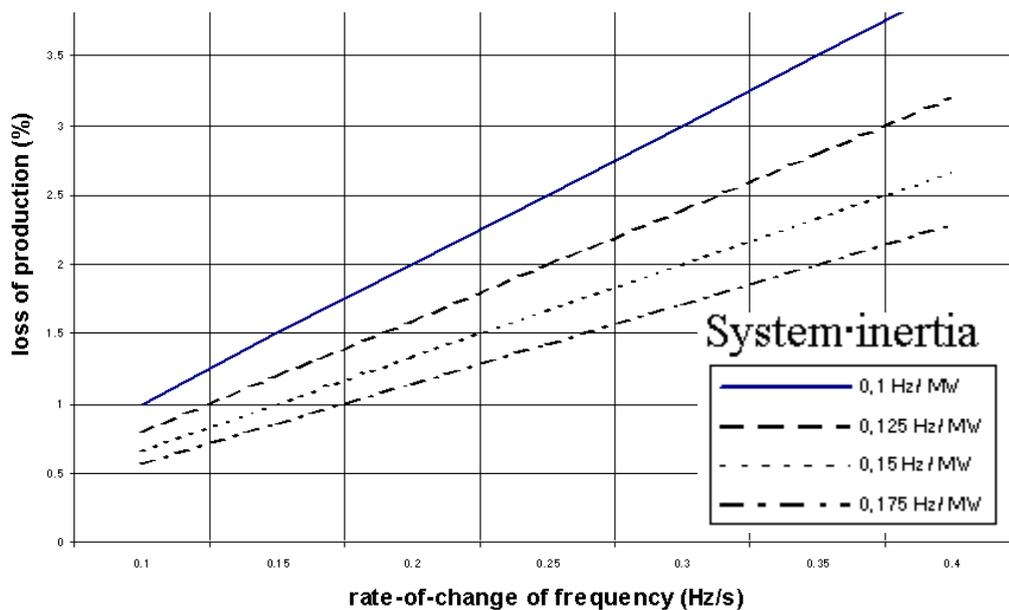
شکل (۴-۲) نوسانات فرکانس در پی یک اغتشاش و میزان رزرو چرخان ناکافی [۵].

<sup>۱</sup> Frequency Relays

اگر کاهش فرکانس بسیار شدید باشد ممکن است سیستم حفاظتی سایر واحدهای تولیدی عمل کرده و آنها را از مدار خارج کنند که این امر میزان کسری توان را افزایش داده و ادامه این روند منجر به فروپاشی سیستم قدرت و خاموشی آن خواهد شد. با نگاهی دوباره به معادله (۲-۹) به این نتیجه خواهیم رسید که نرخ تغییرات فرکانس متناسب با میزان عدم تعادل (کسری توان یا  $\Delta P$ ) در سیستم قدرت است. یعنی:

$$\Delta P \propto \frac{df}{dt} \quad (11-2)$$

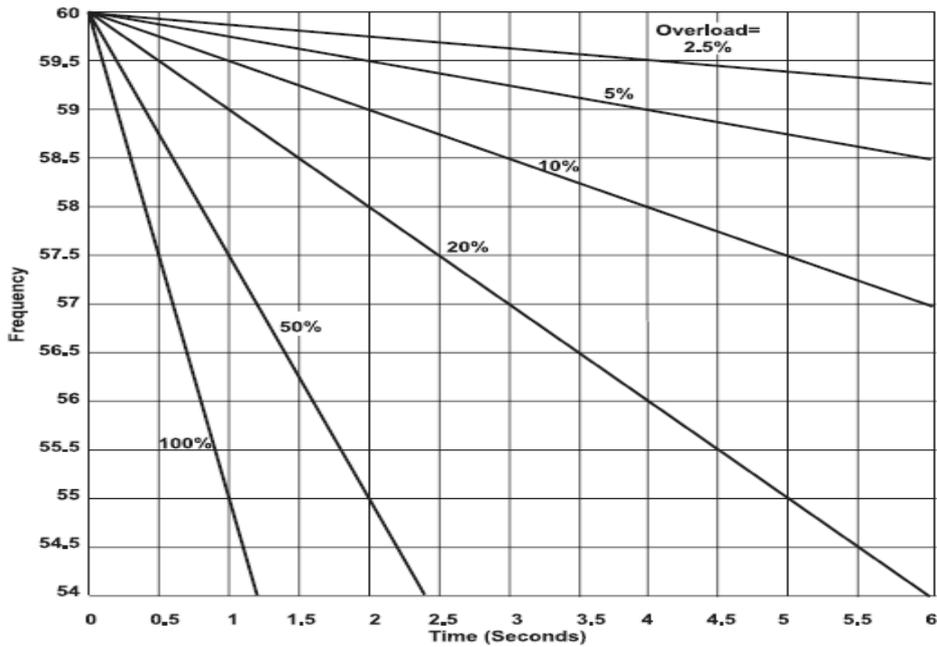
شکل (۲-۵) رابطه بین درصد میزان کسری توان و نرخ تغییرات فرکانس (RoCoF) را برای سیستمهای با ثابت اینرسی متفاوت نشان میدهد [۵]. همانطور که مشاهده می شود هرچه میزان اینرسی معادل سیستم بزرگتر باشد، نرخ تغییرات فرکانس در پی اغتشاشات کوچکتر است.



شکل (۲-۵) نرخ تغییرات فرکانس در برابر انواع کسری توان [۵].

شکل (۲-۶) نیز رابطه بین درصد میزان اضافه بار<sup>۱</sup> و تغییرات فرکانس را برای یک سیستم نشان می دهد.

<sup>۱</sup> Over Load



شکل (۲-۶) تغییرات فرکانس در برابر انواع اضافه بار [۷].

نرخ تغییرات فرکانس یک شاخص مهم برای تعیین میزان کسری توان لحظه ای در سیستم قدرت است. در سیستمهای قدرت واقعی نرخ تغییرات فرکانس بعلت ماهیت ذاتی نوسانی بودن تغییرات سرعت ماشین، نوسانی است. فرکانس سیستم با هرگونه عکس العمل (پاسخ) ژنراتورها و اثرات متقابل بین ژنراتورها تغییر و نوسان خواهد کرد و همچنین با تغییر وضعیت سیستم قدرت نیز سریعاً تغییر خواهد کرد. فرکانس لحظه ای سیستم و نرخ تغییرات فرکانس در بین مراکز اینرسی معادل سیستم و همچنین در تک تک باسهای سیستم با هم تفاوت دارند. در ادامه این موضوع بیشتر مورد بررسی قرار می گیرد [۷].

## ۲-۵- مشخصه های پاسخ فرکانسی<sup>۱</sup> سیستم قدرت

برای بکارگیری رله های فرکانسی در بارزدایی ضروری است تا رفتار فرکانس سیستم در پی اضافه بار و کسری توان در سیستم را مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار دهیم. هرچند بدست

<sup>۱</sup> Frequency Gradient

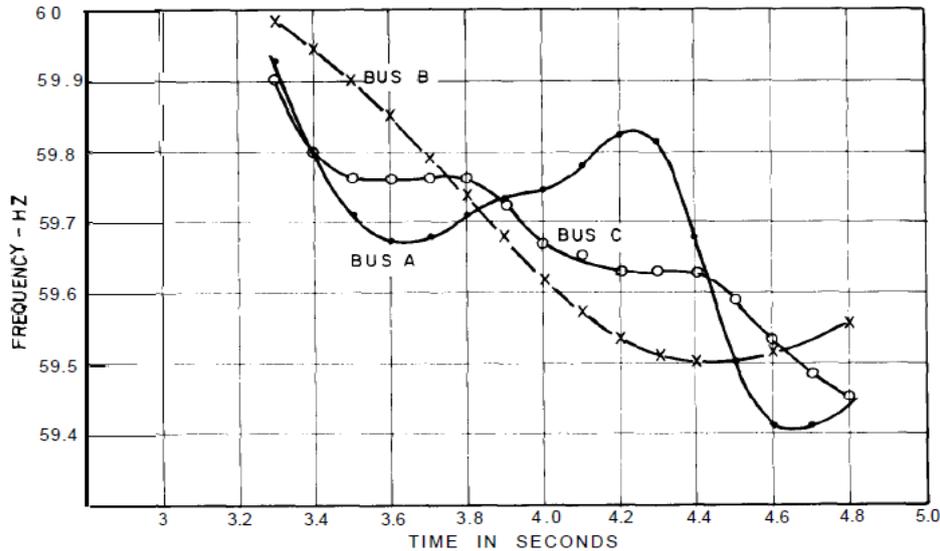
آوردن مشخصه دقیق پاسخ فرکانس برای بکارگیری صحیح و دقیق رله های فرکانسی ضروری است اما بدلیل پیچیدگی و گسترده بودن سیستم های قدرت متغیرهای زیادی باید در مد نظر قرار گیرند که در این شرایط بدست آوردن منحنی دقیق فرکانس برای سیستم بسیار سخت است. بنابراین بدست آوردن اطلاعات در مورد پدیده های تاثیر گذار و مهم بر روی منحنی های فرکانس کافی می باشد.

## ۲-۵-۱- تاثیر اضافه بار و ثابت اینرسی سیستم بر روی پاسخ فرکانس

عموما یک کسری توان ناگهانی در ظرفیت تولید با کاهش در فرکانس سیستم همراه است. در سیستمهای قدرت بزرگ به دلیل بزرگ بودن ثابت اینرسی معادل سیستم، فرکانس در سیستم قدرت سریعا با یک مقدار ثابت از مقدار نامی خود منحرف نمی شود، اما نرخ تغییرات آن سریع است. آغاز این نرخ تغییرات فرکانس منحصرافا فقط به مقدار اضافه بار و اینرسی سیستم بستگی دارد، هرچند هنگام افت فرکانس، گشتاور باقیمانده سیستم تولیدی افزایش می یابد و در نتیجه کاهش نرخ تغییرات فرکانس تاثیرگذار خواهد بود. اگر فرض کنیم سیستم گاورنر غیر فعال باشد، اثر میرایی<sup>۱</sup> توسط تغییرات گشتاورهای بار و تولید سرانجام باعث می شود که فرکانس در مقداری پایین تر از مقدار نامی به حالت پایدار برسد. اما اگر سیستم گاورنر فعال در نظر گرفته شود و ظرفیت تولید ژنراتورها قابلیت جبران اضافه بار را داشته باشند، اندازه نرخ تغییرات فرکانس کمتر شده و فرکانس در یک مقدار بیشتر از حالت قبل به پایداری خواهد رسید. در هر دو مورد فرکانس مقداری کاهش را متحمل خواهد شد که بعلت یک کاهش اضافی در ظرفیت تولیدی قبل از هرگونه عکس العمل جهت جبران این کسری در تولید است. تغییرات فرکانس سیستم در طی یک اغتشاش دارای نرخ کاهش هموار و مسطح نیست بلکه دارای خاصیت نوسانی است و این بدلیل اثر نوسانات متقابل ژنراتورهای متصل به شبکه در برابر یکدیگر است [۹]. بعلاوه نرخ کاهش و دوره نوسانات ممکن است در سراسر سیستم بصورت محسوسی متفاوت باشد. برای مثال شکل (۲-۷) نتایج مطالعات بر روی منحنی مشخصه فرکانسی یک سیستم با سه باس A و B و C و ۵ درصد

<sup>۱</sup> Damping

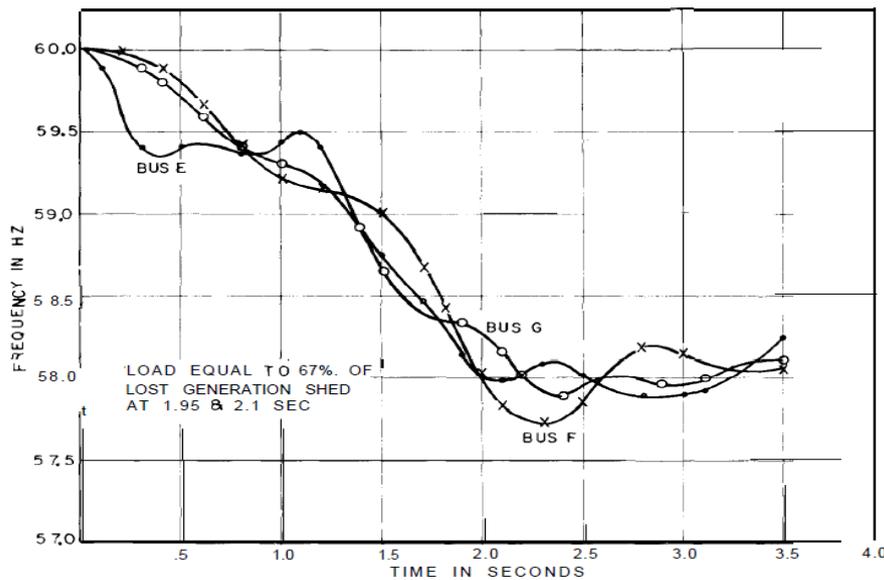
کسری توان را نشان می دهد. در طی سه ثانیه ابتدایی انحرافات فرکانس بسیار کوچک بوده و صرف نظر می شود، اما در سه ثانیه دوم ناحیه مورد نظر از شبکه اصلی جدا شده و فرکانس سریعاً افت می کند. فرض می شود که پس از اغتشاش سیستم میزان کسری توان را جبران کرده و فرکانس به مقدار  $59.5/5\text{Hz}$  خواهد رسید.



شکل (۷-۲) منحنی مشخصه فرکانس بعد از یک کسری توان ۵ درصدی [۹].

شکل (۸-۲) نیز حالتی را نشان می دهد که میزان کسری توان در سیستم ۱۵ درصد است. در لحظه وقوع اغتشاش، فرکانس کاملاً افت کرده تا زمانی که اضافه بار تقریباً در لحظه  $t=2\text{s}$  قطع شود. مقدار باری که قطع می شود برابر ۶۷ درصد از میزان کسری توان است. این مقدار برای توقف افت بیشتر فرکانس کافی است اما برای بازگرداندن آن به مقدار نامی خود کافی نمی باشد. در هر دو شکل (۷-۲) و (۸-۲) به وضوح مشخص است که انحراف فرکانس و نرخ تغییرات آنها در بعضی از باسها بطور قابل ملاحظه ای بزرگتر از سایر باسها است. در شکل (۷-۲) باس A یک نرخ کاهش اولیه  $1\text{ Hz/s}$  و در ادامه (در  $t=4/3\text{s}$ ) نرخ تغییرات فرکانس  $1/5\text{ Hz/s}$  دارد. سایر باسها تقریباً نرخ تغییرات فرکانس متوسط  $0.5\text{ Hz/s}$  دارند.

در شکل (۸-۲)، باس F نرخ تغییرات فرکانس اولیه  $3/5\text{ Hz/s}$  دارد در حالی که سایر باسها دارای نرخ تغییرات فرکانس متوسط  $1\text{ Hz/s}$  هستند [۹].



شکل (۸-۲) منحنی مشخصه فرکانس بعد از یک کسری توان ۱۵ درصدی [۹].

در هر دو مثال بالا نرخ تغییرات فرکانس اولیه با سه‌های A و E میزان کسری توان بیشتری را نسبت به مقدار واقعی نشان می‌دهند و این به دلیل خاصیت نوسانی منحنی مشخصه فرکانس می‌باشد. بنابراین بطور کلی تجزیه و تحلیل نوسانات فرکانس در پی اغتشاشات جهت تعیین میزان کسری توان در سیستم بدون استفاده از مطالعات کامپیوتری امکانپذیر نمی‌باشد [۹].

شبهه سازی سیستمهای قدرت با مدل کاملی از ژنراتورها و در نظر گرفتن ۲۰٪ رزرو چرخان نشان می‌دهند که با توجه به پاسخ و عکس‌العمل ژنراتورها در یک جزیره می‌توان تخمین دقیقی از میزان کسری توان واقعی را با استفاده از اندازه  $df/dt$  و معادله نوسان بدست آورد [۵].

## ۲-۵-۲- مشخصه فرکانسی در گشتاورهای ثابت بار و ژنراتور

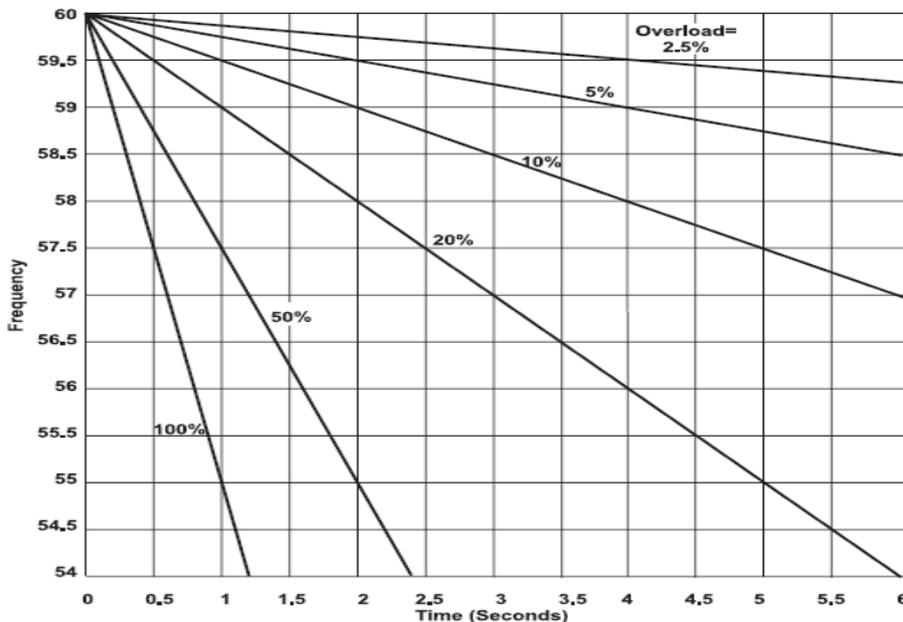
همانطور که در قسمت قبل بیان شد رابطه اساسی تغییرات فرکانس از معادله حرکت یک ماشین دوار بدست می‌آید که این ارتباط را می‌توان از رابطه (۲-۹) بصورت زیر نوشت:

$$\frac{df}{dt} = \frac{T_a f_0}{2H} \quad (۲-۱۲)$$

در این رابطه  $\frac{df}{dt}$  نرخ تغییرات فرکانس (Hz/s)،  $f_0$  فرکانس نامی (Hz)،  $H$  ثابت اینرسی سیستم (s) که برابر با مجموع ثابت های اینرسی کل واحدهای تولیدی است و  $T_a$  گشتاور شتاب دهنده می باشد. هنگامی که یک کسری توان در سیستم رخ می دهد  $T_a$  منفی شده و از سرعت آن کاسته خواهد شد. اگر فرض شود که گشتاور معادل ژنراتورهای باقیمانده ( $T_G$ ) و گشتاور بارهای باقی مانده ( $T_L$ ) در طی اغتشاش ثابت باشند تغییرات فرکانس بصورت یک خط مسقیم خواهد بود. تغییرات فرکانس برای اندازه های مختلف اغتشاش ناشی از اضافه بار برای یک سیستم در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. درصد اضافه بار نیز از نسبت اختلاف بین بار مورد تقاضای سیستم و میزان توان تولیدی در دسترس به میزان توان تولیدی در دسترس طبق رابطه زیر تعیین می شود:

$$(۲-۱۳) \quad 100 \times (\text{میزان تولید باقیمانده}) / (\text{میزان تولید باقیمانده} - \text{میزان تقاضا}) = \text{درصد میزان اضافه بار}$$

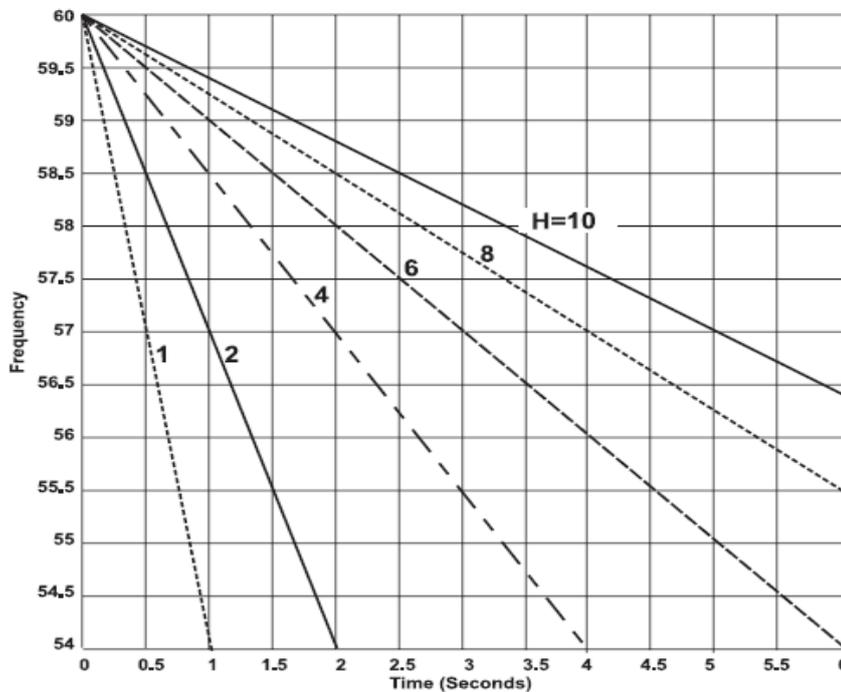
طبق رابطه (۲-۱۳) کسری ۳۳ درصد از کل تولید منجر به ایجاد ۵۰ درصد اضافه بار و کسری ۵۰ درصد از تولید ۱۰۰ درصد اضافه بار را در سیستم ایجاد می کند [۱۰].



شکل (۲-۹) تغییرات فرکانس برای مقادیر مختلف اضافه بار در شرایط گشتاورهای بار و تولید ثابت [۷].

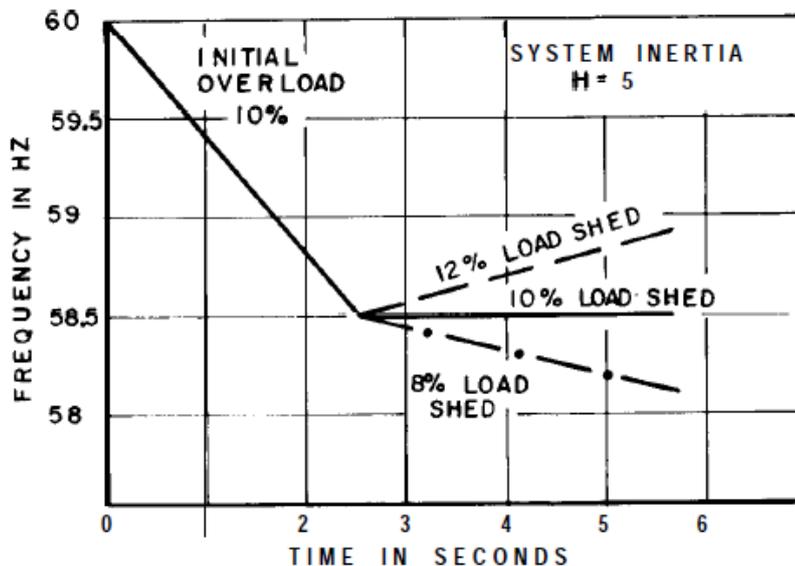
باید دقت کرد که درصد اضافه بار، برابر با مقدار کسری توان تولیدی نیست، درصد کسری توان مقدار کمتری از درصد اضافه بار است. برای مثال ۱۰ درصد اضافه بار متناسب با ۹/۱ درصد کسری توان است. در حالی که ۱۰۰ درصد اضافه بار ۵۰ درصد کسری توان تولیدی خالص ایجاد می کند.

با توجه به رابطه (۸-۲) هر چه سیستم قدرت بزرگتر باشد و واحدهای تولیدی با ثابت اینرسی بزرگتری داشته باشد، دارای ثابت اینرسی معادل بزرگتری خواهد بود، از طرفی با توجه به رابطه (۱۲-۲) یک مقدار کسری توان ثابت در سیستم، میزان نرخ تغییرات فرکانس با ثابت های اینرسی معادل سیستم رابطه معکوس دارد. بنابراین در پی اغتشاشات، سیستمی که ثابت اینرسی بزرگتری داشته باشد، نرخ تغییرات فرکانس کمتری را خواهد داشت و برعکس سیستمی که ثابت اینرسی کوچکتری داشته باشد، نرخ تغییرات فرکانس بیشتری را خواهد داشت. شکل (۱۰-۲) میزان این تغییرات فرکانس را در پی اضافه بار ۱۰٪ در سیستم های با ثابت های اینرسی متفاوت نشان می دهد.



شکل (۱۰-۲) تاثیر ثابت اینرسی بر روی نرخ تغییرات فرکانس در حالتی گشتاور بار و تولید ثابت هستند [۷].

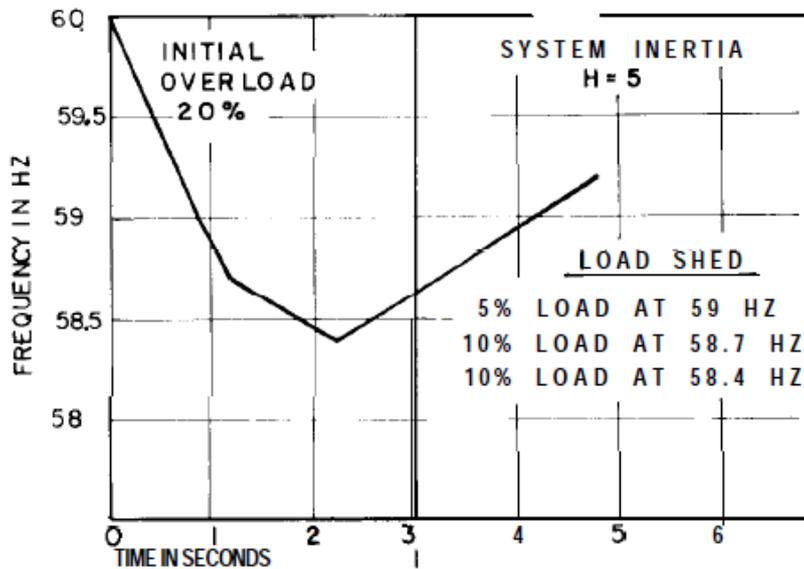
با توجه به مطالب بیان شده مشخصه فرکانسی سیستم نیز می تواند از مطالعات مشابه بدست آید، برای مثال اگر مقدار باری که قطع می شود برابر با اضافه بار باشد گشتاور شتاب دهنده را برابر صفر خواهد کرد و در نتیجه در پی آن نرخ تغییرات فرکانس سیستم صفر خواهد شد. در لحظه ای که این قطع بار صورت می گیرد، فرکانس در همان مقداری که به آن رسیده است میل خواهد کرد و به پایداری خواهد رسید که این حالت در شکل (۲-۱۱) با خط پرننگ (اضافه بار ۱۰ درصدی) نشان داده شده است [۹].



شکل (۲-۱۱) تاثیر مقادیر مختلف بارزدایی بر روی منحنی مشخصه فرکانس [۹].

اگر مقدار باری که قطع می شود بیشتر از میزان اضافه بار باشد  $T_a$  بزرگتر از صفر شده و در پی آن بصورت یک خط مستقیم افزایش خواهد یافت که این حالت در شکل (۲-۱۱) با خط تیره نشان داده شده است. اما اگر مقدار باری که قطع می شود کمتر از میزان اضافه بار باشد فرکانس به مسیر کاهش خود ادامه می دهد اما با نرخ تغییرات کمتر، این حالت در شکل (۲-۱۱) با خط نقطه نشان داده شده است، نرخ تغییرات فرکانس جدید متناسب با مقدار جدید  $T_a$  تغییر خواهد کرد.

اگر بارزدایی در طی چند مرحله انجام شود منحنی مشخصه فرکانس مانند شکل (۲-۱۲) خواهد بود. در این شکل مقدار اضافه بار اولیه ۲۰ درصد بوده که ۵ درصد آن در مرحله اول، ۱۰ درصد آن در مرحله دوم و بقیه در مرحله سوم قطع می شود.



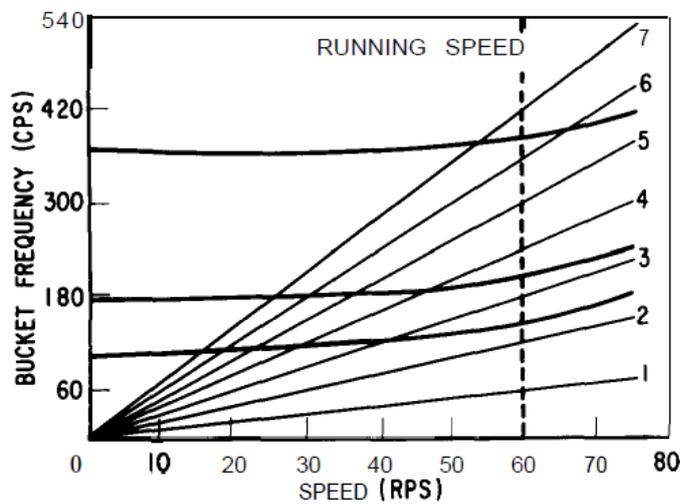
شکل (۲-۱۲) اثر قطع اضافه بار سیستم در چندین مرحله بر روی منحنی مشخصه فرکانس [۹].

درصد بارهایی که در هر مرحله قطع می شوند متناسب با مقدار توان تولیدی باقیمانده است. باید توجه داشت که در تمام موارد هنگامی که بار قطع می شود یک تغییر ناگهانی در نرخ تغییرات فرکانس ایجاد می شود. روشهای بالا یک رویه ساده و تقریبی برای تعیین منحنی مشخصه فرکانس در یک سیستم با یک مقدار کسری در توان تولیدی را مهیا می سازند [۹].

## ۲-۶- پیامدهای کاهش فرکانس

هر شبکه قدرت دارای یک فرکانس کار نامی، معمولاً ۵۰ یا ۶۰ هرتز است. تمام اجزاء سیستم قدرت اعم از توربین ژنراتورها، ترانسفورماتورها، موتورها و ... برای کار در فرکانس نامی طراحی و ساخته شده اند و بدیهی است که هرگونه انحراف فرکانس از مقدار نامی، در جهت افزایش یا کاهش، باعث خروج آنها از حالت کار عادی می شود. البته میزان حساسیت به تغییر فرکانس برای اجزاء گوناگون متفاوت است. از مهمترین پیامدهای افت فرکانس می توان به تنش های مکانیکی حاصل از کاهش فرکانس و تاثیر آنها بر عملکرد توربین های سیستم اشاره کرد.

توربینهای یک شبکه قدرت خصوصا توربینهای بخار حساسترین جزء شبکه به تغییرات فرکانس هستند. هر توربین بخار معمولا از چندین قسمت تشکیل شده است که هر قسمت شامل تعداد قابل توجهی از پره های ثابت و متحرک است. این ساختار پیچیده دارای مجموعه وسیعی از فرکانسهای تشدید مکانیکی است. فرکانسهای مذکور می تواند مربوط به نوسانهای عرضی یا پیچشی روتور باشد. برای نمونه در شکل (۲-۱۳) خطوط افقی فرکانسهای تشدید یک طبقه از توربین را نشان می دهد. در این شکل خطوط شعاعی مضارب صحیح سرعت توربین بوده و نشانگر فرکانسهای ایجاد شده در توربین هستند. طراحی توربین به نحوی انجام میشود که سرعت کار و مضارب صحیح آن بقدر کافی با فرکانسهای تشدید فاصله داشته باشند [۹، ۱۱].



شکل (۲-۱۳) فرکانسهای تشدید توربین [۹].

هرگونه افت فرکانس باعث کاهش دورتوربین شده و مرز مضارب سرعت با فرکانسهای تشدید را کم می کند. بر اثر نزدیک شدن دور توربین به فرکانس تشدید دامنه ارتعاشات توربین افزایش می یابد.

وقوع پدیده تشدید به شدت به توربین آسیب رسانده و باعث کاهش عمر آن می شود. به همین ترتیب کارکرد توربین در فرکانس بالاتر از نامی نیز زیانبار است. برای حفاظت توربینها در برابر تغییرات فرکانس، استاندارد IEEE C 77.106 تهیه شده است. این استاندارد محدوده زمانی مجاز کار توربین را برای بازه های زمانی مختلف نشان می دهد. بنابراین هرگونه مکانیسمی که برای اصلاح فرکانس سیستم بکار گرفته شود باید زمان عملکردی متناسب با استاندارد داشته باشد [۹].

## ۲-۶-۲- راهکارهای حفظ پایداری فرکانس

چون تغییرات در فرکانس سیستم نتیجه مستقیم عدم تعادل توان در شبکه است، هرگونه اقدام اصلاحی مستلزم تغییر در تولید یا مصرف توان حقیقی در شبکه است، برخی از این ابزارها بترتیب سرعت عملکرد در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند :

### - راه اندازی سریع واحدهای تولیدی:

راه اندازی واحدهای تولیدی نیاز به زمان بسیاری دارد، سریعترین واحدهای تولیدی گازی می توانند در طی چند دقیقه وارد مدار شده و کمبود توان شبکه را جبران کنند.

### - رزرو چرخان سیستم :

رزرو چرخان سیستم عبارت است از ظرفیت آزاد نیروگاه های مشغول به کار و در مواردی که بدلیل تغییرات بار، عدم تعادل کوچکی بین میزان توان تولیدی و میزان بار مورد تقاضا ایجاد شود از این میزان رزرو استفاده می شود . استفاده از این ظرفیت آزاد مستلزم عملکرد سیستمهای کنترل سرعت توربین، یا گاورنر توربین است.

### - بارزدایی (حذف بار):

ساده ترین و سریعترین راه جبران کسری توان در شبکه، حذف بار است . فاصله زمانی صدور فرمان حذف بار تا انجام آن نیز بسیار اندک بوده و در واقع برابر زمان عملکرد کلید قدرت و در حدود چند سیکل الکتریکی است. روشهای زیادی برای بارزدایی در مقالات، مجلات و استانداردهای بین المللی ارائه گردیده است [۱۱،۱۰].

از میان روشهای فوق ، از رزروهای گردان به همراه واحد کنترل فرکانس برای جبران نوسانات دینامیکی شبکه که دارای دامنه ای محدودند استفاده می شود، اما اگر اغتشاشات وارد بر سیستم شدید باشد (مانند خروج یک واحد تولیدی بزرگ و یا جزیره ای شدن سیستم) و میزان رزرو چرخان توانایی بازگرداندن فرکانس سیستم به محدوده مجاز را نداشته باشد طرح های بارزدایی در سیستم اجرا شده و قسمتی از بارهای غیر ضروری از سیستم جدا می شود. در ادامه اهداف بارزدایی و انواع روشهای آن مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۷-۲- اهداف و فلسفه بارزدایی فرکانسی

طرح‌های بارزدایی فرکانسی بمنظور بازگرداندن فرکانس سیستم به یک سطح قابل قبول در پی یک شرایط اضطراری (اغتشاش) و کسری توان اجرا می‌شود. بعلاوه بارزدایی فرکانسی می‌تواند از فروپاشی و خاموشی سیستم پیشگیری نماید. انجمن قابلیت اطمینان الکتریکی آمریکای شمالی<sup>۱</sup> (NERC) در پی خاموشی سال ۱۹۶۵ میلادی در آمریکای شمالی یک طرح بارزدایی فرکانسی را در آمریکا پیشنهاد کرد. در این طرح هر ناحیه از NERC پارامترهای اساسی مربوط به طرح بارزدایی از جمله مقدار بار قطع شده در پی اجرای فرایند بارزدایی، مقدار آستانه فرکانس آغاز بارزدایی و زمان‌های تاخیر در اجرای این طرح را تعیین می‌کرد. بعنوان مثال طرح بارزدایی بیان شده توسط انجمن هماهنگ کننده سیستم قدرت شمال شرقی آمریکا<sup>۲</sup> (NPCC) اهداف زیر را برای اجرای بارزدایی تعیین کرده است:

منظور از اجرای بارزدایی فرکانسی پایدار سازی فرکانس سیستم در یک ناحیه تا زمانی است که مشخصات تولید در هر ناحیه تعیین شود. هدف از این برنامه توقف افت فرکانس سیستم و بازگرداندن فرکانس به حداقل  $58/5\text{Hz}$  در طی زمان کمتر از ۱۰ ثانیه و رساندن فرکانس به حداقل  $59/5\text{Hz}$  در طی زمان کمتر از ۳۰ ثانیه در پی یک کسری توان به میزان ۲۵٪ از کل بار است. برای اطمینان از شرایط ولتاژ رضایت بخش و شرایط بارگذاری سیستم بعد از اجرای فرایند بارزدایی اتوماتیک، هر ناحیه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. انجام فرایند بارزدایی در سراسر سیستم های قدرت توسط رله های فرکانسی نصب شده در ایستگاههای سیستمهای توزیع و انتقال صورت می‌گیرد که این ایستگاهها اغلب پستهای انتقال و فوق توزیع می‌باشند [۵]. در این پستها رله های فرکانسی بر روی فیدرهای انتخابی که بارهای غیر ضروری را تغذیه می‌کنند نصب شده و هنگام بروز شرایط غیر عادی مانند انواع مختلف اغتشاشات با اندازه گیری فرکانس و مقایسه آن با مقادیر آستانه از قبل تعیین شده بریکر های قطع بار را فعال کنند. برنامه های بارزدایی فرکانسی حفاظت اولیه فرکانسی را برای توربین واحدهای تولیدی فراهم می‌کنند، همچنین باید اطمینان حاصل کرد که مقدار بار کافی برای بازگشت سریع فرکانس به شرایط عادی قطع خواهد شد. این

<sup>۱</sup> North American Electric Reliability Council (NERC)

<sup>۲</sup> Northeast Power Coordinating Council (NPCC)

امر از خروج سایر واحدهای تولیدی و افزایش مقدار کسری توان در سیستم قدرت و عملکرد رله های حفاظتی واحدهای تولیدی جلوگیری می کند.

## ۸-۲- انواع روشهای بارزدایی

### ۸-۲-۱- بارزدایی ولتاژی (UVLS)

در بارزدایی ولتاژی، ولتاژ محلی باسهای مختلف بعنوان شاخصی از وضعیت بار سیستم در نظر گرفته شده و با تشخیص اضافه بار توسط رله های ولتاژی، فرمان قطع بصورت محلی صادر می شود. برخلاف فرکانس که در کل شبکه تقریباً یکنواخت است، سطح ولتاژ در شبکه بشدت به محل اندازه گیری وابسته است. بطوریکه بعنوان مثال، سطح ولتاژ در نزدیکی باسهای کنترل ولتاژ شده (اعم از ژنراتوری یا کنترل ولتاژ بوسیله توان راکتیو) تقریباً ثابت مانده و در نزدیکی باسهای مصرف کننده بیشتر تغییر می کند. در عین حال میزان بار مصرف کنندگان تابعی از سطح ولتاژ آنهاست.

### ۸-۲-۱-۱- قواعد و قوانین طرح بارزدایی ولتاژی (UVLS)

بارزدایی ولتاژی یک عمل متقابل در برابر افت ولتاژ و در پی آن فروپاشی ولتاژ است. به طور کلی یک طرح بارزدایی ولتاژی بگونه ای طراحی و اجرا می شود که در شرایط افت ولتاژ مقدار معینی بار در یک یا چند نقطه از سیستم قدرت بعد از گذشت زمان معینی قطع شود. طرح های بارزدایی ولتاژی بر اساس تغییرات و شدت افت ولتاژ در باسهای مختلف سیستم عمل می کنند. بدین صورت که :

اگر در طی یک زمان معین (مدت زمان  $\tau$ )،  $V < V^{th}$  باشد مقدار  $\Delta P^{sh}(MW)$  از سیستم جدا می شود.

در این روابط  $V$  ولتاژ اندازه گیری شده و  $V^{th}$  متناظر با مقدار آستانه<sup>۱</sup> ولتاژ است. مقدار

<sup>۱</sup> Threshold

باری که در این روش از سیستم جدا می شود متناسب با میزان افت ولتاژ بوده و بصورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\Delta P^{sh} = K \cdot \Delta V^{av} \quad (۱۴-۲)$$

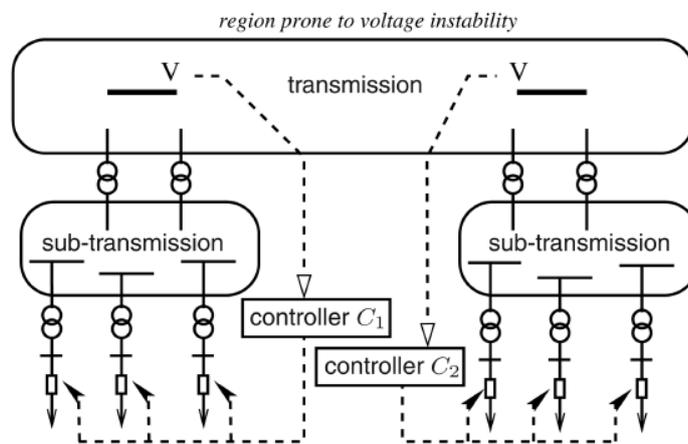
که  $K$  یک مقدار ثابت برای تنظیم است که با توجه به پارامترهای سیستم تعیین می شود و  $\Delta V^{av}$  میانگین افت ولتاژ در طی زمان  $[t_0, t_0 + \tau]$  است و از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\Delta V^{av} = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} (V^{th} - V(t)) dt \quad (۱۵-۲)$$

در رابطه بالا  $t_0$  زمانی است که اندازه ولتاژ از مقدار ولتاژ آستانه کمتر شود. طبق رابطه بالا اندازه  $V^{th} - V(t)$  بیشتر  $\Delta V^{av}$  بیشتر را در پی دارد و بنابراین مقدار بیشتری از بار قطع میشود [۷].

## ۲-۱-۸-۲- روش اجرای طرح های بارزدایی و ولتاژی

طرح های بارزدایی و ولتاژی براساس یک دسته از کنترلرهای توزیع شده در سراسر نواحی مستعد ناپایداری ولتاژ بنا شده است. هر کنترلر ولتاژ در یک باس انتقال و اعمال آن بر روی یک دسته از بارهای ناحیه ای در سطح توزیع نصب شده و تاثیر آنها بر روی ولتاژ ( $V$ ) را مشاهده و بررسی میکند. ممکن است یک شبکه فوق توزیع نیز در بین باسهای کنترل شده و باس اندازه گیر ولتاژ وجود داشته باشد. در شکل (۱۴-۲) نحوی قرار گرفتن این کنترلرها نشان داده شده است [۱۰].



شکل (۱۴-۲) نحوی اجرای بارزدایی و ولتاژی توسط کنترلرها [۱۰].

## ۲-۸-۲- بارزدایی فرکانسی

از معمولترین طرح های حفاظتی، بارزدایی فرکانسی است. این عمل زمانی انجام می شود که پاسخ گاورنرها کافی نباشد. این ابزار برای حفظ امنیت سیستم تولید و انتقال در زمان کاهش فرکانس در اثر یک اغتشاش بزرگ استفاده می شود. به هنگام بروز اغتشاشات بزرگ بارزدایی فرکانسی در سیستمهای قدرت باید بسرعت انجام شود تا افت فرکانس سیستم که بعلت عدم تعادل توان بین تولید و مصرف ایجاد شده است را متوقف کند. بطور کلی طبق مرجع [۴] روش- های بارزدایی فرکانسی (UFLS) را می توان به سه دسته تقسیم بندی کرد:

طرحهای بارزدایی سنتی

طرحهای بارزدایی نیمه تطبیقی

طرحهای بارزدایی تطبیقی

در ادامه هریک از روشهای بالا را بطور مختصر مورد بررسی قرار می دهیم.

## ۲-۸-۲-۱- طرحهای بارزدایی سنتی

روشهای بارزدایی معمول که در گذشته برای سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار می گرفت از نوع طرحهای بارزدایی سنتی بود. در این روشها از رله های فرکانسی به منظور فرایند بارزدایی استفاده می شود و بارهای سیستم باید تحت نظر رله های فرکانسی نصب شوند که در شرایط اضطراری با قطع این بارها از فروپاشی شبکه جلوگیری بعمل آید، با تنظیم محدوده مجاز فرکانس در این رله ها با افت فرکانس به زیر مقدار مجاز، مقدار معینی بار (بر حسب درصدی از کل مقدار اضافه بار) از شبکه قطع می شود. هنگامی که فرکانس به کمتر از اولین محدوده مجاز فرکانس می رسد، اولین مرحله از بارزدایی اجرا خواهد شد. اگر افت فرکانس ادامه یابد آشکار است که مقدار بار قطع شده کافی نبوده و در صورتی که فرکانس به زیر مقدار مجاز در دومین مقدار تنظیم شده برسد دومین مرحله از بارزدایی اجرا می شود. اگر فرکانس همچنان کاهش یابد مراحل بارزدایی بعدی نیز فعال می شوند تا زمانی که فرکانس به مقدار نامی خود بازگردد. هرچند در موارد رویدادهای خطرناک و جدی مقدار باری که قطع می شود تعیین می شود. بنابراین در پی رویدادهای مهم و خطرناک هنگامی که فرکانس به زیر اولین مقدار آستانه بارزدایی افت می کند مقدار باری که باید قطع شود محاسبه می شود. علیرغم موفقیت های بدست آمده در زمینه طرح

های بارزدایی سنتی این روشها معایبی دارند که از جمله مهمترین آنها میتوان به قطع مقدار بار بیش از مقدار مورد نیاز اشاره کرد که منجر به افزایش ناگهانی فرکانس به بیش از مقدار نامی می شود. اکثر طرح های بارزدایی سنتی قابلیت انعطاف پذیری در برابر افزایش تعداد مراحل بارزدایی را ندارند بنابراین استفاده از این روشها تغییرات ناگهانی را در فرکانس سیستم ایجاد می کند که نامطلوب است. امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و گسترش تجهیزات ارتباطی و اهمیت امنیت سیستمهای قدرت به روشهای بارزدایی تطبیقی توجه بیشتری می شود [۴، ۸].

### ۲-۲-۸-۲- طرح های بارزدایی نیمه تطبیقی

روش های بارزدایی نیمه تطبیقی تا حدودی شبیه به روش بارزدایی سنتی است. هرچند که مقدار معینی از بار که قطع می شود بر اساس اندازه گیری مقدار نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF) تعیین می شود. در این طرح ها هم از شاخص فرکانس و هم از شاخص نرخ تغییرات فرکانس برای بارزدایی استفاده می شود و عموماً نرخ تغییرات فرکانس برای هر یک از اغتشاشات احتمالی، مانند خروج واحدهای تولیدی و یا اضافه بارهای ناگهانی از قبل تعیین می شود.

### ۲-۲-۸-۳- طرح های بارزدایی تطبیقی

در طرح های تطبیقی از شیب فرکانس برای تعیین میزان کسری توان در سیستم قدرت استفاده می شود و بر اساس استفاده از معادله نوسان استوار هستند. در این روشها با استفاده از فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس مقدار دقیقتری از کسری توان که منجر به برهم خوردن تعادل توان در سیستم قدرت شده است تخمین زده می شود. پس از تعیین این مقدار کسری توان، مقداری از بارهای غیر ضروری در طی چند مرحله و پس از گذشت یک زمان تاخیر از سیستم قدرت قطع می شوند.

عوامل زیادی بر روی طرح های بارزدایی تاثیر گذار هستند، یکی از این عوامل مدل بار است. بارها بطور در تمام روز در حال تغییر هستند و این امر باعث می شود که بار کل سیستم بطور متناوب در طول روز، هفته و سالهای مختلف تغییر کند. تغییرات بار تخمین مقدار باری را که در پی یک اغتشاش، باید در یک زمان و مکان خاص از سیستم قطع شوند را مشکل می سازد. عامل دیگری که بر روی طرح های بارزدایی موثر است منابع تولید پراکنده هستند. ژنراتورهای کوچک همراه با واحدهای تولیدی بزرگ (واحدهای نیروگاهی حرارتی) بصورت موازی قرار گرفته و در

سمت مصرف کنندگان توان به عنوان یک منبع جانشین توان نصب می شوند. این واحدهای تولیدی کوچک بعنوان یک منبع درآمد، که مصرف کنندگان انرژی مورد نیاز خود را در مناطق دوردست از آن خریداری می کنند برای شبکه عمل می کنند و یا توان تولیدی محلی خود را در اختیار شبکه قرار می دهند. قطع این واحدهای تولیدی کوچک که بصورت موازی با شبکه کار می کنند مطمئنا باعث از بین رفتن تاثیرات مفید این واحدهای تولیدی بر بارزدایی خواهد شد و حتی ممکن است تاثیرات منفی بر روی روشهای بارزدایی داشته باشد. اکثر این واحدهای تولیدی کوچک که عموماً در سیستمهای توزیع نصب می شوند یا دارای لختی و ثابت اینرسی بسیار کوچک هستند و یا فاقد قسمت متحرک (مانند شفت روتور) هستند، از اینرو هنگام تبدیل سیستمهای کوچک به حالت جزیره ای اینرسی معادل سیستم کاهش می یابد و این امر باعث می شود که در پی گذر به حالت جزیره ای، فرکانس سریعاً افت کرده و منجر به عملکرد رله های حفاظتی و خروج متوالی واحدهای تولیدی دیگر شود، بنابراین روشهای بارزدایی معمول که در سیستمهای قدرت بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد در سیستمهای کوچک کارایی نخواهد داشت. روشهای بارزدایی فرکانسی سنتی، ایستا<sup>۱</sup> هستند از این نظر که بصورت ویژه اجرا شده و مختص یک موقعیت خاص می باشند. این روشها شامل توابع و روابط از قبل تعیین شده ای هستند که در یک موقعیت خاص اجرا می شوند. با توجه تغییرات لحظه ای سیستمهای قدرت و خاصیت دینامیکی آنها، سیستمهای قدرت مدرن امروزی نیاز به روشهای بارزدایی تطبیقی و دینامیکی (پویا)<sup>۲</sup> دارند. امروزه رله های مدرن مبتنی بر میکروپروسور با سیستمهای ارتباطی کامل، امکان اجرای طرح های بارزدایی فرکانسی تطبیقی و پویا را بر روی سیستمهای قدرت فراهم نموده است. در ادامه مواردی که باید هنگام طراحی طرحهای بارزدایی فرکانسی مد نظر قرار داد را مورد بررسی قرار خواهیم داد [۱۱، ۸، ۴].

---

<sup>۱</sup> Static

<sup>۲</sup> Dynamic and Adaptive

## ۲-۸-۳- نیازهای اساسی در طراحی بارزدایی فرکانسی

در طرح های بارزدایی مطلوب است سریعاً میزان کسری توان تشخیص داده شده و مقدار دقیقی از اضافه بار برای بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی خود قطع شوند. برای شبکه‌های کوچک تشخیص دقیق این موارد در رویدادهای پیش بینی نشده بسیار سخت و غیر قابل اجرا می باشد. با در نظر گرفتن ماهیت نوسانی افت فرکانس واضح است که طراحی برنامه بارزدایی که بتواند یک مقدار دقیق از بار را که برابر با اضافه بار است را در لحظه اغتشاش قطع کند بسیار مشکل است. این نوسانات فرکانسی برنامه های بارزدایی را بسمت استفاده از متوسط نرخ تغییرات فرکانس متمایل می کنند. طراحی یا تحلیل یک الگوی حذف بار نیازمند آگاهی از ارتباط بین مفاهیم بار، فرکانس، ولتاژ در سیستم قدرت است. در ادامه فاکتورهایی که باید در توسعه یک برنامه بارزدایی در نظر گرفته شوند مورد بررسی قرار می گیرند.

قبل از ارائه یک برنامه بارزدایی ضروری است که مواردی از جمله فرکانس های آستانه<sup>۱</sup> شروع بارزدایی در هر مرحله، میزان باری که قطع می شود، تعداد مراحل بارزدایی، زمان تاخیر در هر مرحله از بارزدایی و فاصله بین مراحل بارزدایی تعیین شود. در ادامه به طور مختصر در مورد هریک از آنها مطالبی بیان می شود.

### ۲-۸-۳-۱- فرکانس آستانه شروع بارزدایی

فرکانس های آستانه در هر مرحله بدین منظور در نظر گرفته می شوند تا تعیین کنند که سیستم قدرت تا چه فرکانسی می تواند بدون حذف بار به کار ادامه دهد. سیستم قدرت دارای توانایی ذاتی برای حفظ فرکانس کار دائم در برابر محدوده ای از اختلالهای بار است و بنابراین اغلب نیازی به حذف بار ندارد. این محدوده کار مجاز دائم، خود تابعی از شرایط عملکرد توربینهای سیستم قدرت است و بنابر استاندارد IEEE حدود ۵/۰ Hz است. آغاز بارزدایی می تواند مبتنی بر خروج فرکانس از ناحیه مجاز باشد. بعبارت دیگر می توان حذف بار را به نحوی طراحی کرد که به محض خروج فرکانس از ناحیه کار دائم، حذف بار آغاز شود. فاصله آستانه فرکانس از فرکانس نامی در مراجع گوناگون متفاوت است، اما بطور کلی در مراجع مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۹ هرتز در نظر

<sup>۱</sup> Threshold Frequency

گرفته می شوند. یعنی در سیستمی با فرکانس نامی  $50\text{ Hz}$  فرکانس شروع بارزدایی بین  $49/8\text{ Hz}$  تا  $49/1\text{ Hz}$  است [۵-۱۲].

برای سیستمهای بزرگ بهم پیوسته انحرافات فرکانس بیشتر از  $0/2-0/3\text{ Hz}$  معمولاً شاخصی از یک اغتشاش شدید است و بنابراین بارزدایی باید در سطوح بالاتر فرکانس مثلاً  $59/3\text{ Hz}$  آغاز شود. بطور کلی این مقادیر آستانه تابع رفتار بار، رفتار واحدهای تولیدی رزرو سیستم و از همه مهمتر دامنه فرکانس مجاز کارکرد اجزای سیستم قدرت، بویژه توربینهاست [۱۱].

## ۲-۸-۳-۲- میزان حذف بار

بطور کلی میزان حذف بار وابسته به دامنه اضافه بارهای سیستم، آستانه فرکانس، لختی سیستم (H) و نیز کیفیت توانی است که شرکت برق ملزم به ارائه آن است. مقدار باری که در پی اغتشاشات قطع می شوند باید به اندازه‌ای باشد که فرکانس بتواند به مقدار نامی و یا نزدیک به مقدار نامی خود بازگردد. بدین منظور مقدار باری که قطع می شود باید نزدیک به مقدار اضافه بار یا همان کسری توان باشد. بازگشت فرکانس به مقدار نامی خود در لحظات ابتدایی ضروری نمی باشد، اگر فرکانس به نزدیکی مقدار نامی خود برسد، واحدهای تولیدی باقیمانده در سیستم توسط سیستم گاورنر خود می توانند فرکانس را به مقدار دقیق نامی خود بازگردانند. اگر در این شرایط میزان ظرفیت تولیدی باقیمانده توانایی جبران پیک اضافه بار را نداشته باشند، اپراتور بهره بردار سیستم بعد از گذر زمان نسبتاً بیشتر مقدار دیگری از بارهای اضافی را قطع می کند و یا میزان تولید را افزایش می دهد [۱۱و۵].

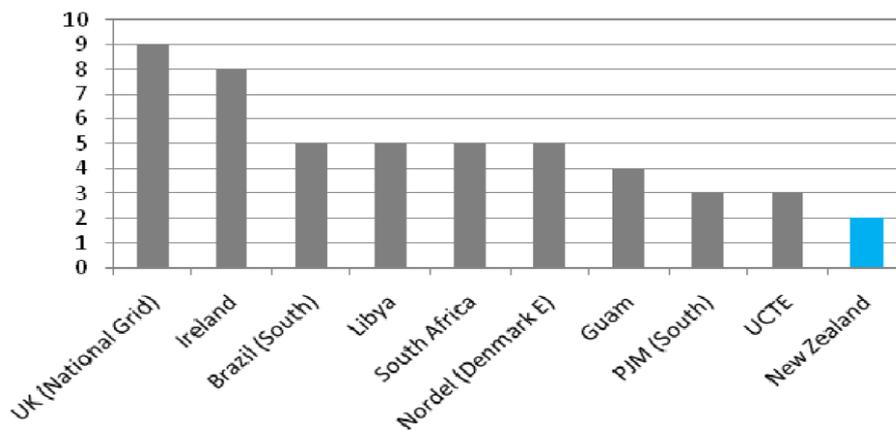
بدلیل آسیب رسیدن به توربینهای بخار توصیه می شود که بارزدایی در چندین مرحله صورت گیرد، چون با هر قطع و بازگرداندن بار تنش های مکانیکی به شفت و پره های توربین وارد شده که باعث وارد آمدن صدمات جدی به توربین می شود. بنابراین بهتر است در لحظات اولیه اغتشاش افت فرکانس کاهش داده شود و فرکانس سیستم در مقداری کمتر از مقدار نامی اش پایدار شود. از این لحاظ باید مصالحه ای بین مقدار باری که قطع می شود در نظر گرفته شود تا در شرایط بروز اغتشاش، هم افت فرکانس متوقف شده و هم تنشهای مکانیکی وارده بر توربین به حداقل برسد.

برنامه های بارزدایی معمولاً طوری طراحی می شوند که مقدار اضافه بار را در چندین مرحله قطع کنند و تا جایی که امکان دارد مقدار باری که در شرایط اضافه بار قطع می شود را کاهش

دهند. بعلاوه مقدار باری که در هر مرحله قطع می شود، معمولاً در نقاط مختلف سیستم توزیع می شود تا نوسانات توان که منجر به تریپ شدن خطوط انتقال می شوند را به حداقل برسانند [۵].

### ۲-۸-۳-۳- تعداد مراحل بارزدایی

در این زمینه استاندارد برای تعداد مراحل بارزدایی تدوین نشده است. تعداد پله ها در برخی مراجع ۳ و در برخی دیگر ۱۲ یا ۲۰ پله است [۵]. اما آنچه در بررسی مراجع بیشتر به چشم می خورد توصیه ۳ تا ۵ پله است [۱۰-۵]. شکل (۲-۱۵) نمونه ای از تعداد مراحل بارزدایی را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود اکثر طرح های بارزدایی در طی ۳ تا ۵ مرحله اجرا می شوند. [۱۲].



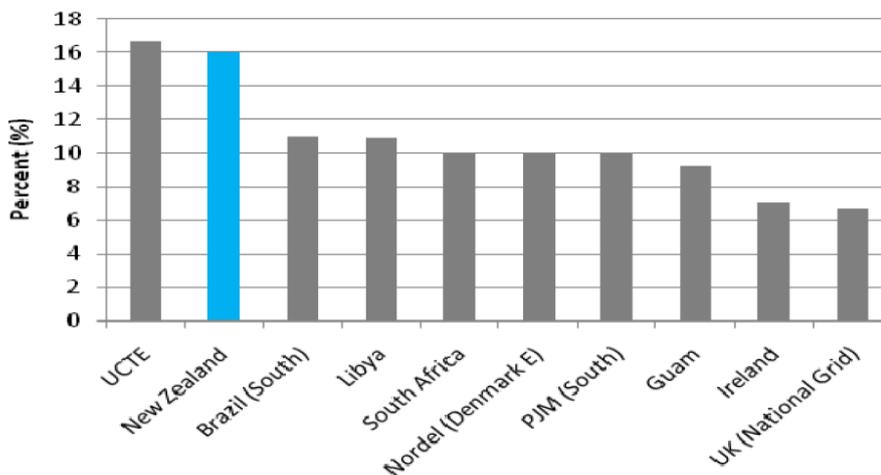
شکل (۲-۱۵) تعداد مراحل بارزدایی را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود [۱۲].

### ۲-۸-۳-۴- میزان قطع بار در هر مرحله

تقسیم بار میان مراحل بارزدایی ممکن است به روشهای مختلفی اجرا شود. اگر مقدار زیادی از بار در مرحله اول بارزدایی قطع شود این طرح برای عدم تطابق زیاد بین تولید و مصرف مناسب است. هرچند که این طرح در اغتشاشات کوچک منجر به بارزدایی بیش از حد میشود. برعکس اگر یک مقدار کم از بار در مرحله اول بارزدایی قطع شود و بقیه بار اضافی در مراحل بعدی قطع شوند این طرح مناسب برای اغتشاشات کوچک است. هرچند که در اغتشاشات بزرگ این طرح ممکن است منجر به افت شدید فرکانس شود. یک طرح مناسب برای بارزدایی آن است که مقدار کمی از

بار را در مرحله اول بارزدایی، مقدار زیادی از بار را در مراحل میانی و مقدار کم باقیمانده را در مرحله نهایی قطع کند [۵-۷،۱۳].

در رابطه با این موضوع بیشتر مراجع پیشنهاد می کنند که میزان قطع بار در مرحله اول بیشتر از مراحل بعدی باشد یعنی میزان قطع بار در گام اول در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کل حذف بار باشد، اما این موضوع در سیستمهای کوچک نتایج مناسبی را نخواهد داشت و منجر به اضافه فرکانس برای اختلالهای کوچک می شود. ظرفیت بزرگترین واحد تولیدی یا بار سنگین ترین خط نیز بعنوان توصیه ای برای گام اول مطرح شده است. یک توصیه کلی نیز آن است که میزان قطع بار بعدی لااقل برابر یا بزرگتر از مرحله اول باشند. به هر حال مهمترین نکته در تعیین میزان قطع هر پله جلوگیری از اضافه حذف ، بویژه در مرحله اول است که این موضوع با شبیه سازی و بررسی سیستمهای قدرت بطور جداگانه قابل پیش بینی می باشد [۵-۷،۱۳]. شکل (۲-۱۶) نمونه ای از متوسط میزان باری که در هر مرحله از بارزدایی قطع می شود را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود اکثر طرح های بارزدایی، بطور متوسط در هر مرحله ۱۰ درصد از میزان اضافه بار را قطع می کنند [۱۲].



شکل (۲-۱۶) تعداد مراحل بارزدایی را برای چندین طرح بارزدایی فرکانسی موجود [۱۲].

## ۲-۸-۳-۵- زمان تاخیر در هر مرحله از بارزدایی

مکانیسم بارزدایی همانند هر مکانیسم دیگری با تاخیری ذاتی روبروست که این تاخیر ذاتی برای جلوگیری از تداخل بین مراحل بارزدایی مورد نیاز است. این زمان تاخیر برابر با مجموع زمان اندازه‌گیری شاخص‌ها، ارتباط این شاخص‌ها به مرکز تصمیم‌گیری و پردازش آنها، تاخیر عملکرد رله فرکانسی و زمان عملکرد بریکر است. در بسیاری از مراجع این زمان تاخیر بین ۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه [۱۴،۳] (برای شبکه‌های کوچک) تا ۰/۳ تا ۰/۳ ثانیه (برای شبکه‌های بزرگ) [۵-۷،۱۳] در نظر گرفته شده است. در بعضی از طرح‌های بارزدایی زمان تاخیر در تمامی مراحل ثابت در نظر گرفته می‌شود، اما این امر ضروری نمی‌باشد و در بسیاری دیگر از طرح‌ها زمان تاخیر با توجه به هر مرحله از بارزدایی تنظیم می‌شود، بدین صورت که زمان تاخیر در مراحل اولیه بارزدایی (جهت توقف سریع افت فرکانس) نسبت به مراحل پایانی بسیار کمتر می‌باشد [۵-۱۱].

## ۲-۸-۳-۶- فاصله بین مراحل بارزدایی

فاصله بین مراحل بارزدایی به تعداد مراحل بارزدایی وابسته است. بدین معنا که باید بتوانیم تعداد مشخصی از مراحل بارزدایی را در بازه فرکانسی موجود بین آستانه فرکانس سیستم قدرت و حداقل فرکانس مجاز آن توزیع کنیم. عامل مهمتر در تعیین فاصله بین مراحل بارزدایی، حفظ هماهنگی این مراحل است. چنانچه فاصله مراحل بارزدایی بسیار کم باشد، در مدت زمانی که سیستم قدرت مشغول پاسخ دادن به یک مرحله از بارزدایی است، مرحله بعدی فعال شده و میزان بیشتر و احتمالاً اضافه بر نیاز از بار قطع می‌شود و به این ترتیب ممکن است سیستم بسادگی با اضافه قطع و عواقب آن روبرو شود. از اینرو در تنظیم فاصله بین مراحل باید پاسخ سیستم به مراحل دیگر بارزدایی را در نظر داشت. در این پاسخ دو عامل از اهمیت بهتری برخوردارند: (۱) ثابت اینرسی سیستم قدرت (۲) اندازه قطع بار در مرحله قبل. هرچه ثابت اینرسی سیستم (H) کوچکتر باشد باید در تعیین فاصله بین مراحل بارزدایی دقت بیشتری لحاظ شود. در این مورد نیز مراجع مختلف گامهای متفاوت ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۶ هرگز را پیشنهاد کرده‌اند [۵-۷،۱۳].

## ۲-۹- روشهای بارزدایی فرکانسی متداول در سیستمهای قدرت

بطور کلی بارزدایی تحت فرکانس آخرین اقدام موثر در برابر یک افت شدید فرکانس در سیستم قدرت است. بنابراین هنگامی که یک سیستم قدرت دچار یک اغتشاش شدید می‌شود و یا هنگامی که یک عدم تعادل توان بزرگ بین تولید و مصرف رخ می‌دهد، توانایی ایجاد تعادل در توان و در پی آن پایداری فرکانسی مستقیماً به استراتژی بارزدایی فرکانسی وابسته است. طرح‌های بارزدایی فرکانسی بسیاری امروزه در سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه تعدادی از این طرح‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

اطلاعات گردآوری شده از طرح‌های بارزدایی برای اکثر مناطق آمریکای شمالی NERC<sup>۱</sup> و کشورهای فرانسه، ایرلند، دانمارک و سایر کشورها در جدول (۲-۳) خلاصه شده است. این جدول مراحل بارزدایی، مقادیر فرکانس شروع مراحل بارزدایی<sup>۲</sup>، زمان‌های تاخیر و درصدی از بار که در هر مرحله قطع می‌شود را نشان می‌دهد. این نکته را باید در نظر داشت که این پارامترها بر اساس مطالعات دینامیکی سیستم تعیین شوند [۵].

همانطور که در جدول مشخص شده است مواردی که مربوط به فرکانس آستانه شروع مراحل بارزدایی، تعداد مراحل بارزدایی و میزان بار قطع شده در هر مرحله از بارزدایی در قسمت ۲-۸ بیان شد، در این طرح‌ها رعایت شده است. در ادامه چند مورد از این استانداردها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

---

<sup>۱</sup> North American Electrical Reliability Corporation  
<sup>۲</sup> Pickup Frequencies

جدول (۲-۲) خلاصه ای از معیارهای بارزدایی فرکانسی در NERC [۵].

نام موسسه	درصد بار قطع شده همراه با فرکانس آستانه هر مرحله بر حسب هر تتر									
	f <sub>1</sub>	بار قطع شده	f <sub>2</sub>	بار قطع شده	f <sub>3</sub>	بار قطع شده	f <sub>4</sub>	بار قطع شده	f <sub>5</sub>	بار قطع شده
WECC <sup>۱</sup>	۵۹/۱	%۵/۳	۵۸/۹	%۵/۹	۵۸/۷	%۶/۵	۵۸/۵	%۶/۷	۵۸/۳	%۶/۷
MAPP <sup>۲</sup>	۵۹/۳	%۱۰	۵۹	%۱۰	۵۸/۷	%۱۰				
ERCOT <sup>۳</sup>	۵۹/۳	%۵	۵۸/۹	%۱۰	۵۸/۵	%۱۰				
MAIN <sup>۴</sup>	۵۹/۳	%۱۰	۵۹/۰	%۱۰	۵۸/۷	%۱۰				
SPP <sup>۵</sup>	۵۹/۳	%۱۰	۵۹/۰	%۱۰	۵۸/۷	%۱۰				
ECAR <sup>۶</sup>	۵۹/۵	%۵	۵۹/۳	%۵	۵۹/۱	%۵				
NPCC <sup>۷</sup>	۵۹/۳	%۱۰	۵۸/۸	%۱۵	Manual					
MAAC <sup>۸</sup>	۵۹/۳	%۱۰	۵۸/۹	%۱۰	۵۸/۵	%۱۰				
FRCC <sup>۹</sup>	۵۹/۷	%۹	۵۹/۴	%۷	۵۹/۱	%۷	۵۸/۸	%۶	۵۸/۵	%۵
NWPP <sup>۱۰</sup> direct service industry(DSI) load	۵۹/۳	%۲۵	۵۹/۲	%۲۵	۵۹/۱	%۲۵	۵۹/۰	%۲۵	۵۸/۸	%۵/۶
NWPP Non- (DSI) load	۵۹/۳	%۵/۶	۵۹/۲	%۵/۶	۵۹/۱	%۵/۶	۵۹/۰	%۵/۶		
Ireland ESB (50Hz)	۴۸/۵	%۱۳	۴۸/۴	%۱۳	۴۸/۳	%۱۳	۴۸/۲	%۲۶		
Nordel (50Hz)	۴۸/۸	%۱۰	۴۸/۶	%۱۰	۴۸/۴	%۱۰	۴۸/۲	%۱۰	۴۸/۰	%۱۰

Western Electricity Coordinating Council (WECC)<sup>۱</sup>

Mid Continent Area Power Pool (MAPP)<sup>۲</sup>

Electric Reliability Council of Texas (ERCOT)<sup>۳</sup>

Mid America Interconnected<sup>۴</sup>

Southwest Power Pool (SPP)<sup>۵</sup>

Southwest Power Pool (SPP)<sup>۶</sup>

Northeast Power Coordinating Council (NPCC)<sup>۷</sup>

Mid Atlantic Area Council (MAAC)<sup>۸</sup>

Florida Reliability Coordinating Council (FRCC)<sup>۹</sup>

North West Power Pool (NWPP)<sup>۱۰</sup>

## ۲-۹-۲- معیارهای بارزدایی فرکانسی در NERC

در آمریکا و کانادا معیارهای بارزدایی توسط انواع انجمن های مشاوره ای قابلیت اطمینان انرژی و اپراتورهای بهره بردار سیستم های قدرت تعیین می شود. فرکانس های قطع بار و سطوح بارزدایی برای آمریکا و کانادا بر اساس اسناد موجود هماهنگ شده توسط این نواحی در جدول (۳-۲) نشان داده شده است. در هیچ یک از این مناطق نرخ تغییرات فرکانس  $df/dt$  بعنوان معیار بارزدایی مورد بحث قرار نمی گیرد. بطور کلی بارزدایی های اجرا شده در محدوده NERC در طی سه تا پنج مرحله انجام می شوند. فرایند بارزدایی در این روشها از فرکانس  $59.7\text{Hz}$  تا  $59.3\text{Hz}$  آغاز می شود و فاصله بین مراحل بارزدایی از  $0.2\text{Hz}$  تا  $0.5\text{Hz}$  در نظر گرفته می شود که در هر مرحله ۵ تا ۱۵ درصد از بار سیستم قطع می شود. با نگاهی گذرا به این روشها مشاهده می شود که در روشهایی که تعداد مراحل بارزدایی بیشتر است درصد کمتری از بار در هر مرحله قطع می شود. تعداد کمی از معیارهای بارزدایی در زمینه زمانهای تاخیر جهت بارزدایی در هر مرحله می باشند. عموماً زمانهای قطع بار در این روشها از  $0.1\text{s}$  تا  $0.4\text{s}$  در نظر گرفته می شود. معیارهای بارزدایی در کشورهای انگلستان، فرانسه و ایرلند افت فرکانس به اندازه  $1/5\text{Hz}$  تا  $1/2\text{Hz}$  را معیاری جهت آغاز فرایند بارزدایی و فاصله بین مراحل بارزدایی از  $0.1\text{Hz}$  تا  $0.2\text{Hz}$  در نظر گرفته می شود. زمان تاخیر در طی فرایند بارزدایی در این مناطق حدوداً  $0.15\text{s}$  می باشد و در هر مرحله ۱۰ تا ۱۳ درصد از بار سیستم قطع می شود [۵].

با توجه به جدول (۳-۲)، انجمن FRCC در فلوریدا الزاماتی را برای فرایند بارزدایی تعیین کرده اند که بشرح زیر می باشد:

- بارهای صنعتی عضو این انجمن باید تحت نظر رله های فرکانسی نصب شوند که در شرایط اضطراری با قطع این بارها از فروپاشی شبکه جلوگیری بعمل آید.
- در طرح بارزدایی ارائه شده توسط این انجمن در شرایط اضطراری تقریباً ۵۶٪ از کل بارهای سیستم قطع خواهند شد.
- فرایند بارزدایی در طی ۹ مرحله انجام می شود که اولین مرحله بارزدایی با افت فرکانس به مقدار  $59.7\text{Hz}$  آغاز میشود و آستانه فرکانس برای آخرین مرحله  $59.1\text{Hz}$  می باشد.

مقادیر آستانه فرکانس برای شروع هر مرحله از بارزدایی، مقدار باری که در هر مرحله قطع

می شود و زمان تاخیری که مقدار بار مورد نظر بعد از این زمان از سیستم قطع میشود در جدول (۲-۴) آمده است.

جدول (۲-۳) مراحل بارزدایی در FRCC [۱۵].

مراحل بارزدایی	فرکانس آستانه (Hz)	زمان تاخیر (s)	درصد بار قطع شده	مجموع بار قطع شده (%)
A	۵۹/۷	۰/۲۸	۹	۹
B	۵۹/۴	۰/۲۸	۷	۱۶
C	۵۹/۱	۰/۲۸	۷	۲۳
D	۵۸/۸	۰/۲۸	۶	۲۹
E	۵۸/۵	۰/۲۸	۵	۳۴
F	۵۸/۲	۰/۲۸	۷	۴۱
L	۵۹/۴	۱۰	۵	۴۶
M	۵۹/۷	۱۲	۵	۵۱
N	۵۹/۱	۸	۵	۵۶

مراحل A تا F در پی افت فرکانس بترتیب بارها را قطع می کنند و مراحل L و M و N مراحل ویژه ای هستند که اگر در طی اجرای مراحل اولیه بارزدایی افت فرکانس متوقف شود و به یک مقدار ثابتی میل کند اجرا خواهند شد، هدف از اجرای این مراحل جلوگیری از باقی ماندن فرکانس در پایین تر از مقدار نامی آن است. بنابراین اگر پس از اجرای چند مرحله بارزدایی فرکانس به ۵۹/۴ Hz برسد و برای زمانی حدود ۱۰ ثانیه در همین محدوده باقی بماند ۵٪ از کل مقدار بار باقیمانده قطع می شود تا فرکانس به مقدار نامی خود برسد. کارایی این طرح بارزدایی برای مدت ۵ سال توسط گروه تحقیقاتی FRCC مورد آزمایش قرار گرفت، براساس این طرح فرکانس در طی زمان ۱۲ ثانیه به بالای ۵۹/۷ Hz خواهد رسید، بعلاوه فرکانس نباید بدلیل قطع بار اضافی از ۶۱/۸ Hz تجاوز کند.

یکی دیگر از طرح های بارزدایی سنتی مربوط به استاندارد تدوین شده توسط MAAC می باشد که این طرح بارزدایی بصورت مرحله به مرحله انجام می شود و در هنگام تعیین مقادیر آستانه فرکانس هر مرحله و همچنین مقدار باری که در هر مرحله قطع می شود مسئله حفاظت ژنراتورها در نظر گرفته می گیرد. در این طرح رله های حفاظت ژنراتورها طوری تنظیم می شوند

که ژنراتورها بعد از آخرین مرحله از فرایند بارزدایی عمل کرده و ژنراتور را از مدار خارج کنند. این طرح مطابق جدول (۲-۴) در طی ۳ مرحله اجرا می شود که اولین مرحله از بارزدایی با افت فرکانس به زیر مقدار  $59/3 \text{ Hz}$  آغاز شده و در هر مرحله  $10\%$  از کل بارهای متصل به شبکه قطع می شوند.

جدول (۲-۴) مراحل بارزدایی در MACC [۱۵].

مقدار باری که قطع می شود (درصدی از کل بار)	فرکانس آستانه (Hz)
$10\%$	$59/3$
$10\%$	$58/9$
$10\%$	$58/5$

در این طرح بارزدایی برخلاف بسیاری از طرح های بارزدایی که بارها را بصورت متمرکز در نظر می گیرند، بارها سیستم را بصورت توزیع شده در سراسر سیستم در نظر گرفته و آنها را هنگام بارزدایی قطع می کنند. تعداد مراحل بارزدایی می تواند به بیش از ۳ مرحله افزایش یابد. زمان تاخیر تنظیم شده برای رله های تحت فرکانس، هنگام قطع بار در همه مراحل این طرح بارزدایی  $0/1s$  در نظر گرفته می شود [۵،۱۵].

### ۲-۹-۳- معیارهای بارزدایی فرکانسی در منطقه اروپای شمالی (Nordel)

در سیستم قدرت Nordel (هنگام تدوین این استاندارد) تغییر فرکانس بین محدوده  $49/9 \text{ Hz}$  تا  $50/1 \text{ Hz}$  مجاز بوده و هیچگونه عکس العمل خاصی در طی این شرایط اعمال نخواهد شد. جدول (۲-۵) اقدامات و عکس العمل های مربوط به این استاندارد را در هر سطح فرکانس نشان می دهد.

جدول (۲-۵) برنامه کنترل فرکانس در سیستم Nordel [۵].

فرکانس (f) بر حسب هرتز	عکس العمل
$50/1 > f > 49/9$	بهره برداری عادی
$49/9 > f > 49/5$	فعال شدن سیستم رزرو
$49/5 > f$	راه اندازی سریع واحدهای گازی
$49/0 > f > 47/0$	اجرای بارزدایی فرکانسی (طبق جدول (۲-۶))
$47/5 > f$	از مدار خارج کردن واحدهای حرارتی بزرگ - خاموشی سیستم

جدول (۲-۶) مراحل بارزدایی در سیستم Nordel [۵].

مراحل بارزدایی	نقطه تنظیم اولیه طرح بارزدایی	نقطه تنظیم ثانویه طرح بارزدایی
۱	48/8 Hz --- 0/ 15 s	49/0 Hz --- 20 s
۲	48/6 Hz --- 0/ 15 s	48/6 Hz --- 20 s
۳	48/4 Hz --- 0/ 15 s	48/4 Hz --- 20 s
۴	48/2 Hz --- 0/ 15 s	48/2 Hz --- 20 s
۵	48/0 Hz --- 0/ 15 s	48/0 Hz --- 20 s

همانطور که از جدول (۲-۶) مشخص است بارزدایی در این منطقه در پنج مرحله و با زمان های تاخیر متفاوت در هر مرحله انجام می شود. هدف از زمان های تاخیر در قسمت اول مراحل بارزدایی متوقف کردن افت سریع فرکانس و زمان تاخیر در قسمت دوم جهت بازگرداندن فرکانس به یک سطح قابل قبول در نظر گرفته شده است [۵]. پس از اجرای طرح بارزدایی در قسمت اول، اگر افت فرکانس متوقف شود و در محدوده مجاز قرار گیرد نیازی به اجرای قسمت دوم بارزدایی نیست.

## **فصل ۳: مروری بر کار دیگران در روشهای بارزدایی**

### **فرکانسی**

### ۳-۱- مقدمه فصل

عموما بارزدایی فرکانسی آخرین اقدام در برابر کاهش شدید فرکانس در سیستمهای قدرت است. بنابراین هنگامی که سیستمهای قدرت با اغتشاشات شدید یا کسری زیاد در توان مواجه می‌شوند، جهت حفظ تعادل توان و پایداری فرکانس مستقیما استراتژی بارزدایی فرکانسی را به خدمت می‌گیرند. یک استراتژی بارزدایی مناسب باید موارد زیر را برآورده نماید:

- افت فرکانس را مهار کرده و فرکانس را به مقدار نامی خود بازگرداند.
- زمان سپری شده برای بازگشت فرکانس به مقدار نامی خود به حداقل برسد و از افزایش و کاهش ناگهانی فرکانس در پی بارزدایی پرهیز شود.
- مقدار بار قطع شده در فرایند بارزدایی به حداقل برسد.
- هزینه کلی بارزدایی تا حد ممکن کاهش یابد.

تاکنون مقالات زیادی بر روی بهبود استراتژیهای بارزدایی فرکانسی در سیستمهای قدرت بحث و تمرکز کرده‌اند، این تمرکز خصوصا در تعیین مقدار باری که قطع می‌شود، اولویت بندی بارها و تعیین عدم تعادل توان بین تولید و مصرف می‌باشد. در ادامه تعدادی از مقالات که در زمینه روشهای بارزدایی فرکانسی مطالب و روشهایی را ارائه کرده اند بطور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۳-۲- بارزدایی فرکانسی در سیستمهای قدرت بزرگ

در مرجع [۱۶] یک روش تطبیقی برای حفاظت سیستمهای قدرت در برابر ناپایداری دینامیکی و فروپاشی فرکانس ارائه شده است. در این مقاله فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF) بوسیله الگوریتم غیربازگشتی نیوتن تخمین زده می‌شود. اندازه اغتشاش با استفاده از معادلات نوسان ژنراتور تعیین می‌شود.

در مرجع [۱۷] از میزان حساسیت باسها نسبت به تغییرات ولتاژ ( $dv/dt$ ) در اولویت بندی باسها برای بارزدایی استفاده شده است. اندازه عدم تعادل توان با استفاده از نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF) و معادله نوسان تعیین می‌شود و باسهای حساس برای بارزدایی بوسیله نرخ تغییرات

توان اکتیو نسبت به تغییرات ولتاژ ( $dp/dv$ ) مشخص می‌شوند. در این روش ابتدا باسها بر اساس حساسیت آنها نسبت به تغییر ولتاژ ( $dv/dt$ ) اولویت بندی شده و پس از تعیین میزان کسری توان با استفاده از معادله نوسان، مقدار باری که در هر باس در طی فرایند بارزدایی قطع می‌شود از رابطه (۱-۳) تعیین می‌شود که در این رابطه  $P_{def}$  میزان کسری توان و  $\Delta P_i$  میزان باری است که از هر باس قطع می‌گردد.

$$\Delta P_i = \frac{(dP_i/dV_i) \cdot \Delta V_i}{\sum [(dP_i/dV_i) \cdot \Delta V_i]} \times P_{def} \quad (1-3)$$

مرجع [۱۸] دو الگوریتم بارزدایی تطبیقی متمرکز را ارائه می‌کند که حتی در شرایط اغتشاشات بزرگ و ترکیبی هم می‌تواند تطبیق پذیری طرح‌های بارزدایی فرکانسی و پایداری سیستم‌های قدرت را بهبود بخشد. این روش ابتدا بر اساس پاسخ و سپس بر اساس ترکیبی از روشهای بر اساس پاسخ و رویداد عمل می‌کند. پارامترهای این روش بر اساس اندازه اغتشاش بطور تطبیقی انتخاب می‌شود. شبیه سازی دینامیکی مدل دینامیکی یک سیستم قدرت واقعی برای تست الگوریتم پیشنهادی بکار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از این الگوریتم از خاموشی‌های سیستم‌های قدرت جلوگیری می‌شود.

در مرجع [۸] هدف از بارزدایی فرکانسی تطبیقی چنین بیان شده است:

۱- محاسبه کمبود توان اکتیو در سیستم پس از بروز اغتشاشات

۲- توزیع میزان کسری توان ( $P_{def}$ ) در چندین مرحله از بارزدایی

طرح بارزدایی ارائه شده در این مرجع پس از تعیین فرکانس معادل سیستم و استفاده از مشخصه شیب فرکانس در سیستم‌های جزیره‌ای شده، اثر مدل بار را در معادله نوسان در نظر می‌گیرد تا مقدار کسری توان محاسبه شده دقیق تر باشد، همچنین با استفاده از شیب فرکانس در هر مرحله از بارزدایی، میزان کسری توان را اصلاح می‌کند. با استفاده از این روش مقدار باری که در طی فرایند بارزدایی قطع می‌گردد به حداقل رسیده است. در ادامه با شبیه سازی‌های مختلف، اثر انواع توزیع کسری توان را در بین مراحل بارزدایی مانند جدول (۱-۳) مورد بررسی قرار داده و در پایان با استفاده از شیب فرکانس معادل سیستم  $\frac{df_{col}}{dt}$  در هر مرحله از بارزدایی مقدار بار قطع شده در هر مرحله را اصلاح کرده و مانند شکل (۱-۳) یک رابطه خطی بین میزان کسری توان در سیستم و میزان بار قطع شده در طی فرایند بارزدایی بدست می‌آورد.

تنظیم مراحل بارزدایی باتوجه به تحت نظر قرار دادن تغییرات  $\frac{df_{COL}}{dt}$  بین دو مرحله مجاور بارزدایی و مقایسه آن با مقدار اصلی (ماکزیمم مقدار) امکان پذیر است. برای مثال مرحله اول بارزدایی میتواند با توجه به تغییرات در  $\frac{df_{COL}}{dt}$  بین مقدار اصلی  $\frac{df_{COL,MAX}}{dt}$  و  $\frac{df_{COL}}{dt}$  در مرحله اول اصلاح شود این تغییر با  $\Delta_1$  مشخص شده است. بطور مشابه مرحله  $i$  ام بارزدایی می تواند با توجه به تغییرات در  $\frac{df_{COL}}{dt}$  بین اولین و  $i-1$  امین مرحله بارزدایی تنظیم شود که این تغییر با  $\Delta_i$  مشخص شده و قبل از اینکه  $i$  امین مرحله بارزدایی فعال شود درصد تغییرات  $\frac{df_{COL}}{dt}$  ابتدا محاسبه می شود.

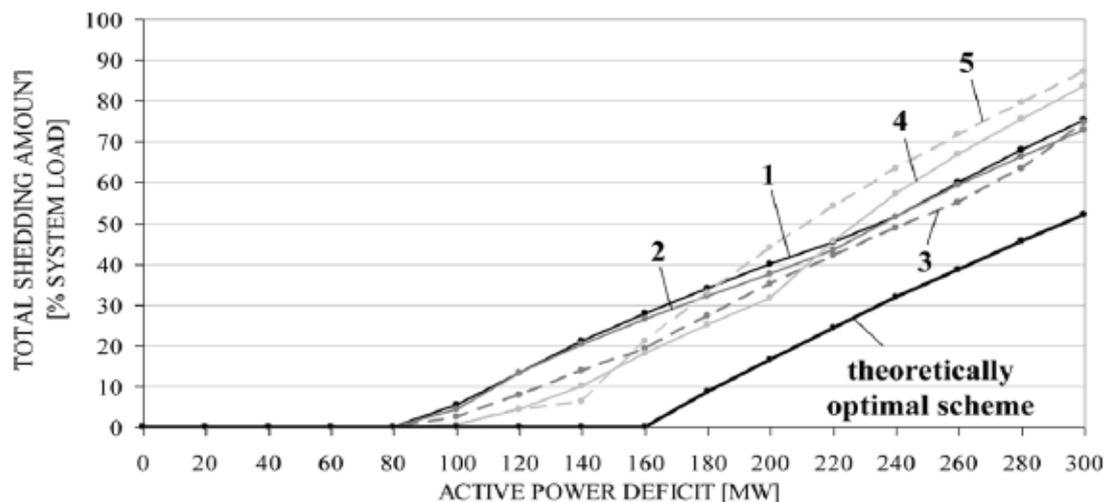
$$\Delta_i \% = \frac{\Delta_i}{df_{COL}/dt} \cdot 100 \quad (2-3)$$

با توجه به مقدار محاسبه شده در رابطه (2-3) مقدار باری که در هر مرحله قطع خواهد شد بصورت رابطه (3-3) اصلاح می شود:

$$P'_{shed,i} = P_{shed,i} - \Delta_i \% \quad (3-3)$$

جدول (1-3) پنج توزیع مختلف کسری توان در مراحل بارزدایی [8].

Distribution number	Frequency thresholds [Hz]			
	49.0	48.8	48.4	48.0
	$P_{shed,1}$	$P_{shed,2}$	$P_{shed,3}$	$P_{shed,4}$
1	50	20	20	10
2	35	30	20	15
3	25	25	25	25
4	15	20	30	35
5	10	20	20	50



شکل (۳-۱) رابطه خطی بین میزان کسری توان و کل مقدار بار قطع شده در فرایند بارزدایی [۸].

اخیرا مسئله توسعه استراتژی بارزدایی فرکانسی اغلب بعنوان یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی در نظر گرفته می‌شود. در مراجع [۱۹] و [۲۰] یک بارزدایی فرکانسی موثر، ساده و سریع با توسعه بارزدایی فرکانسی بهینه، رزرو چرخان سریع، منابع تولید پراکنده و یک پخش بار مجدد بعنوان یک کسری توان ناگهانی در تولید به منظور جلوگیری خاموشی سیستم گسترش یافته است. روند بهینه پیشنهادی به سه مرحله با توابع هدف متفاوت در هر مرحله بمنظور تضمین امنیت و قابلیت اطمینان سیستم قدرت تقسیم شده است. یک الگوریتم ژنتیک با چندین هدف بر مبنای بهینه نمودن تکنیک بارزدایی بمنظور برقراری تعادلی بین توابع هدف ناسازگار ارائه شده است. شبیه سازی های عددی بمنظور تأیید این سه استراتژی بکار گرفته شده‌اند.

در مرجع [۲۱] الگوریتم بهینه سازی کولونی مورچگان<sup>۱</sup> (ACO) برای حل مسائل بارزدایی ارائه شده است. در این مرجع دو مسئله کلیدی بارزدایی فرکانسی حل شده است، در مسئله اول باسبارهای مناسب برای بارزدایی انتخاب می‌شوند که این انتخاب بر اساس حساسیت حدود پایداری ولتاژ نسبت به تغییرات بار در باسهای مختلف انجام می‌شود. مسئله دوم مقدار بار قطع شده در هر باس در فرایند بارزدایی می‌باشد، که با اجرای الگوریتم مورچگان مسئله بهینه سازی غیر خطی در چهارچوب پخش بار بهینه حل می‌شود. در پایان یک شرایط بحرانی از سیستم تست ۳۰ باسه IEEE برای تأیید عملکرد روش پیشنهادی شبیه سازی می‌شود.

<sup>۱</sup> Ant Colony Algorithm

در مرجع [۲۲] یک مدل بهینه با روش درونیابی برای توسعه استراتژی‌های بارزدایی بمنظور حداقل کردن مقدار بارهای قطع شده ارائه شده است. مدل توسعه یافته می‌تواند در طرح‌های عملیاتی سیستم‌های قدرت اجرا شود و مقدار بار مورد نیاز برای قطع را با توجه به کمترین محدوده مجاز ولتاژ و محدوده بالای توان اکتیو تغییر یافته کاهش دهد. شبیه سازی های یک سیستم ۲۹۱ باسه در برزیل همراه با بارهای سنگین کارایی روش بارزدایی پیشنهادی را نشان می‌دهند.

### ۳-۳- بارزدایی فرکانسی در شبکه‌های کوچک با حضور منابع تولید پراکنده

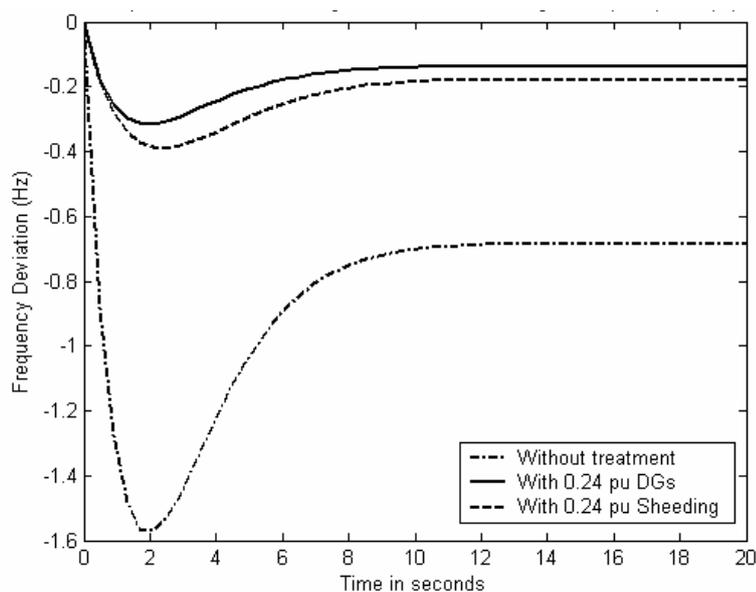
تاکنون تعداد کمی از نشریات و گزارشات تحقیقاتی استراتژی‌های بارزدایی در حضور منابع تولید پراکنده برای سیستم‌های توزیع را مورد بررسی قرار داده‌اند. در ادامه تعدادی از این مقالات تحقیقاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مرجع [۴] دو روش بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی بر پایه اطلاعات فرکانس و شیب فرکانس ( $df/dt$ ) با استفاده از رله‌های فرکانسی برای سیستم‌های جزیره‌ای شده جهت پیدا کردن مقدار بهینه ای از بار که باید برای بهبود پاسخ فرکانسی سیستم قطع شود ارائه می‌کند. در این دو روش زمانهای تاخیر و مقدار باری که در هر مرحله قطع می‌شود با سایر مراحل بارزدایی متفاوت بوده و با توجه به نتایج شبیه سازی و تجربه بهره‌برداران سیستم تعیین می‌شوند. در پایان با شبیه سازی سیستم نمونه بنگلادش و اجرای طرح های بارزدایی پیشنهادی بر روی آن کارایی طرح‌های پیشنهادی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

در مرجع [۲۳] یک استراتژی برای تعیین مقدار باری که در طی فرایند بارزدایی قطع می‌شود یا توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده هنگام افت فرکانس در پی اغتشاشات شدید تولید می‌شود را ارائه می‌کند. در این مرجع یک مدل پاسخ فرکانسی مرتبه پایین<sup>۱</sup> ( $SFR$ ) بمنظور تخمین انحراف فرکانس بکار گرفته می‌شود. تعیین و بدست آوردن ماکزیمم انحراف

<sup>۱</sup> System Frequency Response Model

فرکانس سیستم شامل اطلاعاتی است که برای تخمین مقدار باری که قطع می‌شود و همچنین توان تولیدی توسط واحدهای تولید پراکنده مورد نیاز است. ضمناً پارامترهای مدل برای سطوح مختلف نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع اصلاح شده است. فرایند بارزدایی و پاسخ دینامیکی بهتر سیستم متصل به منابع تولید پراکنده نسبت به تغییرات مشابه توان اکتیو در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) تاثیر حضور منابع تولید پراکنده در فرایند بارزدایی [۲۳].

در پایان این مرجع نتیجه‌گیری می‌شود که تحویل توان از DG ها بهترین پیشنهاد بعنوان یک مرحله ابتدایی از بارزدایی بمنظور جلوگیری از بدتر شدن شرایط عملکرد سیستم در پی افت فرکانس است.

مرجع [۲۴] مروری بر هدف و قوانین UFLS دارد و کاربرد و استفاده آن را در سیستمهای جزیره‌ای گزارش می‌دهد. سطح و توزیع رزرو چرخان، اولویت بندی بارها و پارامترهای ویژه بارزدایی از جمله فرکانس آستانه بارزدایی، مقدار باری که باید از سیستم برای بازگشت فرکانس به مقدار نامی حذف شود، مقدار باری که باید در هر مرحله جدا شود و تاخیر زمانی در نظر گرفته شده در بین هر مرحله از بارزدایی از جمله مواردی است که در این مرجع مورد بحث قرار گرفته است. در پایان یک نمونه از طرح های بارزدایی را بر روی سیستم تست نمونه جزیره‌ای شده اجرا کرده و نتایج را مورد بررسی قرار داده است.

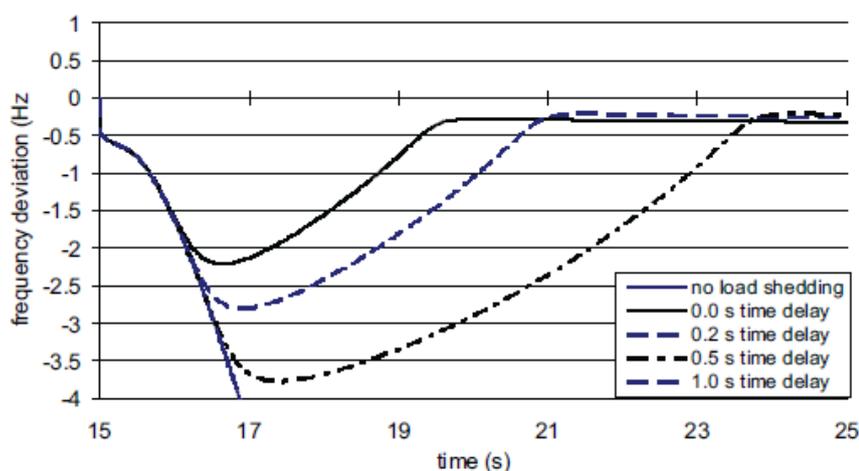
در مرجع [۲۳] یک الگوریتم بارزدایی بر مبنای الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> (GA) برای سیستم‌های توزیع متصل به DG ها در قالب ۲ سناریو با مدل منبع تغذیه ثابت و متغیر ارائه شده است. در این مرجع هدف به حداقل رساندن مجموع بار قطع شده و کاهش تلفات سیستم با در نظر گرفتن محدودیت‌های امنیتی سیستم است. یک سیستم توزیع تست نمونه با ۳۳ بار برای تشریح الگوریتم ارائه شده بکار گرفته می‌شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که روش توسعه یافته ارائه شده می‌تواند بطور موفقیت آمیزی بارزدایی بهینه را در سیستم‌های توزیع جزیره ای شده، در حضور منابع تولید پراکنده و یا بدون اتصال به منابع تولید پراکنده را حل کند.

با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع، ممکن است حضور DG ها باعث ایجاد مسائلی در بهره‌برداری شود و بر روی طرح‌های بارزدایی موجود تاثیر گذار باشد. اگر این موضوع بطور کامل مورد بررسی قرار گیرد، DG ها پتانسیل ایجاد مزایای فراوانی را در بارزدایی خواهند داشت. همچنین در این مقاله نشان داده می‌شود که باقیمانده توان اکتیو DG ها بعد از اعمال بارزدایی ظاهراً بیشتر از مقدار آن در شرایط عدم حضور آنها است (بار کمتری قطع می‌شود). از طرف دیگر درصد تلفات شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل کسری توان با ظرفیت متغیر از توان منبع تغذیه در شرایط حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده بطور آشکار متفاوت است.

مرجع [۲۵] یک تکنیک جدید با تکیه بر ارتباط تدریجی جهت حفظ پایداری شبکه توزیع و بهبود قابلیت اطمینان تغذیه مصرف کنندگان را ارائه کرده است. بارها می‌توانند برطبق میزان اهمیت آنها اولویت بندی شوند و آنهایی که دارای بیشترین اهمیت هستند در آخرین مراحل بارزدایی قطع می‌شوند. استراتژی بارزدایی پیشنهادی و رفتار آن بر روی یک سیستم توزیع با انواع بار از نظر نوع و اندازه آن و DG ها مانند سلولهای خورشیدی، واحدهای تولید همزمان برق و گرما<sup>۲</sup> CHP و واحدهای تولیدی بادی با شبیه سازی دینامیکی آنها در نرم افزار PSCAD اجرا می‌شود. و سپس اندازه اغتشاش (کسری توان) با استفاده از معادله نوسان تخمین زده می‌شود. در این مرجع همچنین اثر زمان تاخیر بر روی پاسخ فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>۲</sup> Combined Heat and Power



شکل (۳-۳) اثر زمان تاخیر در پاسخ فرکانسی سیستم [۲۵].

مرجع [۱۴] روشی را ارائه می‌کند که در آن مقدار بهینه‌ای از بار برای ثابت نگه داشتن فرکانس از سیستم قطع می‌شود. استراتژی بارزدایی ارائه شده در این مرجع بر اساس اطلاعات فرکانس سیستم، نرخ تغییر فرکانس، رضایت مشتریان از پرداخت و تاریخچه بارها صورت می‌گیرد. در این روش با اندازه‌گیری مداوم نرخ تغییرات فرکانس میزان کسری توان در هر مرحله از بارزدایی تعیین شده و قسمتی از بارهای سیستم قطع می‌شود. شرایط مختلف شبیه‌سازی شده همراه با نتایج آنها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در بارزدایی مقدار بهینه‌ای از بار هنگام پایدار سازی فرکانس موثر است.

در مقاله مرجع [۲۶] یک روش جدید برای بهینه‌سازی استراتژی بارزدایی بر اساس اندازه‌گیری آنی اطلاعات بار و ضرایب تنظیم بار-فرکانس ارائه شده است. در این روش بارهای با ضرایب تنظیم فرکانس کوچکتر نسبت به سایر بارها زودتر قطع می‌شوند. همچنین در این مرجع مقاله یک استراتژی بارزدایی با در نظر گرفتن مشخصه‌های فرکانسی بار ارائه شده است و بارهای با ضریب حساسیت کوچکتر نسبت به فرکانس نسبت به سایر بارها در ابتدا قطع می‌شوند تا فرکانس زودتر به مقدار نامی خود بازگردد و سیستم سریعتر پایدار گردد، اما شبیه‌سازی‌های عددی به سیستم‌های تک ماشینه محدود می‌گردند.

مطالب ذکر شده، تحقیقاتی را که بر روی استراتژی‌های بارزدایی صورت گرفته است را ارائه کردند، هرچند بعضی از مسائل اساسی هنوز بخوبی حل نشده‌اند و دارای ابهاماتی هستند. از جمله می‌توان به تاثیر مدل بار در اولویت بندی بارها برای قطع شدن و همچنین بر روی مشخصه پاسخ

فرکانسی سیستم و تعیین دقیق میزان کسری توان که در فرایند بارزدایی نیاز است قطع شود، اشاره کرد. از طرف دیگر روشهای ارائه شده دارای پیچیدگی‌هایی هستند که کاربرد عملی آنها در شبکه‌های کوچک بسیار سخت می‌کند و همچنین بکارگیری این روشها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشند. با توجه به این پیش زمینه‌ها، مسئله توسعه یک استراتژی بارزدایی فرکانسی بهینه در یک سیستم جزیره‌ای شده در حضور منابع تولید پراکنده و در نظر گرفتن مشخصه‌های استاتیکی بار در این پایان نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۴- مروری بر مدل‌های بار و تاثیر آنها بر روی بارزدایی

#### ۳-۴-۱- مفهوم بار در سیستم‌های قدرت

مدلسازی بار در سیستم‌های قدرت تکنیکی است که برای شبیه‌سازی و ارزیابی پایداری سیستم‌های قدرت ضروری می‌باشد. مدلسازی دقیق بارها بدلیل چندین ویژگی بارهای حقیقی کار بسیار سختی است، که از این ویژگی‌ها می‌توان به در دسترس نبودن اطلاعات کامل از بارها در بارهای ترکیبی، تغییر مداوم بارها در هر زمان، هر فصل و هر شرایط آب و هوایی اشاره کرد. بارها در سیستم‌های قدرت به بارهای صنعتی، تجاری، خانگی و بارهای ترکیبی تقسیم بندی می‌شوند.

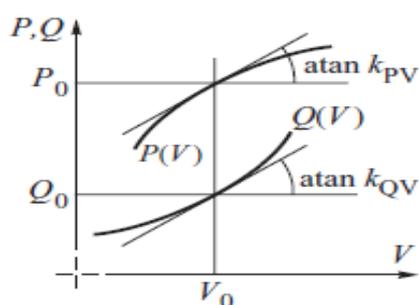
کلمه بار در مهندسی سیستم قدرت مفاهیم مختلفی دارد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۷]:

- وسیله‌ای که به سیستم قدرت متصل شده است و توان مصرف می‌کند.
  - توان اکتیو و راکتیو کل که توسط همه‌ی وسایل متصل به سیستم قدرت مصرف می‌شود.
  - توان خروجی یک ژنراتور یا نیروگاه.
- شبکه‌های انتقال و فوق توزیع توان مورد نیاز بارهای سیستم را به مراکز بارها (بارهای متمرکز در یک شبکه توزیع) که از یکدیگر فاصله داشته و به اصطلاح گسترده هستند انتقال می‌دهند، در حالی که شبکه‌های توزیع باید توان هر یک از مصرف کنندگان منطقه خود را تامین کنند و لذا خیلی فشرده هستند. این بدان معنی است که یک سیستم قدرت نمونه شامل چندصد

نقطه گره در سطح انتقال و فوق توزیع بوده ولی ممکن است دارای یک صد هزار نقطه گره در سطح توزیع باشد. در نتیجه شبکه های توزیع، معمولاً مانند سیستمهای قدرت گسترده مدلسازی نمی شوند و برای شبیه سازی و تجزیه و تحلیل دقیق آنها نیاز است که مدل های دقیقتری از بار نیز در شبیه سازی ها در نظر گرفته شوند. بارها در شبکه های توزیع بعنوان بارهای مرکب معروف هستند. معمولاً هر بار مرکب نمایش دهنده مجموعه ای از تعداد زیادی بارها نظیر موتورها، روشنایی و وسایل الکتریکی می باشد. بنابراین تعیین مدل مرکب معتبر و ساده ای از بارها، مسئله آسانی نبوده و هنوز موضوع تحقیقات زیادی از جمله IEEE Task Force, 1995 است. با توجه به نیاز این پایان نامه به مدل بار جهت استفاده در فرایند بارزدایی، در این قسمت فقط مدل ساده ای از یک بار مرکب (مدل استاتیکی) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در حالت ماندگار، تقاضای بار مرکب به ولتاژ شین ( $V$ ) و فرکانس سیستم ( $f$ ) وابسته است. تابع بیان کننده وابستگی تقاضای بار اکتیو و راکتیو به ولتاژ و فرکانس  $P(V, f)$  و  $Q(V, f)$  به مشخصه های استاتیکی بار<sup>۱</sup> موسوم است. مشخصه های  $P(V)$  و  $Q(V)$  در حالت ثابت بودن فرکانس مشخصه های ولتاژ نامیده شده و مشخصه های  $P(f)$  و  $Q(f)$  در حالت ثابت بودن ولتاژ مشخصه های فرکانس نامیده می شوند.

شیب مشخصه ولتاژ یا فرکانس به حساسیت ولتاژ<sup>۲</sup> یا حساسیت فرکانس<sup>۳</sup> موسوم است. شکل (۳-۴) مفهوم حساسیت بار نسبت به تغییرات ولتاژ را نشان می دهد. حساسیت های فرکانس به طریق مشابهی تعریف می شوند.



شکل (۳-۴) مفهوم حساسیت نسبت به ولتاژ [۲۷].

<sup>۱</sup> Static Characteristics of the Load  
<sup>۲</sup> Voltage Sensitivities  
<sup>۳</sup> Frequency Sensitivities

حساسیت های ولتاژ  $K_{Pv}$  و  $K_{Qv}$  و حساسیت های فرکانس  $K_{Pf}$  و  $K_{Qf}$  معمولاً بر حسب پریونیت نسبت به نقطه کار داده شده بیان شده و عبارتند از:

$$K_{Pv} = \frac{\Delta P/P_0}{\Delta V/V_0} \quad K_{Qv} = \frac{\Delta Q/Q_0}{\Delta V/V_0} \quad (4-3)$$

$$K_{Pf} = \frac{\Delta P/P_0}{\Delta f/f_0} \quad K_{Qf} = \frac{\Delta Q/Q_0}{\Delta f/f_0}$$

که در رابطه بالا  $P_0$ ،  $Q_0$ ،  $V_0$  و  $f_0$  بترتیب توان اکتیو، توان راکتیو، ولتاژ و فرکانس سیستم در نقطه کار داده شده می باشد [۲۷].

از آنجایی که مشخصه های بار مرکب به مشخصه های هر یک از مولفه های آن بستگی دارد، لازم است ابتدا مشخصه های بعضی از بارهای منفرد مهمتر را بدست آورد. با این روش می توان مدل عمومی تر یک بار مرکب را تعیین نمود.

### ۳-۴-۲- انواع مدل های بار

بررسی هایی که تاکنون انجام گرفته است نشان می دهد که خصوصیات بار نقش بسیار مهمی در دینامیک سیستم های قدرت، خصوصاً در شبکه های توزیع دارد. مدل نامناسب بار می تواند منجر به عملکرد ناصحیح در کنترل شبکه و به دنبال آن فروپاشی شبکه شود. مدل بار بیانگر رفتار صدها جزء جداگانه شبکه مانند موتورها، لامپها و سایر وسایل برقی است. این مدل ها در واقع رابطه بین ولتاژ و فرکانس بار را با توان آن بیان می کنند.

اصولاً در محاسبات، امروزه سعی می شود که از معادلات استاتیک بار استفاده شود. این معادلات با زمان تغییر نمی کنند. از آنجایی که همه برنامه های تجزیه و تحلیل سیستم های قدرت، برای مثال پخش بار یا شبیه سازی دینامیکی، نیاز به چنین مدل باری دارند، در این بخش برخی از متداول ترین مدل هایی که مورد استفاده هستند توضیح داده می شوند. این معادلات بار خصوصیات آن را در هر لحظه از زمان بصورت یک تابع جبری از مقدار ولتاژ و فرکانس بیان می کند. در بخش اخیر توضیح داده شد که چگونه توانهای اکتیو و راکتیو انواع بارها به ولتاژ بار

بستگی دارند، ولی چگونگی نمایش ریاضی آنها شرح داده نشد. در ادامه انواع مدل‌های استاتیکی بار مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۸، ۲۷].

### ۳-۴-۲-۱- مدل توان/جریان/امپدانس ثابت

در ساده‌ترین مدل بار یکی از کمیت‌های زیر ثابت فرض می‌شود:

- تقاضای توان (P) ثابت

- تقاضای جریان (I) ثابت

- امپدانس (Z) ثابت

در یک مدل توان ثابت میزان توان اکتیو و راکتیو در تمام شرایط ثابت بوده و با تغییرات ولتاژ هیچ تغییری نمی‌کنند، بنابراین مشخصه‌های آن یعنی  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 0$  فرض می‌شود. این مدل اغلب در محاسبات پخش بار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل جریان ثابت مربوط به تقاضای باری است که بطور خطی نسبت به ولتاژ تغییر می‌کند عبارت دیگر  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 1$ . این مدل نمایش تقاضای توان حقیقی ترکیبی از وسایل مقاومتی و موتوری است [۲۷].

در مدل بار با امپدانس ثابت، تغییرات توان بار با توان دوم ولتاژ نسبت مستقیم دارد، عبارت دیگر  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 2$ . این مدل به خوبی نشان دهنده برخی از بارهای روشنایی است ولی در مدل‌سازی بارهایی که در آنها توان حقیقی بستگی کمی به ولتاژ دارد مناسب نیست. برای بدست آوردن مشخصه عمومی تر ولتاژ، مزایای هر یک از این مشخصه‌ها را می‌توان با استفاده از مدل مرسوم به مدل چندجمله‌ای یا زیپ (polynomial or ZIP) ترکیب نمود. این مدل شامل مجموع جملات مربوط به امپدانس ثابت (Z)، جریان ثابت (I) و توان ثابت (P) بصورت زیر می‌باشد:

$$P = P_0 \left[ a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right] \quad Q = Q_0 \left[ a_4 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + a_5 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_6 \right] \quad (۵-۳)$$

در رابطه بالا  $V_0$ ،  $P_0$  و  $Q_0$  مقادیر مربوط به شرایط کار اولیه هستند. پارامترهای این مدل چند جمله‌ای ضرایب  $a_1$  تا  $a_6$  هستند. در صورت عدم وجود جزئیات اطلاعات ترکیب بار، توان اکتیو معمولاً با مدل جریان ثابت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که توان راکتیو با امپدانس ثابت

نشان داده می شود [۲۹،۲۷].

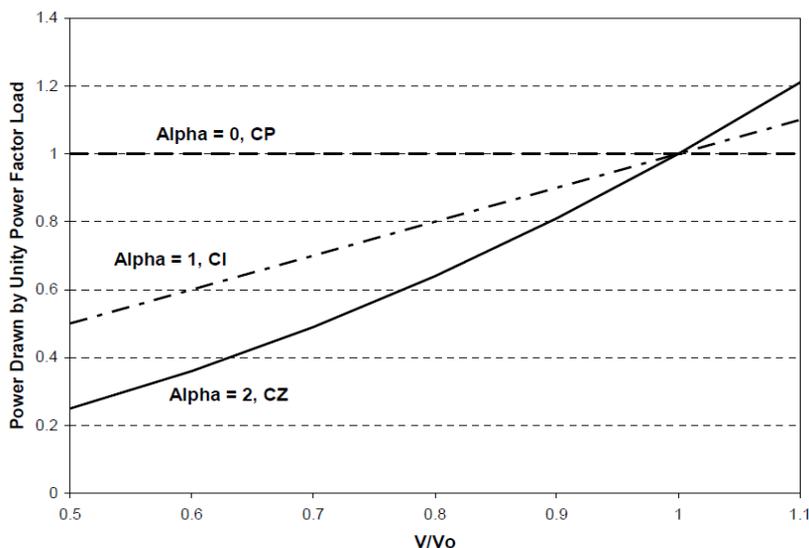
### ۳-۴-۲-۲- مدل نمایی بار

یکی از مدل‌های ساده که در بسیاری مراجع از آن استفاده می‌شود مدل نمایی بار است، در این مدل رابطه توان بر حسب ولتاژ بصورت زیر است [۳،۲۷]:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (۴-۳)$$

که در رابطه بالا  $P_0$  و  $Q_0$  توانهای اکتیو و راکتیو بار در شرایط نامی و  $\alpha, \beta$  پارامترهای حساسیت توان نسبت به تغییرات ولتاژ و فرکانس سیستم در این مدل هستند. توجه نمائید که با تنظیم این پارامترها با مقادیر ۰ و ۱ و ۲ می‌توان بار را بصورت توان ثابت، جریان ثابت و یا امپدانس ثابت نمایش داد. شیب این مشخصه‌ها که از معادله بالا بدست می‌آید به پارامترهای  $\alpha, \beta$  بستگی دارد. با خطی سازی این مشخصه‌ها می‌توان نشان داد که  $\alpha, \beta$  با حساسیت‌های ولتاژ برابر است یعنی  $\alpha = K_{PV}, \beta = K_{QV}$ .

شکل (۳-۵) اثر تغییرات ولتاژ را بر روی توان مصرفی انواع مختلف مشخصه‌های بار نشان می‌دهد. مدل بار توان ثابت با وجود تغییرات در ولتاژ مقدار توان ثابتی را از شبکه دریافت می‌کند. توان کشیده شده توسط بار با مدل جریان ثابت و امپدانس ثابت، هنگام افت ولتاژ و در پی آن کاهش می‌یابد که این کاهش در توان مصرفی در بار با مدل امپدانس ثابت بیشتر است [۲۸،۲۷].



شکل (۳-۵) اثر تغییرات ولتاژ بر روی میزان توان مصرفی مشخصه های مختلف بار [۲۸].

### ۳-۴-۲-۳- مدل بار وابسته به فرکانس<sup>۱</sup>

در یک سیستم واقعی بارها علاوه بر ولتاژ به فرکانس سیستم نیز وابسته هستند. وابستگی بار به فرکانس معمولاً با ضرب کردن مدل چندجمله ای یا نمایی در ضریب  $[1 + K_f(f - f_0)]$  نمایش داده می شود که در این رابطه  $f$  فرکانس واقعی سیستم،  $f_0$  فرکانس نامی سیستم و  $K_f$  پارامتر حساسیت نسبت به فرکانس مدل است. با استفاده از مدل نمایی داریم:

$$P = P(V) [1 + K_{pf} \cdot \Delta f]$$

$$Q = Q(V) [1 + K_{Qf} \cdot \Delta f] \quad (۷-۳)$$

در رابطه بالا  $P(V)$  و  $Q(V)$  نشان دهنده هر نوع مشخصه ولتاژ بوده و  $K_{pf}$  و  $K_{Qf}$  پارامترهای حساسیت ولتاژ می باشند و  $\Delta f$  بصورت معادله (۳-۸) بیان می شود [۷، ۱۴، ۲۷].

$$\Delta f = f - f_0 \quad (۸-۳)$$

با در نظر گرفتن مدل نمایی برای مشخصه ولتاژ بار و باتوجه به رابطه (۳-۷) مدل بار

<sup>۱</sup> Frequency-Dependent Load Model

وابسته به ولتاژ و فرکانس را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{Pv}} \times (1 + K_{Pf} \cdot \Delta f) \quad Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{Qv}} \times (1 + K_{Qf} \cdot \Delta f) \quad (9-3)$$

همانطور که دیده می شود این مدلها تابع زمان نیستند. با توجه به احساس نیازی که به مدلی با قابلیت پاسخگویی به محاسبات مطالعات پایداری شبکه می شد مدل دینامیک بار به وجود آمد. این مدل به صورت توابع جبری ثابت با زمان نیست.  $P_n$  و  $Q_n$  توانهای اکتیو و راکتیو در ولتاژ نامی  $V_n$  است.  $K_{Pf}$  و  $K_{Qf}$  مقادیر ثابتی هستند که به ترتیب از ۰ تا ۳ و ۰ تا ۲- تغییر می کنند. مقدار معمول  $\alpha$  بین ۰/۵ تا ۱/۸ و  $\beta$  بین ۱/۵ تا ۶ می باشد [۳،۱۴،۲۷].

### ۳-۴-۳- مقادیر نمونه پارامترهای مدل بار

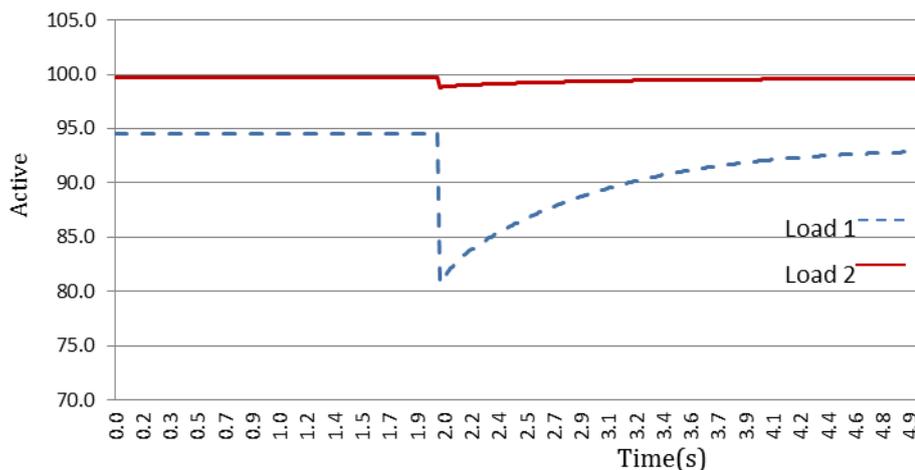
مقالات زیادی چاپ شده اند که در آنها نتایج آزمایشهای میدانی برای مشخص کردن مقادیر پارامترها در مدلهای مختلف بار به کار رفته است. مرور دقیقی از این مقالات توسط Ihra و Concordia در سال ۱۹۸۲ و همچنین Vaahedi در سال ۱۹۸۷ انجام شده است. یک راه جایگزین برای انجام آزمایش های میدانی استفاده از روش مبتنی بر مولفه ها (IEEE.1993) است که در آن مدل بار مرکب با جمع کردن مولفه های جداگانه تشکیل می شود. با این روش، مشخصه های مولفه ها برای کلاس های خاص بارها تعیین می شود ( برای مثال بارهای خانگی، تجاری یا صنعتی). این عمل هم با تجزیه و تحلیل تئوری و هم آزمایشی قابل انجام است. سپس مدل بار مرکب با جمع کردن کسرهایی از بار مصرف شده توسط هر یک از کلاسهای خاص بار تشکیل می شود. این روش دارای این مزیت است که نیازی به اندازه گیری های میدانی نداشته و با سیستمها و شرایط مختلف سازگار است. جدول زیر برخی از ضرایب نوعی حساسیت ولتاژ و فرکانس بدست آمده از این روش را نشان می دهد [۲۸،۲۹].

جدول (۳-۲) پارامترهای نمونه بار (IEEE,1993) [۲۷].

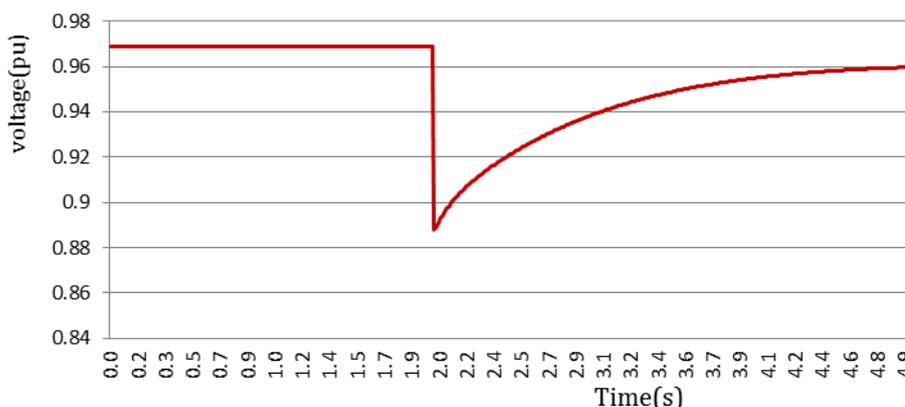
نوع بار	ضریب قدرت	$K_{PV}$	$K_{QV}$	$K_{Pf}$	$K_{Qf}$
خانگی	۰/۸۷ تا ۰/۹۹	۰/۹ تا ۱/۷	۲/۴ تا ۳/۱	۰/۷ تا ۱	-۱/۳ تا -۲/۳
تجاری	۰/۸۵ تا ۰/۹	۰/۵ تا ۰/۸	۲/۴ تا ۲/۵	۱/۲ تا ۱/۷	-۰/۹ تا -۱/۶
صنعتی	۰/۸ تا ۰/۹	۰/۱ تا ۱/۸	۰/۶ تا ۲/۲	-۰/۳ تا ۲/۹	۰/۶ تا ۱/۸

### ۳-۵- تاثیر تغییرات ولتاژ بر روی بارزدایی فرکانسی

در هنگام استفاده از معادله نوسان، نرخ تغییرات فرکانس باید تا حد امکان در لحظه وقوع اغتشاش اندازه گیری شود (از لحاظ تئوری در زمان  $t=0s$ ) که این امر حتی در عمل هم نمی تواند قابل دسترسی باشد بنابراین اندازه گیری با تاخیر صورت می گیرد، اما فرکانس در هر حال نمی تواند بیشتر از ۰/۱٪ افت کند. بنابراین تغییرات توان های اکتیو و راکتیو در لحظه اغتشاش بر اثر تغییرات فرکانس می تواند نادیده گرفته شود. از طرف دیگر ولتاژ تقریباً بصورت ناگهانی افت می کند و در لحظه اغتشاش بر روی توان اکتیو و راکتیو بار بسیار تاثیر گذار است [۳۰]. با توجه به این موضوع عکس العمل سریع بار نسبت به تغییر ولتاژ نمی تواند نادیده گرفته شود و چون تغییرات بار بر روی مقدار کسری توان اکتیو اثر می گذارد پس این تغییرات بر روی اندازه گیری شیب فرکانس در لحظه اغتشاش نیز تاثیر گذار است. بنابراین با توجه به معادلات بیان شده برای مدل بار، تاثیر گذارترین پارامتر در مقدار توان اکتیو بار، پارامتر  $\alpha$  یا  $K_{PV}$  است. برای نشان دادن تاثیر این پارامتر بر میزان تغییرات توان، شکل (۳-۶) تغییرات توان اکتیو را برای دو بار شماره ۱ و ۲، در پی خروج یکی از خطوط انتقال توان و در پی ان افت ولتاژ سیستم (شکل (۳-۷)) را نشان می دهد. تمام پارامترهای این دو بار به غیر از پارامتر  $\alpha$  باهم برابر است. مقدار  $\alpha$  برای بار شماره ۱ برابر ۱/۸ و برای بار شماره ۲ برابر ۰/۵ فرض می شود.



شکل (۳-۶) تغییرات توان اکتیو دو بار شماره ۱ و ۲ با تغییرات ولتاژ



شکل (۳-۷) تغییرات ولتاژ سیستم در پی اغتشاش

همانطور که مشاهده می‌شود در لحظه اغتشاش و افت ولتاژ توان اکتیو بار شماره ۱ در لحظات ابتدایی شدیداً کاهش می‌یابد در حالی که میزان این تغییرات در بار شماره ۲ بسیار ناچیز است. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده مناسب است که در لحظات ابتدایی جزیره‌ای شدن سیستم و ایجاد کسری توان اکتیو در جزیره بارهایی با کمترین حساسیت نسبت به ولتاژ ( $\alpha$  کوچکتر) زودتر قطع شوند تا افت فرکانس سریعتر متوقف شده و با قطع کمترین مقدار بار به حالت اولیه خود بازگردد. جدول زیر مقادیر نمونه پارامترهای مدل بار را برای تعدادی از بارهای متداول نشان می‌دهد.

جدول (۳-۳) تاثیر تغییرات ولتاژ و فرکانس بر روی توان اکتیو و راکتیو بارهای مختلف [۵].

نوع بار	$K_{PV}$	$K_{Pf}$	$K_{QV}$	$K_{Qf}$
لامپ رشته‌ای	۱/۶	۰	۰	۰/۱
لامپ فلورسنت	۱/۲	-۰/۱	۳	-۲/۸
بخاری برقی	۲	۰	۰	۰
موتورهای القایی	۰/۲	۱/۵	۱/۶	-۰/۳
موتورهای القایی (بار کامل)	۰/۱	۲/۸	۰/۶	۱/۸
کارخانجات آلومینیوم	۱/۸	-۰/۳	۲/۲	۰/۶
کوره های قوس الکتریکی	۱/۹	-۰/۵	۲/۱	۰

بطور کلی در پی یک افت ولتاژ برای بارهای با  $\alpha$  بزرگتر از یک، کاهش در میزان توان اکتیو نسبت به کاهش در ولتاژ بیشتر است. بعنوان یک نتیجه در این نوع از بارها یک کاهش کوچک در اندازه ولتاژ می تواند کاهش قابل توجهی را بر میزان توان اکتیو مصرفی و در پی آن کاهش در میزان کسری توان در سیستم داشته باشد. از این خاصیت می توان برای اولویت بندی بارها جهت بارزدایی استفاده کرد و بارهای با  $\alpha$  کوچکتر را در اولویت بارزدایی قرار داد تا در لحظات ابتدایی افت فرکانس سریعتر متوقف شده و بتوان میزان کسری توان را در سیستم کاهش داد. با کاهش میزان کسری توان افت فرکانس بطور کلی کاهش می یابد.

### ۳-۶- اثر مدل بار بر تعیین دقیق میزان کسری توان

همانطور که در قسمتهای قبل بیان شد در بسیاری از مقالات، طرح های بارزدایی بر اساس معادله نوسان طراحی شده‌اند. با توجه به این مطلب و تکرار رابطه (۲-۱۲)، تغییرات فرکانس در یک سیستم قدرت با استفاده از معادله نوسان می‌تواند بصورت زیر تعیین شود:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n}{2H_{eq}} \cdot P_{def} \quad (۱۰-۳)$$

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^n H_i \quad (۱۱-۳)$$

در این رابطه  $P_{def}$  میزان کسری توانبر حسب پریونیت،  $H_{eq}$  ثابت اینرسی معادل سیستم

برحسب ثانیه و  $f_n$  فرکانس نامی سیستم است. لازم به ذکر است که رابطه (۳-۱۰) معادله نوسان را بر حسب پیرونیت بیان می‌کند، بنابراین رابطه (۳-۱۱) بصورت حاصل جمع ثابت اینرسی واحدهای تولیدی سیستم بیان می‌شود.

معادله (۳-۱۰) مشخص می‌کند که شیب فرکانس در  $t=0$  فقط به ثابت اینرسی ( $H_{eq}$ ) برحسب زمان و کسری توان اکتیو سیستم ( $P_{def}$ ) وابسته است.

چهار فاکتور متفاوت که در پی اغتشاشات بر میزان کسری توان تاثیر می‌گذارند عبارتند از:

- توان مکانیکی اولیه در توربین در سیستم (درست قبل از اغتشاش سیستم)  $P_{tur,0}$

- توان اکتیو مصرفی اولیه بار در سیستم (درست قبل از اغتشاش سیستم)  $P_{L0}$

- عکس العمل گاورنر توربین در یک اغتشاش (وابسته به رزرو چرخان)  $\Delta P_{tur}$

- تغییر توان اکتیو بار  $\Delta P_L$  در پی انحراف فرکانس و ولتاژ سیستم از مقدار پیش از اغتشاش

بعلت پاسخ کند شیرهای مکانیکی توربین کنترل شده توسط گاورنر توربین در مقایسه با نرخ کاهش فرکانس، نتیجه گیری می‌شود که خروجی توربین هنگام استفاده از معادله نوسان ثابت است. از نظر تئوری در لحظه اغتشاش  $t=0$  عکس العمل گاورنر توربین را نداریم ( $\Delta P_{tur} = 0$ ) اما این مورد برای تغییر بار  $\Delta P_L$  مطرح نیست [۳۰]، چون مدلهایی که برای بار در نظر گرفته می‌شوند به تغییرات فرکانس و ولتاژ وابسته هستند. با توجه به وابستگی مدل بار به ولتاژ و فرکانس و فاکتورهایی که این وابستگی را نشان می‌دهند، در لحظه اغتشاش میزان توان اکتیو و راکتیو آنها شدیداً تغییر خواهد کرد، که این امر باید در فرایند بارزدایی در نظر گرفته شود.

یکی از عوامل مهم در تعیین میزان دقیق کسری توان با استفاده از معادله نوسان، در نظر گرفتن مدل بار سیستم در لحظه اغتشاش است. هنگام استفاده از معادله نوسان شیب فرکانس باید هرچه سریعتر تا حد امکان بعد از اغتشاش اندازه گیری شود (از لحاظ تئوری در زمان  $t=0$ ) که این امر حتی در عمل هم نمی‌تواند قابل دسترسی باشد و بنابراین اندازه‌گیری با تاخیر صورت می‌گیرد، اما فرکانس در هر حال نمی‌تواند بیشتر از ۰/۱٪ افت کند. بنابراین تغییرات توان های اکتیو و راکتیو در لحظه اغتشاش بر اثر تغییرات فرکانس می‌تواند نادیده گرفته شود. از طرف دیگر ولتاژ تقریباً آنی افت می‌کند و در لحظه اغتشاش بر روی توان اکتیو و راکتیو بار بسیار تاثیر گذار است. یک مثال که این حالت را تأیید می‌کند در افت ولتاژ سیستم مرجع [۳۱] استفاده شده است که موقعیت اغتشاش را تعیین می‌کند. ثانیاً در این مرجع اهمیت دینامیک های ولتاژ مورد تاکید واقع شده است خصوصاً هنگام تلاش برای اندازه‌گیری تغییرات فرکانس. از طرفی کسری

توان اکتیو معمولاً با کسری در توان راکتیو همراه است که بر روی پروفایل ولتاژ سیستم تاثیر می-گذارد. این عوامل باعث می شود که نویسندگان مختلف توجه زیادی به وابستگی بار به ولتاژ داشته باشند. بنابراین عکس العمل سریع بار نسبت به تغییر ولتاژ نمیتواند نادیده گرفته شود و چون تغییرات بار بر روی مقدار کسری توان اکتیو اثر می گذارد پس این تغییرات بر روی اندازه گیری شیب فرکانس در لحظه اغتشاش نیز تاثیر گذار است.

اگر تلفات در سیستم نادیده گرفته شود، مقدار کسری توان ( $P_{def}$ ) در لحظه اغتشاش میتواند مانند زیر نوشته شود:

$$P_{def} = P_{tur} - P_L \quad (۱۲-۳)$$

که در رابطه بالا  $P_{tur}$  مجموع توان مکانیکی در توربین و  $P_L$  مجموع توان اکتیو لحظه ای بارهای سیستم است. با در نظر گرفتن مدل نمایی رابطه (۳-۶) برای هر یک از بارهای سیستم، مجموع توان لحظه ای بارهای سیستم را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_{L0,i} \left( \frac{V_i}{V_{0,i}} \right)^\alpha \quad Q_L = \sum_{i=1}^n Q_{L0,i} \left( \frac{V_i}{V_{0,i}} \right)^\beta \quad (۱۳-۳)$$

که در رابطه بالا  $P_{L0,i}$  و  $Q_{L0,i}$  توانهای اکتیو و راکتیو هر بار در شرایط بهره برداری نامی (قبل از وقوع اغتشاش) و  $\beta, \alpha$  پارامترهای حساسیت نسبت به تغییرات ولتاژ و فرکانس سیستم هستند. با جایگذاری رابطه (۱۳-۳) در رابطه (۱۲-۳) خواهیم داشت:

$$P_{def} = P_{tur} - \sum_{i=1}^n P_{L0,i} \left( \frac{V_i}{V_{0,i}} \right)^{\alpha_i} \quad (۱۴-۳)$$

$$P_{L0} = \sum_{i=1}^n P_{L0,i} \quad (۱۵-۳)$$

$$P_{def} = P_{tur} - P_{L0} - \sum_{i=1}^n P_{L0,i} \left[ \left( \frac{V_i}{V_{0,i}} \right)^{\alpha_i} - 1 \right] \quad (۱۶-۳)$$

همانطور که نشان خواهیم داد تغییر در شیب فرکانس بعلت انحرافات ولتاژ مهم بوده و همچنین به میزان مقدار بار اولیه سیستم  $P_{L0}$  وابسته است، به این دلیل در نظر گرفتن انحرافات ولتاژ مهم است. با در نظر گرفتن روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۶) می توان نوشت:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n}{2H_{eq}} \cdot \left[ (P_{tur} - P_{L0}) - \sum_{i=1}^n P_{L0,i} \cdot \left( \left( \frac{V_i}{V_{0,i}} \right)^{\alpha_i} - 1 \right) \right] \quad (۳-۱۷)$$

$$\frac{df}{dt} = f'_1 + f'_2 \quad (۳-۱۸)$$

از رابطه (۳-۱۸) پیداست که شیب فرکانس اندازه گیری شده شامل دو قسمت است که با  $f'_1$  و  $f'_2$  نشان داده شده است. اولین قسمت، شیب فرکانس را هنگامی نشان می دهد که بار شامل توان اکتیو و راکتیو ثابت است. قسمت دوم سهمی از بار که مقدار شیب فرکانس را بعلت افت ولتاژ تغییر می دهد را نشان می دهد [۳۰]. همانطور که مشاهده می شود اگر مدل تمام بارهای سیستم از نوع توان ثابت در نظر گرفته شوند، قسمت دوم شیب فرکانس صفر خواهد شد و بنابراین شیب فرکانس بیشتر شده و با توجه به معادله نوسان میزان کسری توان افزایش یافته به تبع آن میزان بار بیشتری از سیستم قطع خواهد شد. در نظر گرفتن این موضوع در اولویت بندی بارها بر اساس پارامتر  $\alpha_i$  برای قطع شدن در مراحل اولیه بارزدایی می تواند مفید واقع شود، بدین صورت که در مراحل اولیه بارزدایی بارهایی که  $\alpha_i$  کوچکتر دارند در اولویت بارزدایی قرار گیرند تا علاوه بر توقف سریعتر افت فرکانس، میزان باری که در مراحل بعدی بارزدایی قطع می شود را کاهش دهد. این موضوع در شبیه سازی هایی که در فصل بعدی این پایان نامه انجام شده است مد نظر قرار گرفته و اثرات آن بر میزان قطع بار و افت فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مطالب بیان شده و در نظر گرفتن روشهای بیان شده، در فصل بعد دو روش بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی برای شبکه های کوچک جزیره ای شده ارائه می شود. سپس با شبیه سازی دو سیستم تست نمونه جزیره ای شده، در طی چندین سناریو کارایی طرح های بارزدایی پیشنهادی در حفظ پایداری و بهبود پاسخ فرکانسی سیستم مورد بررسی قرار می گیرد.

## **فصل ۴: طرح‌های بارزدایی تطبیقی و نیمه**

### **تطبیقی پیشنهادی**

## ۴-۱- مقدمه فصل

همانطور که در فصل اول در مورد انواع روشهای بارزدایی بیان شد، تنظیمات بارزدایی تحت فرکانس سنتی صرف نظر از شدت اغتشاش ثابت است. این امر موجب حذف بار بیش از حد و یا حذف مقدارناکافی از بار در شرایط مختلف می شود. یک راه حل جهت افزایش تطبیق پذیری بارزدایی سنتی استفاده از نرخ تغییرات فرکانس ( $df/dt$ ) است. استفاده از این شاخصه در فرایند بارزدایی، می تواند چندین هدف مهم بشرح زیر را تحقق بخشد:

- افزایش سرعت بارزدایی برای مقادیر زیاد  $df/dt$

- حذف مقدار زیادی از بار سیستم در مقادیر زیاد  $df/dt$

- استفاده از مشخصه های  $f$  و  $df/dt$  در تنظیم مراحل بارزدایی

متناسب با وقوع کسری توان ناشی از اغتشاشات در سیستمهای قدرت، فرکانس سیستم افت می کند که نرخ تغییرات فرکانس در سیستم متناسب با شدت اغتشاش و کسری توان است. بنابراین از نرخ تغییرات فرکانس در هر لحظه می توان بعنوان شاخصی جهت تعیین کسری توان در سیستم استفاده کرد. استفاده از اندازه نرخ تغییرات فرکانس در طرحهای بارزدایی عملکرد و سرعت طرح را در حذف مقدار بهینه ای از بار افزایش داده و منحنی پاسخ فرکانسی سیستم را بهبود می بخشد.

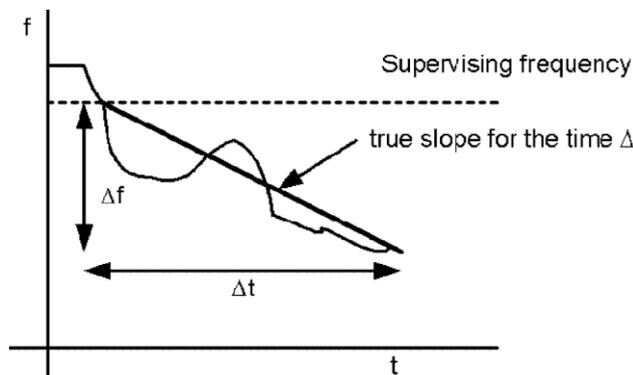
## ۴-۲- نرخ تغییرات فرکانس ( $df/dt$ )

نرخ تغییرات فرکانس ( $df/dt$ ) یک شاخص لحظه ای از میزان عدم تعادل توان است که اخیراً در طرح های بارزدایی نوین (روشهای تطبیقی و هوشمند) برای انتخاب بهتر و سریعتر شروع مراحل بارزدایی و میزان باری که در هر مرحله باید قطع شود مورد استفاده قرار می گیرد. همچنان که تغییرات فرکانس نتیجه نهایی کسری توان در سیستم قدرت است، نرخ تغییرات فرکانس نیز یک شاخص لحظه ای از کسری توان است که می تواند میزان کسری توان در لحظات اولیه ایجاد عدم تعادل توان (اغتشاش) در سیستم قدرت را تعیین کند. هرچند تغییرات در سرعت ماشین ماهیتی نوسانی دارد اما این نوسانات به پاسخ ماشین در شرایط مختلف وابسته بوده و در موقعیت

های مختلف متفاوت است. در صورتیکه بارزدایی با کاهش فرکانس، بجای نرخ تغییرات فرکانس آغاز گردد پاسخ صحیح تری خواهد داشت چون نرخ تغییرات فرکانس ( $df/dt$ ) نسبت به تغییرات بسیار حساس است. با در نظر گرفتن این موارد در مراحل بارزدایی می توان از شاخص نرخ تغییرات فرکانس بعنوان شاخص دقیقی برای بارزدایی استفاده کرد.

#### ۴-۲-۱- متوسط نرخ تغییرات فرکانس ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ )

بدلیل پیچیدگی سیستمهای قدرت تغییرات در فرکانس در طی اغتشاشات از یک الگوی خاص پیروی نخواهد کرد، بنابراین پروفایل فرکانس بطور کلی تابعی غیر خطی و نوسانی می باشد. نرخ تغییرات فرکانس  $df/dt$  اندازه گیری شده توسط رله ها بصورت لحظه ای هستند و هم ردیف تابع مشتق فرکانس تعریف می شوند. در بعضی موارد تنها نظارت لحظه ای بر مقادیر لحظه ای می تواند گمراه کننده باشد چون نرخ تغییرات فرکانس ممکن است بصورت غیرخطی باشد، از اینرو برخی از رله ها برای اندازه گیری و نظارت بر متوسط نرخ تغییرات فرکانس سیستم در نظر گرفته می شوند شکل (۴-۱) نحوی محاسبه متوسط نرخ تغییرات فرکانس را نشان می دهد [۵].



شکل (۴-۱) نحوی محاسبه متوسط نرخ تغییرات فرکانس [۵].

با مشاهده و نظارت بر روند تغییرات فرکانس می توان در طی شرایط اضطراری تصمیم مناسبی برای بارزدایی اتخاذ شود. در این شرایط بعد از گذشت زمان  $\Delta t$  صرف نظر از نتیجه حاصل

شده مقدار  $\frac{\Delta f}{\Delta t}$  محاسبه شده و تجهیزات اندازه گیری تا رسیدن فرکانس به بالای محدوده مجاز<sup>۱</sup> در حالت غیر فعال و آماده بکار قرار خواهند گرفت. در بسیاری از موارد امکان استفاده همزمان از معیارهای متفاوت در فرایند بارزدایی، مانند فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس یا فرکانس و متوسط نرخ تغییرات فرکانس در اجرای طرح های بارزدایی فرکانسی امکان پذیر و مناسب می باشد. تصمیم گیری برای بارزدایی در طرح های بالا توسط نظارت بر روی تغییرات فرکانس در طی یک دوره چند صد میلی ثانیه ای صورت می گیرد. از اینرو فرایند تریپ شدن (قطع بار) در طرح های بارزدایی که در آنها بر نرخ تغییرات فرکانس نظارت می شود آهسته تر انجام می شود. اگر زمان تاخیر برای پایداری سیستم غیرقابل قبول باشد آنگاه می توان با استفاده از تنظیمات ثابت تجهیزات (مانند فرکانس ثابت) سرعت اجرای طرح های بارزدایی را افزایش داد.

#### ۴-۳- طرح بارزدایی فرکانسی تطبیقی پیشنهادی

با توجه به اهمیت حفظ پایداری و بالابردن قابلیت اطمینان تامین انرژی در شبکه های کوچک و حفاظت به موقع از منابع تولید پراکنده، در این بخش یک روش بارزدایی فرکانسی تطبیقی برای شبکه های کوچک جزیره ای شده ارائه می شود. استراتژی بارزدایی شبکه های کوچک جزیره ای با سیستم قدرت بزرگ از نظر رفتار متفاوت می باشد، چون این دو نوع سیستم مشخصه های متفاوتی دارند. شبکه های کوچک جزیره ای اغلب ژنراتورهای کوچک دارند و از اینرو اینرسی کمتری دارند، بنابراین در پی اغتشاشات بزرگ تمایل فرکانس به کاهش سریعتر است. در روش پیشنهادی از متوسط نرخ تغییرات فرکانس و معادله نوسان برای تعیین مقدار باری که باید قطع شود استفاده می شود. در لحظه گذر به حالت جزیره ای شدن مقدار بار اضافی محاسبه شده سریعاً قطع می شود و در ادامه با توجه به کوچک بودن اینرسی معادل سیستم جزیره ای شده، تغییرات نرخ فرکانس برای یک دوره معین اندازه گیری شده و در صورتی که متوسط نرخ تغییرات فرکانس در این دوره منفی و قابل توجه باشد بارزدایی ادامه می یابد، در غیر این صورت بارزدایی متوقف خواهد شد.

<sup>۱</sup> Supervising Frequency

با توجه به مطالب بیان شده فلوچارت مربوط به استراتژی بارزدایی فرکانسی در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. در این فلوچارت فرکانس در هر نیم سیکل اندازه‌گیری شده و متوسط نرخ تغییرات فرکانس (RoCoF) محاسبه می‌شود. هنگامی که RoCoF منفی باشد ممکن است بارزدایی مورد نیاز باشد. اگر RoCoF محاسبه شده کوچکتر از  $RoCoF_{LL}$  (RoCoF) مربوط به کوچکترین بار) بود، روش پیشنهادی برای افت فرکانس به زیر مقدار  $f_{set}$  (کمترین محدوده مجاز فرکانس) صبر خواهد کرد زیرا کاهش در فرکانس گاهی می‌تواند ناشی از رویدادهای عادی باشد و بعد از مدتی سیستم پایدار شود. هنگامی که RoCoF محاسبه شده کمتر از  $RoCoF_{LL}$  باشد و فرکانس از مقدار  $f_{set}$  کمتر شود، مقداری از بارها باید سریعاً قطع شوند. همانگونه که قبلاً بیان شد در شبکه‌های کوچک افت فرکانس بسیار سریع می‌باشد، بنابراین فرکانس شروع بارزدایی را نسبت به طرح‌های بارزدایی مورد استفاده برای سیستمهای بزرگ کمی نزدیکتر به مقدار نامی آن انتخاب می‌کنند. با توجه به مراجع [۵، ۱۴] در این روش فرکانس آستانه بارزدایی  $49/5\text{Hz}$  در نظر گرفته می‌شود. در روش ارائه شده مقدار باری که قطع می‌شود متناسب با اندازه اغتشاش و با استفاده از معادله نوسان تخمین زده می‌شود. با نگاهی دوباره به معادله نوسان داریم:

$$P_m - P_e = \frac{2 \cdot H}{f_n} \cdot \frac{df}{dt} \quad (1-4)$$

$$\Delta P = \frac{2 \cdot H}{f_n} \cdot \frac{df}{dt}$$

که در رابطه بالا  $P_e$  و  $P_m$  بترتیب توان مکانیکی و توان الکتریکی بر حسب پرینیت،  $H$  ثابت اینرسی بر حسب ثانیه و  $f_n$  فرکانس نامی سیستم و  $\Delta P$  میزان کسری توان بر حسب پرینیت است.

از آنجایی که واحد ثابت اینرسی ثانیه یا MJ/MVA و واحد ژول وات در ثانیه (W.s) است، میزان کسری توان ( $\Delta P$ ) بر حسب واحد توان (MW) در پی اغتشاشات برای یک سیستم چند ماشینه بصورت زیر نوشته می‌شود [۳۲، ۸]:

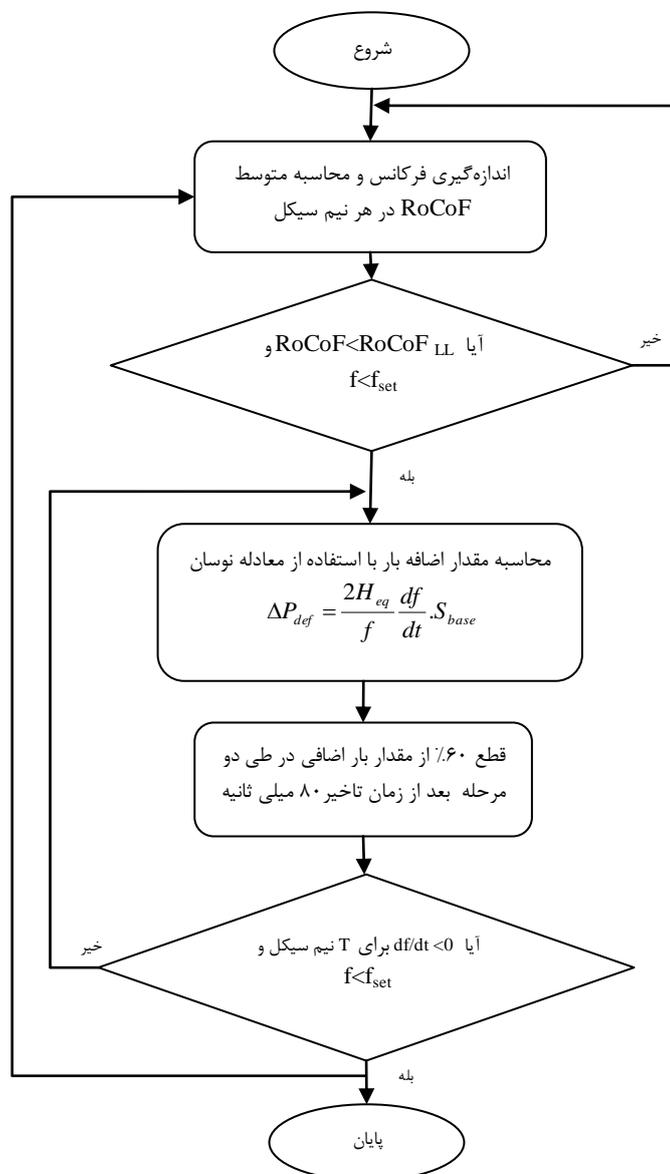
$$\Delta P = P_{mech} - P_{elec} = \frac{H_{eq}}{f_n} \cdot \frac{df_c}{dt} \cdot S_{Base} \quad (2-4)$$

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad S_{Base} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (3-4)$$

بعد از محاسبه مقدار اضافه بار، بارزدایی بر اساس اولویت بندی بارها از جدولی که بارها را بر اساس اهمیت اولویت بندی می‌کند آغاز می‌شود. همانطور که در فصل مربوط به معرفی مدل‌های بار بیان شد، مدل بار در میزان کسری توان و شیب فرکانس در فرایند بارزدایی از اهمیت زیادی برخوردار است. در بسیاری از طرح‌های بارزدایی اولویت بندی بارها بر اساس اهمیت بار و میزان هزینه پرداختی آن تعیین می‌شود [۳، ۱۴]، اما در این مقاله علاوه بر این موارد، مدل بار نیز برای بهبود سریعتر پایداری فرکانسی، و به حداقل رساندن میزان بار قطع شده در طی فرایند بارزدایی و اولویت بندی بارها استفاده می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده در مورد تعداد و میزان قطع بار در هر مرحله از بارزدایی در فصل دوم، مقدار اضافه بار محاسبه شده با استفاده از معادله نوسان، در طی دو مرحله (جهت توقف سریع افت فرکانس در سیستم‌های کوچک) و در هر مرحله به میزان ۳۰٪ از مقدار اضافه بار پس از زمان تاخیر ۸۰ میلی ثانیه (مجموع زمان اندازه‌گیری، ارتباط و عملکرد بریکر) [۱۴]، قطع می‌شود تا همانگونه که در قسمتهای قبلی بیان شد تنشهای مکانیکی وارده بر شفت واحد تولیدی در هنگام قطع بار به حداقل برسد. چون تعیین متوسط نرخ تغییرات فرکانس مقدار دقیقی از کسری توان را در سیستم فراهم نمی‌کند در هر مرحله از فرایند بارزدایی تنها قسمتی از اضافه بار حذف می‌شود تا از قطع اضافی بارهای سیستم نیز جلوگیری شود، همچنین چون بارزدایی تا زمانی که نرخ تغییرات فرکانس مثبت شود ادامه می‌یابد پس نیازی نیست که کل مقدار اضافه باری که در هر مرحله با استفاده از معادله نوسان بدست می‌آید قطع گردد.

پس از قطع اولین مرحله از فرایند بارزدایی، طرح بارزدایی تا زمانی که فرکانس کمتر از مقدار مجاز ( $f_{set}$ ) باشد و شیب فرکانس ( $df/dt$ ) برای T نیم سیکل منفی باشد در حالت آماده بکار قرار می‌گیرد و به محض اینکه این دو شرط برقرار شود مرحله دوم بارزدایی آغاز می‌شود. با توجه به نتایج شبیه سازی، انتخاب ۵ نیم سیکل برای T مناسب بوده و میتواند مقدار بهینه ای از بارها را قطع کند، بدون اینکه فرکانس به مقدار بسیار پایین افت کند. قطع بارها با توجه به جدول اولویت بندی انجام می‌شود، اولویت بندی در این پایان نامه به دو صورت انجام می‌شود در ابتدا

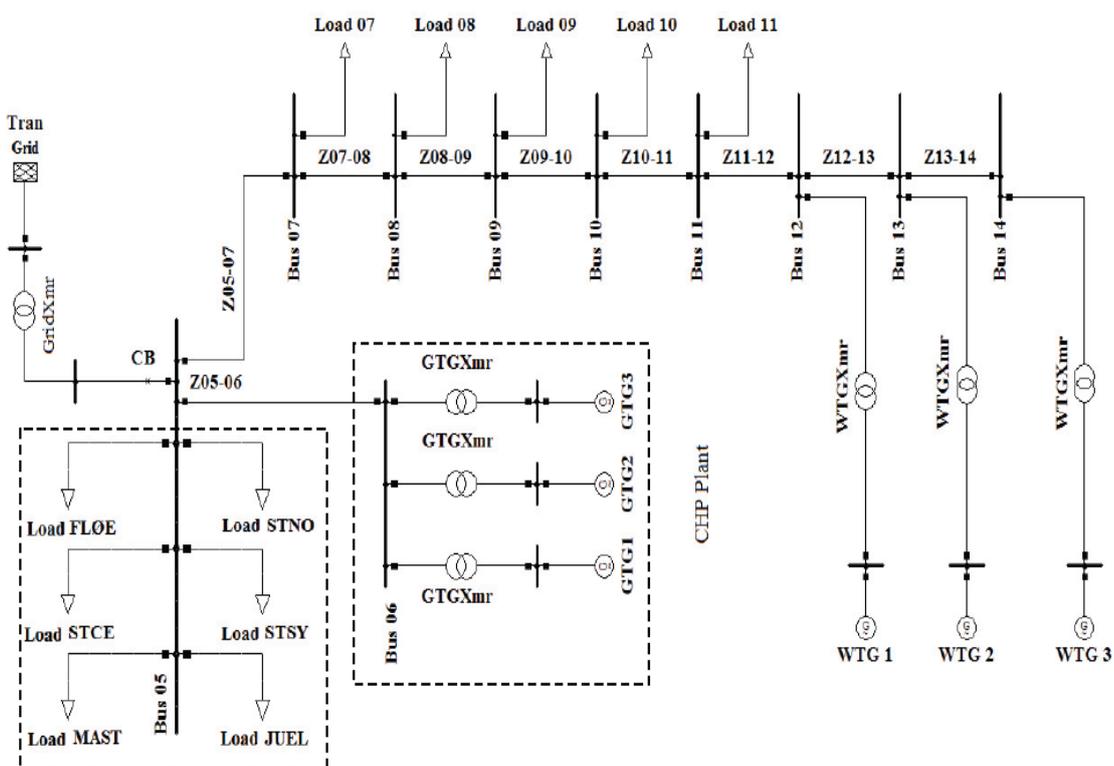
اولویت بندی بارها با توجه به میزان حساسیت بارها انجام می شود بطوری که بارهای غیر ضروری و غیر حساس در ابتدای جدول و سایر بارها به ترتیب اهمیت در ادامه قرار می گیرند. سپس برای نشان دادن اثر مدل بار بر فرایند بارزدایی اولویت بندی بارها با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  انجام می شود. همانطور که در بخش مربوط به اثر پارامترهای بار بر روی بارزدایی بیان شد، بارهای با  $K_{PV}$  کوچکتر در ابتدای جدول اولویت بندی قرار می گیرند تا در لحظات اولیه بروز اغتشاش و کسری توان در شبکه با قطع این بارها، پاسخ منحنی فرکانسی سیستم بهبود یافته و میزان باری که قطع می شود به حداقل برسد.



شکل (۴-۲) فلوچارت مربوط به روش بارزدایی پیشنهادی

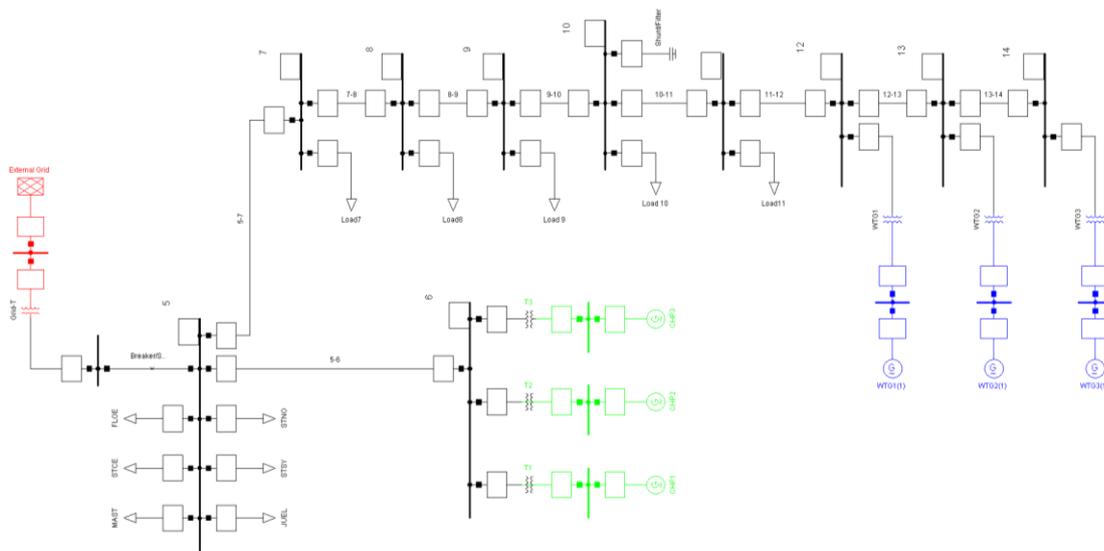
### ۴-۳-۲- سیستم تست نمونه شماره ۱ (قسمتی از سیستم توزیع دانمارک)

برای تست روش بارزدایی فرکانسی تطبیقی پیشنهادی، از یک سیستم تست نمونه استفاده می‌شود که در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. برای شبیه سازی این سیستم از نرم افزار DigSILENT استفاده شده و روش پیشنهادی بر روی آن اجرا می‌شود. سیستم تست قسمتی از شبکه توزیع دانمارک است که شامل ۱۱ بار و ۳ توربین بادی سرعت ثابت<sup>۱</sup> (WTGs) هر کدام با ظرفیت ۶۳۰KW و یک واحد تولیدی ترکیبی برق - گرما<sup>۲</sup> (CHP) با ۳ ژنراتور توربین گازی، هر کدام با ظرفیت ۳/۳MW می‌باشد.



شکل (۴-۳) سیستم تست نمونه [۳۳].

<sup>۱</sup> Wind Turbine Generators  
<sup>۲</sup> Combined Heat and Power



شکل (۴-۴) سیستم تست نمونه شبیه سازی شده در نرم افزار DigSILENT

داده‌های مربوط به خطوط، ژنراتور و سیستمهای تحرک و گاورنر در پیوست و داده‌های مربوط به پیک بارها در جدول (۱-۴) آمده است.

جدول (۱-۴) داده های مربوط به پیک بار سیستم تست شماره ۱ [۱۴].

Load	P(MW)	Q(MVAr)
Load FLOW	۲/۱۰۹	۰/۵۷۶
Load JUEL	۰/۹	۰/۱۶۴
Load 7	۰/۴۵۹۸	۰/۱۳۴۱
Load 8	۰/۷۲۴۳	۰/۲۱۱۳
Load 9	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
Load 10	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
Load 11	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
Load MAST	۲/۷۳۲	۰/۸۴۲
Load STCE	۱/۱۷۲	۰/۱۳۹
Load STNO	۱/۹۸۹	۰/۲۲۳
Load STSY	۱/۶۵۶	۰/۳۸۴
Total	۱۲/۰۸۷۱	۲/۷۷۳۹

#### ۴-۳-۲-۱- مدل بار در سیستم تست شماره ۱

همانطور که در فصل دوم و در قسمت معرفی انواع مدل بار بیان شد مشخصات بارها تاثیر مهمی را بر روی تجزیه و تحلیل و پایداری سیستم دارند. به منظور رسیدگی به این موضوع و در نظر گرفتن اثر بار، یک نوع مدل استاتیکی از بار در این شبیه سازی استفاده شده است. مولفه های توان اکتیو و راکتیو هر کدام بصورت جداگانه در این مدل از بار بررسی می شوند. این مدل از بار یک تابع ریاضی از ولتاژ و فرکانس است اما توان اکتیو و راکتیو بصورت جداگانه در نظر گرفته می شوند. معادلات زیر مدل استاتیکی از بار را بیان می کنند:

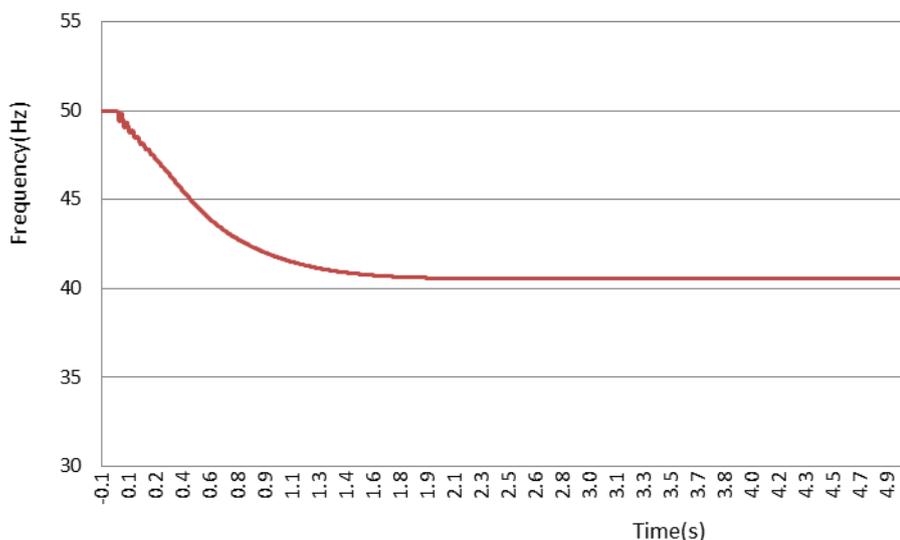
$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{PV}} \times (1 + K_{PF} \cdot df) \quad (۴-۴)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{QV}} \times (1 + K_{QF} \cdot df) \quad (۵-۴)$$

در روابط بالا  $K_{QV}$  و  $K_{PV}$  برابر با شیب  $dP/dV$  و  $dQ/dV$  در نقطه  $V=V_0$ ،  $P$ ،  $Q$ ، توان اکتیو و راکتیو لحظه ای و  $P_0$ ،  $Q_0$  توان اکتیو و راکتیو در ولتاژ و فرکانس پایه است.  $K_{PF}$  و  $K_{QF}$  ضرایبی هستند که میزان وابستگی بار را به فرکانس نشان می دهند و  $df$  میزان انحراف فرکانس از فرکانس مبنا است. در معادلات (۴-۴) و (۵-۴) عموماً  $K_{PV}$  بین ۰/۵ تا ۱/۸ و  $K_{QV}$  بین ۱/۵ تا ۶ انتخاب می شوند [۳]. همچنین  $K_{PF}$  بین صفر تا ۳ و  $K_{QF}$  بین صفر تا ۲- انتخاب می شوند. در این شبیه سازی مقادیر  $K_{PV}$  و  $K_{QV}$  به ترتیب ۱ و ۲ و مقادیر  $K_{PF}$  و  $K_{QF}$  برابر ۱ و -۱ در نظر گرفته می شوند.

## ۳-۳-۴- نتایج شبیه سازی

در این قسمت با قطع بریکر نصب شده در باس شماره ۵ سیستم توزیع نمونه از شبکه جدا شده و در حالت جزیره‌ای بهره برداری می‌شود. قبل از تبدیل سیستم به حالت جزیره‌ای هر یک از واحدهای CHP به میزان ۳MW و هر یک از واحدهای بادی سرعت ثابت (WTGs)، ۸۴KW توان تولید می‌کنند، همچنین میزان توان دریافتی از شبکه انتقال به میزان ۲/۸۶MW و ۱/۷۸MVar و میزان تقاضای هر بار مطابق با جدول (۴-۱) می‌باشد. لازم به توضیح است که یک خازن با ظرفیت ۱/۵MVar جهت تامین توان راکتیو مورد نیاز بارها و بهبود پروفایل ولتاژ در باس شماره ۱۰ نصب شده است. در ادامه در طی چهار سناریو کارایی روش بارزدایی پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۴-۵) فرکانس سیستم را در طی جزیره‌ای شدن و بدون اجرای فرایند بارزدایی نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) فرکانس سیستم تست نمونه شماره ۱ در پی جزیره‌ای شدن و بدون اجرای فرایند بارزدایی

۴-۳-۴- سناریو شماره ۱ (مدل استاتیکی بارها)

در این سناریو با توجه به مطالب بیان شده، از مدل استاتیکی بار در رابطه (۴-۵) برای شبیه سازی و مدلسازی بارهای سیستم استفاده می‌شود. اولویت بندی بارها بر اساس اهمیت بارها و میزان هزینه پرداختی توسط هر مصرف کننده مطابق جدول (۴-۲) فرض می‌شود.

جدول (۴-۲) جدول اولویت بندی بارها در سناریو شماره ۱

ردیف	نام بار	P(MW)	Q(MVAr)
۱	Load STSY	۱/۶۵۶	۰/۳۸۴
۲	Load 10	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
۳	Load 7	۰/۴۵۹۸	۰/۱۳۴۱
۴	Load 9	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
۵	Load STCE	۱/۱۷۲	۰/۱۳۹
۶	Load STNO	۱/۹۸۹	۰/۲۲۳
۷	Load 8	۰/۷۲۴۳	۰/۲۱۱۳
۸	Load FLOW	۲/۱۰۹	۰/۵۷۶
۹	Load 11	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵
۱۰	Load JUEL	۰/۹	۰/۱۶۴
۱۱	Load MAST	۲/۷۳۲	۰/۸۴۲
	مجموع بارها	۱۲/۰۸۷۱	۲/۷۷۳۹

برای شروع در لحظه  $t = 0$  s بریکری که در باس شماره ۵ سیستم توزیع را به شبکه متصل می‌کند قطع شده و جزیره تشکیل می‌شود، در لحظات ابتدایی فرکانس سریعاً افت کرده و به کمتر از  $49/5 \text{ Hz}$  می‌رسد، متوسط نرخ تغییرات فرکانس در این شرایط  $10 \text{ Hz/s}$  می‌باشد. بنابراین با توجه به معادله نوسان و روابط (۴-۲) و (۴-۳) میزان باری که باید قطع شود  $2/42 \text{ MW}$  محاسبه می‌شود. در ادامه نحوی محاسبه این مقدار بیان شده است.

$$S_{Base} = \sum_{i=1}^n S_i = 3(3.3) + 3(0.63) = 11.79 \text{ MW}$$

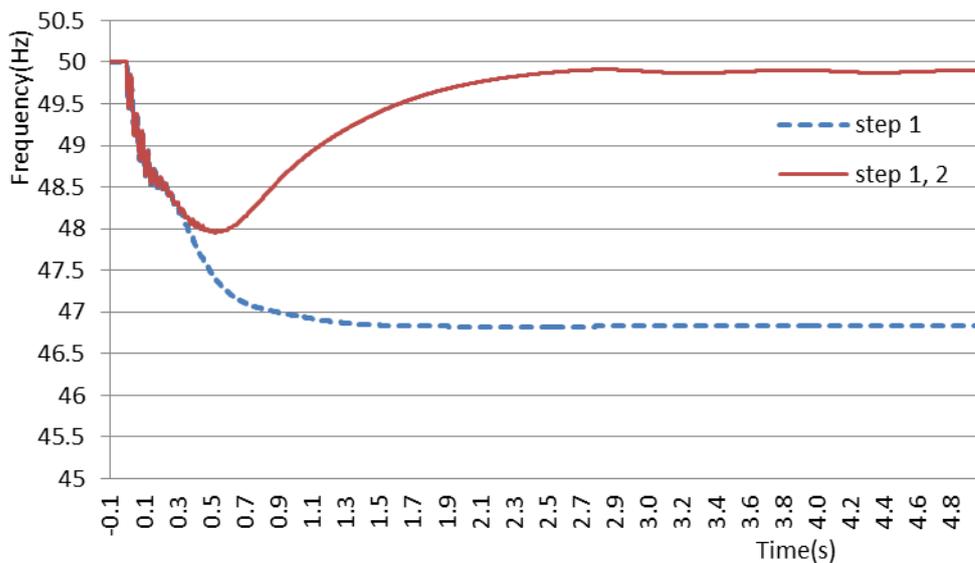
$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{3(0.54 \times 3.3) + 3(0.38 \times 0.63)}{11.79} = 0.514 \text{ s}$$

$$\Delta P = P_{mech} - P_{elec} = \frac{H_{eq}}{f_n} \cdot \frac{df_c}{dt} \cdot S_{Base} = \frac{0.514}{50} \cdot \frac{df_c}{dt} \cdot 11.79 = 0.242 \times \frac{df_c}{dt}$$

$$\Delta P = 0.242 \times (-10 \text{ Hz/s}) = -2.42 \text{ MW}$$

با توجه به فرایند بارزدایی ارائه شده در فلوچارت شکل (۴-۲)، ۵۰٪ از بار ردیف اول (۳۰٪ از اضافه بار) بعد از گذر زمان تاخیر در لحظه  $t=0/08 \text{ s}$  و ۵۰٪ مابقی در لحظه  $t=0/16 \text{ s}$  قطع می‌شود. در ادامه بعد از گذشت ۵ نیم سیکل همچنان نرخ تغییرات فرکانس کوچکتر از صفر بوده و بنابراین مرحله دوم بارزدایی آغاز می‌شود. در لحظه  $t=0/21 \text{ s}$  متوسط نرخ تغییرات فرکانس به  $-5 \text{ Hz/s}$  می‌رسد و با توجه به معادله نوسان میزان باری که باید قطع شود  $1/21 \text{ MW}$  محاسبه می‌شود، بنابراین بار ردیف دوم به همراه ۵۰٪ از بار ردیف سوم بعد از گذر زمان تاخیر در لحظه  $t=0/29 \text{ s}$  قطع می‌شود و ۵۰٪ مابقی بار ردیف سوم به همراه بار ردیف چهارم بعد از گذر زمان تاخیر در لحظه  $t=0/37 \text{ s}$  قطع می‌شوند. بعد از حذف این مقدار از بار، افت فرکانس کاهش پیدا کرده شیب نرخ تغییرات فرکانس مثبت می‌شود، بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود.

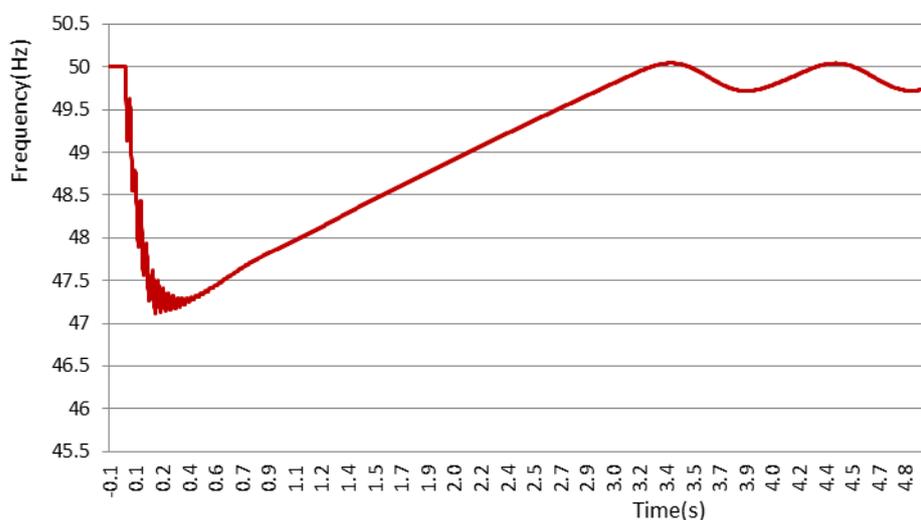
شکل (۴-۶) تغییرات فرکانس را طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و دو مرحله بارزدایی بارزدایی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بعد از دومین مرحله از فرایند بارزدایی فرکانس آهسته به محدوده مجاز خود بازمی‌گردد و این بدلیل کوچک بودن اینرسی معادل سیستم و قطع مقدار بهینه‌ای از بار سیستم می‌باشد.



شکل (۴-۶) فرکانس سیستم در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۱

### ۴-۳-۵- سناریو شماره ۲ (مدل توان ثابت بارها)

در این سناریو برای بررسی اثر در نظر گرفتن مدل بار بر روی فرایند بارزدایی، اولویت بندی بارها مطابق جدول شماره (۲-۴) فرض می‌شود با این تفاوت که ضرایب  $K_{QV}$  و  $K_{PV}$ ،  $K_{QF}$  و  $K_{PF}$  در مدل بار رابطه (۴-۴) و (۵-۴) همگی برابر صفر و بار از نوع  $P, Q$  ثابت در نظر گرفته می‌شود. با قطع بریکر در لحظه  $t=0s$  سیستم توزیع تبدیل به جزیره شده، فرکانس سریعاً افت کرده و متوسط نرخ تغییرات فرکانس به  $-18\text{Hz/s}$  می‌رسد. با توجه به معادله نوسان و روابط (۲-۴) و (۳-۴) میزان باری که باید در لحظه جزیره ای شدن قطع گردد، مقدار  $4/36\text{MW}$  محاسبه می‌شود. با توجه به فرایند بارزدایی ارائه شده در فلوجارت، ۳۰٪ از این مقدار یعنی ۸۰٪ از بار ردیف اول بعد از گذشت زمان تاخیر، در لحظه  $t=0/08s$  و ۳۰٪ مابقی اضافه بار، یعنی ۲۰٪ از بار ردیف اول، تمام بار ردیف دوم و سوم و چهارم و ۲۵٪ از بار ردیف پنجم در لحظه  $t=0/16s$  قطع می‌شوند. در ادامه بعد از گذشت ۵ نیم سیکل نرخ تغییرات فرکانس مثبت بوده و همچنان مثبت باقی می‌ماند، بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل (۷-۴) فرکانس سیستم را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و فرایند بارزدایی نشان می‌دهد.



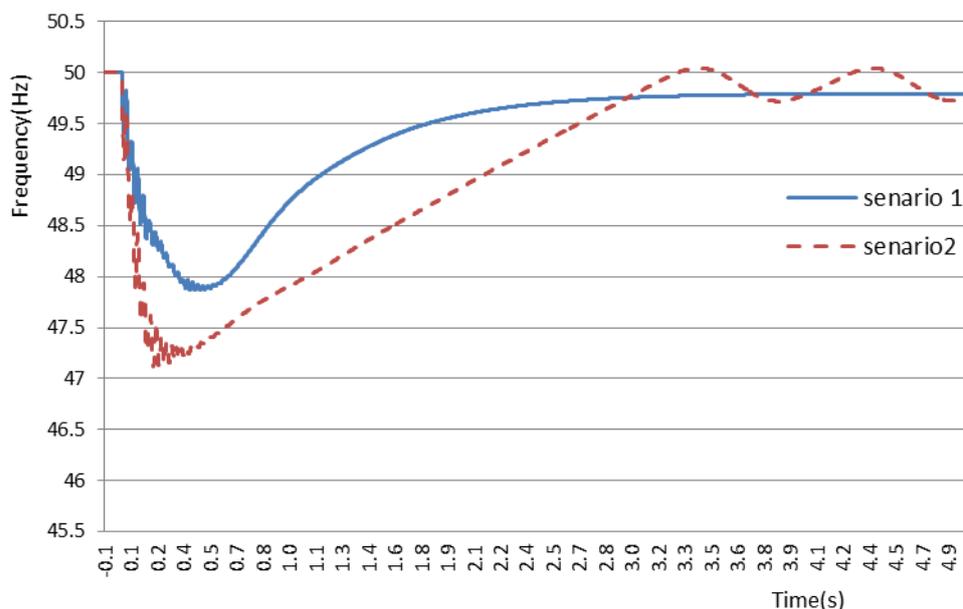
شکل (۷-۴) فرکانس سیستم در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲

با توجه به شکل (۷-۴) مشاهده می‌شود چون مدل بار ثابت در نظر گرفته شده است با توجه به معادلات مدل بار در روابط (۴-۴) و (۵-۴)، مقدار بار بیشتری در طی فرایند بارزدایی قطع شده

و همچنین افت فرکانس سریعتر بوده و نسبت به سناریو شماره ۱ فرکانس به محدوده پایین تری رسیده است. از طرفی چون در این سناریو بارها هیچگونه وابستگی به تغییرات ولتاژ و فرکانس ندارند، و در همه شرایط میزان بار ثابت و بدون تغییر باقی می ماند، نرخ تغییرات فرکانس شدیدتر بوده و برای بازگشت فرکانس به محدوده مجاز خود زمان بیشتری نیاز است. جدول شماره (۳-۴) میزان باری را که در هر مرحله از بارزدایی قطع شده است را برای سناریوهای شماره ۱ و ۲ نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت در سناریو شماره ۲ برای بازگشت فرکانس به محدوده مجاز مقدار بار بیشتری از شبکه قطع شده است. شکل (۴-۸) مقایسه ای بین تغییرات فرکانس سیستم را برای دو سناریو شماره ۱ و ۲ در طی فرایند بارزدایی را نشان می دهد.

جدول (۳-۴) مقایسه بین مراحل بارزدایی در دو سناریو شماره ۱ و ۲

مراحل بارزدایی	مقدار بار قطع شده (MW)	
	سناریو شماره ۱	سناریو شماره ۲
مرحله اول	۱/۶۵۶	۲/۶۴۶
مرحله دوم	۰/۶۹	-
جمع کل	۲/۳۴۶	۲/۶۴۶



شکل (۴-۸) پاسخ فرکانس سیستم در طی فرایند بارزدایی برای سناریوهای شماره ۱ و ۲

### ۴-۳-۶- سناریو شماره ۳ (اولویت بندی بارها بر اساس $K_{PV}$ کوچکتر)

با توجه به مدل استاتیکی بار، مطالب بیان شده در فصل ۳ و شکل‌های (۳-۶) و (۳-۷)، تاثیرگذارترین پارامتر بر روی میزان توان اکتیو و راکتیو به هنگام کسری توان و در پی آن افت فرکانس و ولتاژ، پارامترهای  $K_{PV}$  و  $K_{QV}$  هستند. بنابراین بهترین حالت در هنگام کسری توان اکتیو در سیستم، حذف بارهایی با مقدار  $K_{PV}$  کوچکتر است.

به منظور حداقل رساندن مقدار بار قطع شده در طی فرایند بارزدایی و بهبود پاسخ فرکانسی سیستم، بارها را با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  مطابق جدول (۴-۴) به سه دسته تقسیم بندی می‌کنیم. جدول (۴-۴)، مشابه جدول (۲-۴) می‌باشد با این تفاوت که برای بررسی اثر پارامتر  $K_{PV}$  مدل بار، پارامتر  $K_{PV}$  را برای بارهای ابتدایی جدول کوچک در نظر می‌گیریم و برای بارهای بعدی این مقدار را افزایش می‌دهیم، سایر پارامترهای مدل بار مشابه سناریو شماره ۲ در نظر گرفته می‌شود.

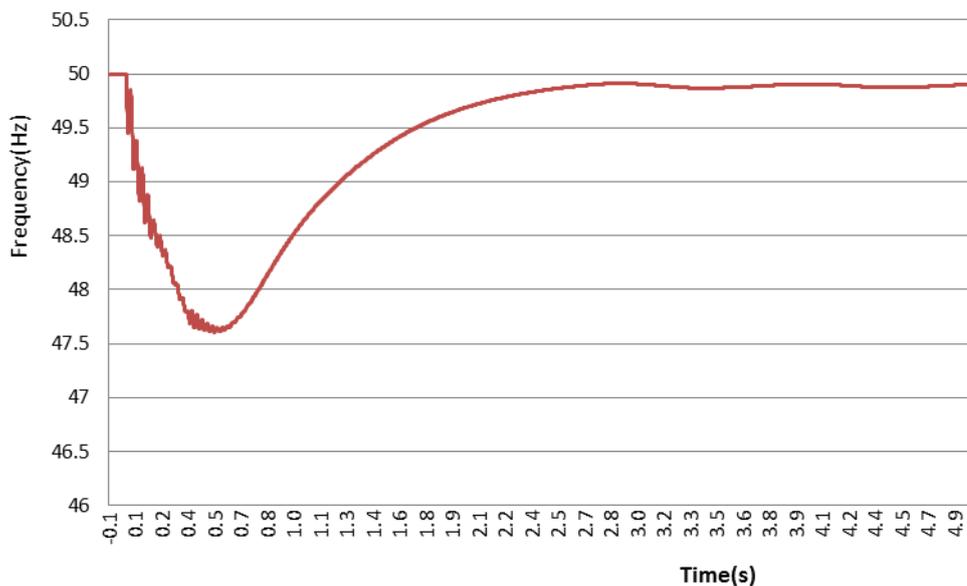
جدول (۴-۴) اولویت بندی بارها با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  برای سناریو ۳

ردیف	نام بار	P (MW)	Q (MVar)	$K_{PV}$
۱	Load STSY	۱/۶۵۶	۰/۳۸۴	۰/۲
۲	Load 10	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۰/۲
۳	Load 7	۰/۴۵۹۸	۰/۱۳۴۱	۰/۲
۴	Load 9	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۰/۲
۵	Load STCE	۱/۱۷۲	۰/۱۳۹	۱
۶	Load STNO	۱/۹۸۹	۰/۲۲۳	۱
۷	Load 8	۰/۷۲۴۳	۰/۲۱۱۳	۱
۸	Load FLOW	۲/۱۰۹	۰/۵۷۶	۱/۸
۹	Load 11	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۱/۸
۱۰	Load JUEL	۰/۹	۰/۱۶۴	۱/۸
۱۱	Load MAST	۲/۷۳۲	۰/۸۴۲	۱/۸

با تشکیل جزیره در لحظه  $t=0s$ ، فرکانس سیستم سریعاً افت کرده و متوسط نرخ تغییرات فرکانس به  $-9\text{Hz/s}$  می‌رسد و میزان باری که باید در لحظه تشکیل جزیره قطع شود با توجه به معادله نوسان به میزان  $2/18\text{MW}$  محاسبه می‌شود. با توجه به فرایند بارزدایی ارائه شده در فلوجارت ۸۰٪ از بار ردیف اول در طی دو مرحله و در زمانهای  $t=0/08s$  و  $t=0/16s$  به ترتیب قطع می‌شوند. در ادامه بعد از گذشت ۵ نیم سیکل همچنان نرخ تغییرات فرکانس کوچکتر از

صفر بوده و بنابراین مرحله دوم بارزدایی آغاز می‌شود.

در ادامه در لحظه  $t=0/21$  s متوسط نرخ تغییرات فرکانس به  $-6/5\text{Hz/s}$  می‌رسد و با توجه به معادله نوسان میزان اضافه باری که باید قطع شود  $1/56\text{MW}$  - محاسبه می‌شود و بنابراین  $20\%$  باقیمانده بار ردیف اول و بار ردیف دوم در لحظه  $t=0/29$  s و بارهای ردیف سوم و چهارم بعد از گذر زمان تاخیر در  $t=0/37$  s قطع می‌شوند. بعد از حذف این مقدار بار نرخ تغییرات فرکانس مثبت شده و بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل (۴-۹) فرکانس سیستم را در طی جزیره‌ای شدن و فرایند بارزدایی در سیستم برای سناریوهای شماره ۳ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۹) فرکانس سیستم در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۳

۴-۳-۷- سناریو ۴ (اولویت بندی بارها بر اساس  $K_{PV}$  بزرگتر)

در این سناریو در راستای سناریو ۳ برای نشان دادن اثر پارامترهای مدل بار بر فرایند بارزدایی، اولویت بندی بارها را مطابق جدول (۴-۵) انجام می‌دهیم. در این جدول بر خلاف جدول (۴-۴) بارهایی که پارامتر  $K_{PV}$  بزرگتری دارند در اولویت بارزدایی قرار می‌گیرند، سایر پارامترهای مدل بار مشابه سناریو ۲ در نظر گرفته می‌شود تا به وضوح بتوان تاثیر پارامتر  $K_{PV}$  را بر میزان بار قطع شده در طی فرایند بارزدایی و پاسخ فرکانسی سیستم نشان داد.

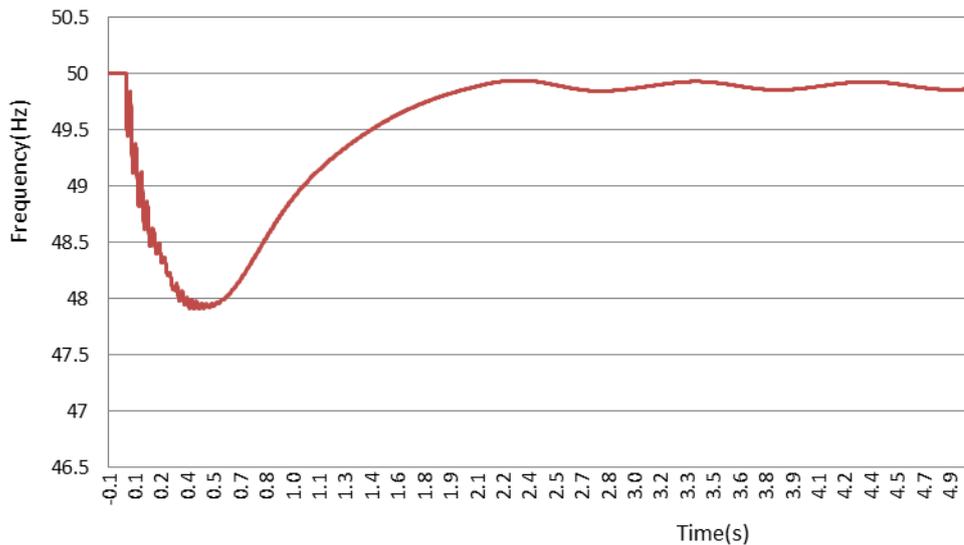
جدول (۴-۵) اولویت بندی بارها با توجه به پارامتر  $K_{PV}$  برای سناریو ۴

ردیف	نام بار	P(MW)	Q(MVAr)	$K_{PV}$
۱	Load FLOW	۲/۱۰۹	۰/۵۷۶	۱/۸
۲	Load 11	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۱/۸
۳	Load JUEL	۰/۹	۰/۱۶۴	۱/۸
۴	Load MAST	۲/۷۳۲	۰/۸۴۲	۱/۸
۵	Load STCE	۱/۱۷۲	۰/۱۳۹	۱
۶	Load STNO	۱/۹۸۹	۰/۲۲۳	۱
۷	Load 8	۰/۷۲۴۳	۰/۲۱۱۳	۱
۸	Load STSY	۱/۶۵۶	۰/۳۸۴	۰/۲
۹	Load 10	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۰/۲
۱۰	Load 7	۰/۴۵۹۸	۰/۱۳۴۱	۰/۲
۱۱	Load 9	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	۰/۲

همانند سناریوهای قبل با تشکیل جزیره در لحظه  $t=0s$ ، فرکانس سیستم سریعاً افت کرده و متوسط نرخ تغییرات فرکانس به  $-9Hz/s$  می‌رسد و میزان باری که باید در لحظه تشکیل جزیره قطع شود،  $2/18MW$  محاسبه می‌شود. با توجه به فرایند بارزدایی ارائه شده در فلوجارت ۳۵٪ از بار ردیف اول، در لحظه  $t=0/08s$  و ۳۵٪ دیگر آن در لحظه  $0/16s$  قطع می‌شود. در ادامه بعد از گذشت ۵ نیم سیکل همچنان نرخ تغییرات فرکانس کوچکتر از صفر بوده و بنابراین مرحله دوم بارزدایی آغاز می‌شود.

در ادامه در لحظه  $t=0/21s$  نرخ تغییرات فرکانس به  $-7/6Hz/s$  می‌رسد و با توجه به معادله نوسان میزان اضافه باری که باید قطع شود  $1/84MW$  محاسبه می‌شود و بنابراین ۳۰٪ باقی مانده بار ردیف اول بعد از گذر زمان تاخیر در لحظه  $t=0/29s$  و تمام بار ردیف دوم به

همراه ۵۰٪ از بار ردیف سوم در لحظه  $t=0/37$  s قطع می‌شود. بعد از حذف این مقدار بار نرخ تغییرات فرکانس مثبت شده و بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل (۴-۱۰) فرکانس سیستم را در طی فرایند جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریوهای شماره ۴ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۰) فرکانس سیستم در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴

با توجه به دو سناریو شماره ۳ و ۴، جدول (۴-۶) میزان باری که در پی جزیره‌ای شدن سیستم و برای بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز قطع شده است را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با اولویت بندی بارها بر اساس پارامتر  $K_{PV}$ ، میزان باری که در طی بارزدایی قطع می‌شود کاهش یافته، همچنین با توجه به شکل (۴-۱۱) و مشاهده می‌شود که فرکانس سیستم در هر دو سناریو در یک مقدار مشابه ( $48/8$  Hz) به پایداری می‌رسند، همچنین با توجه به شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود میزان تغییرات توان اکتیو واحد تولیدی CHP در هر دو سناریو تقریباً مشابه است. دلیل این امر آن است که در سناریو شماره ۴ با اینکه مقدار بار بیشتری قطع می‌شود، اما بارهایی قطع می‌شوند که پارامتر  $K_{PV}$  بزرگتری دارند بنابراین با توجه به مدل استاتیکی بار و منحنی پروفایل ولتاژ در شکل (۴-۱۳) میزان باری که واحد CHP در هر دو سناریو باید تولید کند با توجه به روابط زیر تقریباً یکسان است.

برای سناریو شماره ۳ داریم:

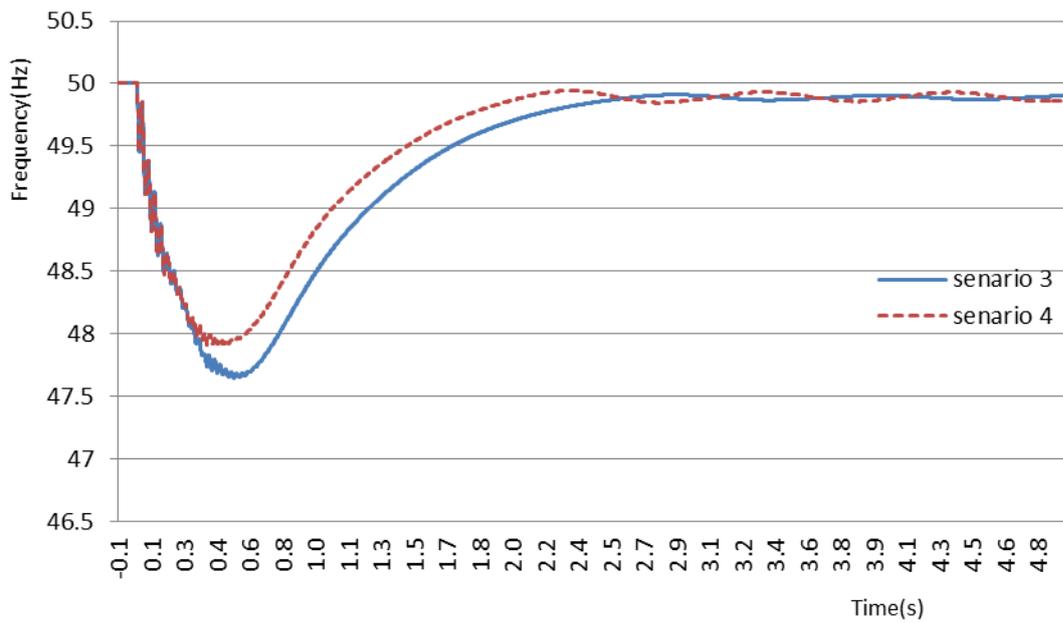
$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{PV}} = 2.346 \left( \frac{0.917}{0.997} \right)^{0.2} = 2.308 \text{ MW}$$

برای سناریو شماره ۴ داریم:

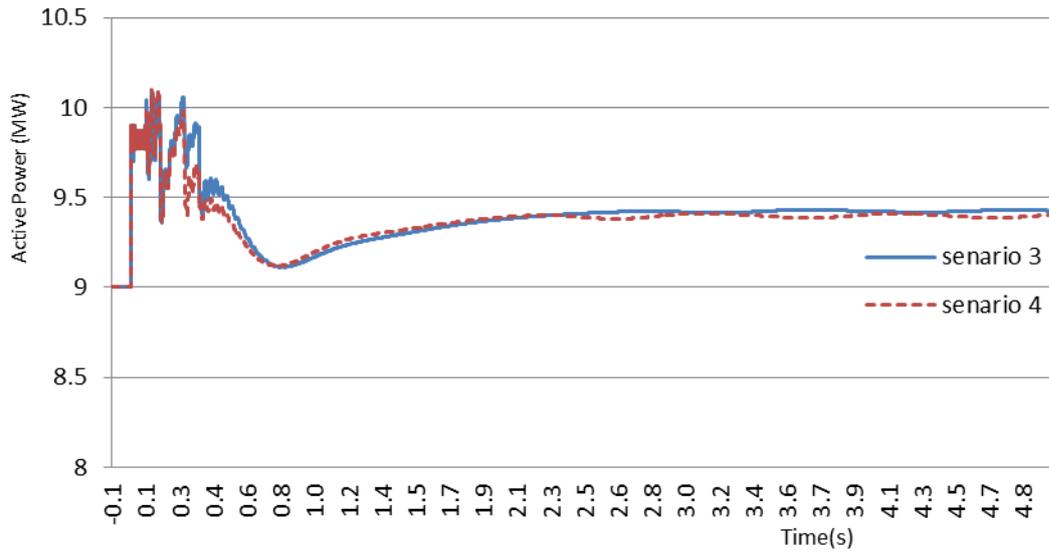
$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{K_{pv}} = 2.674 \left( \frac{0.917}{0.997} \right)^{1.8} = 2.3 \text{ MW}$$

جدول (۴-۶) مقایسه بین مراحل بارزدایی در دو سناریو شماره ۳ و ۴

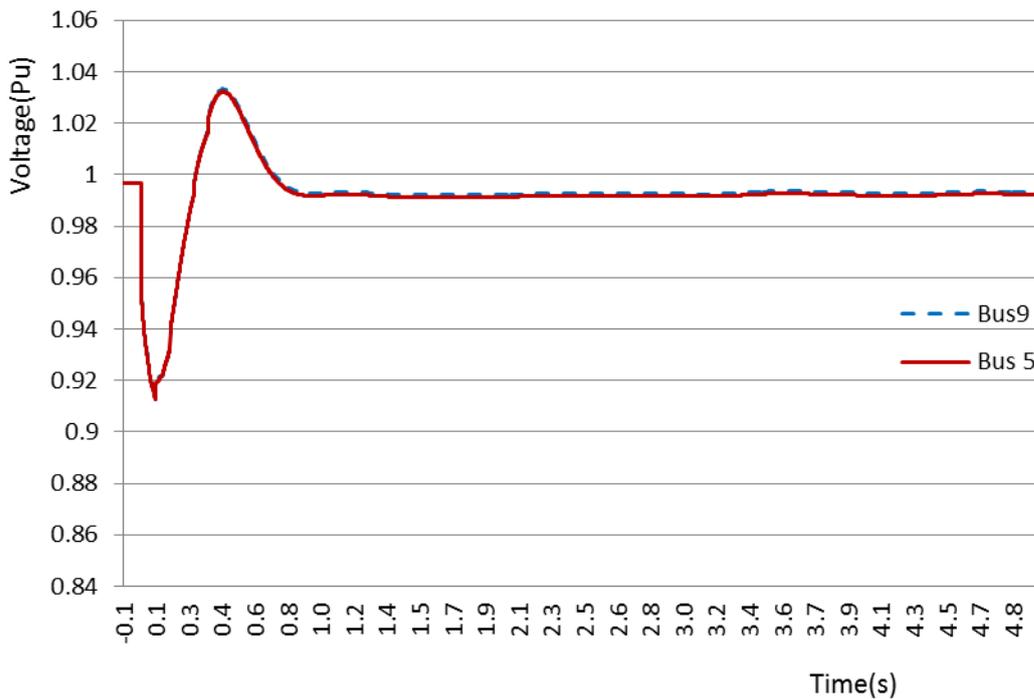
مراحل بارزدایی	مقدار بار قطع شده (MW)	
	سناریو شماره ۳	سناریو شماره ۴
مرحله اول	۱/۳۲۵	۱/۴۷۶
مرحله دوم	۱/۰۲۱	۱/۱۹۸
جمع کل	۲/۳۴۶	۲/۶۷۴



شکل (۴-۱۱) پاسخ فرکانس سیستم در طی فرایند بارزدایی برای سناریوهای شماره ۳ و ۴



شکل (۴-۱۲) تغییرات توان تولیدی واحد CHP در طی فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۳ و ۴



شکل (۴-۱۳) تغییرات ولتاژ در باسهای ۹ و ۵ در طی فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۳ و ۴

## ۴-۳-۸- تحلیل نتایج حاصل از بارزدایی فرکانسی تطبیقی

در این قسمت یک روش جدید بارزدایی فرکانسی تطبیقی جهت حل مسئله پایداری و نتایج ناشی از افت فرکانس برای شبکه‌های کوچک جزیره ای شده متصل به منابع تولید پراکنده ارائه شد. روش پیشنهادی تطبیق پذیر و هوشمند است. در این روش از شاخص‌های فرکانس، متوسط نرخ تغییرات فرکانس و معادله نوسان برای اجرای استراتژی بارزدایی مورد استفاده قرار گرفت. استراتژی بارزدایی در سیستم جزیره‌ای شده به دلیل کوچک بودن اینرسی معادل سیستم نیاز به قطع مقدار بیشتری بار در مراحل اولیه بارزدایی است و برای مراحل بعدی باید فرصت بیشتری را به سیستم داد تا به شرایط عادی خود بازگردد.

پس از بررسی نتایج شبیه سازی، کارایی و توانایی طرح با استفاده از سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. از ویژگی‌های مهم این روش می‌توان به سرعت بالای آن، قطع مقدار بهینه ای از بار، کاهش جهش فرکانس به بالاتر از مقدار نامی بعد از بارزدایی در مقایسه با روش-های بارزدایی مرسوم و کارایی آن برای شبکه‌های توزیع کوچک متصل به منابع تولید پراکنده اشاره کرد.

صرف نظر از مسائل اقتصادی، یکی از فاکتورهای مهم برای اولویت بندی بارها، در نظر گرفتن اثر مدل بار جهت به حداقل رساندن میزان قطع بار در طی فرایند بارزدایی است. چون در شبکه‌های کوچک اینرسی معادل سیستم در مقایسه با سیستم‌های بزرگ بسیار کوچک است بنابراین در لحظات اولیه بروز اغتشاش، فرکانس و در پی آن ولتاژ در باسهای مختلف سریعاً افت کرده و نیاز است مقدار زیادی از بارها در لحظات اولیه قطع گردند تا پایداری سیستم حفظ گردد. بنابراین برای اینکه در لحظات اولیه بارزدایی میزان باری که قطع می‌شود به حداقل برسد می‌توان از پارامترهای مدل بار استفاده کرده، چون در پی جزیره ای شدن سیستم و بروز اغتشاشات، ولتاژ در باسهای مختلف سریعاً افت خواهد کرد، از لحاظ تئوری مناسبتر است بارهایی که کمترین وابستگی را به ولتاژ دارند (بارهایی با  $K_{pv}$  کوچکتر) در اولویت بارزدایی قرار داد. نتایج شبیه سازی سناریوهای شماره ۱ تا ۴ و جداول مربوط به میزان بارهای قطع شده در هر سناریو این موضوع را تأیید می‌کنند.

در پایان مقدار باری که در هر سناریو قطع شده است در جدول (۴-۷) جمع بندی شده است. همانطور که مشخص است در نظر گرفتن مدل بار و اولویت بندی بارها برای قطع شدن با

توجه به پارامتر  $K_{PV}$  تاثیر بسزایی در میزان بار قطع شده از سیستم دارد.

جدول (۴-۷) مقایسه بین مراحل بارزدایی در سناریوهای ۱ تا ۴ در روش بارزدایی تطبیقی

مراحل بارزدایی	مقدار بار قطع شده (MW)			
	سناریو شماره ۱	سناریو شماره ۲	سناریو شماره ۳	سناریو شماره ۴
مرحله اول	۱/۶۵۶	۲/۶۴۶	۱/۳۲۵	۱/۴۷۶
مرحله دوم	۰/۶۹	-	۱/۰۲۱	۱/۱۹۸
جمع کل	۲/۳۴۶	۲/۶۴۶	۲/۳۴۶	۲/۶۷۴

## ۴-۴- طرح بارزدایی فرکانسی نیمه تطبیقی پیشنهادی

با توجه به مطالب بیان شده در قسمت‌های قبل، و با توجه به اینکه اجرای طرح‌های بارزدایی تطبیقی در شبکه‌های کوچک واقعی نیازمند نصب تجهیزات پیشرفته، برای حذف درصد معینی از بار در طی فرایند بارزدایی است، در این بخش یک استراتژی بارزدایی فرکانسی براساس میزان نرخ تغییرات فرکانس متناسب با هر بار در سیستم و کاهش فرکانس ارائه می‌شود که در فلوچارت شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است.

در اولین قدم باید نرخ تغییرات فرکانس متناسب با تک تک بارهای سیستم ( $RoCoF_i$ ) تعیین گردد. بدین منظور شبکه مورد نظر را شبیه سازی کرده و سپس میزان کسری توان در پی جزیره‌ای شدن را با اصلاح سایر بارهای سیستم برابر با مقدار بار مورد نظر قرار داده و جزیره سازی تعمدی را اعمال می‌کنیم. این فرایند برای تمامی بارهای سیستم انجام شده سپس با توجه به اهمیت بارها، آنها را اولویت بندی کرده و  $\sum_{i=1}^N RoCoF_i$  را محاسبه می‌کنیم.

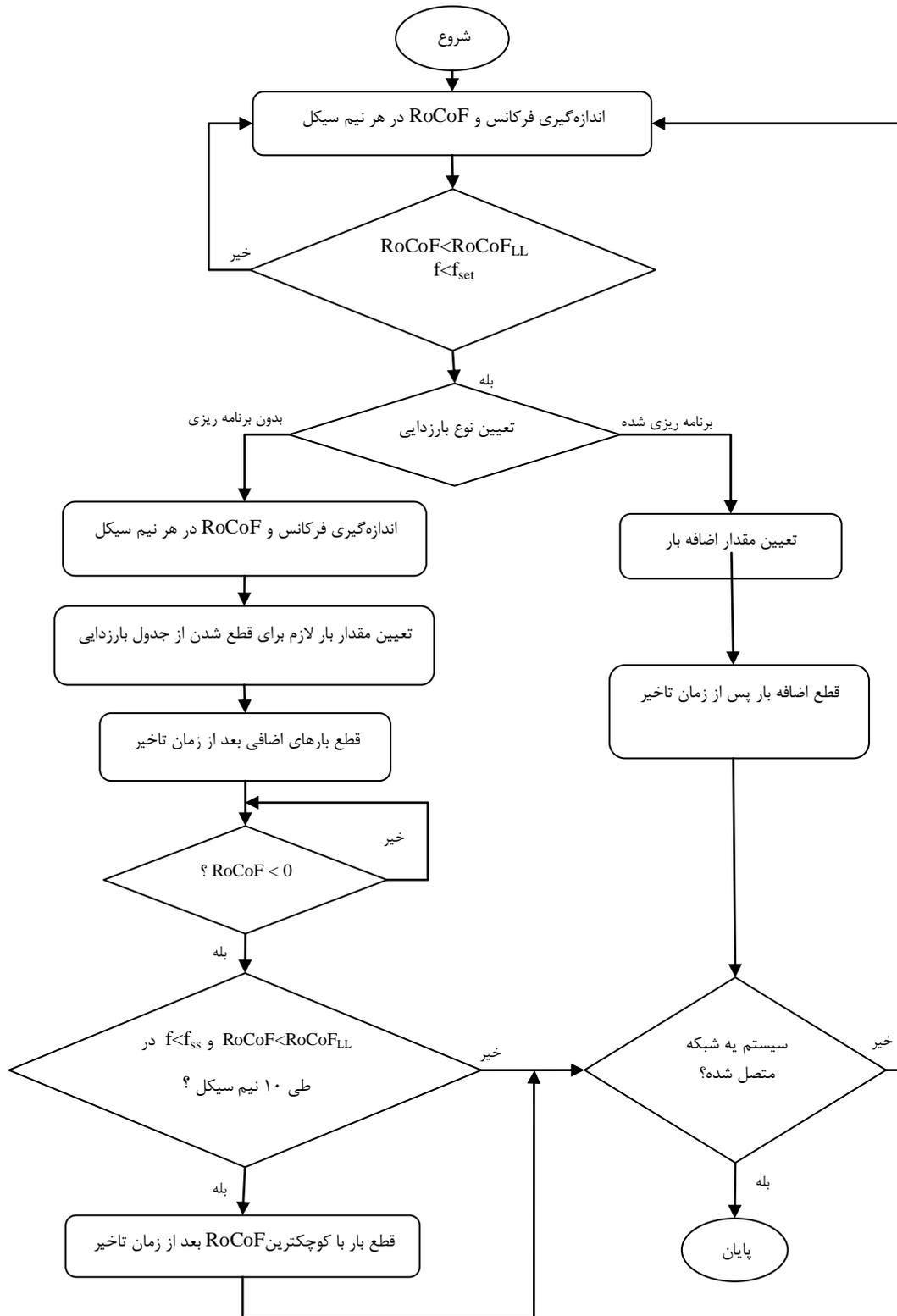
اولویت بندی بارها عموماً بر اساس اهمیت آنها صورت می‌گیرد و گاهی در بعضی شرایط برای پایداری سیستم اولویت بندی بر اساس نوع و مدل بار صورت می‌گیرد. در ادامه فرکانس در هر نیم سیکل اندازه‌گیری شده و  $RoCoF$  محاسبه می‌شود. اگر اندازه  $RoCoF$  کوچکتر از  $RoCoF_{LL}$  (وابسته به کوچکترین بار) بود، روش پیشنهادی برای افت فرکانس به زیر مقدار  $f_{set}$  صبر خواهد کرد، چون کاهش در فرکانس می‌تواند ناشی از بعضی از رویدادهای عادی باشد و فرکانس ممکن است بعد از مدتی پایدار شود. با توجه به نتایج شبیه سازی‌ها و مراجع [۴،۱۰]،  $f_{set}$  (کمترین محدوده فرکانس مجاز) ، در این روش برابر با  $49/5$  Hz در نظر گرفته می‌شود. اگر  $RoCoF$  محاسبه شده کمتر از  $RoCoF_{LL}$  باشد مقداری از بارها باید سریعاً قطع شوند. تعداد بارهایی که باید قطع شوند با توجه به میزان نرخ تغییرات فرکانس در پی جزیره‌ای شدن تعیین شده و هر یک از آنها بعد از گذشت یک زمان تاخیر ( $t = 80$  ms) از سیستم قطع می‌شوند.

برای تعیین مقدار باری که باید قطع شود،  $RoCoF$  محاسبه شده بعد از جزیره‌ای شدن با میزان نرخ تغییرات فرکانس تجمعی ( $\sum_{i=1}^N RoCoF_i$ ) متناسب با ردیف بارها در جدول مقایسه شده و تعداد بارهایی که باید قطع شوند تعیین می‌شود. برای مثال اگر  $RoCoF$  محاسبه شده در پی

جزیره‌ای شدن سیستم  $5 \text{ Hz/s}$  - باشد و بارهای ردیف ۵ و ۶ دارای  $\sum_{i=1}^N RoCoF_i$  به مقدار  $4/85 \text{ Hz/s}$  و  $5/5 \text{ Hz/s}$  - باشند انگاه تعداد بارهایی که برای قطع شدن انتخاب می‌شود بارهای ردیف ۱ تا ۶ می‌باشد. با قطع این بارها افت فرکانس سیستم سریعاً متوقف شده و بتدریج به محدوده مجاز ( $f_{set}$ ) خود بازمی‌گردد اما ممکن است بعد از گذشت زمان دارای خطای حالت ماندگار باشد که برای برطرف کردن این موضوع، در ادامه استراتژی پیشنهادی به مدت ده نیم سیکل ( $0/1$  ثانیه) میزان شیب فرکانس ( $df/dt$ ) را اندازه‌گیری می‌کند، اگر تمام این مدت شیب فرکانس منفی باشد و فرکانس سیستم نیز از محدوده مجاز نامی  $f_{ss}$  (در این طرح  $f_{ss} = f \pm 0/05 \text{ Hz}$  فرض می‌شود) کمتر باشد با توجه به فرصت زمانی که بعد از قطع مرحله اول بارها ایجاد شده است، باری که کوچکترین نرخ تغییرات فرکانس را داشته باشد از سیستم قطع می‌شود. پس از بازگشت فرکانس به محدوده مجاز فرکانس نامی، بارزدایی متوقف شده و تا بروز اغتشاش بعدی منتظر می‌ماند. اگر بارزدایی از نوع بابرنامه باشد یعنی از قبل آمادگی لازم برای بارزدایی وجود داشته باشد، مقدار اضافه بار با توجه به رابطه (۴-۶) تعیین می‌شود.

$$\Delta P_{Def} = [(P_{Grid} + P_{DG}) - P_{Load}] \quad (۴-۶)$$

در رابطه بالا  $\Delta P_{Def}$  مقدار کسری توان (اضافه بار)،  $P_{Grid}$  میزان توان دریافتی از شبکه،  $P_{DG}$  توان تولیدی توسط واحدهای تولید پراکنده و  $P_{Load}$  کل توان مصرفی در سیستم توزیع است. پس از تعیین مقدار اضافه بار تعداد بارهای لازم برای قطع شدن از جدول اولویت بندی تعیین شده و بتدریج یکی یکی بعد از زمان تاخیر ( $t = 80 \text{ ms}$ ) از سیستم قطع می‌شوند [۳].



شکل (۴-۱۴) فلوجارت استراتژی بارزدایی نیمه تطبیقی پیشنهادی

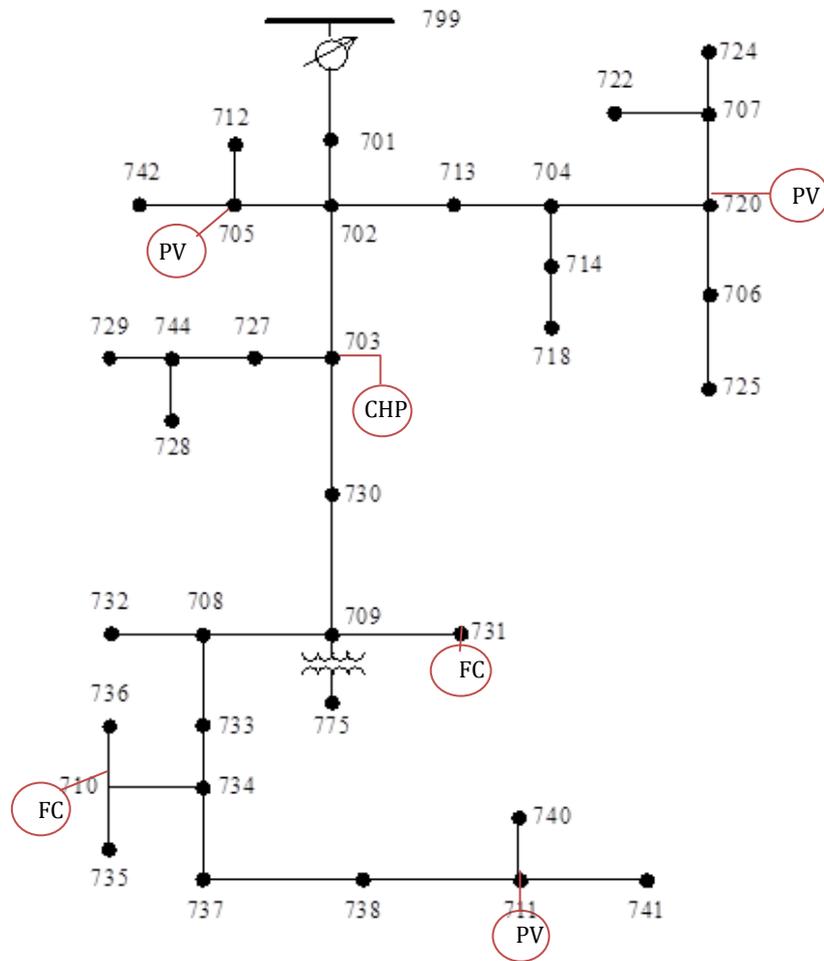
## ۴-۴-۲- سیستم تست شماره ۲ (سیستم تست IEEE با ۳۷ فیدر)

برای تست روش بارزدایی نیمه تطبیقی پیشنهادی از سیستم تست نمونه IEEE با ۳۷ فیدر استفاده می‌شود که در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است [۳۴، ۳۵]. دلیل انتخاب این سیستم تست نمونه در دسترس بودن مدل بارهای آن و تفکیک آنها بر اساس انواع مدل‌های توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت است.

برای شبیه‌سازی این سیستم از نرم افزار DigSILENT استفاده شده است. پس از در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده اختیاری بر روی سیستم تست نمونه و جزیره‌سازی تعدمی آن، روش پیشنهادی بر روی آن تست می‌شود. این سیستم شامل ۲۵ بارالکتریکی است که داده‌های مربوط به آنها در جدول (۴-۸) آورده شده است. یک واحد تولیدی ترکیبی برق - گرما (CHP) با ظرفیت ۱/۵MW در نقطه ۷۰۳، دو واحد تولیدی پیل سوختی (FC) با ظرفیت ۰/۲MW در نقاط ۷۱۰ و ۷۳۱ و سه واحد تولیدی سلول خورشیدی (PV) با ظرفیت ۰/۲MW در نقاط ۷۱۱، ۷۲۰ و ۷۰۵ نصب شده‌اند که این پنج واحد تولیدی در ماکزیمم ظرفیت تولیدی خود بهره‌برداری می‌شوند. مدل‌های IEEE-type ST1 و GAST برای سیستم تحریک و سیستم گاورنر در واحد تولیدی CHP مورد استفاده قرار می‌گیرد که داده‌های مربوط به این دو مدل در نمونه‌های مدل سیستم گاورنر و تحریک نرم افزار DigSILENT و در پیوست برای مطالعه در دسترس است.

جدول (۴-۸) داده های مربوط به بارهای سیستم تست نمونه شماره ۲ [۳۵].

ردیف	شماره فیدر	مدل بار	توان اکتیو (KW)	توان راکتیو (KVAR)	RoCoFi (Hz/S)	$\sum_{i=1}^N RoCoF_i$
۱	۷۳۴	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۰/۵۵
۲	۷۲۴	D-Z	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱/۱
۳	۷۱۸	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۲/۱۵
۴	۷۴۲	D-Z	۹۳	۴۴	-۱/۲	-۳/۳۵
۵	۷۲۸	D-PQ	۱۲۶	۶۳	-۱/۵	-۴/۸۵
۶	۷۱۳	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۵/۹
۷	۷۴۴	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۶/۴۵
۸	۷۳۳	D-I	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۷/۵
۹	۷۴۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۸/۵۵
۱۰	۷۲۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۹/۶
۱۱	۷۲۲	D-I	۱۶۱	۸۰	-۱/۷۵	-۱۱/۳۵
۱۲	۷۲۵	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۱/۹
۱۳	۷۲۷	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۲/۴۵
۱۴	۷۳۲	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۳
۱۵	۷۳۰	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۱۴/۰۵
۱۶	۷۳۱	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۱۵/۱
۱۷	۷۲۹	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۵/۶۵
۱۸	۷۳۵	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۱۶/۷
۱۹	۷۳۸	D-PQ	۱۲۶	۶۲	-۱/۵	-۱۸/۲
۲۰	۷۳۶	D-Z	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۸/۷۵
۲۱	۷۴۱	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۱۹/۳
۲۲	۷۳۷	D-I	۱۴۰	۷۰	-۱/۵۵	-۲۰/۸۵
۲۳	۷۱۴	D-I	۳۸	۱۸	-۰/۵	-۲۱/۳۵
۲۴	۷۱۲	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۲۲/۴
۲۵	۷۰۱	D-PQ	۶۳۰	۳۱۵	-۶/۴	-۲۸/۸
مجموع			۲۴۵۷	۱۲۰۱	-۲۸/۸	



شکل (۴-۱۵) سیستم توزیع نمونه IEEE با ۳۷ فیدر [۳۵]

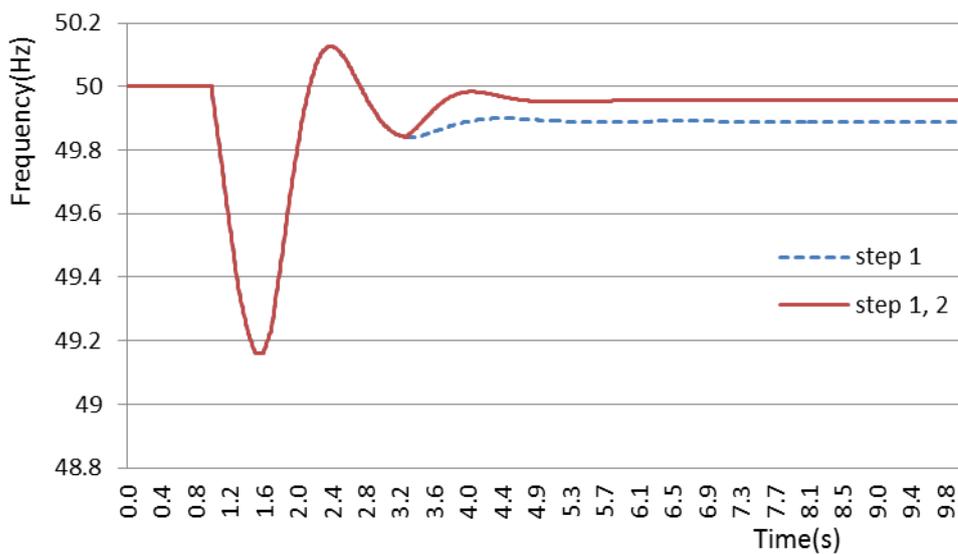
#### ۴-۵- نتایج شبیه سازی

در این قسمت برای تست روش پیشنهادی، سیستم توزیع نمونه با قطع بریکر نصب شده در باس ۷۹۹ از شبکه جدا شده تا در حالت جزیره ای بهره برداری شود. قبل از تبدیل سیستم به حالت جزیره‌ای واحد CHP به میزان ۱MW و سایر واحدهای تولیدی هر کدام ۰/۲MW توان تولید می‌کنند و توان دریافتی از شبکه انتقال ۰/۴۶MW و ۰/۳MVar است. میزان نرخ تغییرات فرکانس در پی جزیره‌ای شدن و کسری توان برابر با هر یک از بارها از قبل برای هر بار تهیه شده و در جدول شماره (۴-۸) لیست شده است. همچنین با توجه به اولویت بندی بارها

فراوانی تجمعی نرخ تغییرات فرکانس ( $\sum_{i=1}^N RoCoF_i$ ) بارها در ستون آخر این جدول محاسبه شده است. در قسمتهای بعدی با جزیره سازی تعمدی سیستم کارایی روش بارزدایی نیمه تطبیقی پیشنهادی و همچنین تاثیر مدل بار در میزان بار حذف شده، در چندین سناریو مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۴-۵-۱- سناریو شماره ۱ (بارزدایی هنگام جزیره‌ای شدن)

در این سناریو باتوجه به فلوچارت شماره (۴-۱۴) و برای تست روش پیشنهادی در لحظه  $t=1s$  بریکری که سیستم توزیع را در فیدر ۷۹۹ به شبکه متصل می کند، قطع شده و جزیره تشکیل می شود. در این لحظه فرکانس سریعاً افت کرده و نرخ تغییرات فرکانس در لحظه  $t=1/26s$  به  $-4Hz/s$  می رسد. بنابراین با توجه به فلوچارت و جدول (۴-۸) بارهای ردیف ۱ تا ۵ به ترتیب در لحظات  $t=1/34s$ ،  $t=1/42s$ ،  $t=1/5s$ ،  $t=1/58s$  و  $t=1/66s$  قطع می شوند. از لحظه  $t=3/00s$  به مدت ده نیم سیکل  $RoCoF < RoCoF_{LL}$  و فرکانس کمتر از مقدار  $f_{ss}$  است در طی این زمان متوسط نرخ تغییرات فرکانس برابر با  $-0/62Hz/s$  می باشد. بنابراین بار ردیف ۷ با توجه به کوچکتر بودن نرخ تغییرات فرکانس آن ( $-0/55Hz/s$ ) بعد از گذشت زمان تاخیر از سیستم قطع می شود. بعد از حذف این مقدار بار افت فرکانس کاهش پیدا کرده و بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می شود. شکل (۴-۱۶) تغییرات فرکانس را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و دو مرحله از بارزدایی فرایند بارزدایی نشان می دهد. همانطور که مشخص است با اجرای مرحله دوم بارزدایی فرکانس شبکه دارای خطای حالت ماندگار بسیار ناچیز بوده و به محدوده مجاز  $f_{ss}$  باز می گردد.



شکل (۴-۱۶) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۱

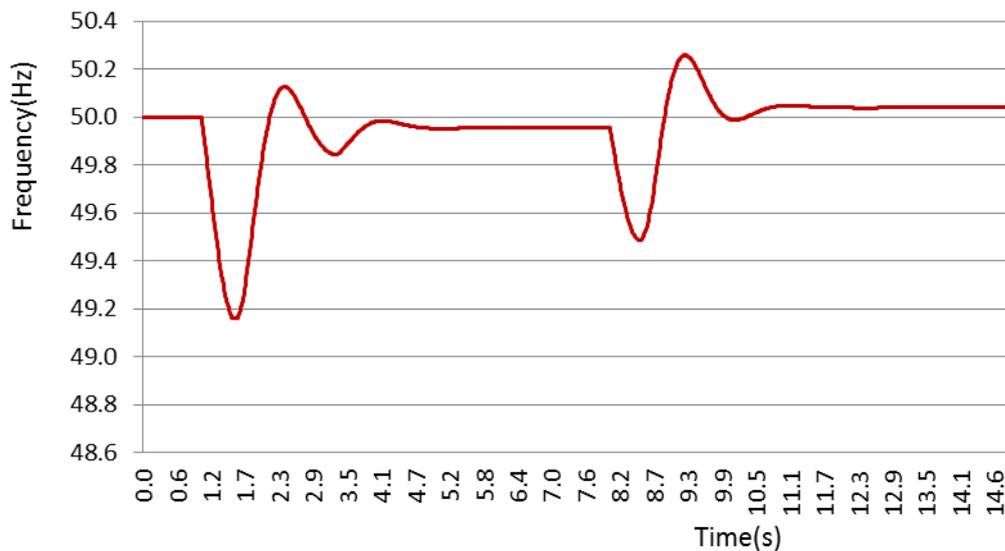
#### ۴-۵-۲- سناریو شماره ۲ (از مدار خارج شدن پیل سوختی در جزیره)

در این سناریو در ادامه سناریو شماره ۱، بعد از گذر به حالت جزیره‌ای، در لحظه  $t = ۸/۰s$  یکی از واحدهای تولیدی پیل سوختی از مدار خارج می‌شود. در پی خروج این واحد تولیدی فرکانس سیستم سریعاً افت می‌کند و نرخ تغییرات فرکانس سیستم در لحظه  $t = ۸/۴۵s$  به  $-۲/۷۵Hz/s$  می‌رسد. با حذف بارهای قطع شده در سناریو شماره ۱ از لیست جدول اولویت بندی، جدول جدید اولویت بندی بصورت جدول (۴-۹) برای ادامه فرایند بارزدایی تهیه می‌گردد. با توجه به روش بارزدایی ارائه شده، بارهای ردیف ۱ تا ۳ به ترتیب در لحظات  $t = ۸/۵۳s$ ،  $t = ۸/۶۱s$  و  $t = ۸/۶۹s$  از سیستم قطع می‌شوند.

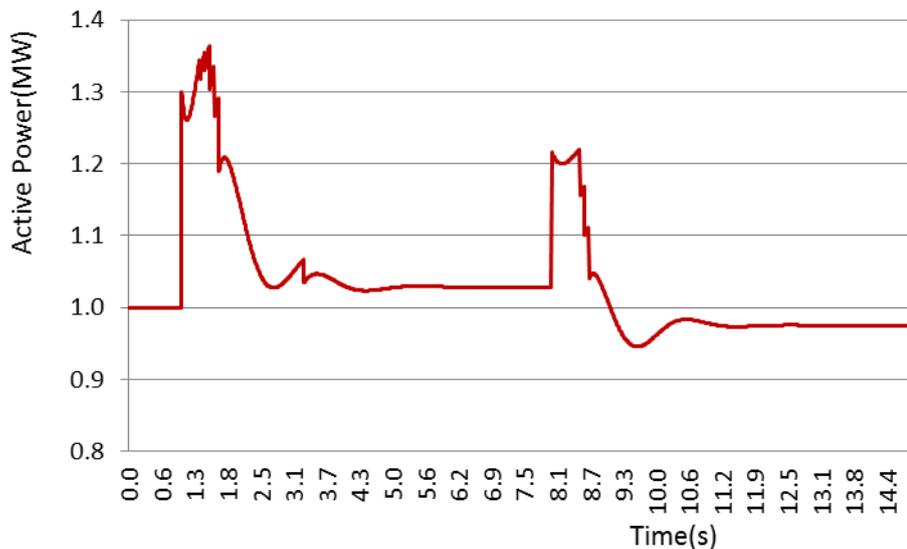
بعد از قطع این بارها افت فرکانس کاهش پیدا کرده و با توجه به اندازه‌گیری فرکانس در هر نیم سیکل و همچنین در نظر گرفتن خطای حالت ماندگار نیازی به ادامه فرایند بارزدایی نمی‌باشد. بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل (۴-۱۷) تغییرات فرکانس را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و فرایند بارزدایی و شکل (۴-۱۸) میزان تغییرات توان اکتیو واحد تولیدی CHP را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۹) جدول اصلاح شده اولویت بندی بارهای سیستم تست شماره ۲ برای سناریو شماره ۲

ردیف	شماره فیدر	مدل بار	توان اکتیو (KW)	توان راکتیو (KVAR)	RoCoFi (Hz/S)	$\sum_{i=1}^N RoCoFi_i$
۱	۷۱۳	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۱/۰.۵
۲	۷۳۳	D-I	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۲/۱
۳	۷۴۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۳/۱.۵
۴	۷۲۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۴/۲
۵	۷۲۲	D-I	۱۶۱	۸۰	-۱/۷.۵	-۵/۹.۵
۶	۷۲۵	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۶/۵
۷	۷۲۷	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۷/۰.۵
۸	۷۳۲	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۷/۶
۹	۷۳۰	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۸/۶.۵
۱۰	۷۳۱	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۹/۷
۱۱	۷۲۹	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۱۰/۲.۵
۱۲	۷۳۵	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۱۱/۳
۱۳	۷۳۸	D-PQ	۱۲۶	۶۲	-۱/۵	-۱۲/۸
۱۴	۷۳۶	D-Z	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۱۳/۳.۵
۱۵	۷۴۱	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵.۵	-۱۳/۹
۱۶	۷۳۷	D-I	۱۴۰	۷۰	-۱/۵.۵	-۱۵/۴.۵
۱۷	۷۱۴	D-I	۳۸	۱۸	-۰/۵	-۱۵/۹.۵
۱۸	۷۱۲	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰.۵	-۱۷
۱۹	۷۰۱	D-PQ	۶۳۰	۳۱۵	-۶/۴	-۲۳/۴
مجموع			۲۰۲۷	۹۹۱	-۲۳/۴	



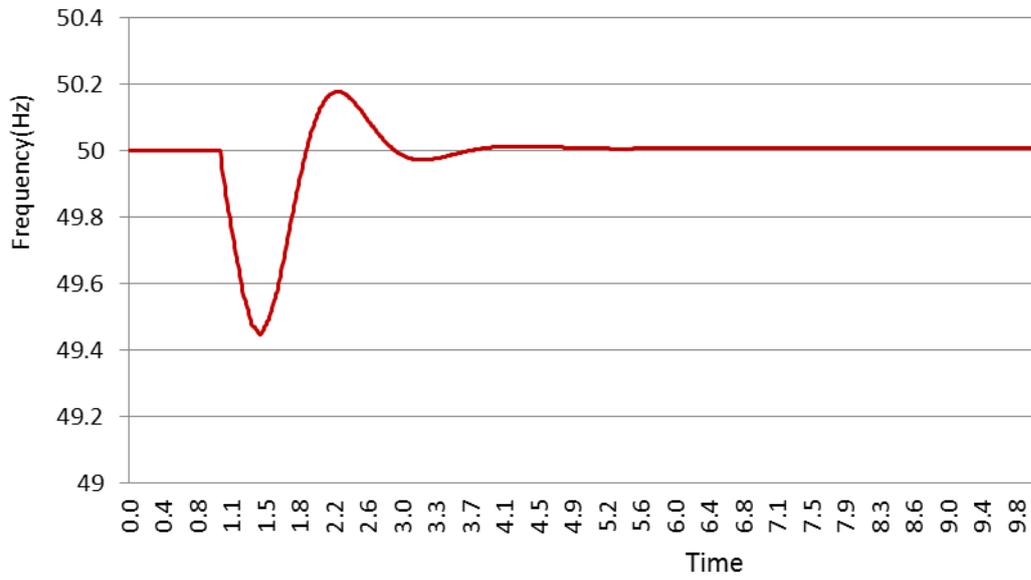
شکل (۴-۱۷) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲



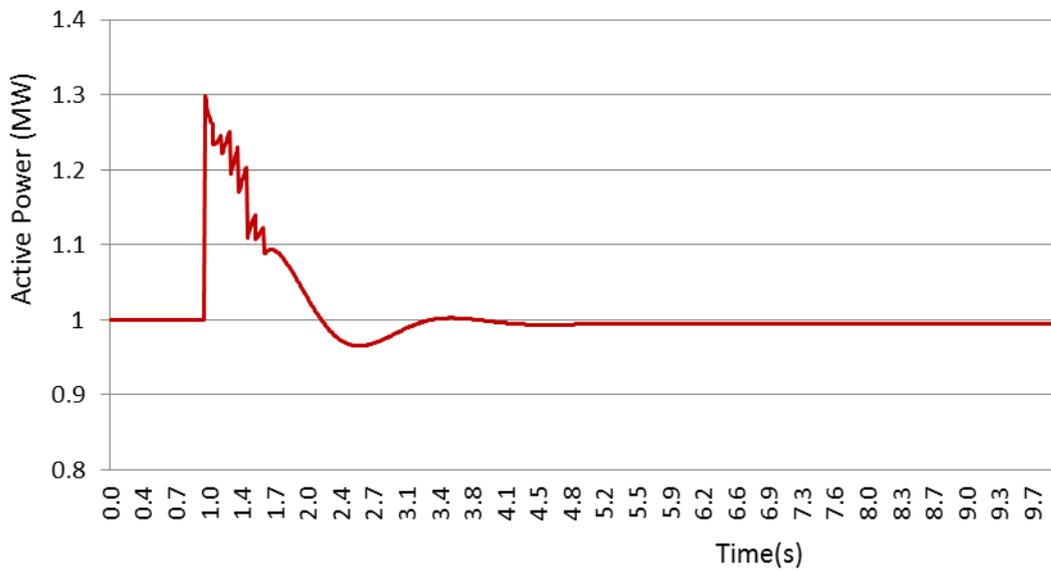
شکل (۴-۱۸) تغییرات توان اکتیو واحد تولیدی CHP در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۲

#### ۴-۵-۳- سناریو شماره ۳ (بارزدایی برنامه ریزی شده)

در این سناریو در لحظه  $t = 1s$  طبق برنامه از قبل تعیین شده به بریکری که سیستم توزیع را به شبکه متصل می‌کند فرمان قطع داده می‌شود، بنابراین جزیره تعمدی تشکیل شده و بارزدایی برنامه‌ریزی شده آغاز می‌شود. با توجه به رابطه (۴-۶) میزان کسری توان برابر با  $0.46MW$  تعیین می‌شود. بنابراین با توجه به فلوچارت بارهای ردیف ۱ تا ۶ و بارهای ردیف ۷ و ۱۲ بعد از گذشت زمان تاخیر از سیستم جدا می‌شوند. در واقع چون با برنامه از پیش تعیین شده جزیره سازی انجام می‌شود اپراتور سعی می‌کند که با توجه به میزان کسری توان مقدار باری برابر با میزان کسری توان از سیستم جدا کند. بنابراین میزان بار قطع شده برابر با  $0.464 MW$  از مدار جدا می‌شود. تک تک این بارها بعد از گذر زمان تاخیر از سیستم جدا می‌شوند. شکل (۴-۱۹) تغییرات فرکانس شبکه را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و فرایند بارزدایی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود چون مقدار بار قطع شده برابر با میزان کسری توان می‌باشد، فرکانس دقیقا به مقدار نامی خود باز می‌گردد. شکل (۴-۲۰) نیز تغییرات توان اکتیو واحد تولیدی CHP را در طی فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۳ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۹) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۳



شکل (۴-۲۰) تغییرات توان اکتیو واحد تولیدی CHP در طی فرایند بارزدایی سناریو شماره ۳

## ۴-۵-۴- سناریو شماره ۴ (در نظر گرفتن مدل بار در اولویت بندی)

با توجه به مطالب بیان شده در قسمت معرفی مدل بار در یک مدل توان ثابت، تغییرات توان نسبت به تغییرات ولتاژ ثابت بوده و در مدل استاتیکی بار  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 0$  فرض می شود. مدل جریان ثابت مربوط به تقاضای باری است که بطور خطی نسبت به ولتاژ تغییر می کند بعبارت دیگر  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 1$ . این مدل نمایش تقاضای توان حقیقی ترکیبی از وسایل مقاومتی و موتوری است. در مدل بار با امپدانس ثابت، تغییرات توان بار با توان دوم ولتاژ تناسب مستقیم دارد بعبارت دیگر  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 2$ . این مدل به خوبی نشان دهنده برخی از بارهای روشنایی است ولی در مدلسازی بارهایی که در آنها توان حقیقی بستگی کمی به ولتاژ دارد مناسب نیست. همانطور که قبلا بیان شد برای مدل نمایی بار داریم:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (7-4)$$

که در رابطه بالا  $\alpha, \beta$  پارامترهای این مدل هستند. توجه نمائید که با تنظیم این پارامترها با مقادیر ۰ و ۱ و ۲ می توان بار را بصورت توان ثابت، جریان ثابت و یا امپدانس ثابت نمایش داد. با خطی سازی این مشخصه ها می توان نشان داد که  $\alpha, \beta$  با حساسیت های ولتاژ برابر است یعنی  $\alpha = K_{PV}, \beta = K_{QV}$ .

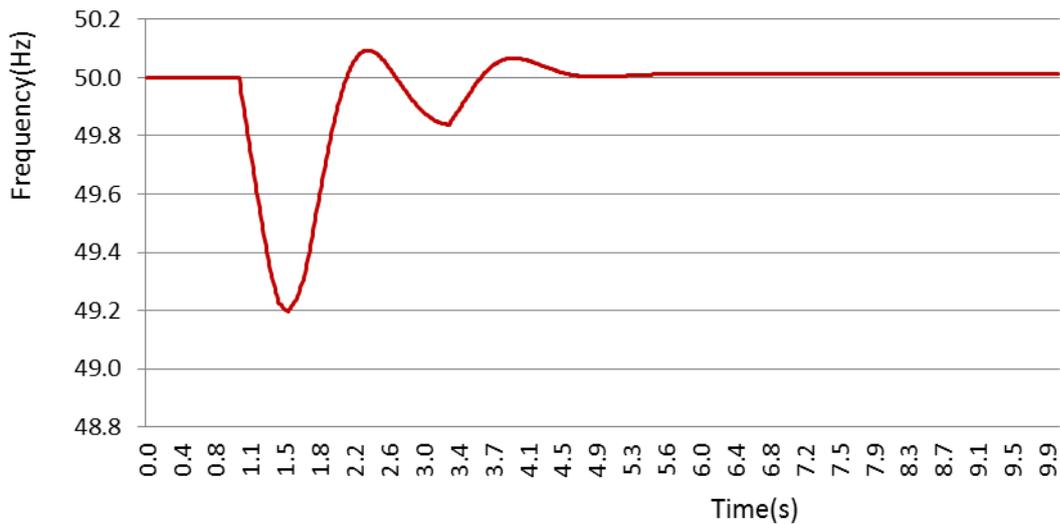
در این سناریو برای نشان دادن اثر مدل بار بر فرایند بارزدایی اولویت بندی بارها را مطابق جدول (۴-۱۰) انجام می دهیم. در این جدول بر خلاف جدول (۴-۹) بارهایی که پارامتر  $\alpha$  یا  $K_{PV}$  بزرگتری دارند (بار با مدل توان ثابت  $K_{PV} \approx K_{QV} \approx 0$ ) در اولویت بارزدایی قرار می گیرند، سایر پارامترهای مدل بار مشابه حالت قبل در نظر گرفته می شود.

جدول (۴-۱۰) جدول اولویت بندی بارهای سیستم تست شماره ۲ برای سناریو شماره ۴

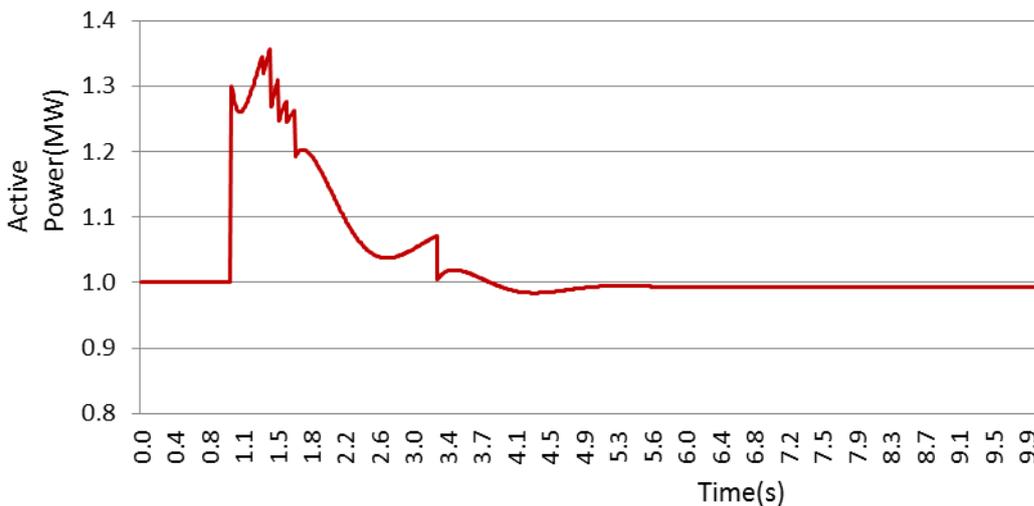
ردیف	شماره فیدر	مدل بار	P (KW)	Q (KVAR)	RoCoFi (Hz/S)	$\sum_{i=1}^N RoCoFi_i$
۱	۷۳۴	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۰/۵۵
۲	۷۲۸	D-PQ	۱۲۶	۶۳	-۱/۵	-۲/۰۵
۳	۷۱۳	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۳/۱
۴	۷۴۴	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۳/۶۵
۵	۷۴۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۴/۷
۶	۷۲۰	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۵/۷۵
۷	۷۲۵	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۶/۳
۸	۷۲۷	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۶/۸۵
۹	۷۳۲	D-PQ	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۷/۴
۱۰	۷۳۵	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۸/۴۵
۱۱	۷۳۵	D-PQ	۱۲۶	۶۲	-۱/۵	-۹/۹۵
۱۲	۷۱۲	D-PQ	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	۱۱-
۱۳	۷۰۱	D-PQ	۶۳۰	۳۱۵	-۶/۴	-۱۷/۴
۱۴	۷۳۳	D-I	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۱۸/۴۵
۱۵	۷۲۲	D-I	۱۶۱	۸۰	-۱/۷۵	-۲۰/۲
۱۶	۷۲۹	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۲۰/۷۵
۱۷	۷۴۱	D-I	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۲۱/۳
۱۸	۷۳۷	D-I	۱۴۰	۷۰	-۱/۵۵	-۲۲/۸۵
۱۹	۷۱۴	D-I	۳۸	۱۸	-۰/۵	-۲۳/۳۵
۲۰	۷۲۴	D-Z	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۲۳/۹
۲۱	۷۱۸	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۲۴/۹۵
۲۲	۷۴۲	D-Z	۹۳	۴۴	-۱/۲	-۲۶/۱۵
۲۳	۷۳۰	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۲۷/۲
۲۴	۷۳۱	D-Z	۸۵	۴۰	-۱/۰۵	-۲۸/۲۵
۲۵	۷۳۶	D-Z	۴۲	۲۱	-۰/۵۵	-۲۸/۸
مجموع			۲۴۵۷	۱۲۰۱	-۲۸/۸	

باتوجه به فلوچارت روش بارزدایی نیمه تطبیقی و برای تست روش پیشنهادی در لحظه  $t=1s$  بریکری که سیستم توزیع را به شبکه متصل می کند قطع شده و جزیره تشکیل می شود، در این لحظه فرکانس سریعاً افت کرده و نرخ تغییرات فرکانس در لحظه  $t=1/1s$  به  $-4Hz/s$  می رسد. بنابراین با توجه به فلوچارت و جدول (۴-۱۰) بارهای ردیف ۱ تا ۵ به ترتیب در لحظات  $t=1/34s$ ،  $t=1/42s$ ،  $t=1/5s$ ،  $t=1/58s$  و  $t=1/66s$  قطع می شوند. از لحظه  $t=2/96s$  به مدت ده نیم سیکل متوسط نرخ تغییرات فرکانس برابر با  $-0/61Hz/s$  می باشد که

کمتر از متوسط نرخ تغییرات کوچکترین بار (RoCoF<sub>LL</sub>) بوده و همچنین فرکانس اندازه‌گیری شده در این لحظه کمتر از مقدار  $f_{SS}$  می‌باشد. بنابراین بار ردیف ۷ بعد از زمان تاخیر از سیستم قطع می‌شود. بعد از حذف این مقدار بار افت فرکانس کاهش پیدا کرده و بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) تغییرات فرکانس و توان واحد CHP را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و فرایند بارزدایی نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۱) فرکانس سیستم در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴

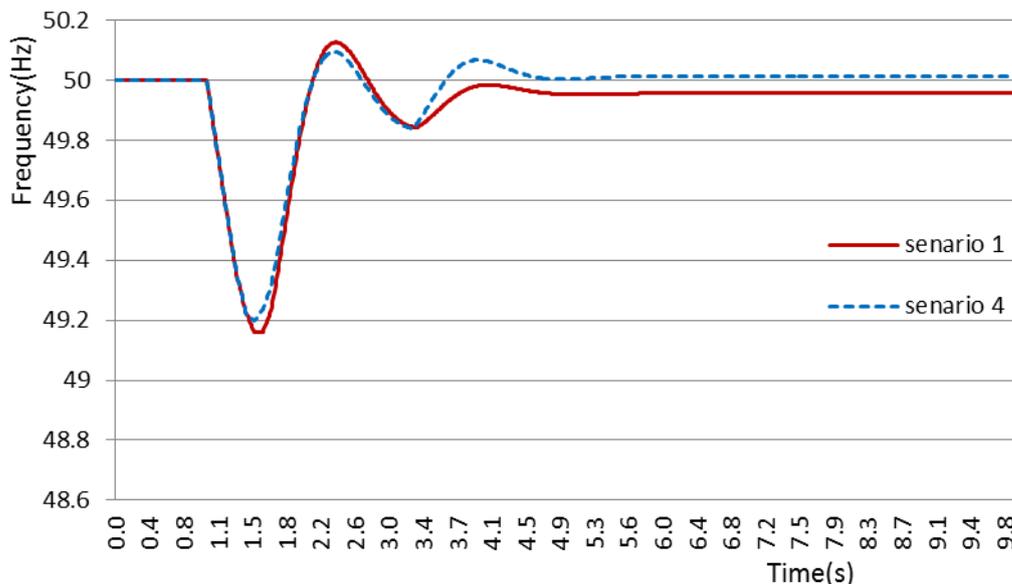


شکل (۴-۲۲) توان اکتیو واحد تولیدی CHP در طی جزیره‌ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۴

جدول شماره (۴-۱۱) میزان باری را که در پی جزیره ای شدن سیستم برای بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز قطع شده است را برای سناریوهای شماره ۱ و ۴ نشان می‌دهد. همانطور که از جدول مشخص است مقدار باری که در سناریو ۴ قطع شده است کمتر بوده بعلاوه فرکانس سیستم نسبت به سناریو ۱ به محدوده نامی خود نزدیکتر شده است. بنابراین با توجه به منحنی تغییرات فرکانس در فرایند بارزدایی برای سناریو شماره ۱ و ۴ و جدول زیر این نکته تأیید می‌شود که با اولویت بندی بارها بر اساس پارامتر  $K_{PV}$ ، میزان باری که در طی بارزدایی قطع می‌شود کاهش یافته، همچنین با توجه به شکل (۴-۲۳) مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه در سناریو شماره ۴ مقدار بار کمتری قطع شده است اما پروفایل فرکانس بهبود یافته است.

جدول (۴-۱۱) مقایسه بین مراحل بارزدایی

مراحل بارزدایی	مقدار بار قطع شده (KW)	
	سناریو شماره ۱	سناریو شماره ۴
مرحله اول	۳۸۸	۳۸۰
مرحله دوم	۴۲	۴۲
جمع کل	۴۳۰	۴۲۲



شکل (۴-۲۳) فرکانس سیستم در طی بارزدایی برای سناریو شماره ۱ و ۴

## ۴-۵-۵- تحلیل نتایج حاصل از بارزدایی نیمه تطبیقی

در این قسمت یک روش جدید بارزدایی فرکانسی نیمه تطبیقی برای حفظ پایداری فرکانسی و بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز در طی گذر به حالت جزیره ای برای یک شبکه کوچک جزیره ای شده ارائه شد. در این روش بارزدایی بر اساس متوسط نرخ تغییرات فرکانس متناسب با هر میزان کسری توان در سیستم صورت می گیرد، بدین منظور با اصلاح بارهای سیستم میزان کسری توان در پی جزیره ای شدن سیستم را برابر با هریک از بارهای سیستم قرار داده و متوسط نرخ تغییرات فرکانس متناسب با حذف آن بار در سیستم را بدست می آوریم. در ادامه با اندازه گیری نرخ تغییرات فرکانس در پی هر اغتشاش از جمله جزیره ای شدن، تعداد بارهایی که باید برای جبران کسری توان در سیستم قطع شوند مشخص می گردد. استراتژی بارزدایی در شبکه‌های کوچک باید دارای سرعت عمل کافی باشند، زیرا به دلیل کوچک بودن اینرسی معادل سیستم، افت فرکانس در پی اغتشاشات بسیار سریع می‌باشد، بنابراین روشهای بارزدایی معمول در شبکه‌های کوچک کارایی مناسب را نخواهند داشت. پس از بررسی نتایج شبیه سازی در سناریوهای مختلف، کارایی و توانایی طرح پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. از ویژگی‌های مهم این روش می‌توان به سرعت بالای آن در حذف اضافه بار، سادگی و دقت بالای آن در قطع مقدار بهینه ای از بار، در مقایسه با روش‌های بارزدایی مرسوم و کارایی آن برای شبکه‌های توزیع کوچک متصل به منابع تولید پراکنده اشاره کرد.

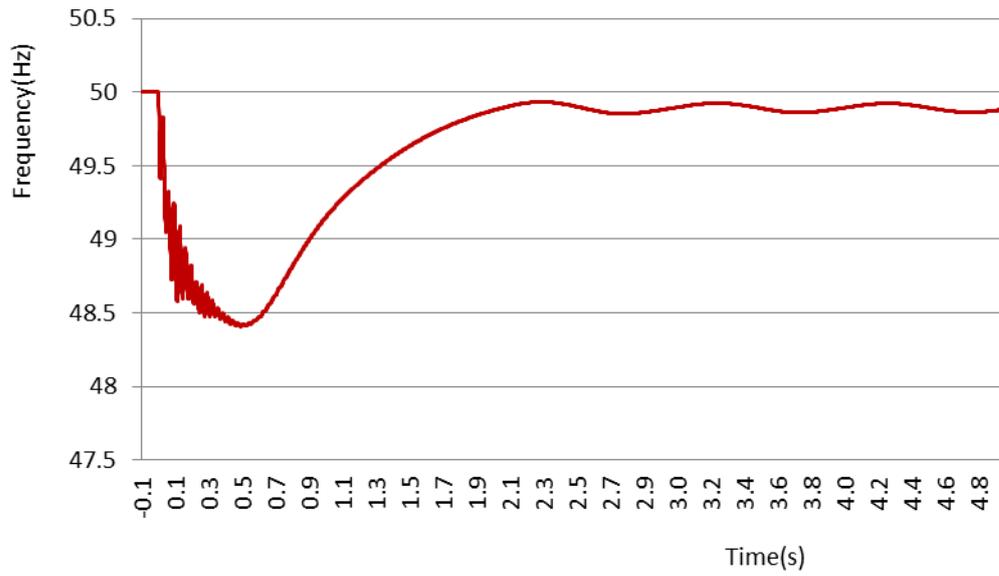
همانطور که قبلاً بیان شد در شبکه های کوچک مدل بار در تجزیه و تحلیل شبکه بسیار تاثیر گذار هستند. در طرح های بارزدایی برای شبکه‌های کوچک، یکی از فاکتورهای مهم برای اولویت بندی بارها، در نظر گرفتن اثر مدل بار جهت به حداقل رساندن میزان قطع بار در طی فرایند بارزدایی است. بنابراین برای اینکه در لحظات اولیه بارزدایی میزان باری که قطع می شود به حداقل برسد و همچنین تنشهای مکانیکی وارده بر پره های توربین کاهش یابد می توان از پارامترهای مدل بار استفاده کرد. این امر باعث می شود که در لحظات ابتدایی بروز اغتشاش میزان قطع بار به حداقل برسد و از طرفی فرصت کافی به سیستم داده شود تا پایداری خود را بازیابد. نتایج شبیه سازی در سناریوهای شماره ۱ تا ۴ و نتایج لیست شده در جدول (۴-۱۱) این موضوع را تأیید می‌کنند.

## ۴-۶- بارزدایی به روش نیمه تطبیقی برای سیستم تست شماره ۱:

در این قسمت روش بارزدایی نیمه تطبیقی را بر روی سیستم تست شماره ۱ (قسمتی سیستم توزیع دانمارک) اجرا خواهیم کرد. باتوجه به فلوچارت شماره (۴-۱۴) و برای تست روش پیشنهادی در لحظه  $t=0s$  بریکری که سیستم توزیع را به شبکه متصل می‌کند بصورت ناخواسته قطع شده و جزیره تشکیل می‌شود، در این لحظه فرکانس سریع‌ا افت کرده و نرخ تغییرات فرکانس به  $-67/5 \text{ Hz/s}$  می‌رسد. بنابراین با توجه به فلوچارت و جدول (۴-۱۲) بارهای ردیف ۱ تا ۴ به ترتیب در لحظات  $t=0/08s$ ،  $t=0/16s$ ،  $t=0/24s$  و  $t=0/32s$  قطع می‌شوند. از لحظه  $t=0/32s$  به مدت ده نیم سیکل فرکانس کمتر از مقدار  $f_{ss}$  است و چون نرخ تغییرات فرکانس برابر با  $-6/5 \text{ Hz/s}$  می‌باشد که  $\text{RoCoF} < \text{RoCoF}_{LL}$  بنابراین بار ردیف ۹ با توجه به کوچکتر بودن نرخ تغییرات فرکانس آن ( $-5/5 \text{ Hz/s}$ ) بعد از گذشت زمان تاخیر از سیستم قطع می‌شود. بعد از حذف این مقدار بار افت فرکانس کاهش پیدا کرده و بنابراین فرایند بارزدایی متوقف می‌شود. شکل (۴-۲۴) تغییرات فرکانس را در طی فرایند جزیره‌ای شدن سیستم و فرایند بارزدایی نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱۲) اطلاعات مربوط به نرخ تغییرات متناسب با هر بار در سیستم تست شماره ۱

ردیف	نام بار	P(MW)	Q(MVAR)	ROCOFLi (Hz/s)	SUM(ROCOFLi)
۱	Load STSY	۱/۶۵۶	۰/۳۸۴	-۴۶/۸	-۴۶/۸
۲	Load 10	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	-۵/۵	-۵۲/۳
۳	Load 7	۰/۴۵۹۸	۰/۱۳۴۱	-۱۳/۲	-۶۵/۵
۴	Load 9	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	-۵/۵	-۷۱
۵	Load STCE	۱/۱۷۲	۰/۱۳۹	-۳۲/۵	-۱۰۳/۵
۶	Load STNO	۱/۹۸۹	۰/۲۲۳	-۵۵	-۱۵۸/۵
۷	Load 8	۰/۷۲۴۳	۰/۲۱۱۳	-۱۹/۵	-۱۷۸
۸	Load FLOW	۲/۱۰۹	۰/۵۷۶	-۵۷	-۲۲۵
۹	Load 11	۰/۱۱۵	۰/۰۳۳۵	-۵/۵	-۲۴۰/۵
۱۰	Load JUEL	۰/۹	۰/۱۶۴	-۲۵	-۲۶۵/۵
۱۱	Load MAST	۲/۷۳۲	۰/۸۴۲	-۷۲/۵	-۳۳۸
مجموع		۱۲/۰۸۷۱	۲/۷۷۳۹	-۳۳۸	



شکل (۴-۲۴) فرکانس سیستم در طی جزیره ای شدن و بارزدایی برای سناریو شماره ۵

جدول (۴-۱۳) مقایسه بین میزان بار قطع شده در بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی

مراحل بارزدایی	مقدار بار قطع شده (MW)	
	سناریو شماره ۱ روش تطبیقی	سناریو شماره ۵ روش نیمه تطبیقی
مرحله اول	۱/۶۵۶	۲/۳۴۵۸
مرحله دوم	۰/۶۸۹۸	۰/۱۱۵
جمع کل	۲/۳۴۵۸	۲/۴۶۱

## ۴-۶-۲- مقایسه بین دو روش بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی

با توجه به جداول و منحنی‌های مربوط به سناریوهای بارزدایی تطبیقی و نیمه تطبیقی مشاهده می‌شود که در روش نیمه تطبیقی میزان باری که قطع می‌شود کمی بیشتر از مقدار باری است که در روش کاملاً تطبیقی حذف می‌شود. این امر باعث می‌شود که فرکانس به مقدار کمتری افت کند و سریعتر به به محدوده مجاز برسد. از ویژگی‌های روش بارزدایی نیمه تطبیقی نسبت به روش تطبیقی می‌توان به سرعت عمل بالای آن اشاره کرد، اما با توجه به مطالب بیان شده در مورد تنش‌های وارده بر توربین در اثر بارزدایی، قطع ناگهانی مقدار زیادی از بار اثرات مخربی را در پی دارد، همچنین موجب افزایش ناگهانی فرکانس به مقدار بیشتری از محدوده مجاز می‌شود. از ویژگی‌های مهم روش بارزدایی تطبیقی می‌توان به حذف مقدار بهینه از بار و پاسخ فرکانسی مناسبتر اشاره کرد. اما همانطور که قبلاً هم بیان شد اجرای بارزدایی به روش تطبیقی برای سیستم‌های کوچک واقعی بسیار مشکل می‌باشد و نیاز و تجهیزات کنترلی پیشرفته می‌باشد، از طرفی چون بارها در سیستم‌های کوچک مانند شبکه‌های توزیع بصورت گسسته و پراکنده می‌باشند حذف درصدی از بار در حین فرایند بارزدایی بسیار مشکل است از طرفی نصب تجهیزات پیشرفته برای رسیدن به این هدف از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد.

اجرای فرایند بارزدایی نیمه تطبیقی در سیستم‌های کوچک واقعی بسیار ساده و موثر می‌باشد چون علاوه بر کارایی این روش در حفظ پایداری فرکانس سیستم و بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز آن در پی اغتشاشات، نیازی به نصب تجهیزات اضافی بر روی فیدرهای موجود در پست جهت قطع قسمتی از بارها نمی‌باشد.

## فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- نتیجه گیری

در سالهای اخیر با نفوذ و گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، جزیره سازی تعمدی شبکه های کوچک متصل به منابع تولید پراکنده به یک مبحث مهم جهت بهبود امنیت و قابلیت اطمینان شبکه های کوچک تبدیل شده است. از طرفی استراتژی مرسوم بارزدایی که در سیستمهای قدرت بزرگ مورد استفاده قرار می گیرند برای سیستمهای کوچک جزیره ای به دلیل تفاوت‌های بین دو سیستم مناسب نمی باشند.

با توجه به این پیش زمینه ذهنی دو استراتژی بارزدایی فرکانسی تطبیقی و نیمه تطبیقی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و مشخصه‌های استاتیکی بار در این تحقیق ارائه شد. در طرح- های ارائه شده، از فرکانس، نرخ تغییرات فرکانس و معادله نوسان جهت تعیین میزان کسری توان و از مدل استاتیکی بارها برای به حداقل رساندن میزان قطع بار و بهبود پاسخ فرکانسی سیستم استفاده شده است.

در پایان دو سیستم تست نمونه برای تشریح استراتژی‌های بارزدایی پیشنهادی بخدمت گرفته شده است. پس از جزیره سازی تعمدی این دو سیستم تست و اجرای طرح‌های بارزدایی پیشنهادی، نتایج شبیه سازی کارایی این دو طرح را در حذف مقدار بهینه‌ای از بار جهت حفظ پایداری فرکانس سیستم هنگام گذر به حالت جزیره‌ای تأیید می کنند.

## ۵-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج مفید بدست آمده از در نظر گرفتن مدل نمایی بار در فرایند بارزدایی جهت به حداقل رساندن میزان بار قطع شده و همچنین بهبود پاسخ فرکانسی سیستم می توان از مدل- های دینامیکی بار جهت پاسخ فرکانسی بهتر استفاده کرد. همچنین جهت بهبود پروفایل ولتاژ می توان بارها را با توجه به پارامترهای مربوط به توان راکتیو بار ( $K_{QV}$ ) در مدل نمایی، طوری اولویت بندی کرد که میزان توان راکتیو در لحظات ابتدایی تشکیل جزیره و ایجاد کسری توان به حداقل رسیده و در نتیجه پروفایل ولتاژ سیستم بهبود یابد.

# مراجع

## مراجع

- [1] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. IEEE Std 929-2000.
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE Std 1547-2003.
- [3] M. Karimi, H. Mohamad., "Under Frequency Load Shedding scheme for islanded distribution network connected with mini hydro", *Electrical Power and Energy Systems* 42 (2012) 127–138.
- [4] Md. Quamrul Ahsan, Abdul Hasib Chowdhury., "Technique to Develop Auto Load Shedding and Islanding Scheme to Prevent Power System Blackout," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 27, no. 1, Feb 2012.
- [5] IEEE Guide for the Application of Protective Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and Restoration, IEEE Std C37.117™-2007.
- [6] Sasdat. Hadi,"Power system Analalysis", June 2002.
- [7] David J. Finley, John Horak "Load Shedding for Utility and Industrial Power System Reliability", Basler Electric Company.
- [8] Urban Rudez and Rafael Mihalic, "Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes" *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 26, no. 2, May 2011.
- [9] Warren C. New, "Load Shedding, Load Restoration and Generator Protection Using Solid-state and Electromechanical Underfrequency Relays", General Electric Company
- [10] B. Otomega, T.V. Cutsem "Under voltage Load Shedding Using Distributed Controllers", *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 22, no. 4, Nov 2007.
- [۱۱] نصیری، علی، "بارزدایی فرکانسی با استفاده از شاخص نرخ افت فرکانس"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف، تهران، آبان ۸۴.
- [12] Automatic Under-Frequency Load Shedding (AUFLS) Technical Report 'Reviewed By: General Electric (GE) Energy', August 2010.
- [13] M. R. Dadashzadeh, "Dynamic modeling and evaluation of load shedding algorithms for power systems", *M. Sc. thesis, University of Tehran, 2005*.
- [14] P. Mahat et al. "Underfrequency load shedding for an islanded distribution system with distributed generators", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 911–917, Apr. 2010.
- [15] Poonam M. Joshi, "Load Shedding Algorithm Using Voltage And Frequency Data", *Master of Science Thesis, University of Clemson, December 2007*.
- [16] V. V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1260–1266, Aug. 2006.
- [17] Girgis A, Mathure S. "Application of active power sensitivity to frequency and voltage variations on load shedding", *Electric Power System Res* 2010.
- [18] H. Seyedi, and M. Sanaye-Pasand, "New centralized adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts." *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2009.
- [19] A.A. Abou EL Ela, A. Zein EI-Din and S.R. Spea, "Optimal load shedding in power systems." *Proceedings of 11th International Middle East Power Systems Conference, 2006*, vol.2, 568–575.
- [20] M. Sanaye-Pasand and M. Davarpanah. "A new adaptive multidimensional load shedding scheme using genetic algorithm." *Proceedings of 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2005.
- [21] W. Nakawiro, and I. Erlich, "Optimal load shedding for voltage stability enhancement by ant colony optimization." *Proc. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2009.
- [22] T.S.P. Fernandes, J. R. Lenzi, and M.A. Mikilita, "Load shedding strategies using optimal load flow with relaxation of restrictions", *IEEE Trans. Power Syst*, 2008.

- [23] A. R. Malekpour, A.R. Seifi, M. R. Hesamzadeh, and N. Hosseinzadeh, "An Optimal Load Shedding Approach for Distribution Networks with DGs considering Capacity Deficiency Modeling of Bulk Power Supply." Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2008).
- [24] C. Concordia, L. H. Fink, and G. Poullikas, "Load shedding on an isolated system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1467–1472, Aug. 1995.
- [25] S. Hirodantis, H. Li, and P.A. Crossley (2009). "Load Shedding in a Distribution Network." Proceedings of International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 09).
- [26] X.F. Xiong, and W.Y. Li, "A new under-frequency load shedding scheme considering load frequency characteristics." Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology, 2009.
- [27] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby "Power System Dynamics Stability and Control" Second Edition, 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [28] Western Electric Coordinating Council, "Guide to WECC/NERC Planning Standards I.D: Voltage Support and Reactive Power", Prepared by: Reactive Reserve Working Group (RRWG), March 30, 2006.
- [29] Kundur P et al. "Power system stability and control". New York: McGraw-Hill; 1994.
- [30] Rudez U, Mihalic R."Analysis of under frequency load shedding using a frequency gradient". *IEEE Trans. Power Del.* 2011.
- [31] D. Prasetijo, W. R. Lachs, and D. Sutanto, "A new load shedding scheme for limiting under frequency," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1371–1378, Aug. 1994.
- [32] P.M Anderson, A.A. Fouad, (2003) Power System Control and Stability, IEEE series on Power Engineering, John Wiley and Sons, Second Edition.
- [33] Pukar Mahat, "Control and Operation of Islanded Distribution System", Ph.D. Thesis, Aalborg University, September 2010.
- [34] Y. R. Omar, I. Z. Abidin, S. Yusof, H. Hashim, H.A. Abdul Rashid, "Under Frequency Load Shedding (UFLS): Principles and Implementation", IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov 29 - Dec 1, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia
- [35] <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [36] T. Tomic, G. Verbi, F. Gubina, "Revision of the Under Frequency Load Shedding Scheme of the Slovenian Power System", Electric Power Systems Research, 2007.
- [37] Walid Helmy, Y. G. Hegazy, M. A. Mostafa, and M. A. Badr, "Implementing distributed generation to mitigate under-frequency load shedding." Proceedings of 12th International Middle-East Power System Conference (MEPCON 2008).
- [38] Zhipeng Liu, Fushuan Wen, Ledwich Gerard, "A benefit comparison of Load Shedding versus use of Distributed Generation", Intelligent Grid Research Cluster, June, 2011.
- [39] جان ماچووسکی، جونز بایلیک، جیمز ریچارد بامبی، "دینامیک و پایداری سیستمهای قدرت"، مترجم: احد کاظمی، حیدر علی شایانفر، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، مرکز انتشارات، ۱۳۸۴.
- [40] Hong Tuan Nguyen Va, "Voltage Control With Shunt Capacitance on Radial Distribution Line With R/X Factor", Wichita State University, December 2005.

# پیوست‌ها

اطلاعات مربوط به سیستم تست شماره ۱ (قسمتی از سیستم توزیع دانمارک)

داده های مربوط به ژنراتورهای سیستم:

Parameters	CHP	WTG
Type of generator	Synchronous	Asynchronous
Number of Parallel Machines	3	1
Transformer to connect to grid	3.3MW 20/6.3KV	630KV 20/0.4KV
<b>Individual generator's rating</b>		
Rated Power	3.3 MW	630 KW
Rated Voltage	6.3 KV	0.4 KV
Stator resistance	0.0504 p.u.	0.018 p.u.
Stator reactance	0.1 p.u.	0.015 p.u.
Synchronous reactance d-axis	1.5 p.u.	
Synchronous reactance q-axis	0.75 p.u.	
Transient reactance d-axis	0.256 p.u.	
Sub-transient reactance d-axis	0.168 p.u.	
Sub-transient reactance q-axis	0.184 p.u.	
Transient time constant d-axis	0.53 s	
Sub-transient time constant d-axis	0.03 s	
Sub-transient time constant q-axis	0.03 s	
Mag. reactance		4.42 p.u.
Rotor. resistance		0.0108 p.u.
Rotor. reactance		0.128 p.u.
Inertia Time Constant	0.54 s	0.38 s

داده های مربوط به سیستم انتقال:

Parameters	Value
Maximum short circuit power	249MW
Minimum short circuit power	228MW
Maximum R/X ratio	0.1
Maximum Z2/Z1 ratio	1
Maximum X0/X1 ratio	1
Maximum R0/X0 ratio	0.1

داده های مربوط به خطوط سیستم تست:

From Bus	To Bus	Resistance ( $\Omega$ )	Reactance ( $\Omega$ )
5	6	0.1256	0.1404
5	7	0.1344	0.0632
7	8	0.1912	0.0897
8	9	0.4874	0.2284
9	10	0.1346	0.0906
10	11	1.4555	1.113
11	12	0.6545	0.1634
12	13	0.0724	0.0181
13	14	0.7312	0.3114

داده های مربوط به سیستم تحریک CHP:

Parameters	Value
Measurement delay (s)	0
Controller minimum input (p.u.)	-7.5
Controller maximum input (p.u.)	9.35
Controller minimum output (p.u.)	-7.5
Controller maximum output (p.u.)	9.35
Filter delay time (s)	0.01
Filter derivative time constant (s)	0
Controller gain (p.u.)	250
Controller time constant (s)	0.01
Stabilization path gain (p.u.)	0.01
Stabilization path delay time (s)	1
Excitor current compensation factor (p.u.)	0

داده های مربوط به سیستم گاورنر CHP:

Parameters	Value
Speed Droop (pu)	0.047
Controller Time Constant (s)	0.4
Actuator Time Constant (s)	0.1
Compressor Time Constant (s)	3
Ambient Temperature Load Limit (p.u.)	0.909
Turnine Factor (p.u.)	1
Controller Minimum Output (p.u.)	0
Controller Maximum Output (p.u.)	1.2
Frictional Losses Factor (p.u.)	0
Turbine Rated Power (MW)	3.3

اطلاعات مربوط به سیستم تست شماره ۲ (IEEE 37 Node Test Feeder)

اطلاعات خطوط شبکه:

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.	Z+(ohm)	Z0(ohm)	B(S)		
701	702	960	722	0.065	0.056	0.124	0.044	23.242
702	705	400	724	0.133	0.044	0.212	0.086	4.564
702	713	360	723	0.066	0.035	0.133	0.064	5.103
702	703	1320	722	0.089	0.077	0.171	0.061	31.958
703	727	240	724	0.080	0.026	0.127	0.051	2.739
703	730	600	723	0.110	0.059	0.221	0.107	8.505
704	714	80	724	0.027	0.009	0.042	0.017	0.913
704	720	800	723	0.147	0.078	0.295	0.142	11.339
705	742	320	724	0.106	0.035	0.169	0.068	3.651
705	712	240	724	0.080	0.026	0.127	0.051	2.739
706	725	280	724	0.093	0.031	0.148	0.060	3.195
707	724	760	724	0.252	0.084	0.402	0.162	8.672
707	722	120	724	0.040	0.013	0.063	0.026	1.369
708	733	320	723	0.059	0.031	0.118	0.057	4.536
708	732	320	724	0.106	0.035	0.169	0.068	3.651
709	731	600	723	0.110	0.059	0.221	0.107	8.505
709	708	320	723	0.059	0.031	0.118	0.057	4.536
710	735	200	724	0.066	0.022	0.106	0.043	2.282
710	736	1280	724	0.425	0.141	0.677	0.274	14.606
711	741	400	723	0.074	0.039	0.147	0.071	5.670
711	740	200	724	0.066	0.022	0.106	0.043	2.282
713	704	520	723	0.096	0.051	0.192	0.093	7.371
714	718	520	724	0.173	0.057	0.275	0.111	5.934
720	707	920	724	0.305	0.101	0.487	0.197	10.498
720	706	600	723	0.110	0.059	0.221	0.107	8.505
727	744	280	723	0.052	3.969	0.103	0.050	3.969
730	709	200	723	0.037	0.020	0.074	0.036	2.835
733	734	560	723	0.103	0.055	0.206	0.100	7.938
734	737	640	723	0.118	0.063	0.236	0.114	9.072
734	710	520	724	0.173	0.057	0.275	0.111	5.934
737	738	400	723	0.074	0.039	0.147	0.071	5.670
738	711	400	723	0.074	0.039	0.147	0.071	5.670
744	728	200	724	0.066	0.022	0.106	0.043	2.282
744	729	280	724	0.093	0.031	0.148	0.060	3.195
775	709	0	XFM-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
799	701	1850	721	0.084	0.077	0.131	0.051	55.988

اطلاعات مربوط به ترانسفورماتورها:

Transformer Data					
	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2,500	230 D	4.8 D	2	8
XFM -1	500	4.8 D	.480 D	0.09	1.81

## اطلاعات تنظیم کننده ولتاژ:

Regulator Data		
Regulator ID:	1	
Line Segment:	799 -701	
Location:	799	
Phases:	A - B -C	
Connection:	AB - CB	
Monitoring Phase:	AB & CB	
Bandwidth:	2.0 volts	
PT Ratio:	40	
Primary CT Rating:	350	
Compensator Settings:	Ph-AB	Ph-CB
R - Setting:	1.5	1.5
X - Setting:	3	3
Voltage Level:	122	122

## اطلاعات مربوط به بارهای شبکه:

Ranked	Node	Load Model	P(kW)	Q( kVAr)	SUM(P)	SUM(Q)
1	734	D-PQ	42	21	42	21
2	724	D-Z	42	21	84	42
3	718	D-Z	85	40	169	82
4	742	D-Z	93	44	262	126
5	728	D-PQ	126	63	388	189
6	713	D-PQ	85	40	473	229
7	744	D-PQ	42	21	515	250
8	733	D-I	85	40	600	290
9	740	D-PQ	85	40	685	330
10	720	D-PQ	85	40	770	370
11	722	D-I	161	80	931	450
12	725	D-PQ	42	21	973	471
13	727	D-PQ	42	21	1015	492
14	732	D-PQ	42	21	1057	513
15	730	D-Z	85	40	1142	553
16	731	D-Z	85	40	1227	593
17	729	D-I	42	21	1269	614
18	735	D-PQ	85	40	1354	654
19	738	D-PQ	126	62	1480	716
20	736	D-Z	42	21	1522	737
21	741	D-I	42	21	1564	758
22	737	D-I	140	70	1704	828
23	714	D-I	38	18	1742	846
24	712	D-PQ	85	40	1827	886
25	701	D-PQ	630	315	2457	1201

## **Abstract:**

Under frequency load shedding is one of the most important safety systems in order to maintain the stability of power systems against power shortage caused by severe disturbances. Today, due to the presence of distributed resources in many small networks, the maintenance frequency, especially when the demand of production is more important has found. To improve the traditional load shedding, frequency slope of the many attempts to use an indicator to determine the power deficit in the power system.

Simultaneous use of the rate of change of frequency with time a frequency measurement system frequency load shedding ways to significantly increase their effectiveness in determining the exact amount of the deficit and improved the frequency profile.

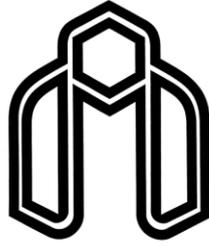
This research presents the ways in which they measure continuous measurement frequency and the average rate of change of frequency, the optimal amount of time to fix the frequency of the system is disconnected.

Two examples of test systems simulation, implementation intentional islanding and Implementation of the proposed methods on them shows the effectiveness of the proposed methods to remove the optimal amount of time for stabilizing the system frequency.

An important feature of these methods can be quickly optimal disconnected of load at the moment of disturbance and improve the system frequency response curve the similar techniques mentioned.

## **Keywords:**

Under frequency load shedding, Islanding micro grid, Load model, Rate of Change of Frequency



**Shahrood University of Technology**  
**Department of Electrical and Robotic Engineering**

**Under Frequency Load Shedding in Microgrid  
with the Presence of Distributed Generation  
Resources**

**By:**  
**Seyed Mohammad Mohiti**

**Supervisor:**  
**Dr. Mahdi Banejad**

**Assistant Supervisor:**  
**Dr. Ahmad Darabi**

**January**  
**2013**