

پایدارسازی و کنترل سیستم‌های قدرت با استفاده از بارزدایی در فرکانس کم با توجه به ذخیره چرخان نیروگاه‌ها

سیدمحمد عظیمی^۱ حمیدرضا رحیمی^۲ عبدالله میرزابیگی^۳

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی همدان- همدان- ایران

azimi@hut.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- جهاد دانشگاهی همدان - همدان- ایران

hamidreza.rahimi1372@yahoo.com

۳- مربی- دانشکده مهندسی برق- موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی - همدان- ایران

mirzabeigi@acecr.ac.ir

چکیده: فرکانس یکی از کمیت‌های مهم سیستم قدرت است که باید در محدوده مجاز باشد. با وقوع یک اغتشاش شدید، سیستم گاورنر و ذخیره چرخان نیروگاه‌ها توانایی لازم را برای جلوگیری از افت سریع فرکانس ندارد. طرح‌های بارزدایی فرکانس کم یکی از مهم‌ترین طرح‌های حفاظتی می‌باشند، که مسئولیت نگهداری فرکانس در محدوده مجاز به‌ازای وقوع اغتشاش‌های شدید را برعهده دارند. در این مقاله، ضمن محاسبه‌ی دقیق توان اکتیو لازم برای ثابت نگه داشتن فرکانس، با تاثیر دادن انرژی ذخیره چرخان نیروگاه‌ها در مراحل بارزدایی، مقدار بار مناسبی به‌منظور بازیابی فرکانس سیستم قدرت جزیره‌ای محاسبه و قطع گردد. برای ۴ مرحله عملیات بارزدایی طراحی شده، در هر مرحله ابتدا میزان کسری توان جبران شده توسط انرژی ذخیره چرخان مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس قطعی بار انجام می‌گیرد. به عنوان نمونه به‌ازای یک اغتشاش ۰/۸ پریونیتی، مقدار ۰/۳ پریونیت توسط انرژی ذخیره جبران می‌گردد و تنها ۰/۵ پریونیت بار از شبکه قطع می‌گردد. به‌منظور نشان دادن کارایی طرح پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی حاصل از به‌کارگیری این طرح برای یک سیستم جزیره‌ای با نتایج شبیه‌سازی حاصل از دو طرح بارزدایی رایج مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی نسبت به دو طرح رایج دیگر، عملکرد مطمئن و مناسب‌تری را از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم قدرت جزیره‌ای، کسری توان اکتیو، پایداری فرکانس، بارزدایی فرکانس کم

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaee.20.4.2624

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سیدمحمد عظیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - خیابان شهید احمدی روشن - دانشگاه صنعتی همدان

۱- مقدمه

بیشتری تخمین زد، به‌صورتی که از خاموشی سیستم قدرت جلوگیری شود [۱۲]. در سیستم‌های قدرت جزیره‌ای، طرح بارزدایی فرکانس کم، نقش مهمی را برای حفاظت از پایداری سیستم ایفا می‌کند. روش‌های بارزدایی انواع مختلفی دارند که می‌توان آنها را به سه دسته‌ی سنتی، نیمه‌تطبیقی و تطبیقی تقسیم‌بندی نمود [۳]. طرح‌های بارزدایی تطبیقی شامل دو مرحله 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 اندازه‌گیری شده محاسبه شود [۳]. در طول اغتشاش‌های سیستم، ژنراتورها نیز دچار اغتشاش نوسانات داخلی می‌شوند که با یک نرخ مشابه دچار افت سرعت نمی‌شوند. بنابراین فرکانسی که برای محاسبه‌ی کسری توان اکتیو مورد نیاز می‌باشد، فرکانس مرکز اینرسی است. البته محاسبه‌ی فرکانس مرکز اینرسی به‌صورت آنلاین کار مشکلی است. با توجه به اینکه فرکانس محلی اندازه‌گیری شده اطلاعات کافی را فراهم نمی‌کند، بنابراین محاسبه‌ی فرکانس مرکز اینرسی لازم و ضروری است. اندازه‌گیری فرکانس و تغییرات آن در [۱۳، ۱۴] شرح داده شده است. در [۱۵] با دیدگاه سیستم‌های چندعامله و با استفاده از یک کنترل‌کننده غیرمتمرکز میزان اضافه بار کنترل شده است. در [۱۶] با استفاده از فرکانس مرکز اینرسی، کسری توان اکتیو با استفاده از مدل پاسخ فرکانسی و معادله نوسان روتور محاسبه شده است و در [۳، ۱۳، ۱۴] نیز از این روش استفاده شده است. استراتژی‌های مختلفی برای توزیع مقدار کسری توان اکتیو در مراحل مختلف بارزدایی تعریف شده است [۳، ۱۲].

مساله اصلی در همه بارزدایی‌ها این است که با قطع کمتر بار، بتوان سیستم را کنترل نمود [۱۷]. در این مقاله روشی ارائه شده است که با بکارگیری حداکثری از ذخیره چرخان نیروگاه‌ها در طی مراحل بارزدایی، حداقل مقدار بار از سیستم قطع می‌شود. در این مقاله اغتشاش‌هایی مورد بررسی قرار گرفته است که موجب ایزوله شدن قسمت خاصی از شبکه می‌شوند. اصطلاح به‌کار رفته برای چنین شرایطی و در حالت گذرا، عملکرد جزیره‌ای نامیده می‌شود. برای قسمت ایزوله شده از سیستم قدرت، اصطلاح جزیره سیستم قدرت و یا به‌حالت ساده‌تر جزیره به‌کار برده می‌شود. هر قدر بار کمتری از شبکه قطع شود، می‌تواند خسارت‌های ناشی از تغییرات ناگهانی فرکانس را کم کند. در این مقاله با مدل نمودن دقیق ذخیره چرخان سیستم در روابط بارزدایی، بار کمتری را نسبت به طرح‌های بارزدایی مشابه خود قطع می‌نماید که نشان از عملکرد بهتر و دقیق‌تر طرح پیشنهادی دارد. به‌طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های مقاله را به‌صورت زیر برشمرد:

– بررسی رفتار فرکانس و ولتاژ یک مدل واقعی از سیستم قدرت

خاموشی سراسری شبکه‌های قدرت همواره به‌عنوان یکی از مشکلات صنعت برق مطرح بوده است. در سال‌های اخیر به‌دلیل خصوصی‌سازی صنعت برق و هزینه‌های بالای احداث تجهیزات جدید، سیستم‌های قدرت با ظرفیت رزرو و حاشیه پایداری کمتری بهره‌برداری می‌شوند. زمانی که تغییرات بار شبکه نرمال باشد، فرکانس شبکه توسط سیستم کنترل اتوماتیک تولید کنترل می‌شود [۱، ۲]. سیستم‌های قدرت معمولاً به دو صورت وصل به شبکه و یا جدای از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بعضی مواقع، اختلال در یک شبکه قدرت بزرگ باعث می‌شود که سیستم‌های قدرت جزیره‌ای شوند. در جزیره‌ای معمولاً تعادل توان برقرار نبوده و توان تولیدی بیشتر یا کمتر از توان مورد نیاز بارها است [۳].

یکی از مهم‌ترین سیستم‌های قدرت ریزشبکه‌ها هستند که دو حالت کاری وصل به شبکه و حالت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۴]. در جزیره‌های ایجاد شده به‌دلیل عدم تعادل بین تولید و مصرف، انحراف فرکانس و ولتاژ خواهیم داشت [۵، ۶]. به‌دنبال تشکیل شدن جزیره‌ها، اگر توان تولیدی بیشتر از توان مصرفی بارها باشد، توان تولیدی مازاد اغلب توسط عملکرد سریع گاورنرهای واحد تولیدی کنترل می‌شود. بیشترین نگرانی زمانی است که تقاضای بارها بیشتر از تولید باشد. بارهای اضافی سبب می‌شوند که فرکانس و ولتاژ شبکه به‌مقدار زیادی افت کند. همچنین سیستم گاورنر و ذخیره چرخان نیروگاه‌ها توانایی لازم را برای جلوگیری از افت سریع فرکانس نداشته و نمی‌توانند سیستم را به‌حالت نرمال خود برگردانند. بنابراین کاهش شدید فرکانس شبکه باعث بوجود آمدن مشکلات غیرقابل جبرانی برای توربین سیستم‌های تولید برق می‌شود [۷، ۸]. در این حالت استفاده از کنترل‌کننده‌های مختلف ضروری است. کنترل‌کننده‌های مختلفی در ریزشبکه استفاده می‌گردد. همه کنترل‌کننده‌ها به سه دسته کلی متمرکز، غیرمتمرکز، توزیع‌شده تقسیم می‌شوند [۷، ۸].

در بعضی مواقع کنترل‌کننده‌ها نیز نمی‌توانند به‌درستی مشکلات شبکه را حل کنند. پس باید سعی شود که به‌منظور نگهداری فرکانس در حالت پایدار، به‌مقدار مناسبی بار از شبکه قطع شود. در این حالت بارهای اصلی در شبکه باقی می‌مانند و بارهای غیرضروری‌تر حذف می‌گردند. فعال‌سازی رله‌های فرکانس کم، بندرت در سیستم قدرت نیاز می‌شوند، ولی در مواقعی بسیار ضروری هستند. در واقع بارزدایی آخرین راهکار در برابر خاموشی سراسری سیستم قدرت می‌باشد [۹-۱۱]. مزیت اصلی بارزدایی این است که امکان اختلال در کارکرد کنترل‌کننده وجود ندارد و سیستم‌ها به‌صورت داخلی فرکانس را تثبیت می‌کنند. اگر حالت‌کاری سیستم‌های قدرت نسبت به شبکه اصلی تغییر کند، در حالیکه سیستم کنترلی مناسب برای آن حالت- کاری جایگزین نشده باشد، عملکرد منابع در سیستم‌های قدرت با اختلال و ناپایداری همراه خواهد شد. با در نظر گرفتن تاثیر وابستگی ولتاژ بارهای سیستم، می‌توان مقدار کسری توان اکتیو را با دقت

بهره K_i و ثابت زمانی T_i هر واحد تولیدی i می‌تواند از مدل‌های دقیق‌تر و یا تست‌های مربوطه بدست بیاید. در این مقاله بهره و ثابت‌های زمانی به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که پاسخ مدل تا حد امکان به پاسخ مدل با جزئیات کامل نزدیک باشد. H ثابت اینرسی معادل سیستم است. پاسخ کلی بارها به تغییرات فرکانس می‌تواند با ضرب میرایی D معادل شود. معمولاً این پارامترها برای هر سیستم قدرت شناخته شده می‌باشد. با استفاده از مدل بالا می‌توان پاسخ سیستم قدرت را به‌ازای قطعی‌های هر ژنراتور بررسی نمود.

پاسخ فرکانس یک سیستم قدرت به‌ازای اغتشاش ورودی با بکاربردن رابطه‌ای که در [۱۶] استفاده شده به‌صورت تقریبی قابل محاسبه می‌باشد. این رابطه، یک واحد تولیدی معادل را معرفی می‌کند که توان نامی ظاهری آن برابر با مجموع توان‌های نامی واحدهای تولیدی و ثابت اینرسی معادل را به‌صورت (۱) انتخاب می‌نماید [۳، ۱۲-۱۴، ۱۷-۱۹].

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

در این رابطه H_{eq} ، S_i ، H_i و n به‌ترتیب ثابت اینرسی واحد تولیدی معادل، ثابت اینرسی واحد تولیدی i ام، توان نامی ظاهری واحد تولیدی i ام و تعداد واحدهای تولیدی می‌باشند.

نویسندگان متعددی طرح‌های بارزدایی خود را بر اساس معادله‌ی نوسان روتور پیاده‌سازی نمودند، که در رابطه (۲) نشان داده می‌شود [۳، ۱۲-۱۴، ۱۷-۱۹].

$$\left. \frac{d\Delta w}{dt} \right|_{t=0} = \frac{P_{def}}{2H_{eq}} \quad (2)$$

شیب فرکانس $\left(\frac{d\Delta w}{dt}\right)$ در لحظه‌ی وقوع اغتشاش به ثابت اینرسی معادل (H_{eq}) و کسری توان اکتیو وابسته می‌باشد. در رابطه‌ی (۲) فرکانس و کسری توان اکتیو برحسب واحد پرینیت و ثابت اینرسی بر واحد ثانیه می‌باشند. کسری توان اکتیو را می‌توان به‌صورت زیر بدست آورد:

$$P_{def} = \frac{2H_{eq}}{f_N} \cdot \frac{df_{HZ}}{dt} \cdot S_{eq} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳) کسری توان اکتیو برحسب واحد مگاوات به‌دست می‌آید که به شیب فرکانس برحسب واحد هرتز و ثابت اینرسی معادل وابسته می‌باشد. f_N فرکانس نامی سیستم بوده و برابر ۵۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت با مشخص بودن ثابت اینرسی معادل سیستم و شیب افت فرکانس در لحظه‌ی وقوع اغتشاش، مقدار کسری توان اکتیو می‌تواند تخمین زده شود. در صورتی که ثابت اینرسی معادل سیستم نامشخص باشد، می‌توان ثابت اینرسی معادل یک سیستم جزیره‌ای را به صورت زیر محاسبه نمود [۱۴]:

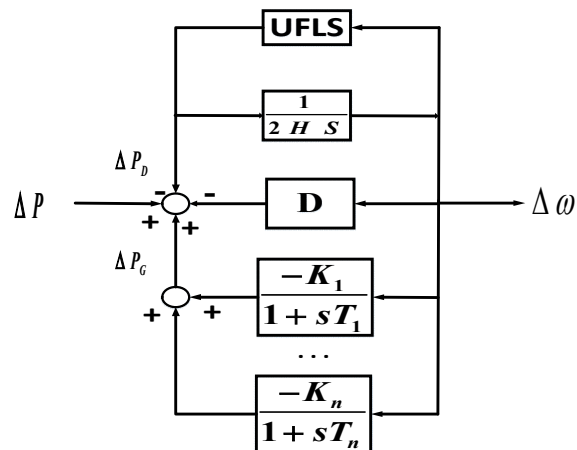
$$H_{eq} = \Delta p \frac{f_N}{2\Delta f_{HZ}} \Big|_{t=t_{im}} \quad (4)$$

- محاسبه مناسب کسری توان اکتیو با در نظر گرفتن اثر ولتاژ باس بارها
- مدل نمودن اثر ظرفیت ذخیره چرخان در روابط به‌منظور کاهش بارزدایی

در ادامه مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در قسمت دوم مدل ساده شده‌ای از سیستم‌های قدرت ایزوله شده را که به‌صورت گسترده برای طراحی و آنالیز طرح‌های بارزدایی فرکانس کم به کار می‌رود، مورد بررسی قرار داده می‌شود. در قسمت سوم مقاله، طرح بارزدایی فرکانس کم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت چهارم شبیه‌سازی و نتایج طرح پیشنهادی در نرم‌افزار متلب/سیمولینک نشان داده شده است. قسمت پنجم، به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- مدل کردن سیستم

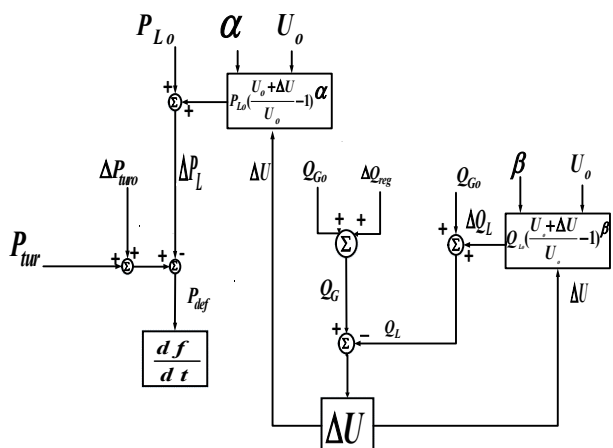
این مدل به‌صورت گسترده برای طراحی و آنالیز طرح‌های بارزدایی فرکانس کم استفاده شده است و می‌تواند دینامیک فرکانس برای سیستم قدرت جزیره‌ای شده را به‌خوبی نشان دهد [۱۷، ۱۸]. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی دینامیک فرکانس سیستم قدرت جزیره‌ای وجود دارند. یکی از بهترین مدل‌ها لین است که فرکانس را در کل سیستم یکپارچه در نظر می‌گیرند و تنها دینامیک سیستم گاورنر توربین و روتور را مدل می‌کنند [۱۸]. در این مدل دینامیک فرکانس تحت تاثیر دینامیک سیستم گاورنر و روتور می‌باشد و از سیستم دینامیک سریع تحریک و گذرای ژنراتور نسبت به دینامیک سیستم روتور و گاورنر توربین صرف‌نظر می‌گردد. همچنین از تاثیر فرکانس و ولتاژ بر هم صرف‌نظر شده است. شکل (۱) مدل سیستم فرضی در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل دینامیک فرکانس سیستم قدرت جزیره‌ای

در شکل (۱) سیستم مدل‌شده شامل n واحد تولیدی متصل به سیستم قدرت است که توسط مدل غیرخطی مرتبه اول همراه با محدودیت‌های $\Delta p_{i,max}$ و $\Delta p_{i,min}$ نشان داده شده است. ضریب

می‌دهد، همچنین β_i وابستگی توان راکتیو بار i ام را به تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد.



شکل (۲): متغیرهای موثر برای محاسبه P_{def}

شکل (۲) متغیرهای موثر برای محاسبه P_{def} را نشان می‌دهد. در شکل (۲) منظور از P_{tur} مجموع توان مکانیکی قبل از وقوع اغتشاش روی توربین ($P_{tur,o}$) و توان مازاد توربین (ΔP_{tur}) به علت واکنش گاورنر می‌باشد. با صرف نظر از تلفات داخلی ژنراتورها، تفاوت بین توان مکانیکی قبل از وقوع اغتشاش (P_{tur}) و توان اکتیو مصرفی (P_L) موجب کسری توان اکتیو (P_{def}) می‌شود که در نهایت منجر به کاهش فرکانس شبکه (df_{Hz}/dt) می‌شود. با اضافه کردن کنترل ولتاژ (ΔQ_{reg}) به توان راکتیو تولیدی قبل از اغتشاش (Q_{Go})، توان راکتیو تولیدی بعد از اغتشاش (Q_G) ساخته می‌شود. تفاوت بین توان راکتیو تولیدی بعد از اغتشاش (Q_G) و توان راکتیو مصرفی بعد از وقوع اغتشاش (Q_L)، توان راکتیو (Q_{sp}) را می‌سازد. با مقایسه این توان و تغییرات ولتاژ دائمی قبل از وقوع اغتشاش، تغییرات ولتاژ (ΔU) پس از اغتشاش بدست می‌آید. در نهایت این تغییرات ولتاژ با ضرایب α و β ، به ترتیب بر توان اکتیو (ΔP_L) و توان راکتیو بارها (ΔQ_L) تاثیر می‌گذارد.

با نادیده گرفتن تلفات سیستم، کسری توان اکتیو به صورت (۷) است.

$$P_{def} = P_{tur} - P_L \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۶) در رابطه‌ی (۷) رابطه کلی (۸) بدست می‌آید.

$$P_{tur} - P_{LO} = P_{def} + \sum_{i=1}^m P_{Lo,i} \left[\left(\frac{U_i}{U_{o,i}} \right)^{\alpha_i} - 1 \right] \quad (8)$$

$$P_{LO} = \sum_{i=1}^m P_{Lo,i}$$

برخی مراجع کسری توان اکتیو را به صورت پیرونیت بر پایه مجموع توان ظاهری نامی همه واحدهای تولیدی در نظر می‌گیرند. در این مقاله به دلایل عملی، کسری توان اکتیو به صورت درصدی از بارهای سیستم بیان می‌شود، که رله‌های فرکانس کم باید اطلاعات این درصد

در رابطه‌ی (۴)، منظور از t_{lim} زمان تغییر در توان تولیدی و یا مصرفی است. Δp مقدار تغییرات توان اکتیو و Δf_{Hz} تغییرات فرکانسی می‌باشد که به دلیل عدم تعادل توان اکتیو در لحظه‌ی t_{lim} رخ می‌دهد.

فرکانس زاویه الکتریکی مرکز اینرسی که در محاسبه کسری توان اکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$w_{COI.pu} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot p_u \cdot H_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n H_i \right)} \quad (5)$$

در این مقاله فرض می‌شود که شیب افت فرکانس بلافاصله پس از وقوع اغتشاش اندازه‌گیری می‌شود و از تاخیر سیستم اندازه‌گیری صرف نظر شده است. البته به دلیل تطبیقی بودن طرح بارزدایی پیشنهادی، این موضوع نمی‌تواند عملکرد طرح بارزدایی و پایداری سیستم را تحت تاثیر قرار بدهد.

۲-۱- مشکلات استفاده از مدل پاسخ فرکانس

مشکل اساسی استفاده از مدل پاسخ فرکانسی برای طرح‌های بارزدایی که در رابطه‌ی (۳) به آن اشاره شده است، در نظر نگرفتن وابستگی ولتاژ بارها در مدل سیستم می‌باشد. معمولاً پس از وقوع یک اغتشاش، کسری توان اکتیو با کسری توان راکتیو همراه می‌باشد که منجر به افت آنی ولتاژ باس‌بارهای سیستم می‌شود. متناسب با این افت، توان اکتیو و راکتیو بارهای سیستم نیز کاهش می‌یابد [۱۸، ۱۹]. بنابراین تغییرات توان اکتیو بارها نیز در واکنش به افت ولتاژ، در محاسبه‌ی مقدار کسری توان اکتیو و شیب فرکانس اندازه‌گیری شده تاثیر می‌یابد. از این رو محاسبه‌ی کسری توان اکتیو تنها از طریق اندازه‌گیری فرکانس و بدون در نظر گرفتن اثر وابستگی ولتاژ بارها می‌تواند گمراه کننده باشد.

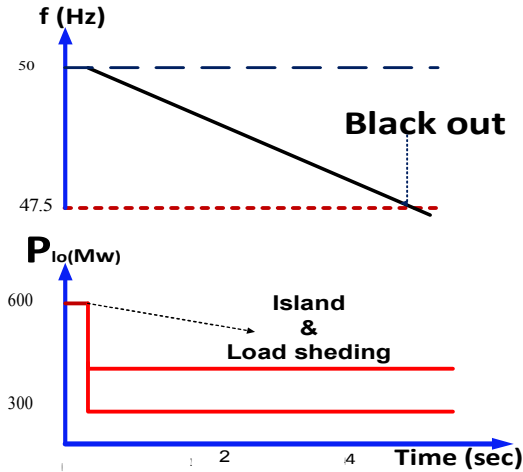
۲-۲- تخمین صحیح مقدار کسری توان اکتیو

طبق اشکال‌های ذکر شده در مدل پاسخ فرکانس، مقدار کسری توان اکتیو تحت تاثیر تغییرات بار نیز می‌باشد. بنابراین باید یک مدل ریاضی برای بار در نظر گرفته می‌شود. یکی از مدل‌های ریاضی برای مدل کردن بار به صورت زیر است [۱۲]:

$$\begin{cases} P_L = \sum_{i=1}^m P_{Lo,i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{o,i}} \right)^{\alpha_i} \\ Q_L = \sum_{i=1}^m Q_{Lo,i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{o,i}} \right)^{\beta_i} \end{cases} \quad (6)$$

در (۶) P_L و Q_L مقادیر لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو سیستم را نشان می‌دهد. همچنین $P_{Lo,i}$ و $Q_{Lo,i}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان اکتیو و توان راکتیو بار، درست قبل از وقوع اغتشاش سیستم است. U_i ولتاژ لحظه‌ای باس بار i ام، $U_{o,i}$ ولتاژ باس بار i ام قبل از وقوع اغتشاش و m تعداد باس‌بارهای سیستم را مشخص می‌کند. α_i فاکتوری است که وابستگی توان اکتیو بار i ام را به تغییرات ولتاژ نشان

همانطور که در شکل مشخص است، زمانی که وابستگی ولتاژ بارها در محاسبه کسری توان در نظر گرفته نمی‌شود، بار مناسبی به منظور جلوگیری از افت فرکانس از سیستم قطع نمی‌شود و ممکن است منجر به خاموشی سیستم شود. در طرف مقابل، با در نظر گرفتن وابستگی ولتاژ بارها در محاسبه کسری توان، بار بیشتری از سیستم قطع می‌شود و فرکانس در کل دوره شبیه‌سازی در مقدار ۵۰ هرتز ثابت باقی می‌ماند.



شکل (۴): اهمیت در نظر گرفتن وابستگی ولتاژ بارها

۳- کنترل سیستم با طرح بارزدایی فرکانس کم

به منظور کنترل فرکانس سیستم پس از محاسبه دقیق کسری توان اکتیو، باید این مقدار کسری در طی مراحل بارزدایی و با توجه به شرایط سیستم از شبکه قطع شود. در طرح بارزدایی پیشنهادی، دو هدف زیر دنبال می‌شود:

۱- حداقل نمودن مقدار بارزدایی

۲- نگه داشتن فرکانس در محدوده مجاز

حداقل نمودن مقدار بارزدایی، به منظور از دست دادن بارهای کمتری در سیستم است. به منظور دستیابی به این هدف، لازم است ذخیره چرخان نیروگاه فعال شود که مستقیماً در سطح فعال‌سازی گاورنرهای توربین سراسر سیستم منعکس می‌شود و در نهایت مقداری از افت فرکانس سیستم را جبران می‌گردد. البته باید در نظر داشت که در چند ثانیه اول شکل‌گیری سیستم جزیره‌ای، کمتر از ۲۰ درصد ذخیره چرخان می‌تواند در اختیار سیستم قرار بگیرد [۱۲]. راه‌حل جالبی برای این مسئله در [۲۰] پیشنهاد می‌شود. به صورتیکه یک سیگنال کنترل گاورنر فرکانس کم، ساخته می‌شود تا پاسخ گاورنر را در طول شکل‌گیری سیستم جزیره‌ای ماکزیمم نماید. با این وجود، کم کردن نرخ افت فرکانس توسط طرح بارزدایی اهمیت ویژه‌ای دارد، به گونه‌ای که زمان کافی در اختیار واکنش ذخیره چرخان قرار بگیرد.

حداقل فرکانس مجاز برای عملکرد تجهیزات الکتریکی سیستم‌های قدرت ۴۷/۵ هرتز است. اگر فرکانس از این مقدار کمتر شود، سیستم به سمت خاموشی می‌رود [۱۶]. در صورتی که مقدار کسری توان محاسبه شده از رابطه‌ی (۹) تنها در یک مرحله از

مقدار بار مورد نیاز برای بارزدایی را در اختیار داشته باشند. با نوشتن رابطه (۸) به صورت پریونیت (۹) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} P_{def} = \frac{P_{tur} - P_{LO}}{P_{LO}} * 100 \\ P_{def} = g_1 * \frac{df_{COI}}{dt} + g_2 \end{cases} \quad (9)$$

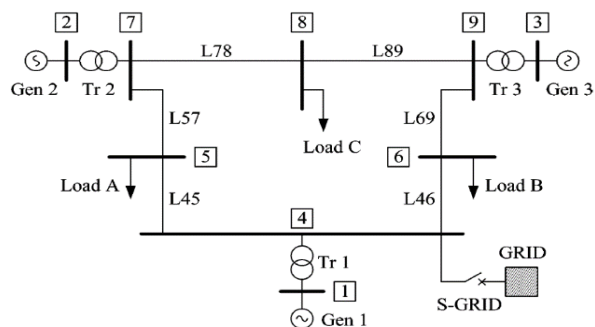
در روابط بالا، g_1 نشان‌دهنده‌ی ضریب تاثیر شیب فرکانس در محاسبه‌ی کسری توان اکتیو می‌باشد. همچنین g_2 که شاخص ولتاژ نامیده می‌شود، نشان‌دهنده‌ی تاثیر تغییرات ولتاژ بار در محاسبه‌ی کسری توان اکتیو است. از (۱۰) و (۱۱) مقادیر این دو پارامتر بدست می‌آید.

$$g_1 = \frac{2 \cdot H_{eq}}{f_N} * 100 \quad (10)$$

$$g_2 = \sum_{i=1}^m P_{LO,i} \left[\left(\frac{U_i}{U_{o,i}} \right)^{\alpha_i} - 1 \right] \cdot \frac{100}{P_{LO}} \quad (11)$$

از (۱۲) شیب فرکانس اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. همانطور که از (۱۲) مشخص است شیب فرکانس اندازه‌گیری شده شامل دو قسمت است: قسمت اول آن (f'_1) شیب فرکانسی است، زمانی که بار شامل توان اکتیو و راکتیو ثابتی باشد. بخش دوم آن (f'_2) مشخص‌کننده‌ی شیب فرکانسی است که توسط تغییرات بار در واکنش به افت ولتاژ تشکیل می‌شود. بنابراین تغییرات بار در واکنش به افت ولتاژ هم در محاسبه‌ی کسری توان اکتیو (۹) و هم در اندازه‌گیری شیب افت فرکانس (۱۲) تاثیر می‌گذارد.

$$\begin{aligned} \frac{df_{COI}}{dt} &= \frac{f_N}{2H_{eq} \cdot S_{eq}} \cdot [(P_{tur} - P_{LO}) \\ &- \sum_{i=1}^m P_{LO,i} \cdot \left| \left(\frac{U_i}{U_{o,i}} \right)^{\alpha_i} - 1 \right|] = f'_1 + f'_2 \end{aligned} \quad (12)$$



شکل (۳): سیستم تست ۹ باسه IEEE

به منظور نشان دادن نتایج حاصل از در نظر نگرفتن وابستگی ولتاژ بارها در محاسبه‌ی کسری توان اکتیو، از یک سیستم ۹ باسه IEEE در شکل (۳) استفاده شده است.

فرض می‌شود که در سیستم تست، کنترل اولیه فرکانس در دسترس نباشد و بارزدایی مقدار کسری توان محاسبه شده، تنها در یک مرحله انجام پذیرد. نتایج این بخش در شکل (۴) نشان داده شده است.

برای تنظیم هر مرحله بارزدایی، مقایسه‌ای بین مشتق اولیه فرکانس هر دو مرحله بارزدایی متوالی با ماکزیمم مشتق اولیه فرکانس انجام می‌گیرد که در شکل (۵) با Δ_i نشان داده شده است. قبل از اینکه بارزدایی مرحله i رخ دهد، درصد تغییرات (df_{COI}/dt) و بارزدایی مرحله i ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{i\%} = \frac{\Delta_i}{df_{COI,max}/dt} * 100 \quad (13)$$

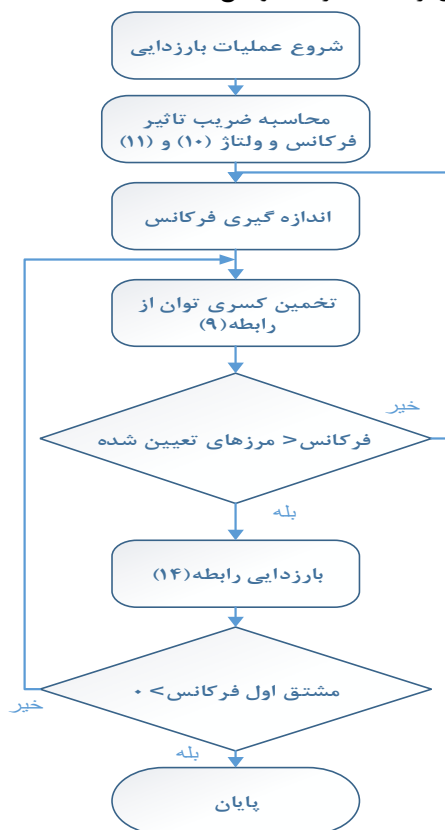
$$\Delta_{last} = \frac{df_{last}/dt}{df_{COI,max}/dt} * 100 \quad (14)$$

$$P'_{shed,i} = P_{shed,i} - \Delta_{i\%} \quad (14)$$

به منظور افزایش اطمینان از طرح بارزدایی پیشنهادی، یک مرحله بارزدایی اضافه‌ای در نظر گرفته می‌شود. اگر فرکانس به علت رویدادهای پیش‌بینی نشده به مقدار f_{min} رسید، این مرحله بارزدایی انجام می‌گیرد.

منظور از $df_{COI,max}/dt$ ، ماکزیمم مشتق فرکانس پس از وقوع اغتشاش و df_{last}/dt مشتق فرکانس در مینیمم فرکانس مجاز (۴۷/۵ هرتز) است. مقدار $P_{shed,i}$ مقدار بار تعیین شده از قبل که در جدول ۱ مقاردهی شده است. مقدار بارزدایی و Δ_i افت فرکانس جبران شده توسط ذخیره چرخان در مرحله i ام می‌باشند. در واقع Δ_i میزان انرژی ذخیره چرخانی است که در طول مراحل بارزدایی به سیستم تزریق می‌گردد و موجب می‌شود در مراحل پیشرو بارزدایی، مقدار بار کمتری از شبکه قطع گردد.

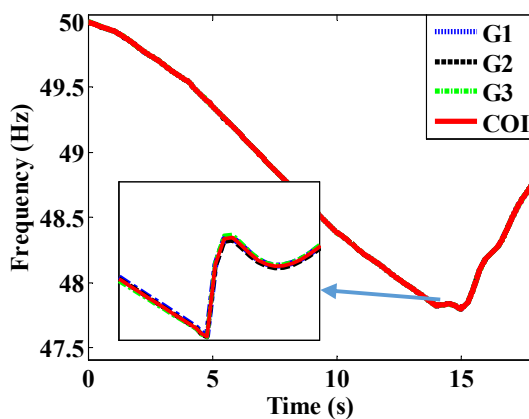
فلوچارت روش ارائه شده در (۷) توضیح داده شده است.



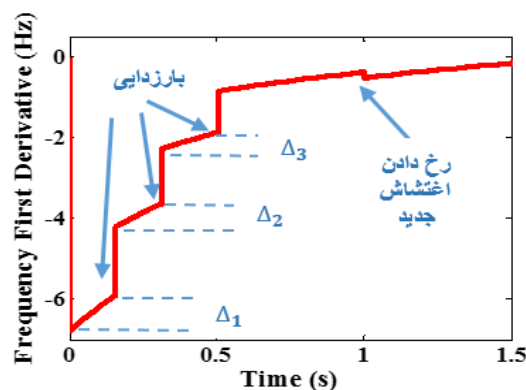
شکل (۷): فلوچارت طرح بارزدایی پیشنهادی

سیستم، بارزدایی شود، انرژی ذخیره چرخان سیستم مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرد. بنابراین سعی می‌شود که این مقدار کسری توان در طی چندین مرحله از سیستم بارزدایی شود. روش‌های متفاوتی در مراجع برای نحوه توزیع مقدار P_{def} وجود دارد. در این مقاله چهار مرحله بارزدایی به ترتیب در مرزهای فرکانسی ۴۹، ۴۸/۸، ۴۸/۴، ۴۸ هرتز انجام می‌گیرد. از الزامات اجرایی طرح بارزدایی پیشنهادی، نظارت بر مشتق اولیه فرکانس $(\dot{\omega}_{COI,pu})$ 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 در $(\dot{\omega}_{COI,pu})$ بین دو مرحله بارزدایی، نمایانگر این است که ذخیره چرخان سیستم، توانسته قسمتی از P_{def} را جبران کند و بنابراین برای این قسمت از P_{def} بارزدایی نیاز نمی‌باشد. شکل (۶)، مشتق اولیه فرکانس (df_{COI}/dt) سیستم ۹ باس IEEE شکل (۳)، را نشان می‌دهد.

شکل (۵) پاسخ فرکانس سیستم ۹ باس IEEE در محل ژنراتورها و فرکانس مرکز اینرسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است فرکانس سیستم در باس‌های مختلف نوسانات قابل توجهی را نشان می‌دهند. این در حالیتیست که فرکانس مرکز اینرسی نوسان بسیار ناچیزی را دنبال می‌کند، که قابل چشم‌پوشی است. لذا بکارگیری فرکانس مرکز اینرسی در روابط می‌تواند نتایج بهتری را به همراه داشته باشد [۱۹].



شکل (۵): پاسخ فرکانس سیستم ۹ باس IEEE در محل ژنراتورهای سیستم و پاسخ فرکانس مرکز اینرسی سیستم

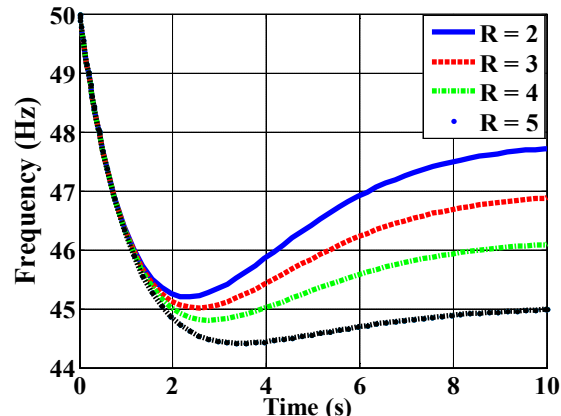


شکل (۶): مشتق اولیه فرکانس در مراحل بارزدایی

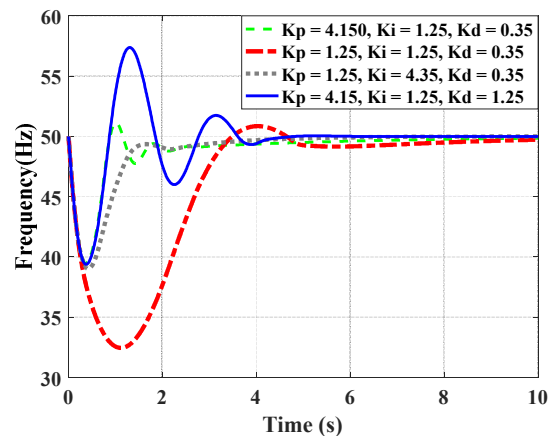
۴- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر جدول ۱ و در نرم‌افزار matlab/Simulink در نظر گرفته شده است. برای تست طرح بارزدایی پیشنهادی، از مدل ساده پاسخ فرکانسی سیستم ۹ باسه IEEE استفاده شده است. در این مدل مطابق با شکل (۱)، مقادیر پارامترها به صورت $R = 0/06$ ، $D = 1/0$ Pu/Hz ، $T_R = 8$ s ، $H = 3/5$ s ، $K_m = 0/085$ است [۱۶].

شکل (۸) تاثیر عملکرد کنترل‌کننده اولیه را برای پایدار نگه‌داشتن فرکانس نشان می‌دهند. زمانی که سیستم دچار کسری توان می‌شود کنترل اولیه سیستم با تغییر دادن شیب افتی گاورنر (R) واحدهای تولیدی سعی در جبران کسری توان دارد. همانطور که در شکل مشخص است به‌ازای سناریوهای مختلفی از تغییر شیب افتی سیستم (R)، فرکانس از محدوده مجاز (۴۷/۵ هرتز) فراتر رفته و موجب خاموشی سیستم قدرت می‌گردد. این رفتار فرکانس برای پایداری شبکه قابل قبول نیست و باید به‌دنبال یک چاره اساسی بود که بتوان جلوی پیشروی افت فرکانس را قبل از به‌خطر افتادن پایداری فرکانس و به‌دنبال آن ناپایداری شبکه را گرفت.



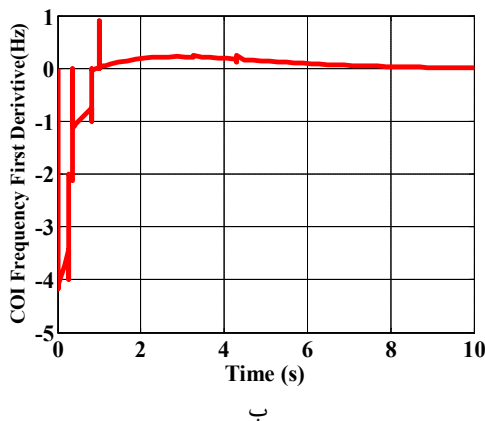
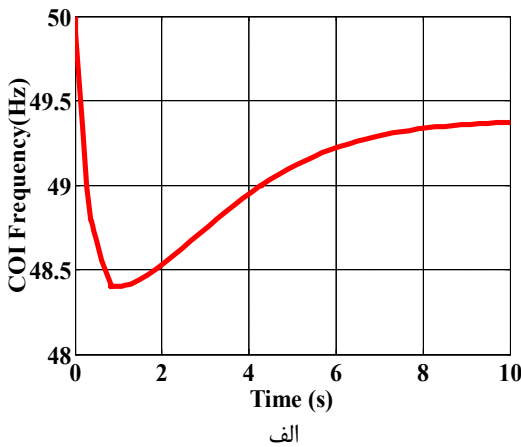
شکل (۸): انحراف فرکانس شبکه به‌ازای شیب‌های افتی مختلف (کنترل اولیه)

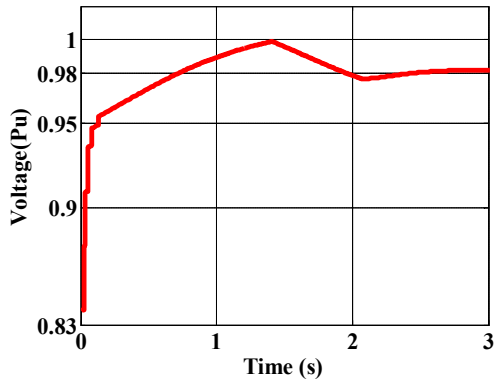


شکل (۹): انحراف فرکانس شبکه به‌ازای ضرایب متفاوت FOPID (کنترل ثانویه)

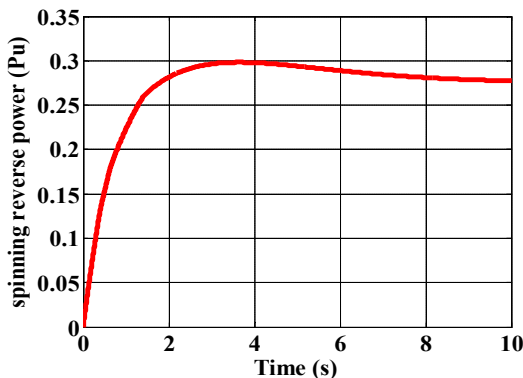
شکل (۹) تاثیر عملکرد طرح‌های کنترل‌کننده اولیه و ثانویه را برای پایدار نگه‌داشتن فرکانس نشان می‌دهند. ضرایب بهینه کنترل-کننده ثانویه (FOPID) از مقاله [۱۲] انتخاب شده است. با توجه به اینکه حداقل فرکانس مجاز برای یک سیستم قدرت با فرض فرکانس نامی ۵۰ هرتز، ۴۷/۵ هرتز می‌باشد، لذا به‌ازای سناریوهای مختلف از تغییر پارامترهای کنترل اولیه و ثانویه، فرکانس از محدوده مجاز فراتر رفته و موجب خاموشی سیستم قدرت می‌گردد. علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته، فرکانس در یک حرکت شارپ به مقادیر زیر ۴۰ هرتز و در نهایت خاموشی شبکه رسیده است، که این رفتار برای پایداری شبکه قابل قبول نیست. بنابراین باید به‌دنبال یک راهکار اساسی بود که بتوان جلوی پیشروی افت فرکانس را قبل از به‌خطر افتادن پایداری فرکانس و به‌دنبال آن ناپایداری شبکه را گرفت.

بررسی اغتشاش‌های گذشته سیستم نشان می‌دهد زمانی که یک سیستم از لحاظ تولید منابع انرژی کوچک است، اینرسی کمی را شامل می‌شود. لذا با رخ دادن یک اغتشاش نسبتاً بزرگ، پایداری سیستم بیشتر در معرض خطر است و در صورتی که عملیات لازم انجام نگیرد سیستم دچار خاموشی می‌شود [۲۰]. با رسم نمودار چگالی احتمال کسری توان اکتیو، برای سیستم ۹ باسه مشخص می‌شود، که ماکزیمم کسری توان رخ داده برای سیستم ۰/۸- پریونیت می‌باشد [۱۷]. نتایج به‌ازای یک اغتشاش ۰/۸- پریونیتی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.





شکل (۱۱): میانگین ولتاژ باس بارهای سیستم

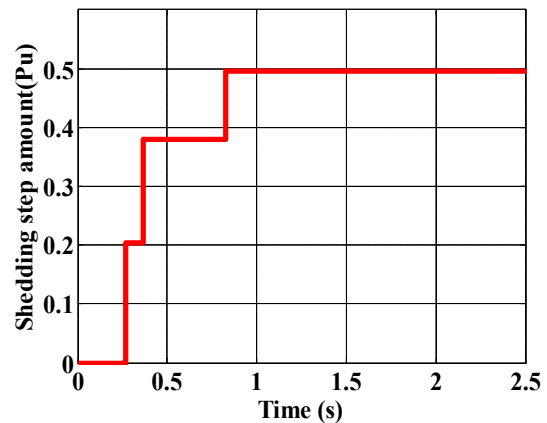


شکل (۱۲): توان انرژی ذخیره چرخان بازگرداننده شده به شبکه

شکل (۱۲)، توان انرژی ذخیره چرخان سیستم را نشان می‌دهد که در طول عملیات بارزدایی می‌تواند به سیستم برگردانده شود و موجب شود که در حین بارزدایی، بار کمتری از شبکه خارج شود. علت منفی بودن نمودار در شروع شبیه‌سازی این است که در حالت نرمال، ظرفیت انرژی ذخیره چرخان در واحدهای ژنراتوری شبکه ذخیره شده است. اگر شبکه به این مقدار انرژی نیاز داشته باشد، این مقدار ظرفیت آزادسازی می‌شود و به عنوان توان تولیدی به شبکه بازگردانی می‌شود. همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است به‌مرور زمان، آزادسازی این توان ذخیره به‌مرور افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن این مقدار ذخیره چرخان در عملیات بارزدایی، در کاهش بار خروجی موثر است.

به‌منظور نشان دادن کارایی طرح پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی حاصل از به‌کارگیری این طرح پیشنهادی برای یک سیستم ۹ باسه IEEE با نتایج شبیه‌سازی حاصل از دو طرح بارزدایی در [۱۶] و [۱۲] مقایسه شده است.

همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، به‌ازای یک اغتشاش ۰/۵۵- پریونیتی، طرح بارزدایی پیشنهادی توانسته ضمن نگه داشتن فرکانس در محدوده‌ی مجاز، بار کمتری را نسبت به دو طرح دیگر از سیستم قطع نماید. در واقع طرح پیشنهادی، ذخیره چرخان سیستم را در روابط بارزدایی بهتر و دقیق‌تر مدل می‌کند و با استفاده از زمانی که در اختیار ذخیره چرخان سیستم قرار می‌دهد، ذخیره چرخان می‌تواند



ج

شکل (۱۰): نمودارهای الف) فرکانس، ب) مشتق فرکانس و ج) مقدار بار قطع شده از طرح بارزدایی پیشنهادی به‌ازای اغتشاش ۰/۸- پریونیت

در شکل (۱۰)، نشان داده شد که طرح بارزدایی پیشنهادی در واکنش به ماکزیمم اغتشاش ممکن سیستم، توانسته با قطع نمودن ۰/۵ پریونیت بار، فرکانس را در محدوده‌ی مجاز نگه دارد و فرکانس دوباره به بیش از ۴۹ هرتز برسد. همچنین ذخیره چرخان سیستم نیز توانسته ۰/۳ پریونیت بار را تغذیه نماید.

جدول (۱): مقادیر بارزدایی از پیش تعیین شده ($\dot{P}_{shed,i}$)

Frequency HZ	49.0	48.8	48.4	48
$\dot{P}_{shed,i}$	$\dot{P}_{shed,1}$	$\dot{P}_{shed,2}$	$\dot{P}_{shed,3}$	$\dot{P}_{shed,4}$
%Load	35	30	25	15

مقدار Δ_i می‌تواند مثبت و یا منفی باشد بنابراین مقدار $\dot{P}_{shed,i}$ می‌تواند بزرگتر و یا کوچکتر از $\dot{P}_{shed,i}$ باشد.

شکل (۱۱) تغییرات میانگین ولتاژ باس بارهای سیستم را نشان می‌دهد. مقدار اولیه ولتاژ سیستم ۰/۹۸۲ پریونیت می‌باشد که پس از وقوع کسری توان افت پیدا می‌کند. در نهایت پس از انجام بارزدایی پیشنهادی با بهره‌گیری مناسب از ظرفیت چرخان سیستم و حذف مناسب بار، ولتاژ به‌مقدار 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 (۱۴): مقایسه بارزدایی طرح پیشنهادی با طرح‌های بارزدایی رایج

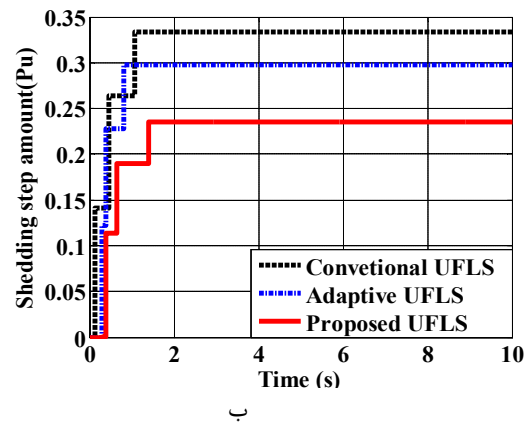
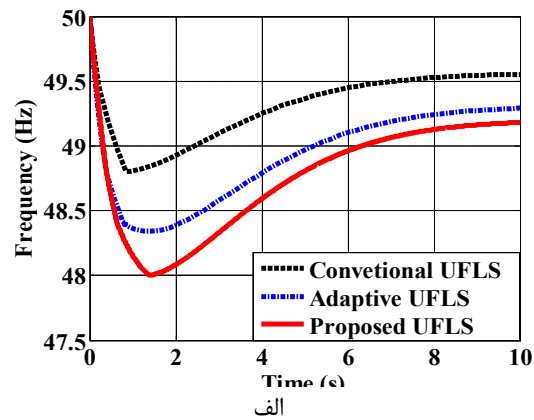
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور تثبیت فرکانس سیستم‌های قدرت، از بارزدایی استفاده شده است و کارایی این روش با مقایسه با دیگر روش‌ها بهبود یافته است. سطوح‌های بارزدایی فرکانس کم بر اساس اندازه‌گیری مشتق اول فرکانس عمل می‌نمایند. اولین مرحله در طرح‌های بارزدایی، تخمین صحیح کسری توان اکتیو می‌باشد. لذا در این مقاله سعی شده است که با در نظر گرفتن اثر ولتاژ در محاسبه کسری توان اکتیو با دقت بهتری انجام گردد. برای ۴ مرحله عملیات بارزدایی طراحی شده، در هر مرحله ابتدا میزان کسری توان جبران شده توسط انرژی ذخیره چرخان مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس قطعی بار انجام می‌گیرد. به‌عنوان نمونه به‌ازای یک اغتشاش ۰/۸ پریونیتی، مقدار ۰/۳ پریونیت توسط انرژی ذخیره جبران می‌گردد و تنها ۰/۵ پریونیت بار از شبکه قطع می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد طرح بارزدایی پیشنهادی توانست ضمن نگهداری فرکانس در محدوده‌ی مجاز، با مدل نمودن دقیق ذخیره چرخان سیستم در روابط بارزدایی، بار کمتری را نسبت به طرح‌های بارزدایی مشابه خود قطع نماید. همچنین عملکرد پروفیل ولتاژ باس بارهای سیستم به کمک روش پیشنهادی بهبود پیدا کرده است که این نشان از بهبود و عملکرد دقیق سیستم دارد. نتایج نشان از تاثیر قابل توجه انرژی ذخیره چرخان در کاهش مقدار بارزدایی دارد. لازم بذکر است که در این روش در این طرح با نگاه عملی به مساله طرح پیشنهادی با چندین طرح دیگر مقایسه شده و عملکرد مطلوب آن نشان داده شده است.

مراجع

- [1] A. Keyhani and A. Chatterjee, "Automatic generation control structure for smart power grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1310-1316, 2012.
- [2] K. Naidu, H. Mokhlis, and A. A. Bakar, "Multiobjective optimization using weighted sum artificial bee colony algorithm for load frequency control," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 55, pp. 657-667, 2014.
- [3] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalerà, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes," in 2001 Power

قسمت زیادی از کسری توان اکتیو را جبران نماید. همانطور که از شکل (۱۳) مشخص است طرح پیشنهادی (قرمز رنگ) عملکرد مطلوبی داشته است.



شکل (۱۳): مقایسه الف) فرکانس و ب) مقدار بار قطع شده طرح بارزدایی پیشنهادی با دو طرح بارزدایی [۱۶] و [۱۲] به‌ازای اغتشاش ۰/۵۵- پریونیت

شکل (۱۴) مقدار بارزدایی طرح پیشنهادی در مقایسه با بارزدایی طرح‌های قبلی را نشان می‌دهد. زمانی که شبکه با یک اغتشاش ۰/۵۵ پریونیتی مواجه می‌شود، طرح بارزدایی مقاله [۱۲] به‌ازای خارج ساختن ۰/۳۳ پریونیت بار یعنی بیشتر از نیمی از بار شبکه، می‌تواند موجب پایداری فرکانس شبکه شود. همچنین بارزدایی به روش مقاله [۱۶] پایداری فرکانس را به‌ازای خارج ساختن ۰/۳ پریونیت بار از شبکه فراهم می‌کند. این در حالی است که در طرح بارزدایی پیشنهادی به دلیل بکارگیری هوشمندانه اثر ظرفیت انرژی ذخیره چرخان در عملیات بارزدایی، مقدار بار خروجی از سیستم ۰/۲۳ پریونیت می‌باشد.

- [19] 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.
- [20] V. N. Chuvychin, N. Gurov, S. Venkata, and R. Brown, "An adaptive approach to load shedding and spinning reserve control during underfrequency conditions," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 1805-1810, 1996.
- [21] Ashton.P, Taylor.G and et al, "Novel application of detrended fluctuation Analysis for state estimation using synchrophasor measurements," IEEE Transactions on power systems, Vol. 28, No. 2, pp. 1930-1938, 2013.
- Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262), 2001, vol. 1, pp. 307-312: IEEE.
- [4] م. ح. م. ف. امیری, "کنترل فرکانس-بار ریز شبکه دو ناحیه ای به وسیله کنترل کننده پیش بین مدل بهینه شده," نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران, دوره: ۱۹, شماره: ۱۴۰۱.
- [5] Q.-C. Zhong and T. Hornik, Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration. John Wiley & Sons, 2012.
- [6] M. Abedini, M. H. Moradi, and S. Hosseinian, "Optimal clustering of MGs based on droop controller for improving reliability using a hybrid of harmony search and genetic algorithms," ISA transactions, vol. 61, pp. 119-128, 2016.
- [7] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, J. Miret, M. Castilla, and L. G. De Vicuna, "Hierarchical control of intelligent microgrids," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 23-29, 2010.
- [8] J. P. Lopes, C. Moreira, and A. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, 2006.
- [9] F. Gao and M. R. Iravani, "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation," IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, no. 2, pp. 850-859, 2008.
- [10] Y. A.-R. I. Mohamed, H. H. Zeineldin, M. Salama, and R. Seethapathy, "Seamless formation and robust control of distributed generation microgrids via direct voltage control and optimized dynamic power sharing," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1283-1294, 2011.
- [11] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop," IEEE transactions on power systems, vol. 25, no. 2, pp. 796-808, 2009.
- [12] 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.
- [13] U. Rudez and R. Mihalic, "A novel approach to underfrequency load shedding," Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 2, pp. 636-643, 2011.
- [14] A. Ketabi and M. H. Fini, "An underfrequency load shedding scheme for islanded microgrids," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 62, pp. 599-607, 2014.
- [15] خ. م. م. دامون, "روشی غیرمتمرکز برای بازیابی شبکه توزیع فعال های مجاور در حضور ریز شبکه متصل به هم," نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران, دوره نوزدهم- شماره اول- بهار ۱۴۰۱ صفحه ۲.
- [16] 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.
- [17] E. J. Thalassinakis and E. N. Dyalynas, "A Monte-Carlo simulation method for setting the underfrequency load shedding relays and selecting the spinning reserve policy in autonomous power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 2044-2052, 2004.
- [18] L. Sigrist, I. Egido, and L. Rouco, "A method for the design of UFLS schemes of small isolated power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 951-958, 2011.