

## کنترل و پایداری فرکانس سیستم‌های قدرت به کمک طرح بارزدایی تطبیقی فرکانس کم

حمیدرضا رحیمی، کارشناسی ارشد، [h.rahimi@alumni.basu.ac.ir](mailto:h.rahimi@alumni.basu.ac.ir)<sup>۱</sup>

عبدالله میرزاییگی، هیات علمی، مربی، [mirzabeigi@acecr.ac.ir](mailto:mirzabeigi@acecr.ac.ir)<sup>۲</sup>

### چکیده

فرکانس یکی از کمیت‌های مهم سیستم قدرت است که هرگز نباید از مقدار نامی خود خارج گردد. در شرایط نرمال تغییرات بار، فرکانس توسط کنترل اتوماتیک تولید تنظیم می‌شود ولی زمانی که به دلیل شرایط خاص مانند جدا شدن شبکه پایین دست از شبکه اصلی یا خارج شدن قابل توجه توان تولیدی، عدم تعادل توان بین تولید و مصرف باعث شود که افت فرکانس سریع باشد در این صورت کنترل اتوماتیک تولید، توانایی لازم برای متوقف نمودن افت فرکانس را نداشته و فرکانس به سمت ناپایداری میل می‌کند. اگر ناپایداری فرکانس به موقع و به صورت مناسب مدیریت نشود می‌تواند موجب خاموشی و ناپایداری شبکه گردد. بنابراین برای برگرداندن تعادل توان و جلوگیری از افت فرکانس به مقدار غیر مجاز، باید مقدار بار کافی در زمان مناسب قطع گردد. طرح‌های بارزدایی فرکانس کم مسئولیت نگهداری فرکانس را در محدوده مجاز به ازای کسری توان‌های شدید برعهده دارند. مشکل اصلی طرح‌های بارزدایی تطبیقی مرسوم، تخمین کسری توان اکتیو می‌باشد که با عدم قطعیت در مقدار محاسبه همراه می‌باشد. در واقع این محاسبات، وابستگی ولتاژ بارها را در تخمین کسری توان اکتیو به حساب نمی‌آورند که ممکن است اثرات قابل توجهی در نتایج و حتی فروپاشی سیستم داشته باشد. طرح بارزدایی پیشنهادی در این مقاله، با معرفی پارامتر ضریب تاثیر ولتاژ که از طریق شبیه‌سازی بدست می‌آید توانسته مشکل تخمین کسری توان را حل نماید و میزان قطعی بارهای سیستم را به صورت چشم‌گیری کاهش دهد. طرح بارزدایی تطبیقی پیشنهادی بر روی مدل دینامیکی سیستم تست ۹ باسه IEEE در نرم‌افزار متلب، پیاده و شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که طرح بارزدایی پیشنهادی در مقایسه با طرح‌های بارزدایی تطبیقی مرسوم از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد لذا این طرح پیشنهادی می‌تواند هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی برای پیاده‌سازی در سیستم‌های واقعی مورد تایید باشد.

واژه‌های کلیدی — سیستم‌های قدرت، کسری توان اکتیو، ضریب تاثیر ولتاژ، کنترل و پایداری فرکانس، بارزدایی فرکانس کم

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق - موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی همدان - همدان - ایران

## ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، جهان شاهد خاموشی‌های شدید فراوانی در نقاط مختلف بوده است. این خاموشی‌ها که میلیون‌ها انسان را تحت تاثیر قرار داده موجب خسارات سنگین اقتصادی و اجتماعی بر روی جوامع گردیده است. تاثیرهای اجتماعی این خاموشی‌ها، مخصوصاً در مناطق شهری می‌تواند به امکانات بخش مراقبت در بیمارستان‌ها، مشکلات کنترل ترافیک منجر به تصادفات، اینترنت و سایر قطعی‌های سیستم‌های مخابراتی و ... اشاره نمود. مرور این رخدادها بیانگر آن است که سیستم‌های قدرت توسعه یافته امروزی بیشتر در معرض ناپایداری و فروپاشی فرکانس هستند. لذا حفظ پایداری و افزایش امنیت فرکانس برای تداوم کار و عملکرد مطلوب سیستم‌های قدرت لازم و ضروری می‌باشد [۱]. فرکانس سیستم قدرت نشانه‌ای از میزان عدم تعادل بین تولید و بار در سیستم است که به طور دائم در حال تغییر می‌باشد، زیرا هیچ‌گاه بین تولید و مصرف تعادل کامل برقرار نیست. در واقع منظور از پایداری فرکانس حفظ فرکانس با حضور یک اغتشاش شدید در محدوده مجاز می‌باشد [۲].

اساساً تغییرات فرکانس زمانی موجب نگرانی می‌شود که فرکانس به علت تغییرات توان تولیدی و مصرفی شبکه از محدوده مجاز و پایدار خود خارج شود. زمانی که به دلیل اغتشاش‌های ناگهانی و شدید همانند بروز خطای اتصال کوتاه در شبکه‌های انتقال و عملکرد نامناسب رله‌های متناظر، کاهش ناگهانی توان تولیدی در حالت جزیره‌ای، قطعی غیرقابل پیش‌بینی شبکه از سیستم قدرت نرخ افت فرکانس زیاد باشد. در این صورت قابلیت مجموعه‌ی جرم ماشین‌ها (ثابت اینرسی) در جبران این عدم تعادل بسیار محدود بوده و توانایی لازم را برای متوقف نمودن افت فرکانس نداشته و در صورت تداوم عدم موازنه تولید و مصرف، فرکانس به سمت ناپایداری میل می‌کند. اگر ناپایداری فرکانس به موقع و به صورت مناسب مدیریت نشود، می‌تواند موجب خاموشی سیستم شبکه گردد لذا اتخاذ روش‌های کنترلی پیش‌گیرانه در این موارد بسیار ضروری می‌باشد.

یک شبکه سیستم قدرت می‌تواند با شبکه‌های مجاور خود در ارتباط باشد و یا به عنوان یک شبکه زبردست برای یک شبکه بالادست شناخته شود در این صورت شبکه در دو حالت وصل به شبکه بالادست و قطع از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت وصل به شبکه با توجه به اینکه سیستم قدرت به شبکه سراسری متصل است، کنترل از طریق شبکه اصلی انجام می‌گیرد [1-3]. در صورت ایجاد مشکلات ممکن است شبکه از سیستم سراسری برق قطع گردد. انحراف فرکانس از مقدار نامی، با جزیره‌ای شدن شبکه همراه می‌باشد که علت آن عدم تعادل بین توان مصرفی بار و توان تولیدی شبکه می‌باشد. جدی‌ترین مسئله در جزیره، کمبود توان تولیدی می‌باشد. در شرایط عادی، کنترل فرکانس توسط کنترل‌کننده‌های بار- فرکانس انجام می‌شود. اما اگر به دلیل اغتشاش‌های ناگهانی و شدید همانند اتصال کوتاه، کاهش توان تولیدی در حالت جزیره‌ای، قطعی غیرقابل پیش‌بینی شبکه از سیستم قدرت نرخ افت فرکانس زیاد باشد، این کنترل‌کننده‌ها توانایی فراهم کردن توان لازم برای متوقف کردن افت فرکانس را نداشته و می‌توانند شبکه را به ناپایداری ببرند و نیاز به بکارگیری طرح بارزدایی خواهد بود. در سال‌های اخیر رخدادهای فرکانس کم متعددی در سرتاسر جهان روی داده است. مرور این رخدادها نمایانگر اهمیت طرح‌های بارزدایی فرکانس کم در حفظ پایداری سیستم می‌باشد [۴-۷]. کنترل سیستم قبل از بارزدایی انجام می‌پذیرد. در این راستا روش‌های مختلفی وجود دارد که از روش‌های کنترلی متمرکز، غیرمتمرکز، سلسه مراتبی و یا توزیع شده استفاده کرده‌اند. بیشتر کنترل از طریق کنترل توان، ولتاژ و یا فرکانس انجام می‌پذیرد [۸، ۹]. حضور مکانیزم‌های بارزدایی در سیستم‌های قدرت به چند دهه برمی‌گردد که در طول این دوره، پیشرفت‌هایی در قسمت تکنولوژی و ارتباطات انجام گرفته شده است.

روش‌های بارزدایی انواع مختلفی را دارند که عموماً شامل دو مرحله زیر می‌باشند:

\_ محاسبه نمودن کسری توان اکتیو در سیستم قدرت

\_ توزیع مقدار کسری توان اکتیو در چندین مرحله بارزدایی

کسری توان اکتیو می‌تواند براساس مشتق اولیه فرکانس که دقیقاً بعد از رخ دادن اغتشاش اندازه گیری شده محاسبه شود [۱۰]. اندازه گیری فرکانس و تغییرات آن در مقاله‌های [۱۱-۱۴] اشاره شده است. با استفاده از مشتق اول فرکانس اندازه گیری شده، کسری توان اکتیو می‌تواند با استفاده از معادله نوسان روتور محاسبه شود [۱۵]. همچنین از این روش در مقاله‌های [۱۶-۱۸] استفاده شده است. با در نظر گرفتن تاثیر وابستگی ولتاژ بارهای سیستم، می‌توان مقدار کسری توان اکتیو را با دقت بیشتری تخمین زد به صورتی که از خاموشی سیستم قدرت جلوگیری شود [۱۹]. استراتژی‌های مختلفی برای توزیع مقدار کسری توان اکتیو در مراحل مختلف بارزدایی تعریف شده است. در این مقاله می‌خواهیم یک روش بارزدایی را معرفی نماییم که می‌تواند با تاثیر دادن تغییرات ولتاژ باس بارها در محاسبه کسری توان اکتیو، و با در نظر گرفتن تغییرات توان تولیدی ژنراتورها در طی مراحل بارزدایی، مناسب‌ترین مقدار بار را از سیستم قطع می‌نماید [۱۱، ۲۰].

مسئله بارزدایی، سال‌های بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته که اوایل تحقیقات آن به سال ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد [۲۴-۲۱]. در آن زمان، بیشتر نیروگاه‌های برق در فرکانس‌های پایین (زمانی که فرکانس به مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد از مقدار نامی خود کاهش پیدا می‌کرد) در معرض خاموشی قرار می‌گرفتند زیرا تجهیزات جانبی نیروگاه‌ها توانایی لازم را برای نگه‌داشتن خروجی نرمال نیروگاه‌ها نداشتند [۲۳]. در سال ۱۹۷۸ میلادی، یک ممیزی صنایع، برای واحدهای به کار رفته در رله‌های ولتاژ پایین و فرکانس کم ثبت شد. این ممیزی نشان می‌داد که تنها یک سوم واحدهای تولیدی از طرح‌های حفاظتی فرکانس کم بهره می‌بردند که اکثراً این طرح‌ها برای حفاظت از تیغه توربین به کار می‌رفتند همچنین این استاندارد نشان می‌داد که در تمامی شرایط، هیچ تلاشی به منظور هماهنگ ساختن حفاظت از توربین‌ها به کمک رله‌های بارزدایی فرکانس کم انجام گرفته نشده بود. از طرفی هیچ گزارشی مبنی بر واحدهای تریپ داده شده به علت فرکانس کم گزارش نشده بود که نشان از اتفاق نادر از وقوع این اغتشاش‌ها بود [۲۵]. در سال‌های بعد، استانداردهایی به منظور حفاظت از تجهیزات شبکه، در شرایط غیر نرمال فرکانس معرفی شدند [۲۷-۲۵]. این استانداردها مفاهیم اولیه‌ای را معرفی می‌کردند تا سیستم‌ها را در مواجهه با اغتشاش‌های جدی بارها محافظت کنند. یکی از شدیدترین اغتشاش‌های رخ داده در ایالات متحده و کانادا به زمان ۱۴ آگوست ۲۰۰۳ برمی‌گردد خاموشی که ۵۰ میلیون نفر را در ۸ ایالات متحده و ۲ ایالات کانادا تحت تاثیر قرار داد. بررسی‌ها نشان می‌داد که وقفه خاموشی در حدود ۶۳ گیگا وات بار و بیش‌تر از ۴۰۰ قطعی خطوط انتقال و خاموشی ۵۳۱ واحد تولیدی در ۲۶۱ نیروگاه برق بوده است [۳۰-۲۸]. که به مدت ۴ روز (۹۶ ساعت) در بخش‌های شرقی ایالات متحده به طول انجامید [۳۱] و منجر به تلفات اقتصادی در حدود ۴ تا ۶ بیلیون دلار شده بود [۳۲]. از سایر خسارت‌های سنگین دیگر به نقاط دیگر جهان می‌توان به کشورهای هند و برزیل اشاره نمود که تا به امروز حداقل ۲ بار تلفات اقتصادی سنگینی را تجربه کردند. این در حالی است که در کشور مصر و کشورهای اروپایی تنها در سال‌های ۱۹۹۰ [۳۳] و ۲۰۰۶ گریبان‌گیر رخدادها این چنینی بوده‌اند [۳۴]. در طول این خاموشی‌ها ۵۰ میلیون نفر در مصر به مدت زمان ۶ ساعت و ۱۵ میلیون نفر در اروپا به مدت زمان ۲ ساعت تحت تاثیر نتایج این خاموشی قرار گرفتند. بزرگترین خاموشی رخ داده در سال‌های اخیر به زمان ۳۱ جولای ۲۰۱۲ در کشور هند برمی‌گردد که علت آن بارگذاری زیاد خطوط انتقال بوده است به گونه‌ای که ۶۷۰ میلیون نفر به همراه صدها قطار و صدها هزار خانواده را تحت تاثیر تلفات مخرب خود قرار داده بود [۳۶].

مهم‌ترین خاموشی سراسری شبکه برق ایران در بهار سال ۲۰۰۱ رخ داد که باز وصل کامل سیستم ۹ ساعت به طول انجامید [۳۶]. وقوع اتصال کوتاه روی یکی از دو خط ۴۰۰ kV که وظیفه انتقال توان از نیروگاه نکا به مرکز ایران را برعهده داشتند، منجر به قطع شدن این خط انتقال شد. قبل از وقوع خطا ۵۵۰ MW توان از نکا به آهوان منتقل می‌شد. قطع شدن این خط، منجر به اضافه بار شدن دیگر خطوط منتقل‌کننده توان از شمال به مرکز ایران شده بود. توان‌های انتقالی از قائم به کلان و از نکا به حسنی - کیف به ترتیب به مقادیر ۲۲۰ MW و ۷۵۰ MW افزایش یافته بود که این باعث اضافه بار و در نتیجه قطع شدن هر

دو خط شده بود. در نتیجه تمامی خطوط انتقال توان از نیروگاه نکا به مرکز ایران قطع شده و این دو ناحیه ایزوله شده بودند. این اتفاق باعث افزایش فرکانس در ناحیه شمال و کاهش آن در ناحیه جنوب شده بود. پس از آن، تعدادی از خطوط انتقال در نتیجه افت شدید ولتاژ و فرکانس قطع شدند. علاوه بر این در پی عملکرد اشتباه بعضی از تجهیزات حفاظتی، قسمتی از شبکه، شامل تعدادی از خطوط انتقال دچار اضافه بار شده بودند. فرکانس شبکه نیز دچار افت شدید شده بود. در چنین شرایطی، تریپ اشتباه چهار واحد تولید توان نیروگاه منتظر قائم در جنوب ایران باعث بغرنج‌تر شدن شرایط و فروپاشی قسمت جنوبی سیستم قدرت شده بود در واقع در این رخداد، واکنش‌های زنجیره‌ای و تریپ اشتباه بعضی تجهیزات حفاظتی همراه با انجام بارزدایی کمتر از حد لازم توسط رله‌های فرکانس کم منجر به فروپاشی بخش عمده‌ای از شبکه ایران شده بود. تقریباً تمامی بخش‌های شبکه ایران و تمامی استان‌ها دچار خاموشی شدند که این به مدت چند ساعت ادامه داشت شبکه برخی از استان‌های شمال شرق و شمال غرب کشور به صورت جزیره‌هایی مستقل توانستند تعادل بین تولید و مصرف را حفظ نمایند و پایدار بمانند. لازم به ذکر است که قبل از وقوع اغتشاش، توان از بعضی جزیره‌ها به بیرون منتقل می‌شد. یعنی در این جزیره‌ها تولید بیش از مصرف بوده و پس از جزیره‌ای شدن توانسته‌اند با کاهش توان تولیدی، تعادل بین تولید و مصرف را حفظ نمایند.

مرور این رخدادها نمایانگر اهمیت طرح‌های بارزدایی فرکانس کم در حفظ پایداری سیستم است. با بررسی رخداد‌های صورت گرفته می‌توان برداشت نمود که در صورتی که رله‌های فرکانس کم به موقع، مقدار مناسبی بار را از شبکه قطع نکنند شبکه‌های جزیره‌ای شده به سمت خاموشی سراسری میل می‌کنند.

به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های مقاله را به صورت زیر برشمرد:

- ارائه یک مدل پاسخ فرکانسی مناسب برای سیستم‌های قدرت
- محاسبه صحیح کسری توان اکتیو با در نظر گرفتن اثر ولتاژ باس بارها
- پایش لحظه‌ای تغییرات ولتاژ در کلیه مراحل بارزدایی
- در نظر گرفتن انرژی برگردانده شده به سیستم (انرژی ذخیره چرخان)

در ادامه مقاله به صورت زیر سازمان دهی شده است.

در قسمت دوم بارزدایی سیستم‌های قدرت و در قسمت سوم مدل پاسخ فرکانسی سیستم قدرت اشاره می‌شود. در قسمت چهارم طرح بارزدایی پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت پنجم مقاله نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته شده در متلب مورد نمایش قرار داده می‌شود. در قسمت نهایی، به نتیجه‌گیری اختصاص داده می‌شود.

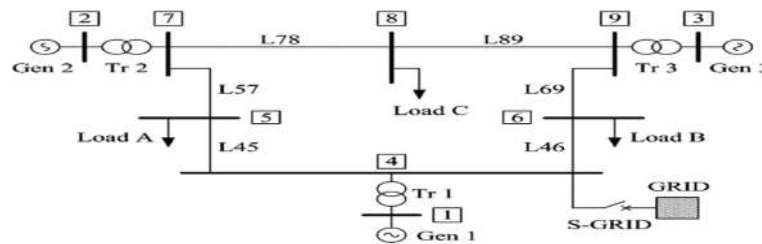
## ۲- بارزدایی سیستم‌های قدرت

در مطالعات ارزیابی پایداری فرکانس، عموماً به فعالیت‌های کنترلی که برای رفع ناپایداری فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد اشاره می‌شود که می‌توان آن‌ها را به ۳ دسته سنتی، نیمه-تطبیقی و تطبیقی تقسیم بندی نمود [۳۷]. در طرح‌های سنتی، تنها معیار پایداری فرکانس را عبور فرکانس از یک مقدار آستانه در نظر می‌گیرد به گونه‌ای که مقدار فرکانسی را که هر رله اندازه‌گیری می‌کند با یک مقدار از پیش تعیین شده مقایسه می‌نماید و در صورت عبور فرکانس از محدوده مجاز فعالیت‌های کنترلی را پیاده‌سازی می‌کند. این طرح به دلیل پیچیدگی کم‌تر و قابلیت اطمینان نسبت بالایی که دارد، هنوز در بعضی از سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۸]. مشکل اصلی این طرح، نبود شناخت کافی از رفتار فرکانس و عدم تخمین علت این ناپایداری فرکانس است که موجب می‌شود با تغییرات شدید و آرام فرکانس به صورت یکسان برخورد شود. به منظور برطرف ساختن

مشکلات طرح قبلی، طرح‌های نیمه تطبیقی معرفی شدند که به دلیل این که به طور کامل از ماهیت تطبیقی برخوردار نبودند به این نام، نامگذاری شدند. در این طرح، رله‌های پیشرفته می‌توانند نرخ تغییر فرکانس را برای بازه‌های زمانی محاسبه نمایند و زمانی که فرکانس از آستانه‌های تنظیم شده عبور می‌کند بر اثر شدت نرخ تغییر فرکانس در عبور از آستانه‌ها میزان فعالیت کنترلی خود را تنظیم نمایند. با این حال این طرح به دلیل وجود عدم قطعیت در نرخ تغییر فرکانس با استقبال عملی کمی روبرو شد لذا همچنان نیاز برای دسترسی به یک طرح جامع‌تر احساس می‌شد. طرح‌های تطبیقی کاملاً با طرح‌های قبلی متفاوت عمل می‌کند در واقع یک قابلیت جدید به این طرح اضافه می‌شود و آن ریشه‌یابی علت ناپایداری فرکانس (کسری توان اکتیو) می‌باشد که در فعالیت‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

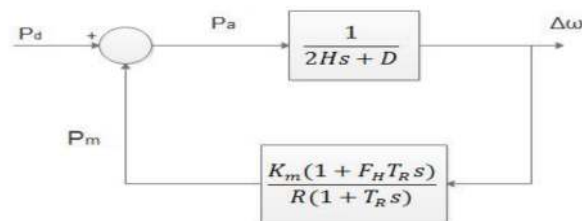
### ۳- مدل پاسخ فرکانسی سیستم قدرت

اولین گامی که در این طرح برای محاسبه علت ناپایداری فرکانس پیشنهاد گردید استفاده از مدل پاسخ فرکانس سیستم می‌باشد که در عین سادگی دقت بالایی را شامل می‌شود و برای آنالیز رفتار دینامیک فرکانس متوسط بکار برده می‌شود. برای شبیه‌سازی دقیق رفتارهای دینامیکی سیستم باید از مدل‌های ریاضی و غیرخطی مرتبه بالا برای واحدهای تولیدی استفاده شود که این مدل‌های مرتبه بالا شامل سیستم‌های خنک‌کننده و کنترل‌کننده‌های واحد تولید توان می‌باشند.



شکل ۱- سیستم تست ۹ باسه IEEE [۷]

این در حالیست که برای بررسی محدوده پایداری فرکانس، بکارگیری مدل ساده شده سیستم کافی می‌باشد و از مدل کردن قسمت‌هایی که دینامیکی سریع‌تر (پاسخ ژنراتور) یا کندتر (دینامیک‌های سیستم حرارتی بویلر) از دینامیک کوتاه مدت فرکانس دارند صرف‌نظر می‌شود. باقیمانده سیستم کاهش‌یافته متشکل از سرو موتور گاورنر، توربین بخار و اینرسی می‌باشد. لذا به منظور بررسی پاسخ فرکانس واحدهای تولیدی، بجای استفاده از مدل‌های غیرخطی مرتبه بالا از مدل‌های مرتبه پایین (توابع انتقال مرتبه اول) استفاده می‌شود. ضرایب بهره و ثابت زمانی واحدهای تولیدی به وسیله آزمون‌های مربوطه و یا مدل‌های دقیق به گونه‌ای تعیین می‌شوند که پاسخ فرکانس مرتبه پایین واحد تولیدی به پاسخ فرکانس مرتبه بالا واحد تولیدی که جزئیات بیشتری را شامل می‌شود بسیار نزدیک باشد [۳۹-۴۰] شکل ۱ مدل پاسخ فرکانسی شبکه ۳۳ باس IEEE را نشان می‌دهد که با ساده‌سازی آن مدل شکل ۲ ساخته می‌شود [۴۱].



شکل ۲- مدل ساده شده پاسخ فرکانسی با مرتبه کاهش یافته سیستم ۹ باسه IEEE

با نوشتن معادلات برای سیستم مدل شده پاسخ فرکانسی بالا داریم :

$$\Delta\omega(t) = \frac{R P_{step}}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-\delta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi)] \quad P.u \quad (1)$$

هرکدام از پارامترهای به کار رفته در رابطه بالا به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T_R\delta\omega_n + T_R^2\omega_n^2}{1 - \delta^2}}, \quad \omega_r = \omega_n\sqrt{1 - \delta^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_r T_R}{1 - \delta\omega_n T_R}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{-\delta}\right) \quad (3)$$

همانطور که از رابطه (۳) مشاهده می‌گردد پاسخ زمانی به صورت سینوسی نوسان می‌کند باید خاطر نشان کرد مقادیر پارامترها به صورت تخمینی برای سیستم طراحی به کار می‌رود که این مقادیر بستگی به بزرگی سیستم دارد.

### ۳-۱- بررسی تاثیر تغییرات ولتاژ باس بارهای سیستم در محاسبات کسری توان اکتیو

موضوع اصلی طرح‌های بارزدایی تطبیقی فرکانس کم، تخمین کسری توان اکتیو می‌باشد که در ساده‌ترین حالت با استفاده از مشتق اول فرکانس و به کمک معادله نوسان روتور محاسبه می‌شود [۲۱]. به کمک مدل پاسخ فرکانسی مرتبه پایین، رابطه‌ای بین شدت کسری توان اکتیو و نرخ تغییرات فرکانس در لحظات اولیه فراهم می‌شود.

$$P_{def} = P_M - P_E \quad (4)$$

$$(P_M - P_E) \cdot \frac{1}{MS + D} = \Delta f \quad (5)$$

$$M = 2H_{eq}, \quad P_{def} = \frac{2H_{eq}}{f_N} \cdot \left. \frac{df_{Hz}}{dt} \right|_{t=0} \quad (6)$$

در این رابطه  $H_{eq}$ ,  $H_i$ ,  $S_i$  و  $n$  به ترتیب ثابت اینرسی واحد تولیدی معادل، ثابت اینرسی واحد تولیدی  $\dot{A}$  ام، توان نامی ظاهری واحد تولیدی  $\dot{A}$  ام و تعداد واحدهای تولیدی می‌باشند.

کسری توان اکتیو ( $P_{def}$ ) از اختلاف توان مکانیکی توربین ( $P_M$ ) و توان الکتریکی بار ( $P_E$ ) ناشی می‌شود. با نوشتن رابطه تغییرات فرکانس و تغییرات توان از مدل پاسخ فرکانسی مرتبه پایین سیستم شکل ۲، رابطه (۶) ایجاد می‌شود. تخمین مقدار کسری توان به شیب اولیه فرکانس ( $df_{Hz}/dt$ ) در لحظه وقوع اغتشاش و ثابت اینرسی معادل سیستم ( $H_{eq}$ ) وابسته می‌باشد.  $f_N$  فرکانس نامی سیستم می‌باشد و برابر با ۵۰ یا ۶۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود و کسری توان اکتیو ( $P_{def}$ ) به صورت پریونیتی استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد [۴۴] که محاسبه کسری توان اکتیو بدون در نظر گرفتن تاثیر وابستگی ولتاژ بارها می‌تواند تاثیر قابل توجهی در خاموشی‌های حاصل از عدم بارزدایی کافی داشته باشد. بنابراین می‌توان کسری توان اکتیو ( $P_{def}$ ) را به صورت رابطه (۷) در نظر گرفت.

$$P_{def} = \frac{M_{eq}}{f_N} \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} + V \quad (7)$$

ضریبی است که تاثیر مشتق اول فرکانس را در محاسبه کسری توان اکتیو نشان می‌دهد با مشخص بودن مقدار ثابت اینرسی معادل و فرکانس نامی سیستم، مقدار این ضریب معلوم می‌باشد.  $V$ : شاخصی است که تاثیر وابستگی ولتاژ باس‌بارهای سیستم را در محاسبه کسری توان اکتیو نشان می‌دهد مشخص نمودن مقدار شاخص ولتاژ، بستگی به پارامترهای سیستم دارد که تعیین نمودن مقادیر واقعی پارامترهای سیستم بسیار سخت و پیچیده می‌باشد [۴۵].

در مقاله [۴۶]، شاخص ولتاژ  $V$  به صورت زیر تعریف می‌شود.  $P_{LO.i}$ ،  $U_{O.i}$ ،  $U_i$ ،  $m$  و  $\alpha_i$  و به ترتیب توان اکتیو باس  $i$  ام، ولتاژ اولیه باس بار  $i$  ام قبل از وقوع اغتشاش، ولتاژ لحظه‌ای باس بار  $i$  ام، تعداد باس‌بارهای سیستم و فاکتوریست که وابستگی توان اکتیو باس بار  $i$  ام را به تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد.

$$V = \sum_{i=1}^m P_{LO.i} \cdot [1 - (U_i/U_{O.i})^{\alpha_i}] \quad (8)$$

همانطور که مشخص است برای بدست آوردن مقدار شاخص ولتاژ، باید مقدار بارگذاری سیستم قبل از وقوع اغتشاش و ولتاژ بارها قبل و بعد از وقوع اغتشاش و همچنین ضریب وابستگی ولتاژ باس‌بارها مشخص و در دسترس باشند. بدست آوردن این مقادیر برای محاسبه مقدار شاخص ولتاژ کار آسانی به نظر نمی‌رسد. پس منطقی است که روشی ارائه شود که تاثیر وابستگی ولتاژ را به نحو دیگر در تخمین کسری توان محاسبه می‌نماید.

#### ۴- طرح بارزدایی پیشنهادی

با توجه به توزیع منابع تولیدی توان در سراسر سیستم قدرت و به دلیل مشخصات پیچیده و متفاوتی که واحدهای تولیدی پراکنده دارند بدست آوردن مستقیم شاخص ولتاژ بارها از طریق جمع‌آوری پارامترهای شبکه مشکل و غیر ممکن به نظر می‌رسد. لذا می‌توان فرض نمود که در سیستم‌های قدرت مستقل که مشمول ریزشبکه‌های جزیره‌ای نیز می‌شوند تمامی واحدهای تولیدی به عنوان یک واحد کلی در نظر گرفته می‌شوند و بر روی یک باس واحد از سیستم قرار می‌گیرند. با بدست آمدن شاخص ولتاژ برای شبکه جزیره‌ای، کسری توان شبکه با دقت خوبی تخمین زده می‌شود. بر اساس شبیه‌سازی سیستم شبکه شکل ۲ در متلب، با اعمال کسری توان‌های مختلف ( $\Delta P_k^{set}$ ) به شبکه، مشتق اولیه فرکانس‌های متفاوتی ( $df_k/dt$ ) بدست می‌آید با مشخص بودن مقدار ثابت اینرسی سیستم، مطابق با رابطه (۹) تا (۱۱) مقادیر شاخص‌های ولتاژ ( $V_k$ ) متناسب با این کسری توان‌ها محاسبه می‌شود.

$$\Delta P_k^{set} = \frac{M}{f_N} \cdot \frac{df_k}{dt} \Big|_{t=0} + V_k \quad (9)$$

$$V_k = \Delta P_k^{set} - \frac{M}{f_N} \cdot \frac{df_k}{dt} \Big|_{t=0} \quad (10)$$

$$V_k \approx V_{ec} \cdot \frac{df_k}{dt} \Big|_{t=0} \quad (11)$$

پارامتر  $k$  تعداد کسری توان‌های اعمالی به سیستم را نشان می‌دهد.  $(\Delta P_k^{set})$  کسری توان‌هایی مختلفی است که برای اعمال به سیستم انتخاب شده‌اند. معمولاً پس از وقوع یک اغتشاش، کسری توان اکتیو با کسری توان راکتیو همراه می‌باشد لذا با کاهش کسری توان راکتیو، تمامی ولتاژ بارهای سیستم به صورت آنی افت پیدا می‌کند که موجب کاهش توان مصرفی بارها می‌شود. کاهش مصرفی بارها موجب کاهش مشتق اول فرکانس اندازه‌گیری شده، می‌شود. هرچقدر میزان کاهش ولتاژ بارها بیشتر باشد کاهش مشتق اول فرکانس نیز بیشتر می‌باشد (مشتق اول فرکانس بهبود می‌یابد) زیرا مطابق با رابطه (۹) با کاهش ولتاژ ثانویه بارها، مقدار شاخص ولتاژ بزرگ‌تر می‌شود در این صورت مطابق با رابطه (۱۰) مقدار مشتق اول فرکانس بزرگ‌تر می‌شود بنابراین می‌توان رابطه بین تغییرات توان ناشی از تغییرات ولتاژ بارها را با تغییرات مشتق اول فرکانس را با یک تناسب نشان داد.

رابطه (۱۰) بیان می‌کند که به ازای یک اغتشاش رخ داده در سیستم و با مشخص شدن مشتق اول فرکانس و نیز محاسبه شاخص ولتاژ مربوطه، می‌توان یک پارامتر جدیدی به نام ضریب تاثیر ولتاژ  $(V_{ec})$  تعریف نمود. به عبارت دیگر این ضریب نشان می‌دهد که به ازای یک اغتشاش توان، شاخص ولتاژ مربوطه با چه نرخي موجب کاهش مشتق اول فرکانس اندازه‌گیری شده، می‌شود که با ضرب نمودن این ضریب در مشتق اول فرکانس، مقدار کسری توان با دقت بالایی تخمین زده می‌شود.

$$P_{def} = (V_{ec} + \frac{M_{eq}}{f_N}) \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} \quad (12)$$

به منظور صحت عملکرد سیستم پس از وقوع کسری توان لازم است فضای مانور فرکانس در محدوده مجاز بین ۴۹ و ۴۷/۵ هرتز در نظر گرفته شود [۴۷]. که البته باید تا حد امکان هرچه سریع‌تر فرکانس به مقدار نامی خود بازگردد. بنابراین مرزهای فرکانسی طرح بارزدایی پیشنهادی در مقادیر ۴۹ - ۴۸/۸ - ۴۸/۴ - ۴۸ هرتز انتخاب می‌گردند تا تعاملی بین بازگشت سریع فرکانس و استفاده مناسب از ظرفیت انرژی ذخیره چرخان وجود داشته باشد.

از الزامات اجرایی طرح بارزدایی پیشنهادی، نظارت بر مشتق اولیه فرکانس  $(\frac{df_{Hz}}{dt})$  می‌باشد. اگر تغییر خاصی در مراحل بارزدایی رخ دهد طرح بارزدایی پیشنهادی می‌تواند خود را با تغییر مربوطه تنظیم نماید. مطابق با این حقیقت، یک تغییر (پله افزایشی) در  $(\frac{df_{Hz}}{dt})$  بین دو مرحله بارزدایی، نمایانگر این است که ذخیره چرخان سیستم، توانسته قسمتی از  $P_{def}$  را جبران کند به گونه‌ای که برای این قسمت از  $P_{def}$  بارزدایی نیاز نمی‌باشد. برای تنظیم هر مرحله بارزدایی، مقایسه‌ای بین مشتق اول فرکانس هر دو مرحله بارزدایی متوالی با ماکزیمم مشتق اولیه فرکانس انجام می‌گیرد که در شکل ۵ با  $\Delta_i$  نشان داده شده است. قبل از این که بارزدایی مرحله  $i$  رخ دهد درصد تغییرات  $(df_{COI}/dt)$  و بارزدایی مرحله  $i$  ام به صورت روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه می‌شود.

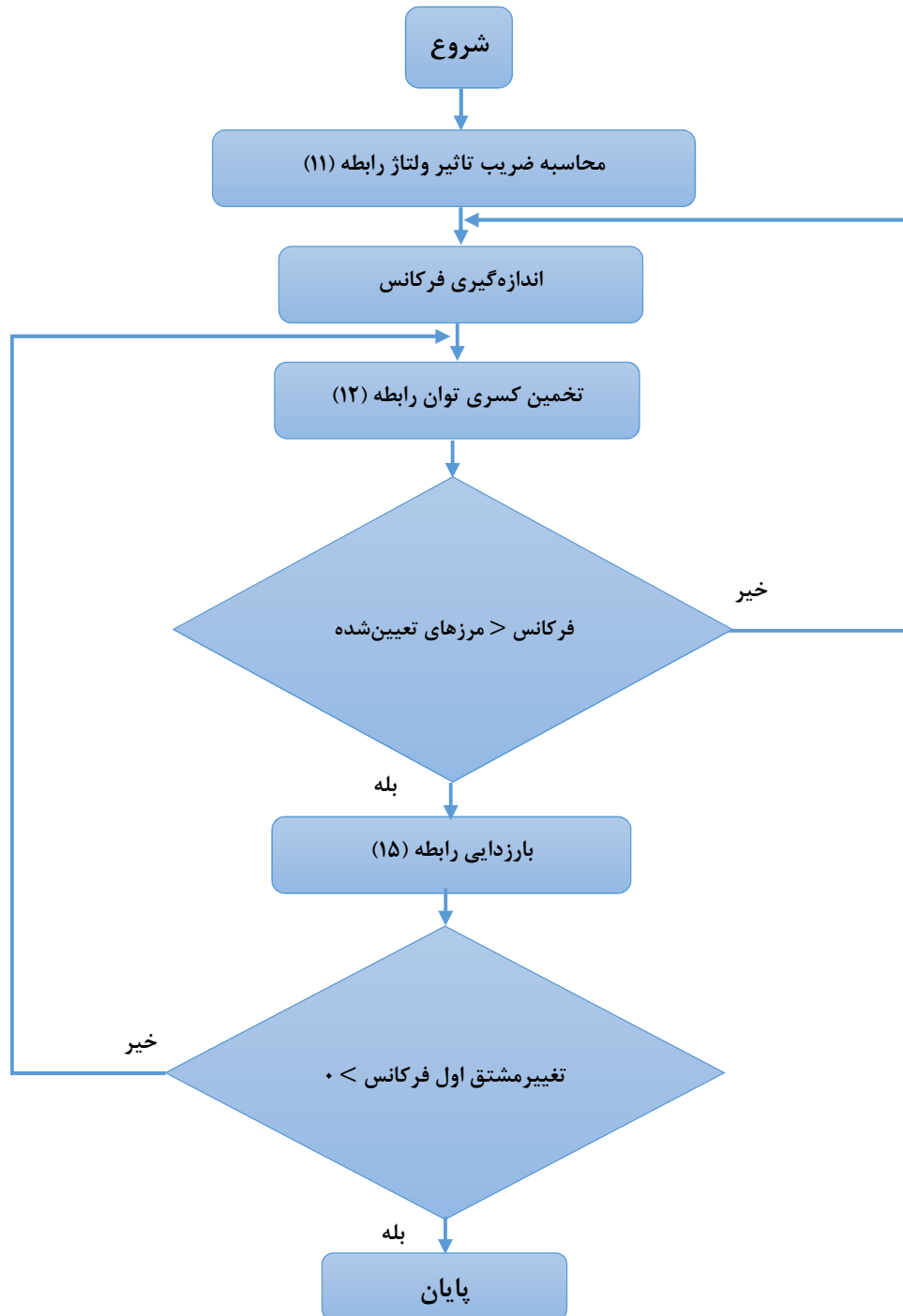
$$\Delta_i = \Delta_i / (df_{max}/dt) \quad (13)$$

$$\Delta_{final} = (df_{last}/dt) / (df_{max}/dt) \quad (14)$$



$$\dot{P}_{shed.i} = P_{shed.i} - \Delta_i$$

(۱۵)



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم بارزدایی پیشنهادیشکل ۳- فلوجارت الگوریتم بارزدایی پیشنهادی

به منظور افزایش اطمینان از طرح بارزدایی پیشنهادی، یک مرحله بارزدایی اضافی ( $\Delta_{final}$ ) در نظر گرفته می‌شود اگر فرکانس به علت رویدادهای پیش‌بینی نشده به مقدار  $f_{MIN}$  رسید این مرحله بارزدایی انجام گیرد. منظور از  $df_{max}/dt$ ، ماکزیمم مشتق اول فرکانس پس از وقوع اغتشاش و  $df_{iast}/dt$  مشتق اول فرکانس در مینیمم فرکانس (۴۸ هرتز) می‌باشد.  $P_{shed.i}$  مقدار بار تعیین شده از قبل که مقداردهی شده است. مقادیر  $P_{shed.i}$  برای فرکانس‌های ۴۹، ۴۸/۸، ۴۸/۴ و ۴۸ هرتز به ترتیب برابر ۳۵، ۳۰، ۲۵ و ۱۵ درصد بار کسری توان اکتیو می‌باشد.  $\dot{P}_{shed.i}$  مقدار بارزدایی و  $\Delta_i$  افت فرکانس جبران شده توسط ذخیره چرخان در مرحله  $i$  ام می‌باشد. مقدار  $\Delta_i$  می‌تواند مثبت و یا منفی باشد بنابراین مقدار  $\dot{P}_{shed.i}$  می‌تواند بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از  $P_{shed.i}$  باشد. این طرح بارزدایی این فرصت را به واحدهای تولیدی می‌دهد تا در طول پروسه بارزدایی مقدار توان تولیدی خود را افزایش دهند لذا زمانی که  $\Delta_i$  در یک مرحله بزرگتر از صفر باشد یعنی واحدهای تولیدی توانستند مقداری از افت فرکانس ناشی از وقوع اغتشاش را جبران کنند و زمانی که  $\Delta_i$  مقدار منفی باشد یعنی منابع تولیدی نتوانستند در مرحله  $i$  ام با افزایش توان تولیدی انتظارات را برآورده کنند. برای بارزدایی مقدار کسری توان اکتیو محاسبه شده، از رابطه خطی و ساده (۱۴) استفاده می‌شود زیرا استفاده از یک رابطه پیچیده با جزییات بیشتر، تاثیر خاصی بر عملکرد طرح بارزدایی نداشته و موجب افزایش هزینه‌ها و پیچیدگی محاسبات می‌شود. فلوجارت طرح بارزدایی تطبیقی پیشنهادی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی

برای تست طرح بارزدایی پیشنهادی، از سیستم ۹ باسه IEEE نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است. به کمک روش مونته کارلو و با بررسی نمودار چگالی احتمال کسری توان اکتیو، مشخص می‌شود ماکزیمم کسری توان رخ داده در سیستم ریزشبه ۰/۵۵- پروبیت می‌باشد. برای بررسی صحت عملکرد طرح بارزدایی پیشنهادی از سیستم ۹ باسه IEEE استفاده شده است زیرا این سیستم در بسیاری از مطالعات بارزدایی بکار برده می‌شود. در سناریو مطالعات پایداری فرکانس سیستم، فرض شده است که در ثانیه ۰/۵ به دلیل رخ دادن اغتشاشی، سیستم ۹ باسه از شبکه اصلی جدا می‌گردد و با یک کسری توان ۰/۱۵ پروبیتی روبرو می‌شود. در ادامه به بررسی نمودارهای مختلف و نحوه عملکرد طرح بارزدایی پیشنهادی می‌پردازیم.

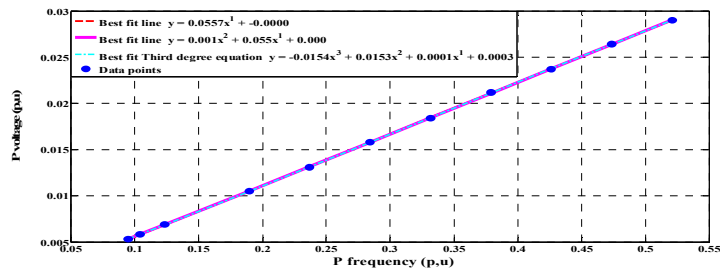
برای تخمین کسری توان اکتیو پیشنهاد گردید که در این رابطه ضریب شاخص ولتاژ از نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال تعدادی کسری توان به سیستم و مشتق فرکانس اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. برای سیستم شبکه شکل ۲، ۵ مورد شبیه‌سازی طراحی شده و کسری توان‌های مختلفی برای محاسبه پارامتر شاخص ولتاژ به شبکه تحمیل شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۱) نشان داده می‌شود.

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه ضریب تاثیر ولتاژ بارها

Case	$\Delta P (p \cdot u)$	$df/dt (p \cdot u)$	$V_{ec}$
۱	۰/۱	۰/۱۸۹۵	۰/۰۵۴۸
۲	۰/۱۱	۰/۲۰۸۳	۰/۰۵۵۶
۳	۰/۱۳	۰/۲۴۶۳	۰/۰۵۵۱
۴	۰/۲	۰/۳۷۸۹	۰/۰۵۵۴
۵	۰/۲۵	۰/۴۷۳۷	۰/۰۵۵۲

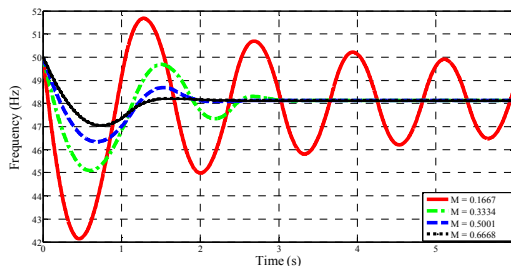
مطابق با جدول (۱) مشاهده می‌شود که کلیه ضریب‌های شاخص ولتاژ محاسبه شده به ازای سناریوهای مختلف، با تقریبی کمتر از ۰/۰۰۱ مشابه هم می‌باشند.

شکل ۴ شاخص‌های ولتاژ ( $V_{ec}^{p.u}$ ) سیستم را بر حسب توان ناشی از مشتق اول فرکانس ( $F_{IC} \cdot \frac{df_k^{p.u}}{dt}$ ) نشان می‌دهد. شیب نمودار مقدار ضریب ولتاژ شبکه را به ازای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. این ضریب بیان می‌دارد که به ازای کسری توان‌های مختلف، افت ولتاژ بارهای شبکه به اندازه ضریب ۰/۰۵۵۵، مقادیر مشتق اول فرکانس متناظر را تحت تاثیر قرار می‌دهند که با در نظر گرفتن این ضریب، می‌توان مقادیر مشتق اول فرکانس را به مقدار واقعی مطابق با رابطه (۱۲) اصلاح نمود.

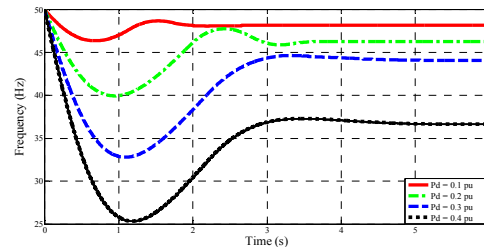


شکل ۴- شیب ضریب تاثیر ولتاژ

همانطور که از شکل ۴ مشخص است برازش مسیر عبوری از نقاط نمودار به کمک خط مستقیم بر برازش نمودار توسط منحنی‌های مرتبه بالاتر مماس می‌باشد که نمایانگر صحت روش محاسبه می‌باشد. برای محاسبه مقدار خطای حاصل از تخمین کسری توان پیشنهادی رابطه (۱۲) جدول (۱) تشکیل می‌شود. مقدار خطا محاسبه شده به ازای کسری توان‌های مختلف کمتر از ۰/۰۰۱ می‌باشد که نشان از درستی و دقت روش پیشنهادی برای تخمین کسری توان می‌باشد.



ب

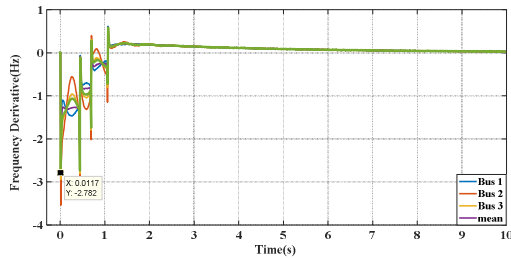


الف

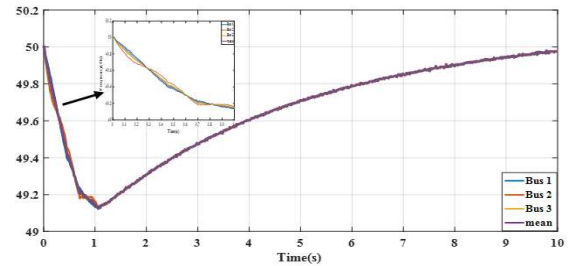
شکل ۵- انحراف فرکانس شبکه به ازای الف (کسری توان‌های مختلف ب) سیستم‌های مختلف (اینرسی‌های متفاوت)

شکل ۵- الف انحراف فرکانس شبکه را به ازای کسری توان‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به ازای تمامی کسری توان‌های وارد به سیستم، مقدار فرکانس به پایین‌تر از مرز مجاز ۴۷/۵ هرتز افت پیدا می‌کند در حالی که مرز مجاز فرکانس تعریف شده برای تمامی واحدهای تولیدی، ۴۷/۵ هرتز می‌باشد لذا با عبور فرکانس از این مرز، قطعی و خاموشی شبکه را به دنبال دارد. شکل ۵- ب نشان می‌دهد با اعمال کسری توان اکتیو ۰/۱-، پریونیت به شبکه، به ازای ثابت اینرسی‌های مختلف، فرکانس با انحراف‌های متفاوتی مواجه می‌شود به گونه‌ای که به ازای ثابت اینرسی‌های کوچک‌تر، فرکانس با نوسانات زیادی منحرف می‌شود در حالی که به ازای سیستم‌هایی با ثابت اینرسی بزرگ‌تر، فرکانس محدوده پایداری بهتری را تجربه می‌کند. با توجه به عبور فرکانس از مقدار مجاز به ازای تمامی حالت‌ها، باید یک طرح بارزدایی مناسب بکار برده شود تا ضمن حفظ پایداری فرکانس در محدوده مجاز از قطعی و خاموشی سیستم جلوگیری نماید. بررسی نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد که وجود یک کنترل کننده مناسب که بتواند با تخمین صحیح کمبود توان موجب پایدار ساختن فرکانس شبکه شود اهمیت دارد زیرا

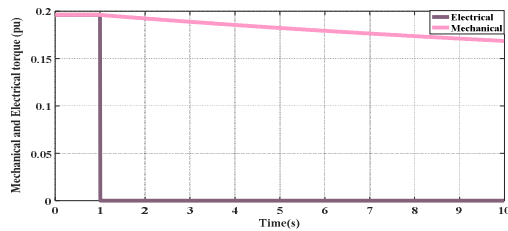
تخمین کمتر کسری توان موجب می‌شود بار نامناسب و کمتری نسبت به مقدار بار مورد نیاز از شبکه قطع شود لذا فرکانس پایین‌تر از محدوده مجاز ۴۷/۵ هرتز حرکت می‌کند و موجب ناپایداری فرکانس و شبکه می‌شود؛ همچنین تخمین بالاتر از مقدار واقعی کسری توان نیز موجب ایجاد پدیده بالا فرکانسی می‌شود. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس به بالای (۳/۰٪ + ۵۰) هرتز افزایش پیدا کند که برای حل این موضوع باید دنبال تعریف کنترل‌های جدید (بریکرهای بالافرکانسی) بود که هزینه و پیچیدگی‌های خاص خود را به همراه دارد. لذا تخمین صحیح کسری توان از اهمیت ویژه‌ای در روابط بارزدایی برخوردار است.



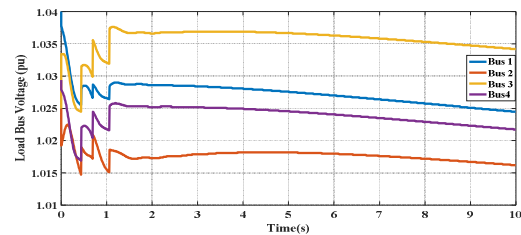
ب



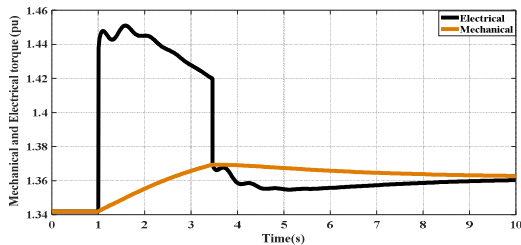
الف



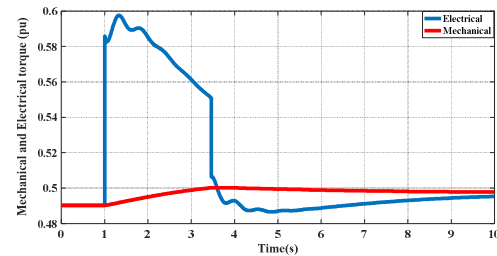
د



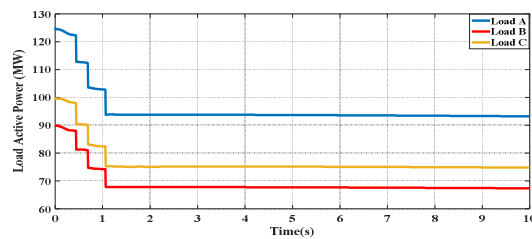
ج



ه



ت



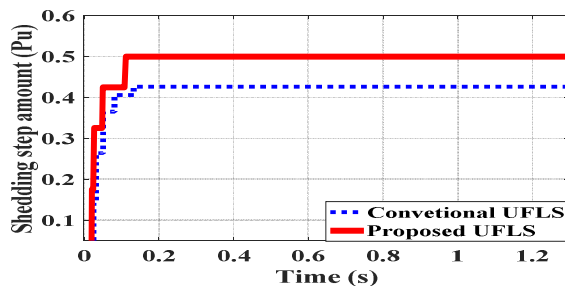
ف

شکل ۶- نمودارهای الف) فرکانس ب) مشتق اول فرکانس ج) ولتاژ باس بارها د، ت و ث) گشتاور مکانیکی و الکتریکی ژنراتورهای ۱ و ۲ و ۳ سیستم ف) توان اکتیو بارهای سیستم ۳۹ با سه به ازای بکارگیری طرح بارزدایی پیشنهادی با در نظر گرفتن اغتشاش ۰/۱۵ pu

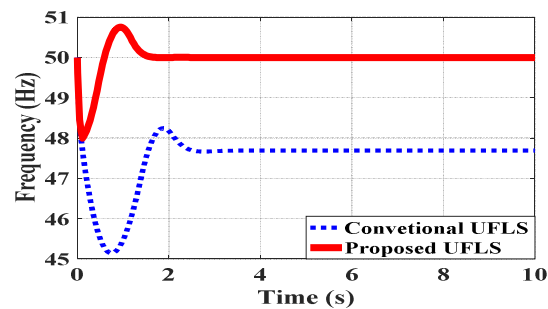
نتایج طرح بارزدایی پیشنهادی در شکل‌های ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶-الف، نشان داده شده است طرح بارزدایی پیشنهادی در واکنش به اغتشاش رخ داده در سیستم، توانسته با قطع نمودن مناسب بار، فرکانس مرکزی سیستم به همراه فرکانس ناحیه‌های مختلف را در محدوده‌ی مجاز نگه دارد. در شکل ۶-ب، مشتق اولیه فرکانس در ناحیه‌های مختلف بعد از

یک افت شدید بعد از رخداد اغتشاش، در نهایت در حالت پایدار به مقدار صفر میل پیدا می‌کند. شکل ۶-د، تغییرات میانگین ولتاژ باس بارهای سیستم را نشان می‌دهد. مقدار اولیه ولتاژ سیستم  $1/03$  پریونیت می‌باشد که پس از وقوع کسری توان افت پیدا می‌کند و در نهایت پس از انجام بارزدایی پیشنهادی با حذف مناسب بار، ولتاژ به مقدار نامی خود برمی‌گردد. شایان ذکر است که طرح بارزدایی پیشنهادی توانسته علاوه بر پایدار ساختن فرکانس شبکه، به بهبود پایداری ولتاژ شبکه نیز کمک کند. شکل ۶-ج، ۶-ت و ۶-ث، گشتاور تولیدی مکانیکی و الکتریکی ژنراتورهای ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهد که در مجموع توانستند در قالب انرژی ذخیره چرخان، در طول مراحل بارزدایی،  $0/05$  پریونیت بار را تغذیه نمایند. شکل ۶-ف، مقدار بار قطع شده از باس‌های مختلف سیستم را نشان می‌دهد که به ازای این بارزدایی، سیستم در حالت پایدار باقی مانده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با قطع مناسب بار، فرکانس در حدود  $50$  هرتز بر می‌گردد و به خوبی کنترل می‌شود. همچنین با توجه به شکل تغییرات فرکانس قابل قبول بوده و از نظر عملی امکان‌پذیر است. برای قطع بار در این روش از چندین مرحله استفاده شده است و در هر مرحله درصدی از بار از سیستم قطع می‌شود.

به منظور نشان دادن کارایی طرح پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی حاصل از به کارگیری این طرح بارزدایی پیشنهادی برای یک سیستم تست ۹ باس IEEE شکل ۱ با نتایج شبیه‌سازی حاصل از یک طرح بارزدایی رایج در مرجع [۵] مقایسه شده است. در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است که به ازای یک اغتشاش  $0/55$ - پریونیتی، طرح بارزدایی پیشنهادی توانست برخلاف طرح بارزدایی معمولی، فرکانس را در محدوده‌ی مجاز، نگه‌دارد و در این حالت فرکانس شبکه انحراف کمتری را تجربه می‌کند و مزیت این روش بدرستی نشان داده می‌شود. در واقع طرح بارزدایی معمولی، به دلیل در نظر نگرفتن وابستگی ولتاژ بارها در محاسبه‌ی کسری توان اکتیو، نتوانسته مقدار کسر توان اکتیو را به درستی تخمین بزند بنابراین مطابق با شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ج بار کمتری را از سیستم قطع می‌نماید که منجر به ناپایداری فرکانس سیستم می‌شود.



ب



الف

شکل ۱۰- مقایسه الف) فرکانس و ب) بار قطع شده طرح بارزدایی پیشنهادی با طرح بارزدایی معمولی به ازای اغتشاش  $0/55$ - پریونیت

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک طرح بارزدایی تطبیقی فرکانس کم برای سیستم‌های قدرت پیشنهاد می‌گردد که بر اساس مشتق اول فرکانس، کسری توان را تخمین می‌زند. به منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی، سیستم تست ۹ باس IEEE مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر خلاف اکثر طرح‌های بارزدایی مرسوم، طرح بارزدایی پیشنهادی توانست مشکل تخمین کسری توان را حل نماید. با استفاده از این طرح، ضریب تاثیر ولتاژ برای سیستم تعریف می‌شود که مقدار آن از طریق نتایج شبیه‌سازی بدست می‌آید. ثابت گردید که به کمک این طرح می‌توان تغییرات توان بارها را به ازای تغییرات ولتاژ باس‌های سیستم در تخمین کسری توان اثر داد و نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای دیگر شبکه نمی‌باشد و تنها پارامتری که برای تخمین کسری توان نیاز می‌باشد فرکانس است که از طریق رله‌های فرکانس اندازه‌گیری می‌شود که این یکی از مزیت‌های ویژه طرح پیشنهادی محسوب می‌شود. طرح پیشنهادی

با در نظر گرفتن اثر وابستگی ولتاژ بارها در محاسبه کسری توان و بروزسانی این کسری توان سعی می‌کند که اگر در مقادیر اولیه تاثیرات ولتاژ و یا داده‌های فرکانسی خطایی رخ داده باشد در مراحل بعدی بروزسانی و اصلاح شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح بارزدایی پیشنهادی برخلاف طرح‌های بارزدایی رایج توانسته به ازای سناریوهای مختلف، از افت سریع فرکانس به محدوده غیرمجاز جلوگیری کند، به گونه‌ای که زمان مناسب و کافی در اختیار کنترل اولیه فرکانس قرار گیرد تا فرکانس را به مقدار نامی خود برگرداند که این نشان از دقت و صحت عملکرد طرح بارزدایی پیشنهادی می‌باشد.

## مراجع

- [۱] Laghari, J.A., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A. and Mohamad, H., 2013. Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: a review. *energy conversion and management*, 75, pp.130-140..
- [۲] Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control* (Vol. 7). New York: McGraw-hill.
- [3] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, "Control of distributed uninterruptible power supply systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 2845-2859, 2008.
- [4] H. Bauman, G. Hahn, and C. Metcalf, "The effect of frequency reduction on plant capacity and on system operation [includes discussion]," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 2, pp. 1632-1668, 1954.
- [5] P. Squire, "Operation at Low Frequency in Great Britain [includes discussion]," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 2, pp. 1647-1668, 1954..
- [6] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 647-655, 1992.
- [7] C. F. Dalziel and E. W. Steinback, "Underfrequency protection of power systems for system relief load shedding-system splitting," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 78, no. 4, pp. 1227-1237, 1959.
- [8] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, 2007.
- [9] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and Z. Qu, "Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 8, pp. 822-831, 2013.
- [10] V. V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Transactions on power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1260-1266, 2006.2008 ,859-0.
- [11] S.-J. Huang and C.-C. Huang, "An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 51-58, 2000.
- [12] J. Ford, H. Bevrani, and G. Ledwich, "Adaptive load shedding and regional protection," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, no. 10, pp. 611-618, 2009.
- [13] H. Villamediana and A. Neira, "Dynamic stability improving at industrial electrical systems through the use of variable load shedding schemes," in *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, pp. 1-5 :IEEE.
- [14] S. Hirodantis, H. Li, and P. Crossley, "Load shedding in a distribution network," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1-6: IEEE.
- [15] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "A low-order system frequency response model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 720-729, 1990.
- [16] H. You, V. Vittal, and Z. Yang, "Self-healing in power systems: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding," *IEEE transactions on power systems*, vol. 18, no. 1, pp. 174-181, 2003 .
- [17] M. S. Pasand and H. Seyedi, "New centralized adaptive under frequency load shedding algorithms," in *2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, 2007, pp. 44-48: IEEE.
- [18] H. Lokay and V. Burtnyk, "Application of underfrequency relays for automatic load shedding," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 3, pp. 776-783, 1968.
- [19] U. Rudez and R. Mihalic, "Analysis of underfrequency load shedding using a frequency gradient," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 565-575, 2009.
- [20] S.-J. Huang and C.-C. Huang, "An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 51-58, 2000.
- [21] Laghari, J.A., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A. and Mohamad, H., 2013. Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: a review. *energy conversion and management*, 75, pp.130-140.

- [22] Bauman, H.A., Hahn, G.R. and Metcalf, C.N., 1954. The effect of frequency reduction on plant capacity and on system operation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 73(2), pp.1632-1668.
- [23] Larsson, M., & Rehtanz, C. (2002, July). Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurements. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, (Vol. 1, pp. 233-238). IEEE.
- [24] Squire, P.J., 1954. Operation at low frequency in Great Britain. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 73(2), pp.1647-1668.
- [25] Report of the Task Force on UnderFrequency and Undervoltage Relaying, "Underfrequency and Undervoltage Relay Applications to Large Turbine Generators," National Electric Reliability Council, Research Park, Princeton, NJ, July 1978.
- [26] American National Standard, "Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants," ANSVIEEE C37.106-1987.
- [27] IEEE Working Group Report, "Summary of the 'Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants,' ANSVIEEE C37.106198y IEEE Trans on Power Delivery, v 3, Jan 1988, p 153158.
- [28] Chang, L. and Wu, Z., 2011. Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(8), pp.1410-1419..
- [29] Zhao, X., Zhang, X. and He, B., 2009. Study on self organized criticality of China power grid blackouts. *Energy Conversion and Management*, 50(3), pp.658-661.
- [30] Pourbeik, P., Kundur, P.S. and Taylor, C.W., 2006. The anatomy of a power grid blackout-Root causes and dynamics of recent major blackouts. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(5), pp.22-29.
- [31] Wang, J.W. and Rong, L.L., 2011. Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures. *Safety science*, 49(6), pp.807-812.
- [32] White, D., Roschelle, A., Peterson, P., Schlissel, D., Biewald, B. and Steinhurst, W., 2003. The 2003 blackout: solutions that won't cost a fortune. *The Electricity Journal*, 16(9), pp.43-53.
- [33] El-Sadek, M.Z., 1998. Preventive measures for voltage collapses and voltage failures in the Egyptian power system. *Electric power systems research*, 44(3), pp.203-211.
- [34] Makarov, Y.V., Reshetov, V.I., Stroeve, A. and Voropai, I., 2005. Blackout prevention in the united states, Europe, and Russia. *Proceedings of the IEEE*, 93(11), pp.1942-1955.
- [35] Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatzigiorgiou, N., Kamwa, I., Kundur, P., Martins, N., Paserba, J., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J. and Schulz, R., 2005. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), pp.1922-1928.
- [۳۶] Sanaye-Pasand, M., 2007. Scrutiny of the Iranian national grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(1), pp.31-
- [۳۷] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalera, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes," in *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262)*, 2001, vol. 1, pp. 307-312: IEEE.
- [۳۸] Jones JR, Kirkland WD. Computer algorithm for selection of frequency relays for load shedding. *IEEE Comput Appl Power*. 1988;1(1):21-25.
- [۳۹] Pan, I. and Das, S., 2015. Kriging based surrogate modeling for fractional order control of microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(1), pp.36-44.
- [۴۰] Lee, D.J. and Wang, L., 2008. Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), pp.311-320.
- [۴۱] Njenda, T. C., Golshan, M. E. H., & Alhelou, H. H. (2018, November). WAMS Based Intelligent Under Frequency Load Shedding Considering Online Disturbance Estimation. In *2018 Smart Grid Conference (SGC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [۴۲] Delfino, B., Massucco, S., Morini, A., Scalera, P. and Silvestro, F., 2001, July. Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001* (Vol. 1, pp. 307-312). IEEE.
- [۴۳] Pasand, M.S. and Seyedi, H., 2007, October. New centralized adaptive under frequency load shedding algorithms. In *Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference on* (pp. 44-48). IEEE.
- [۴۴] Terzija, V.V., 2006. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), pp.1260-1266.
- [۴۵] Mahat, P., Chen, Z. and Bak-Jensen, B., 2010. Underfrequency load shedding for an islanded distribution system with distributed generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2), pp.911-918.
- [۴۶] Rudez, U. and Mihalic, R., 2011. Analysis of underfrequency load shedding using a frequency gradient. *IEEE transactions on power delivery*, 26(2), pp.565-575.
- [۴۷] Rudez, U. and Mihalic, R., 2015. Predictive underfrequency load shedding scheme for islanded power systems with renewable generation. *Electric Power Systems Research*, 126, pp.21-28.

- [۴۸] Rudez, U. and Mihalic, R., 2011. Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2), pp.839-846.
- [۴۹] Ford, J.J., Bevrani, H. and Ledwich, G., 2009. Adaptive load shedding and regional protection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(10), pp.611-618.
- [۵۰] Rudez, U. and Mihalic, R., 2011. Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2), pp.839-846.