

An Adaptive Under Frequency Load Shedding For Frequency Stabilization of Power Systems Considering Voltage and System Inertia Changes

Hamidreza Rahimi¹, Abdollah Mirzabeigi², Mohammad Hassan Moradi³

¹ M.Sc., Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
h.rahimi@alumni.basu.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, ACECR, Hamedan, Iran.
mirzabeigi@acecr.ac.ir

³ Professor, Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
mhmoradi@basu.ac.ir

Abstract:

Maintaining the network frequency at the nominal value is one of the most important criteria of the power network. When the stability of the system frequency is lost due to the unequal production and consumption, severe damages are caused to the network equipment such as turbines and motors. The under frequency load shedding scheme is one of the most important protection in responsible for stabilizing the frequency of the power system. The main problem of conventional load shedding schemes is the estimation of active power deficiency, which due to not considering the voltage dependence of loads and the correct value of the inertia constant, which causes significant effects on the results and even the collapse of the system. In this article, an adaptive load shedding scheme is proposed, which suggests the voltage-frequency index, assuming the placement of all production resources and loads on one bus; Due to which the system's active power deficiency is well estimated and the appropriate amount of load is cut off the system. In order to show the efficiency of the proposed design, 4 scenarios for IEEE 39-bus system have been implemented in DigSILENT software. The simulation results confirm the proper performance of the proposed design.

Keywords: Frequency Control, Active Power Deficit, Inertia Constant, Voltage-Frequency Index Coefficient, Adaptive under-frequency Load Shedding

Article Type: Research

Received: 12. 06. 2024

Revised: 26. 09. 2024

Accepted: 01. 10. 2024

Corresponding author: Mohammad Hassan Moradi

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran



provided the

1. Motivation of the work

Frequency stability in power systems refers to the ability of these systems to maintain the grid frequency in the face of disturbances between generation and load. This stability is directly related to the ability of the system to maintain or restore balance between load and production. Any instability in the frequency, whether it decreases or increases, can lead to tripping of power plant units or load interruption. The occurrence of various disturbances in power networks can cause changes in frequency, power, voltage and other parameters of the network. These problems can affect the frequency stability in transient conditions and damage the control and protection performance. These processes may act slowly, as in dynamic boilers, or suddenly, as in trip generators, in response to the operation of protective relays in severe disturbances [1]. The first step in the load shedding process is to estimate the active power deficit caused by the desired disturbance event; the main difference in the load shedding articles is related to the way of calculating the active power deficiency. The main problem of conventional load shedding schemes is the estimation of active power deficiency, which due to not considering the voltage dependence of loads and the correct value of the inertia constant, which causes significant effects on the results and even the collapse of the system.[2]

2. Contributions

One of the important issues that is addressed in load shedding studies is how to calculate the active power deficit, so the failure to correctly estimate this deficit can cause an inappropriate load to be disconnected from the network and the frequency of the system to lose its stability power [3]. one of the factors which endangers the correct estimation of the power deficit is not taking into account the effect of the voltage dependence of the network loads, which if not included in the calculations can cause frequency instability. Another important point that should be taken into consideration is the amount of load that is disconnected from the network, which by updating the inertia constant in the load shedding stages, the appropriate amount of load is cut off from the system. The energy produced by the rotating storage of generators can compensate for some of the power deficit and cause less load to be removed from the network. In the following article, it has been tried to consider both the important factors of the effect of

load voltage dependence and updating the inertia constant. The simulation results show that, unlike similar load shedding schemes, the proposed scheme has been able to show good performance.

3. Procedures

For load shedding studies, it is necessary to test the frequency of the network and if it goes out of the nominal value, according to the intensity of its drop, the control plans will be activated and the frequency will return to its nominal value. In cases where the effect of primary and secondary plans is insignificant, it is necessary to use load shedding plan. The load shedding operation is divided into two parts. In the first step, it is necessary to calculate the amount of the active power deficit that has caused the frequency drop using a series of formulas, and in the second step, this power deficit must be compensated by removing the load in several steps so that the frequency returns to a suitable and stable value. One of the points that is used as a positive point in the article is influencing the effect of voltage dependence of loads and the effect of updating the inertia constant, which makes the estimation of the power deficit correctly predicted and the output of the load from the network is done in a smaller amount. To estimate the power deficit, in addition to measuring the frequency, which suggests the voltage-frequency index, assuming the placement of all production resources and loads on one bus; Due to which the system's active power deficiency is well estimated and the appropriate amount of load is cut off the system. Also, in this article, it was shown that to measure the frequency, instead of measuring all busses, the center of inertia frequency can be used. The frequency of the center of inertia makes it possible to stabilize the frequency of different busses.

4. Findings

In this article, it is tried to first address the necessity of using load shedding operations in such a way that in different scenarios and when different disturbances occur, the primary and secondary control schemes are not able to prevent frequency instability and network blackout and need emergency control. Also, the results obtained from the simulation of the proposed load shedding plan are compared with two other common offloading plans. The simulation studies show that with proper load removal from the grid in the form of the proposed load shedding scheme, the frequency and voltage

remain stable within the permissible limit, while this possibility is provided due to the influence of the of updating the inertia constant. It allows the load to be disconnected from the system in a smaller proportion than similar plans [4]. Therefore, in each step of load shedding, the amount of active power produced by the generation of the network's production units is checked, and of course, for load shedding, less output from the load is required.

5. Conclusion

In this paper, an under frequency adaptive load shedding scheme for power systems is proposed. Based on the first derivative of the frequency and taking into account the bus voltage changes and the inertia of the system, this design estimates the power deficit well. Considering that it is difficult and complicated to calculate the effect of bus voltage drop through the collection of primary information of production sources, it is assumed that the whole system is considered as a bus. By simulating and collecting data, the voltage-frequency index coefficient was calculated and introduced. Considering this index, it is possible to estimate the voltage drop caused by the lack of power in the system for this hypothetical bus. By affecting the voltage-frequency index, the power deficiency is estimated with good accuracy. After calculating the power deficit and the load shedding operation, the system can be said to be stable when the frequency derivative becomes positive or zero. In order to show the efficiency of the proposed design, 4 scenarios for IEEE 39-bus system have been implemented in DigSILENT software. The simulation results confirm the proper performance of the proposed design.

delivery, vol. 26, no. 2, pp. 565-575, 2009.

بارزدایی تطبیقی فرکانس کم برای پایداری سازی فرکانس سیستم‌های قدرت باوجود تغییرات ولتاژ و اینرسی شبکه

حمیدرضا رحیمی^۱، عبدالله میرزاییگی^۲، محمد حسن مرادی^{۳*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

h.rahimi@alumni.basu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی - همدان- ایران

mirzabeigi@acecr.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

mhmoradi@basu.ac.ir

چکیده: حفظ فرکانس شبکه در مقدار نامی یکی از مهم‌ترین معیارهای شبکه قدرت است. زمانی که پایداری فرکانس به دلیل عدم برابری تولید و مصرف شبکه از بین می‌رود، صدمات شدیدی به تجهیزات شبکه از قبیل توربین‌ها، موتورهای واردمی‌گردد. طرح بارزدایی فرکانس کم، یکی از مهم‌ترین طرح‌های حفاظتی در سیستم قدرت است و در زمان‌های کمبود شدید توان، مسئولیت نگهداری فرکانس در محدوده مجاز را برعهده دارد. مشکل اصلی طرح‌های بارزدایی مرسوم، تخمین کمبود توان اکتیو است که به دلیل در نظر نگرفتن وابستگی ولتاژ بارها و مقدار صحیح ثابت اینرسی، باعث عدم قطعیت تخمین کمبود توان می‌شود که موجب اثرات قابل توجهی در نتایج و حتی فروپاشی سیستم می‌شود. در این مقاله یک طرح بارزدایی تطبیقی پیشنهاد می‌شود که با فرض قرارگیری کلیه منابع تولیدی و بارها بر روی یک باس، شاخص ولتاژ - فرکانسی را پیشنهاد می‌دهد؛ که به موجب آن کمبود توان اکتیو سیستم به خوبی تخمین زده می‌شود و با بروزسانی ثابت اینرسی در مراحل بارزدایی، مقدار بار مناسب از سیستم قطع می‌گردد. به منظور نشان دادن کارایی طرح پیشنهادی، ۴ سناریو برای سیستم ۳۹ باسه IEEE در نرم‌افزار دیگسایلنت پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب و پایدار طرح پیشنهادی را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: کنترل فرکانس، کمبود توان اکتیو، ثابت اینرسی، ضریب شاخص ولتاژ - فرکانس، بارزدایی تطبیقی فرکانس کم

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدحسن مرادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا

۱- مقدمه

پایداری فرکانس در سیستم‌های قدرت به توانایی این سیستم‌ها برای حفظ فرکانس شبکه در مواجهه با اغتشاشات بین تولید و بار اشاره دارد. این پایداری به‌طور مستقیم به توانایی سیستم در حفظ یا بازیابی تعادل بین بار و تولید مرتبط است. هرگونه ناپایداری در فرکانس، چه کاهش یا افزایش آن، می‌تواند منجر به تریپ واحدهای نیروگاهی و یا قطع بار شود. وقوع اغتشاشات مختلف در شبکه‌های قدرت می‌تواند باعث تغییرات در فرکانس، توان، ولتاژ و سایر پارامترهای شبکه شود. این مشکلات می‌توانند پایداری فرکانس را در شرایط گذرا تحت تأثیر قرار داده و به عملکرد کنترلی و حفاظتی آسیب بزنند. این فرایندها ممکن است به‌طور آهسته، مانند دینامیک بویلرها، یا به‌طور ناگهانی، مانند تریپ ژنراتورها، در واکنش به عملکرد رله‌های حفاظتی در اغتشاشات شدید، عمل کنند [۱].

در چند دهه اخیر، رخداد خاموشی‌های شدید در سیستم‌های قدرت به مشکل اساسی تبدیل شده است، که خسارات جدی اقتصادی و اجتماعی را بر جوامع عرضه کرده است. این پدیده ناشی از افزایش تقاضای بار مصرفی است که سیستم‌های قدرت را در معرض ناپایداری و فروپاشی فرکانس قرار می‌دهد. به همین دلیل، حفظ پایداری و افزایش امنیت فرکانس برای تداوم کار و عملکرد مطلوب سیستم‌های قدرت امری ضروری به نظر می‌رسد [۲-۴]. در سیستم‌های جزیره‌ای، پایداری فرکانس به‌طور خاص یک مسأله مهم است و ممکن است هر اختلال در فرکانس منجر به از دست رفتن بار یا تولید شود. واقعیت اینکه تغییرات لحظه‌ای تقاضای بارها باعث عدم توازن در فرکانس سیستم قدرت می‌شود. پایداری فرکانس یک سیستم قدرت به تعادل میان تولید و مصرف انرژی وابسته است. در صورتی که به دلیل اختلالات ناگهانی و شدید، مانند خطاهای اتصال کوتاه در شبکه‌های انتقال، عملکرد نامناسب رله‌های متناظر، کاهش ناگهانی توان تولیدی و یا قطعی‌های غیرقابل پیش‌بینی ریزش‌بکه، تعادل فرکانس بهم می‌خورد، قابلیت جبران این عدم تعادل توسط مجموعه جرم ماشین‌ها (ثابت اینرسی) بسیار محدود است و توانایی لازم برای متوقف کردن افت فرکانس را ندارد. در صورت ادامه عدم توازن تولید و مصرف، فرکانس به سمت ناپایداری متمایل می‌شود. به‌طور کلی، اگر مقدار توان تولیدی بیشتر از مقدار توان تقاضایی باشد، میزان اختلاف بین توان تولیدی و مصرفی مثبت است. این مقدار اضافی تولید توسط واحدهای تولیدی سیستم کاهش می‌یابد و یا در عناصر ذخیره انرژی نظیر سیستم‌های باتری و چرخ طیار ذخیره می‌شود تا در زمان نیاز به شبکه تزریق شود [۵].

بیشترین نگرانی در سیستم‌های قدرت زمانی است که توان تولیدی نتواند توان مصرفی را تأمین کند. در این شرایط، علاوه بر خسارات نسبتاً سنگین به تجهیزات الکتریکی، توربین‌ها و ژنراتورها، ممکن است خاموشی‌های نسبتاً طولانی و زیان‌های اقتصادی رخ دهد. زمان پاسخ تجهیزات شبکه متغیر است و ممکن است از چند ثانیه (برای پاسخ به فرایندهایی نظیر حذف بار فرکانسی یا کنترلرها و حفاظت‌های ژنراتورها)

تا چند دقیقه (برای پاسخ گاورنرها و توربین‌ها یا تنظیم‌کننده‌های ولتاژ) متغیر باشد [۶]. از آنجایی که هیچ کنترل مستقیمی بر روی بارها وجود ندارد، روش ابتدایی برای حفظ فرکانس، قطع کردن بار شبکه به مقدار مناسب است. این عملیات باید با در نظر گرفتن یک برنامه ویژه انجام شود، زیرا هیچ توجیهی برای خارج کردن بار بیشتر از حد معمول از شبکه وجود ندارد. خارج شدن بار بیش از حد، باعث می‌شود که به منظور برقراری تعادل، رله‌های اضافه بار این مقدار اضافی توان واحد تولیدی را کاهش دهند.

اولین اقدام در فرآیند بارزدایی، تخمین کمبود توان اکتیو ناشی از رخداد اغتشاش مورد نظر می‌باشد؛ که عمده تفاوت مقالات بارزدایی به نحوه محاسبه کمبود توان اکتیو مربوط می‌شود [۷]. در [۸-۹] از یک معادله درجه دوم برای پیش‌بینی فرکانس و تخمین کمبود توان اکتیو استفاده شده است. در [۱۰] بجای استفاده از خود فرکانس، از تخمین مشتق اول فرکانس برای محاسبه کمبود توان اکتیو استفاده می‌شود. در [۳] به کمک اندازه‌گیری مشتق اول فرکانس از یک روش جدید برای تخمین کمبود توان به کمک تست حلقه سخت افزاری استفاده می‌نماید. در [۱۱] به معرفی یک روش بهینه‌سازی برای حداقل کردن کمبود توان با سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده می‌پردازد که از اندازه‌گیری-های ولتاژ و فرکانس به‌صورت همزمان بهره می‌برد. در [۱۲] به دلیل تغییرات اینرسی حاصل از حضور بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، از مشتق اول فرکانس محلی برای عملیات بارزدایی استفاده می‌نماید که البته با چالش‌های جدی چون حضور نوسانات قابل توجه مشتق اول فرکانس روبرو می‌باشد. یکی دیگر از موضوع‌هایی که در مقالات بارزدایی مورد توجه قرار می‌گیرد کاهش مقدار قطعی بار از سیستم می‌باشد که در [۱۳] نیز یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی برای به حداقل رساندن افت فرکانس و همچنین کاهش مقدار بارزدایی پیشنهاد می‌شود. در مقالات قبلی، هم به دلیل محاسبات آفلاین و هم به دلیل عدم تخمین صحیح کمبود توان اکتیو و همچنین در نظر نگرفتن تغییرات اینرسی شبکه و اثر ولتاژ بارها بر روی محاسبه کمبود توان، با مشکل ناپایداری فرکانس روبرو هستند؛ در واقع زمانی که اولین مرحله بارزدایی که همان تخمین کمبود توان اکتیو به صورت غیر واقعی محاسبه شود می‌تواند تأثیر بسزایی در سایر مراحل بارزدایی و در نتیجه فروپاشی سیستم داشته باشد. در مقاله پیشنهادی سعی می‌شود یک روش بارزدایی آنلاین ارائه شود که با تأثیر دادن تغییرات ولتاژ باس بارها در محاسبه کمبود توان اکتیو، و با در نظر گرفتن تغییرات اینرسی، تخمین کمبود توان اکتیو با دقت خوبی محاسبه شود و در ادامه با بکارگیری از ظرفیت انرژی ذخیره چرخان واحدهای تولیدی برای جبران این کمبود توان، عملیات بارزدایی با قطعی بار مناسب‌تری (کاهش قابل توجه قطعی بار) انجام می‌پذیرد. با توجه به خلاصه‌ای که ارائه داده شده است، اقدامات انجام شده در مقاله به شرح زیر است:

۱. پیاده‌سازی طرح بارزدایی پیشنهادی برای بررسی رفتار فرکانس و ولتاژ یک مدل واقعی از سیستم قدرت در محیط نرم‌افزاری دیگسایلنت.

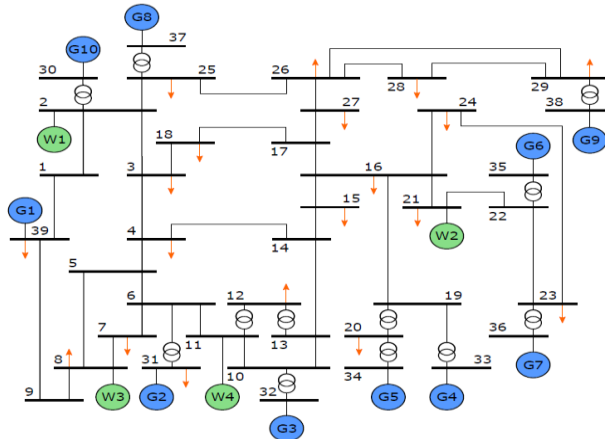
تطبیقی برخوردار نبودند به این ترتیب، نامگذاری شدند. در این طرح، رله‌های پیشرفته می‌توانند نرخ تغییر فرکانس را برای بازه‌های زمانی محاسبه نمایند و زمانی که فرکانس از آستانه‌های تنظیم شده عبور می‌کند بر اثر شدت نرخ تغییر فرکانس در عبور از آستانه‌ها میزان فعالیت کنترلی خود را تنظیم نمایند [۱۳]. با این حال 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 وجود دارد. 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 (کمبود توان اکتیو) است که در فعالیت‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطالعات پایداری فرکانس نشان می‌دهد که بعد از وقوع اغتشاش در شبکه، بین ژنراتورهای سنکرون، نوسانات الکترومکانیکی وجود دارد که در هر ناحیه، این نوسانات در قالب فرکانس نمایان می‌شود. لذا به منظور حذف این نوسانات، فرکانس مرکز اینرسی مطابق رابطه (۱) معرفی گردید که از میانگین وزنی کلیه فرکانس‌های سیستم (فرکانس باس‌هایی که شامل ژنراتور سنکرون است) ساخته می‌شود.

$$f_{COI} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot H_i / \sum_{i=1}^n H_i \quad (1)$$

در رابطه بالا f_{COI} فرکانس مرکز اینرسی سیستم بر حسب هرتز می‌باشد؛ w_i و H_i نیز به ترتیب فرکانس (هرتز) و ثابت اینرسی (ثانیه) ژنراتور سنکرون است. n تعداد باس‌های شامل ژنراتور سنکرون و i باس مورد نظر می‌باشد.

شکل ۱ سیستم تست ۳۹ باس IEEE را نشان می‌دهد. شکل ۲ پاسخ فرکانس سیستم ۳۹ باس IEEE در محل ژنراتورها و فرکانس مرکز اینرسی را به ازای یک اغتشاش مشخص را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۲ مشخص است فرکانس سیستم در باس‌های مختلف نوسانات قابل توجهی را نشان می‌دهند این در حالی است که فرکانس مرکز اینرسی یا همان فرکانس متوسط 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 [۱۵].



شکل (۱): سیستم تست ۳۹ باس IEEE

۲. برورسانی مقدار کمبود توان در تمامی مراحل بارزدایی.

۳. تخمین مناسب ثابت اینرسی سیستم و پایش لحظه‌ای آن

۴. امکان‌سنجی اضافه شدن تولید منابع تجدیدپذیر به سیستم در طول مراحل بارزدایی.

۵. مدل نمودن اثر ظرفیت ذخیره چرخان در روابط به منظور کاهش بارزدایی.

نوآوری این مقاله را می‌توان پایش لحظه‌ای رفتار فرکانس و بارزدایی آنلاین در نظر گرفت که در همان لحظه با توجه به شرایط شبکه، تصمیم‌گیری انجام می‌شود؛ در واقع با پایش لحظه‌ای فرکانس، زمانی که افت فرکانس شروع می‌شود اقدامات لازم جهت محاسبه صحیح کمبود توان اکتیو و اجرایی شدن عملیات بارزدایی پیگیری می‌شود و در زمان بارزدایی، تاثیر ظرفیت انرژی چرخان و تغییرات اینرسی سیستم حاصل از اضافه یا حذف منابع تولیدی به صورت لحظه‌ای پایش و بررسی می‌شود تا ضمن محاسبه مقدار واقعی کمبود توان اکتیو، مقدار بار مناسبی از سیستم قطع گردد تا هم پایداری شبکه تضمین گردد و هم هزینه‌های قطع بار کاهش یابد؛ این درحالی است که در مطالعات مقالات پیشین، این تصمیم‌گیری‌ها به صورت آفلاین و برای یک سیستم شبیه‌سازی شده و نه واقعی انجام می‌گرفته و مواردی که به آن اشاره شد در عملیات بارزدایی در نظر گرفته نمی‌شد.

در ادامه مقاله، سازمان‌دهی به شرح زیر است:

در قسمت دوم، به ارزیابی پایداری فرکانس و بررسی انواع طرح‌های بارزدایی پرداخته می‌شود. در قسمت سوم، رابطه کمبود توان و فرکانس مورد بررسی قرار داده می‌شود. در قسمت چهارم، طرح بارزدایی فرکانس کم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت پنجم، نتایج شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار دیگسایلنت مورد نمایش قرار می‌گیرد. قسمت نهایی، به نتیجه‌گیری اختصاص داده می‌شود.

۲- ارزیابی پایداری فرکانس مرکز اینرسی

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، نیمه‌تطبیقی و تطبیقی تقسیم‌بندی نمود [۵]. 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 و سپس با یک مقدار از پیش تعیین شده مقایسه می‌نماید. 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. 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

فرکانس و ولتاژ هستند. بارهای وابسته به فرکانس، به‌ازای تغییرات فرکانس شبکه تغییر می‌کنند. لذا زمانیکه فرکانس کاهش پیدا می‌کند توان مصرفی بارهای وابسته به فرکانس نیز به نسبت ضریب میرایی (D) کاهش پیدا می‌کند. با در نظر گرفتن این بارها، سیستم می‌تواند مقدار خاصی از کمبود توان را بدون عملیات بارزدایی تحمل نماید.

یکی از اشکالات اصلی مدل‌های پاسخ فرکانسی، در نظر نگرفتن بارهای وابسته به ولتاژ (P_L^v) در مدل سیستم می‌باشد. لذا حضور این بارها در سیستم‌های واقعی موجب می‌شود تغییرات فرکانس مدل پاسخ فرکانسی از مقدار مورد انتظار فاصله بگیرد. معمولاً پس از وقوع یک اغتشاش، کمبود توان اکتیو با کمبود توان راکتیو همراه می‌باشد که منجر به افت آنی ولتاژ باس‌بارهای سیستم می‌شود. متناسب با این افت، به دلیل وابستگی بارهای سیستم به تغییرات ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو بارهای سیستم نیز کاهش می‌یابد لذا این کاهش توان، مطابق با رابطه (۴) و (۲) فرکانس سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای مدل نمودن وابستگی ولتاژ بارها در مدل پاسخ فرکانسی از مدل ریاضی [۱۷] استفاده می‌شود.

$$P_L^v = \sum_{i=1}^m P_{Lo,i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{o,i}}\right)^{\alpha_i} \quad (7)$$

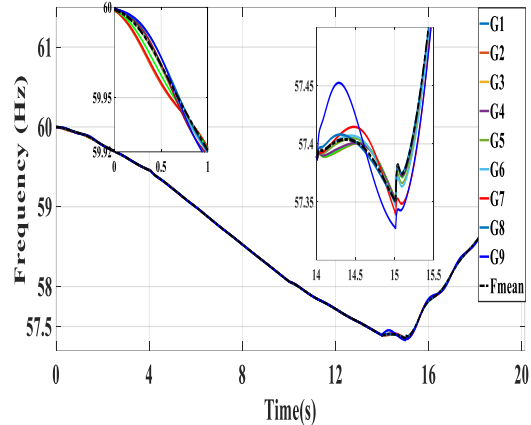
$$Q_L^v = \sum_{i=1}^m Q_{Lo,i} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{o,i}}\right)^{\beta_i}$$

P_L^v و Q_L^v مقادیر لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو سیستم را نشان می‌دهد همچنین $P_{Lo,i}$ و $Q_{Lo,i}$ به ترتیب نشان‌دهنده توان اکتیو و توان راکتیو بار، درست قبل از وقوع اغتشاش سیستم است، U_i ولتاژ لحظه‌ای باس بار i ام و $U_{o,i}$ ولتاژ باس بار i ام قبل از وقوع اغتشاش می‌باشد، m تعداد باس‌بارهای سیستم را مشخص می‌کند. α_i فاکتوری است که وابستگی توان اکتیو بار i ام را به تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد، همچنین β_i فاکتور است که وابستگی توان راکتیو بار i ام را به تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد. مقادیری که برای α_i و β_i در نظر می‌گیرند به ترتیب برابر ۱ و ۲ می‌باشند [۱۷]. به دلیل پیچیدگی‌ها و محاسباتی که برای در نظر گرفتن مدل بارهای وابسته به ولتاژ در مدل پاسخ فرکانسی سیستم وجود دارد بسیاری از طرح‌ها از تاثیر این مدل به اشتباه صرف-نظر می‌کنند [۱۸ و ۱۹] و فرض می‌نمایند که کلیه بارهای شبکه از نوع توان ثابت می‌باشد که این مغایر با سیستم‌های واقعی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که محاسبه کمبود 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 کمبود توان اکتیو (P_{def}) را به صورت زیر در نظر گرفت [۲۰].

رابطه‌ای بین شدت کمبود توان اکتیو (P_{def}) و نرخ تغییرات فرکانس در لحظات اولیه و تغییرات ولتاژ بارها به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$P_{def} = \frac{2H_{eq}}{f_N} \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} + \sum_{i=1}^m P_{Lo,i} \cdot \left[1 - \left(\frac{U_i}{U_{o,i}}\right)^{\alpha_i}\right] \quad (8)$$

موضوع اصلی طرح‌های بارزدایی تطبیقی فرکانس کم، تخمین کمبود توان اکتیو می‌باشد که در ساده‌ترین حالت با استفاده از مشتق اول



شکل (۲): پاسخ فرکانس سیستم ۳۹ باس IEEE در محل ژنراتورهای سیستم و پاسخ فرکانس مرکز اینرسی

۳- رابطه کمبود توان و فرکانس

به‌منظور فراهم نمودن کیفیت توان مناسب برای مصرف‌کنندگان، نگهداری فرکانس تحت هر شرایط متغیر تولید و تقاضا بسیار مهم می‌باشد. با حفظ تعادل توان اکتیو بین مقدار تولید و مصرف، فرکانس در محدوده مجاز و مطلوب نگهداری می‌شود. زمانیکه یک اغتشاش بزرگ در سیستم رخ می‌دهد به‌منظور عملکرد پایدار سیستم مستقل، باید استراتژی‌های کنترلی خاصی بکار گرفته شوند. اساس عملکرد این کنترل‌ها بر اساس اختلاف بین مقدار توان تولیدی ($P_{Generate}$) و مقدار توان مصرفی (P_{Demand}) می‌باشد.

$$\Delta P_e = P_{Generate} - P_{Demand} \quad (2)$$

به دلیل اینکه فرکانس سیستم (Δf) با تغییرات توان خالص (ΔP_e) تغییر می‌کند. تغییرات فرکانس سیستم از (۳) قابل محاسبه است.

$$\Delta f = \Delta P_e / K_{sys} \quad (3)$$

K_{sys} ثابت مشخصه فرکانس سیستم است. با توجه به اینکه یک تاخیر زمانی ذاتی بین تغییرات فرکانس سیستم و تغییرات توان وجود دارد، تابع انتقال برای تغییرات فرکانس سیستم نسبت به تغییرات پریونیتی توان خالص، توسط رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$G_{sys}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P_e} = \frac{1}{K_{sys} (1 + sT_{sys})} = \frac{1}{D + Ms} \quad (4)$$

$M = 2H$
 $G_{sys}(s)$ تابع تبدیل سیستم می‌باشد که نسبت خروجی سیستم را به ورودی محاسبه می‌کند. پارامترهای D ، M ، T_{sys} ، S به ترتیب ثابت اینرسی معادل تجهیزات بر حسب ثانیه، ضریب میرایی بار، ثابت زمانی بر حسب ثانیه و مولفه لاپلاسین تابع تبدیل سیستم قدرت می‌باشند [۱۶].

$$P_{Demand} = P_L^{constant} + P_L^f + P_L^v \quad (5)$$

$$P_L^f = D \cdot \Delta f \quad (6)$$

مطابق رابطه (۵) تا (۷) بارهای شبکه را می‌توان به ۳ گروه تقسیم نمود: بارهای توان ثابت ($P_L^{constant}$)، بارهای وابسته به فرکانس (P_L^f) و بارهای وابسته به ولتاژ (P_L^v). بارهای توان ثابت که مستقل از تاثیرات

موجب کاهش توان مصرفی بارها می شود کاهش مصرفی بارها موجب کاهش مشتق اول فرکانس اندازه گیری شده، می شود. هرچقدر میزان کاهش ولتاژ بارها بیش تر باشد کاهش مشتق اول فرکانس نیز بیش تر می باشد (مشتق اول فرکانس بهبود می یابد) زیرا مطابق با رابطه (۱۱) با کاهش ولتاژ ثانویه بارها، مقدار شاخص ولتاژ بزرگ تر می شود در این صورت مطابق با رابطه (۱۱) مقدار مشتق اول فرکانس بزرگ تر می شود بنابراین می توان رابطه بین تغییرات توان ناشی از تغییرات ولتاژ بارها را با تغییرات مشتق اول فرکانس را با یک تناسب نشان داد.

$$g_k = B_k / (A \cdot \frac{df_k}{dt}) \quad (12)$$

رابطه (۱۲) بیان می کند که به ازای یک اغتشاش رخ داده در سیستم و با مشخص شدن مشتق اول فرکانس و نیز محاسبه شاخص ولتاژ مربوطه، می توان یک پارامتر جدیدی به نام شیب شاخص ولتاژ - فرکانس (g_k) تعریف نمود. به عبارت دیگر این شیب نشان می دهد که به ازای یک اغتشاش توان، شاخص ولتاژ مربوطه با چه نرخي موجب کاهش مشتق اول فرکانس اندازه گیری شده، می شود که با ضرب نمودن این ضریب در مشتق اول فرکانس، مقدار کمبود توان با دقت بالایی تخمین زده می شود. می توان شیب شاخص ولتاژ - فرکانس معادل سیستم (g)، را با میانگین گیری از شیب شاخص های ولتاژ - فرکانس (g_k)، تخمین زد. k تعداد شبیه سازی های انجام شده جهت محاسبه شاخص مورد نظر می باشد. با جایگذاری واحد پارامترها، شیب شاخص ولتاژ - فرکانس بدون واحد در نظر گرفته می شود.

$$g = \sum_{k=1}^k g_k / k \quad (13)$$

اگر مقادیر بدست آمده برای شیب شاخص ولتاژ - فرکانس رابطه (۱۱) به ازای سناریوهای مختلف کمبود توان، تقریباً مشابه باشد مقدار شیب شاخص ولتاژ معادل سیستم (۱۳) با دقت خوبی تخمین زده می شود که نمایانگر صحت روش محاسباتی می باشد. شاخص ولتاژ معادل سیستم به صورت زیر با مشتق اول فرکانس متناسب می گردد.

$$B = g \cdot A \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \quad (14)$$

با مشخص شدن شیب شاخص ولتاژ - فرکانس می توان با جایگزین نمودن شاخص ولتاژ رابطه (۱۴) در رابطه (۹)، کمبود توان را به صورت رابطه زیر تخمین زد.

$$P_{def} = A \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} + g \cdot A \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} \quad (15)$$

$$P_{def} = A \cdot (1 + g) \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0}$$

افت ولتاژ بارهای سیستم در واکنش به اغتشاش رخ داده در سیستم موجب می شود فرکانسی که توسط رله های فرکانس اندازه گیری می شود و برای انجام فعالیت های لازم به واحد کنترل مرکزی اعلام می شود کمتر از مقدار واقعی افت فرکانس باشد لذا می توان به کمک ضریب شیب شاخص ولتاژ - فرکانس (g)، این کاهش فرکانس اندازه گیری شده را جبران نمود. مطابق رابطه (۱۵) با تاثیر دادن شیب شاخص ولتاژ - فرکانس بر فرکانس اندازه گیری شده توسط رله، فرکانس واقعی ناشی از رخداد اغتشاش توان بدست می آید که با جایگزین ساختن

فرکانس و به کمک معادله نوسان روتور محاسبه می شود [۲۱]. با اضافه کردن تاثیر ولتاژ تخمین مقدار کمبود توان به شیب اولیه فرکانس (df_{Hz}/dt) در لحظه ی وقوع اغتشاش و ثابت اینرسی معادل سیستم (H_{eq}) و رابطه تغییرات ولتاژ وابسته می باشد. f_N فرکانس نامی سیستم می باشد که در مقاله ۶۰ هرتز در نظر گرفته شده است و کمبود توان اکتیو به صورت پریونیتی استفاده می شود. 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 باس بارها مشخص و در دسترس باشند. بدست آوردن این مقادیر برای محاسبه مقدار شاخص ولتاژ کار آسانی به نظر نمی رسد. پس منطقی است که روشی ارائه شود که تاثیر وابستگی ولتاژ را به نحو دیگر در تخمین کمبود توان محاسبه می نماید. لذا در قسمت طرح بارزدایی پیشنهادی، سعی می شود راه حل ساده تری برای تاثیر دادن اثر وابستگی ولتاژ بارها پیشنهاد شود.

۴- طرح بارزدایی پیشنهادی

با توجه به توزیع منابع تولیدی توان در سراسر سیستم قدرت و به دلیل مشخصات پیچیده و متفاوتی که هرکدام از واحدهای تولیدی دارند بدست آوردن مستقیم شاخص ولتاژ بارها از طریق جمع آوری پارامترهای شبکه مشکل و غیرممکن به نظر می رسد لذا می توان فرض نمود که در سیستم های قدرت مستقل که مشمول ریزش شبکه های جزیره ای نیز می شوند تمامی واحدهای تولیدی به عنوان یک واحد کلی در نظر گرفته می شوند و بر روی یک باس واحد از سیستم قرار می گیرند. با در نظر گرفتن این فرضیه، می توان افت ولتاژ ناشی از کمبود توان رخ داده در سیستم را برای این باس به خوبی تخمین زد که متناسب با متوسط افت ولتاژ سایر باس های سیستم قدرت نیز می باشد لذا می توان به کمک شبیه سازی و روش های آماری، شاخص ولتاژ - فرکانس را برای سیستم قدرت محاسبه نمود. با بدست آمدن شاخص ولتاژ - فرکانس برای شبکه، کمبود توان با دقت خوبی تخمین زده می شود.

بر اساس اطلاعات گذشته سیستم و یا شبیه سازی سیستم قدرت، با اعمال کمبود توان های مختلف (ΔP_k^{set}) به شبکه، مشتق اولیه فرکانس های متفاوتی (df_k/dt) بدست می آید با مشخص بودن مقدار ثابت اینرسی سیستم، مطابق با رابطه (۹) مقادیر شاخص های ولتاژ (B_k) متناسب با این کمبود توان ها محاسبه می شود.

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

$$A = 2H_{eq}/f_N \quad (10)$$

$$B_k = \Delta P_k^{set} - \frac{2H_{eq}}{f_N} \cdot \frac{df_k}{dt} \Big|_{t=0} \quad (11)$$

پارامتر k تعداد کمبود توان های اعمالی به سیستم را نشان می دهد. (ΔP_k^{set}) کمبود توان هایی مختلفی است که برای اعمال به سیستم انتخاب شده اند. معمولاً پس از وقوع یک اغتشاش، کمبود توان اکتیو با کمبود توان راکتیو همراه می باشد لذا با کاهش کمبود توان راکتیو، تمامی ولتاژ بارهای سیستم به صورت آنی افت پیدا می کند که

$$\dot{P}_{shed,i} = P_{shed,i} - \Delta_{i\%} \quad (20)$$

$$\Delta_{i\%} = \Delta_i / (df_{max}/dt) \quad (21)$$

$$\Delta_i = \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=m^+} - \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=(m+1)^-}$$

از الزامات اجرایی طرح بارزدایی پیشنهادی، نظارت بر مشتق اولیه فرکانس ($\frac{df_{Hz}}{dt}$) است. 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 نیست. برای تنظیم هر مرحله بارزدایی، مقایسه‌ای بین مشتق اول فرکانس هر دو مرحله بارزدایی متوالی با ماکزیمم مشتق اولیه فرکانس انجام می‌گیرد [۲۲].

$\dot{P}_{shed,i}$ مقدار بارزدایی و Δ_i افت فرکانس جبران شده توسط ذخیره چرخان در مرحله i ام می‌باشد. مقدار Δ_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 Δ_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 Δ_i مقدار منفی باشد یعنی منابع تولیدی نتوانستند در مرحله i ام با افزایش توان تولیدی انتظارات را برآورده کنند. m^+ و $(m+1)^-$ به ترتیب لحظات بعد از بارزدایی مرحله m و قبل از عملیات بارزدایی مرحله $(m+1)$ می‌باشد؛ در واقع برای مرحله بارزدایی بعدی $(m+1)$ باید مقدار افت مشتق اول فرکانس مورد بررسی قرار بگیرد که بعد از بارزدایی مرحله m چه مقدار از این افت فرکانس توسط انرژی ذخیره چرخان جبران گردیده است که در این صورت، این مقدار از $\dot{P}_{shed,i}$ قطعی مرحله جدید کسر می‌گردد تا به این صورت اثر مثبت انرژی ذخیره چرخان در کاهش مقدار بار نمایان شود.

۴-۱- بررسی ثابت اینرسی سیستم

مطابق با روابطه (۹) و (۱۰) ثابت اینرسی سیستم می‌تواند بر پاسخ فرکانس شبکه تاثیر زیادی داشته باشد. به‌ازای یک کمبود توان مشخص، ثابت اینرسی بزرگ‌تر موجب نرخ افت فرکانس کم‌تر شده و سبب می‌شود که واحدهای تولیدی زمان بیش‌تری را برای بازگرداندن فرکانس از طریق فعال‌سازی ذخیره چرخان داشته باشند. در حالیکه به‌ازای ثابت اینرسی کوچک‌تر، پاسخ ولتاژ و فرکانس شبکه مقدار ضعیف‌تری دارند لذا بکارگیری صحیح مقدار ثابت اینرسی در روابط بارزدایی اهمیت فراوانی دارد [۲۳]. زمانیکه ثابت اینرسی واحدهای تولیدی مشخص باشد ثابت اینرسی معادل بر اساس توان ظاهری (S_i) و ثابت اینرسی H_i واحدهای تولید پراکنده از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۲۵].

$$H_{eq} = \sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i / \sum_{i=1}^n H_i \quad (22)$$

مشتق اول فرکانس واقعی در رابطه (۱۵) می‌توان کمبود توان اکتیو را محاسبه نمود.

$$\frac{df_{Hz}}{dt}^{actual} = (1 + g) \cdot \frac{df_{Hz}}{dt}^{measurment} \quad (16)$$

$$P_{def} = A \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=0} \quad (17)$$

با محاسبه کمبود توان از طریق رابطه (۱۷)، مشکلات ناشی از تاثیر وابستگی ولتاژ بارها در تخمین کمبود توان حل می‌شود لذا با مشخص بودن ضرایب A و g از رابطه‌های (۱۰) و (۱۳) می‌توان با مشتق اول فرکانسی که بعد از وقوع اغتشاش اندازه‌گیری می‌شود کمبود توان سیستم را با دقت بالایی تخمین زد.

در سیستم‌های قدرت، توان خروجی بعضی از واحدهای تولیدی مانند توربین‌های بادی یا سلول‌های خورشیدی فتوولتایک ممکن است به‌صورت ناگهانی تغییر نماید لذا طرح پیشنهادی برای ریزشکه‌ها باید شرایط بیش‌تری را نسبت سیستم‌های قدرت معمولی در نظر بگیرد از این رو باید در طرح بارزدایی پیشنهادی تغییرات توان منابع انرژی تجدیدپذیر در طول پروسه بارزدایی بررسی و واکنش مناسبی اتخاذ گردد. زمانیکه به‌علت شرایط محیطی، توان تولیدی توسط توربین‌های بادی یا سلول‌های خورشیدی به‌صورت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند تاثیرش که به‌صورت تغییر پله‌ای در مشتق اول فرکانس ظاهر می‌شود و از آنجایی که فرکانس به‌صورت پیوسته توسط رله‌های فرکانس به واحد کنترل مرکزی گزارش می‌شود می‌توان با مشاهده یک افت پله‌ای مشتق اول فرکانس، متوجه کمبود توان جدیدی شد و متناسب با آن تصمیمات لازم را اتخاذ نمود.

$$P_{def}^{update} = A \cdot (1 + g) \cdot \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}} \quad (18)$$

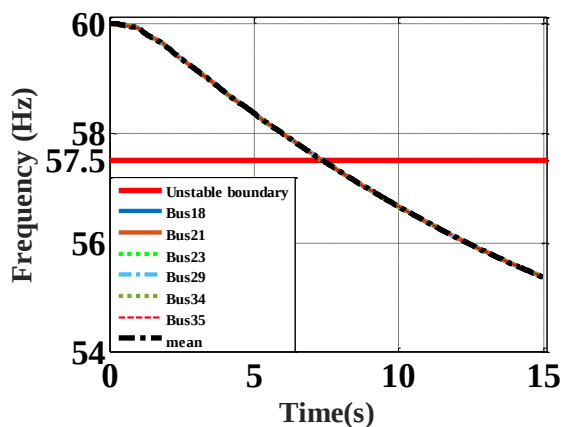
$$P_{def}^{addittional} = A \cdot (1 + g) \cdot \left(\frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}^+} - \frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}^-} \right) \quad (19)$$

منظور از t_{im} لحظه‌ای می‌باشد که به‌علت کمبود توان اضافی، یک تغییر پله‌ای در مشتق اول فرکانس ($\frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}}$) ظاهر می‌شود. $\frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}^+}$ و $\frac{df_{Hz}}{dt} \Big|_{t=t_{im}^-}$ به ترتیب مشتق اول فرکانس درست قبل و بعد از کمبود توان جدید می‌باشد. $P_{def}^{addittional}$ کمبود توان اضافی که به سیستم وارد می‌شود. P_{def}^{update} کمبود توان سیستم قدرت که بعد از وقوع کمبود توان جدید بروزرسانی می‌شود و در مراحل بعدی بارزدایی جبران می‌گردد.

حال که مقدار کمبود توان مشخص شد، باید بارزدایی انجام پذیرد. با توجه به قوانین حفاظتی فرکانس، فضای مانور فرکانس در محدوده مجاز بین $59/2$ و $57/5$ هرتز می‌باشد که البته باید تا حد امکان هرچه سریع‌تر فرکانس به مقدار نامی خود بازگردد. بنابراین مرزهای فرکانسی طرح بارزدایی پیشنهادی در مقادیر $59/2 - 58/8 - 58/4 - 58$ هرتز انتخاب می‌گردند تا تعاملی بین بازگشت سریع فرکانس و استفاده مناسب از ظرفیت انرژی ذخیره چرخان وجود داشته باشد. لذا سعی می‌شود در محاسبات بارزدایی پیش فرض قطعی بار را به ترتیب 35 ، 25 ، 20 و 15 درصد از کمبود توان قرار داد [۲۲]. رابطه (۲۰) مقدار بارزدایی هر مرحله را نشان می‌دهد.

۱-۵- سناریو ۱

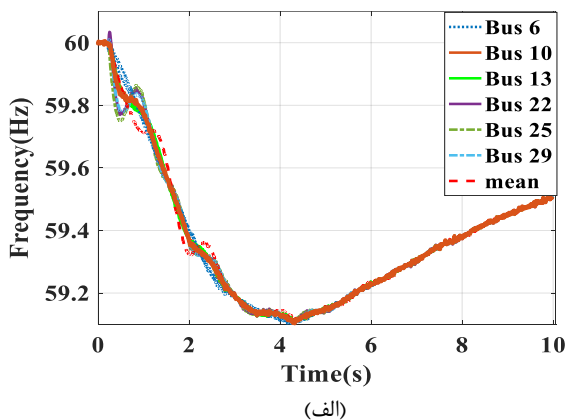
در اولین سناریو فرض می‌شود که ژنراتور G_5 و G_6 که در مجموع توان ۱۱۰۵ مگاوات را به شبکه تزریق می‌کند در ثانیه ۰/۵ شبیه‌سازی به‌دلیل تریپ دادن رله، از سیستم خارج می‌گردند. همین امر موجب کمبود طرح ۰/۱۸- پریونیتی می‌شود. در این سناریو فرض می‌شود هیچ طرح بارزدایی برای سیستم قدرت تعبیه نشده باشد. همانطور که از شکل ۵ مشخص است فرکانس تنها ۶ ثانیه بعد از وقوع اغتشاش به سمت ناپایداری (محدوده فرکانسی پایین‌تر از ۵۷/۵ هرتز) میل می‌کند؛ در واقع حضور کنترل کننده‌های اولیه و ثانویه سیستم نتوانستند مانع از فروپاشی فرکانس و خاموشی سیستم قدرت گردد لذا نیاز به یک کنترل اضطراری بارزدایی در فرکانس‌های کم، واجب می‌شود.



شکل (۵): فرکانس‌های مختلف سیستم ۳۹ باسه با خروج همزمان ژنراتورهای ۵ و ۶

۲-۵- سناریو ۲

در دومین سناریو فرض می‌شود که بارهایی که توسط شبکه تغذیه می‌شود ۶۱۴۳ مگاوات می‌باشد و در ثانیه ۱ ژنراتور باس ۳۲ (ژنراتور G_3) به همراه خط ارتباطی ۵ و ۶ همزمان به دلیل تریپ دادن رله از سیستم خارج می‌گردند که موجب ایجاد کمبود توان ۰/۲۴ پریونیتی (۱۴۷۵ مگاواتی) می‌شوند.



(الف)

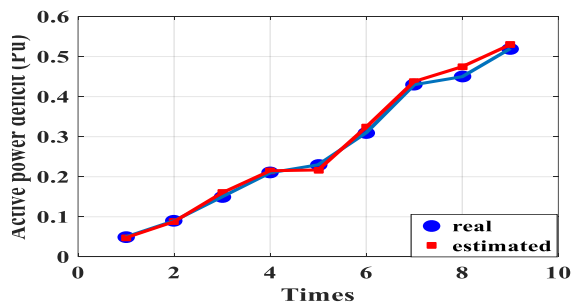
جدول (۱): سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده

سناریوها	توضیح
۱	تریپ همزمان ژنراتورهای ۵ و ۶ در ثانیه ۰/۵
۲	تریپ همزمان ژنراتور ۳ و خط ارتباطی (۵-۶) در ثانیه ۱
۳	باز وصل منبع توربین بادی به باس ۲۱ در ثانیه ۲/۵
۴	خروج ژنراتور ۴ در ثانیه ۳/۵ بعد از خروج همزمان ژنراتور ۵ و ۶ در ثانیه ۰/۲

شکل ۴ و جدول ۲ تخمین کمبود توان اکتیو به کمک شیب شاخص ولتاژ - فرکانس سیستم ۳۹ باسه را به ازای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد همانطور که مشخص است با در نظر گرفتن ضریب شاخص ولتاژ فرکانس می‌توان کمبود توان را با یک دقت خوب تخمین زد.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه شیب شاخص ولتاژ - فرکانس سیستم ۳۹ باسه

Case	$\Delta P (p \cdot u)$	$df/dt (p \cdot u)$	g
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
۶	۰/۳	۰/۵۶۸۲	۰/۰۵۵۵
۷	۰/۳۵	۰/۶۶۳۰	۰/۰۵۵۴
۸	۰/۴	۰/۷۵۷۸	۰/۰۵۵۴
۹	۰/۴۵	۰/۸۵۲۶	۰/۰۵۵۳



شکل (۴): تخمین کمبود توان سیستم ۳۹ باسه به ازای سناریوهای مختلف

$$g = \frac{\sum_{k=1}^n g_k}{k} = 0/055$$

$$g \cong g_k$$

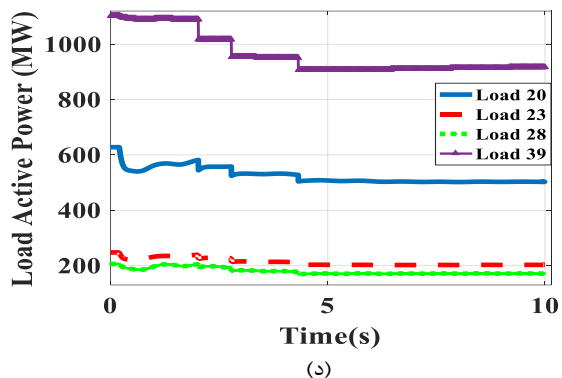
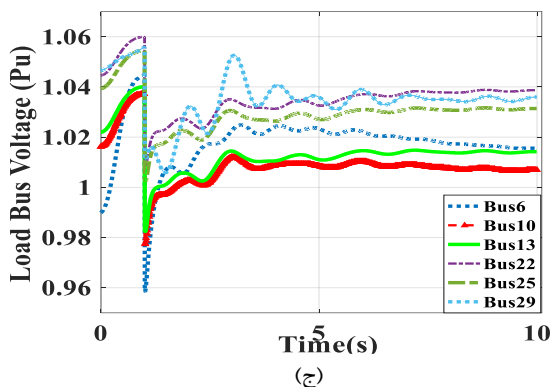
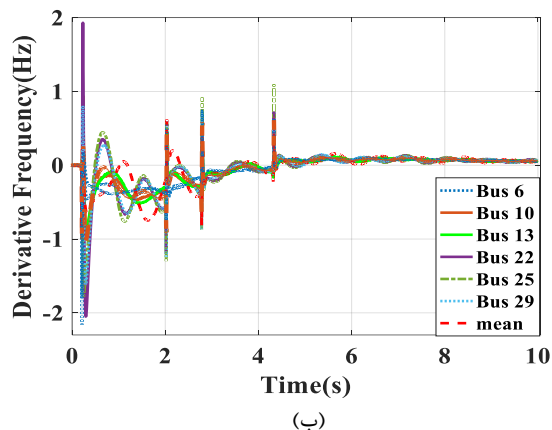
(۲۴)

مقدار نامی (۱ p.u) خود برمی گردد. شکل ۶ (د)، مقدار بار قطع شده از باس‌های مختلف سیستم را نشان می‌دهد که در سه مرحله و به ازای این بارزدایی، سیستم در حالت پایدار باقی مانده است. شایان ذکر است که طرح بارزدایی پیشنهادی توانسته علاوه بر پایدار ساختن فرکانس شبکه، به بهبود پایداری ولتاژ شبکه نیز کمک کند.

۳-۳-۵ سناریو ۳

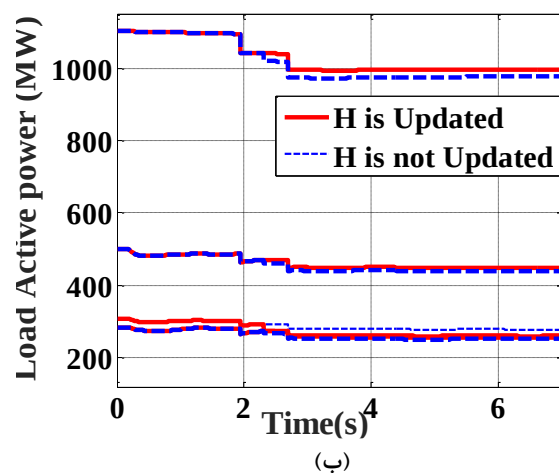
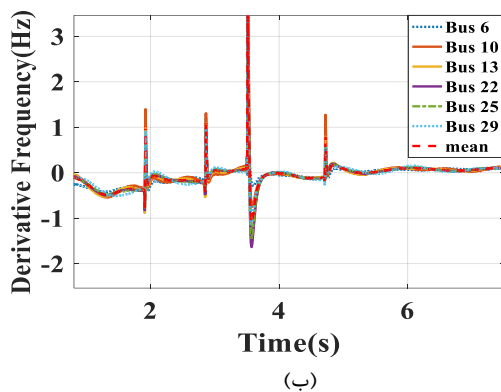
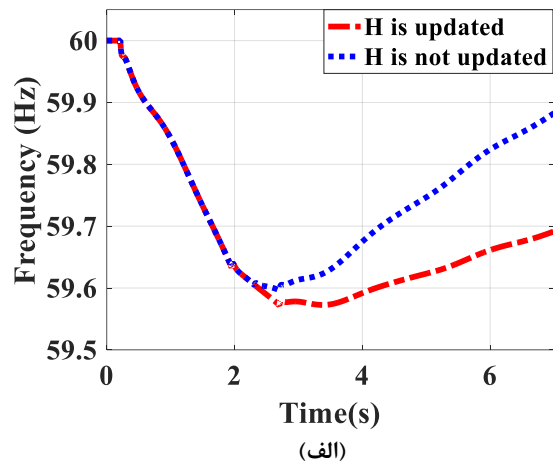
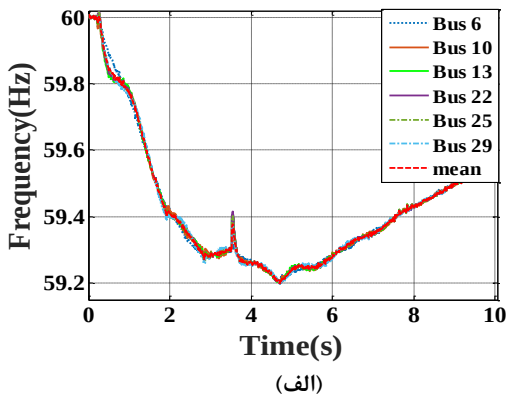
در این سناریو فرض می‌شود که در حین عملیات بارزدایی بر اثر وقوع اغتشاش در ثانیه اول شبیه‌سازی، در ثانیه ۲/۵ نیز سیستم توربین بادی به شبکه برگشته و می‌تواند توان نامی را به شبکه تزریق کند. در نظر گرفتن توان توربین بادی باعث تغییرات مشتق اول فرکانس می‌گردد [۲۵]. لذا با اضافه شدن یک منبع جدید در سیستم قدرت، اینرسی شبکه بیشتر می‌شود و همین افزایش اینرسی می‌تواند موجب جبران بخشی از افت فرکانس شود که داشتن یک استراتژی مناسب در این مواقع باعث می‌شود بار کمتری نسبت به قبل از شبکه قطع گردد و همانطور که در شکل ۷ (الف) مشخص است زمانی که منبع توربین بادی در مدار قرار می‌گیرد طرح کنترلی اجازه می‌دهد که فرکانس با شیب ملایم‌تری به سمت مقدار نامی برگردد و آخرین مرحله بارزدایی انجام نگیرد تا مابقی کمبود توان توسط توربین بادی جبران گردد. شکل ۷ (ب) نیز بارهای قطع شده از سیستم را برای زمانی که ثابت اینرسی روزرسانی می‌شود نشان می‌دهد که نسبت به حالتی که ثابت اینرسی ثابت باقی می‌ماند بار کمتری را از شبکه قطع می‌نماید لذا طرح بارزدایی می‌تواند هزینه‌های قطع بار را کاهش و به صرفه‌تر عمل نماید.

عدم تخمین صحیح ثابت اینرسی می‌تواند موجب ناپایداری فرکانس گردد زیرا به ازای مقادیر پایین‌تر ثابت اینرسی نسبت به مقدار واقعی آن، تخمین کمبود توان اکتیو نیز نسبت به مقدار صحیح آن کمتر تخمین زده شده و همین موجب می‌شود بار نامناسب و کمتری نسبت به مقدار بار مورد نیاز از شبکه قطع شود لذا فرکانس فراتر از محدوده مجاز ۵۷/۵ هرتز حرکت می‌کند و موجب ناپایداری فرکانس و شبکه می‌شود؛ همچنین تخمین بالاتر از مقدار واقعی ثابت اینرسی نیز موجب ایجاد پدیده بالا فرکانسی می‌شود. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس به بالای (۳/۰٪ + ۶۰) هرتز افزایش پیدا کند که برای حل این موضوع باید دنبال تعریف کنترل‌های جدید (بریکرهای بالا فرکانسی) بود که هزینه و پیچیدگی‌های خاص خود را به همراه دارد. لذا تخمین صحیح ثابت اینرسی از اهمیت ویژه‌ای در روابط بارزدایی برخوردار است.



شکل ۶- نمودارهای (الف) فرکانس (ب) مشتق اول فرکانس (ج) ولتاژ باس بارها (د) توان اکتیو بارهای سیستم ۳۹ باسه حاصل از بکارگیری طرح بارزدایی پیشنهادی برای اغتشاش ۲۴ pu -۰/

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 (ج)، تغییرات میانگین ولتاژ باس بارهای سیستم را نشان می‌دهد که در نهایت پس از انجام بارزدایی پیشنهادی با حذف مناسب بار، ولتاژ به

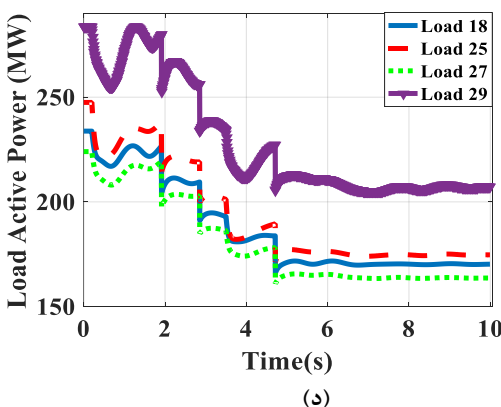
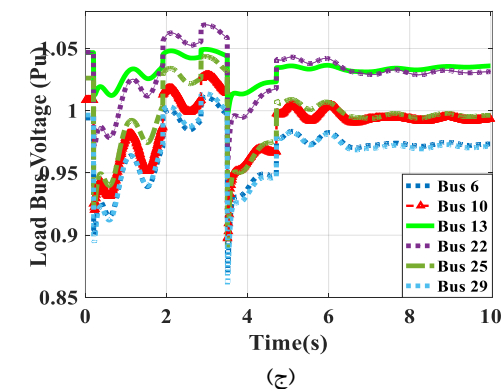


شکل (۷): نمودارهای (الف) فرکانس (ب) توان اکتیو بارهای سیستم ۳۹ با سه به ازای باز وصل توربین بادی در باس ۳۱

۴-۵- سناریو ۴

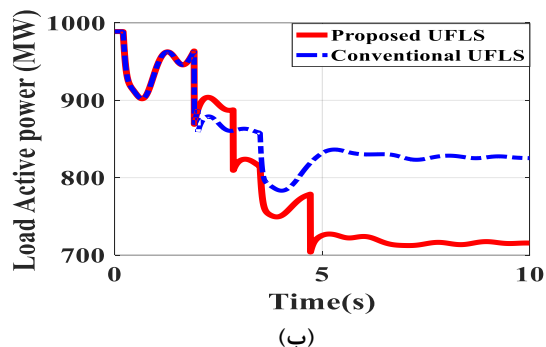
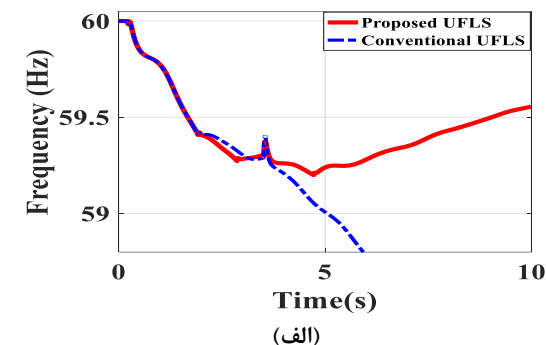
این سناریو اشاره به خروج پشت سرهم ژنراتور ۴ بعد از خروج همزمان ژنراتور ۵ و ۶ دارد. در واقع زمانی اغتشاش دوم رخ می‌دهد که اغتشاش اول در حین رفع شدن می‌باشد و این سناریو می‌تواند یکی از وجه تمایز روش بارزدایی پیشنهادی با طرح‌های بارزدایی بسیاری باشد که اغتشاش دوم را متوجه نمی‌شوند و موجبات ناپایداری فرکانس و خاموشی شبکه را فراهم می‌آورند.

ژنراتورهای G_5 و G_6 در ثانیه ۰/۲ از سیستم خارج می‌گردند و درست در زمانی که بعد از بارزدایی در فرکانس ۵۹/۴ هرتز که فرکانس پایدار گشته و می‌خواهد به مقدار نامی برگردد در ثانیه ۳/۵ یک کمبود توان جدید (اغتشاش) دیگری رخ می‌دهد و ژنراتور G_4 از شبکه خارج می‌گردد و با این رخداد فرکانس یک مسیر افت مجدد را تجربه می‌کند که اگر جلوی فرکانس گرفته نشود ناپایدار گشته و شبکه را با خاموشی مواجه می‌سازد لذا تشخیص درست این اغتشاش جدید و انجام اقدام کنترلی مناسب توسط الگوریتم پیشنهادی یکی از ویژگی‌های مثبت طرح جامع بارزدایی به شمار می‌آید.

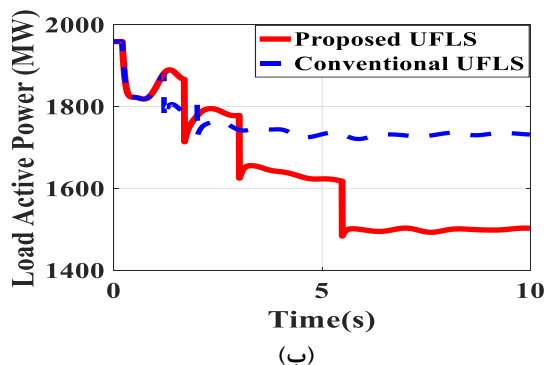
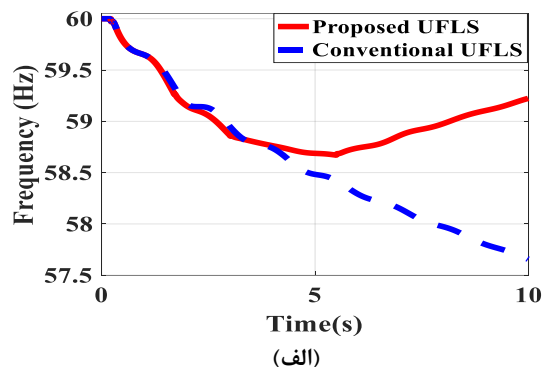


شکل (۸): نمودارهای (الف) فرکانس (ب) مشتق اول فرکانس (ج) ولتاژ باس بارها (د) توان اکتیو بارهای سیستم ۳۹ با سه حاصل از خروج ژنراتور ۴ بعد از خروج همزمان ژنراتورهای ۵ و ۶

و بروز رسانی مقدار کمبود توان اکتیو، اقدامات مناسبی را جهت حفظ پایداری فرکانس اتخاذ کند.



شکل (۹): مقایسه (الف) فرکانس و (ب) بار سیستم به ازای بکارگیری طرح بارزدایی پیشنهادی و طرح بارزدایی معمولی در پاسخ به دو اغتشاش پی در پی رخ داده



شکل (۱۰): مقایسه (الف) فرکانس و (ب) بار سیستم به ازای بکارگیری طرح بارزدایی پیشنهادی و طرح بارزدایی معمولی در پاسخ به رخ دادن اغتشاش ۰/۱۵- پریونیت

همانطور که از منحنی‌های شکل ۸ (الف) و ۸ (ج) مشخص است ولتاژ و فرکانس در ثانیه ۳/۵ به علت خروج ژنراتور ۴ با یک افت چشمگیر و شدید روبرو می‌شوند؛ مطابق با الگوریتم پیشنهادی در فلوچارت شکل ۳، زمانی که مشتق اول فرکانس (زمان ۳/۵ ثانیه) نسبت مشتق اول فرکانس در مرحله قبلی بارزدایی با تغییر قابل ملاحظه‌ای روبرو می‌شود (منفی‌تر می‌شود) سیستم کنترلی متوجه رخ دادن اغتشاش جدید می‌شود لذا ثابت اینرسی جدید سیستم و کمبود توان اکتیو متناسب با شرایط پیش آمده، محاسبه می‌شود و سپس به علت بارزدایی مناسب در فرکانس ۵۹/۲ هرتز، دوباره مسیر صحیح را در پیش می‌گیرند. منحنی-های شکل ۸ (ب) و ۸ (د)، مشتق اول فرکانس و توان اکتیو باس بارهای سیستم را نشان می‌دهد که مشتق اول فرکانس در ثانیه ۳/۵ با یک افت ناگهانی روبرو می‌شود و در ثانیه‌های بعدی با بارزدایی که در فرکانس ۵۹/۲ هرتز انجام می‌گیرد، انحراف فرکانس به صفر رسیده و سیستم در حالت پایدار باقی می‌ماند. اقدام لازم در زمان مناسب شرط پایداری سیستم می‌باشد.

به منظور نشان دادن کارایی طرح پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی حاصل از به‌کارگیری این طرح بارزدایی پیشنهادی برای سناریو ۴ با نتایج شبیه‌سازی حاصل از یک طرح بارزدایی رایج در مرجع [۲۱] مقایسه شده است. در اولین مقایسه فرض شده است که دقیقاً سناریو ۴ که خروج ژنراتور ۴ بعد از خروج همزمان ژنراتورهای ۵ و ۶ اتفاق افتاده است در شکل ۹ (الف)، طرح بارزدایی رایج برخلاف طرح پیشنهادی متوجه رخداد اغتشاش جدید نشده (ثانیه ۳/۵ ام) و به دلیل برزورسانی نشدن کمبود توان اکتیو جدید، نتوانسته بار مناسبی را همانند طرح پیشنهادی در شکل ۱۰ (ب) قطع نماید لذا فرکانس مقادیر غیرقابل مجازی را تجربه می‌کند. در واقع در طرح پیشنهادی مقاله مرجع [۲۱]، تنها به وقوع اغتشاش اولیه بسنده کرده و به دلیل عدم پایش لحظه‌ای فرکانس، از احتمال رخداد اغتشاش جدید غافل شده و همین موجب ناپایداری سیستم گردیده است.

شکل ۱۰ نمونه دیگری از مقایسه طرح بارزدایی پیشنهادی با طرح بارزدایی رایج را نشان می‌دهد. شبکه دچار یک اغتشاش ۰/۱۵- پریونیتی شده و طرح بارزدایی رایج نتوانسته مقدار صحیح کمبود توان را با تأیید دادن وابستگی ولتاژ بارها محاسبه کند لذا به دلیل قطع نامناسب بار، فرکانس با ناپایداری مواجه شده است. شکل ۱۰ (ب) دقیقاً همین موضوع را تأیید می‌کند که در طرح بارزدایی رایج نسبت به طرح بارزدایی پیشنهادی، بار کمتری از شبکه قطع می‌گردد و فرکانس ناپایدار گردد؛ این اهمیت تخمین صحیح کمبود توان اکتیو را نشان می‌دهد؛ در واقع، طرح بارزدایی پیشنهادی به علت تأثیر دادن اثر وابستگی ولتاژ بارها در محاسبات تخمین کمبود توان توانسته به خوبی پایداری فرکانس شبکه را به ازای قطعی بار مطمئن تضمین کند.

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ طرح پیشنهادی با ارئه یک الگوریتم بارزدایی جامع، نسبت به طرح‌های قبلی با کمک پایش لحظه‌ای فرکانس

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک طرح بارزدایی تطبیقی فرکانس کم برای سیستم‌های قدرت پیشنهاد می‌شود. این طرح بر اساس مشتق اول فرکانس و با در نظر گرفتن تغییرات ولتاژ باس بارها و اینرسی سیستم، کمبود توان را به خوبی تخمین می‌زند. با توجه به اینکه محاسبه اثر افت ولتاژ باس بارها از طریق جمع‌آوری اطلاعات اولیه منابع تولیدی سخت و پیچیده است، فرض می‌شود که کل سیستم به عنوان یک باس در نظر گرفته شود. با شبیه‌سازی و جمع‌آوری داده‌ها، ضریب شاخص ولتاژ-فرکانس محاسبه و معرفی گردید. با در نظر گرفتن این شاخص، می‌توان افت ولتاژ ناشی از کمبود توان رخ داده در سیستم را برای این باس فرضی به خوبی تخمین زد که متناسب با متوسط افت ولتاژ سایر باس‌های سیستم قدرت نیز می‌باشد. با تأثیر دادن شاخص ولتاژ-فرکانس، کمبود توان با دقت خوبی تخمین زده می‌شود. بعد از محاسبه کمبود توان، عملیات بارزدایی طی ۴ مرحله پیگیری می‌شود و زمانی می‌توان گفت سیستم پایدار شده که مشتق فرکانس مثبت و یا صفر گردد همچنین خود فرکانس نیز به بالای محدوده مجاز یعنی ۵۹/۵ هرتز رسیده باشد.

یکی از مزیت‌های ویژه طرح پیشنهادی، بررسی وصل و قطع منابع تولیدی به خصوص منابع تجدیدپذیر در حین عملیات بارزدایی است که موجب قطع بهینه بار می‌گردد. این مهم از طریق پایش لحظه‌ای فرکانس و مشتق اول آن و همچنین به‌روزرسانی ثابت اینرسی سیستم در کلیه مراحل بارزدایی اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی، چهار سناریو برای سیستم تست ۳۹ باس IEEE در نرم‌افزار دیگسایلنت تعریف شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن اثر ولتاژ باس بارها و تغییرات اینرسی سیستم، طرح بارزدایی پیشنهادی توانسته است برخلاف طرح‌های بارزدایی رایج، در سناریوهای مختلف از افت سریع فرکانس به محدوده غیرمجاز جلوگیری کند. این امر زمان مناسب و کافی را در اختیار کنترل اولیه فرکانس قرار می‌دهد تا فرکانس را به مقدار نامی خود برگرداند، که نشان‌دهنده دقت و صحت عملکرد طرح بارزدایی پیشنهادی است. زمانی که سیستم با یک اغتشاش پشت سر هم مواجه می‌شود با محاسبه مجدد اینرسی و کمبود توان اکتیو این اجازه به سیستم داده می‌شود تا با آگاهی از شرایط جدید حاصل از خروج منبع تولیدی، عملیات بارزدایی انجام و بار مناسبی از سیستم قطع گردد. با توجه به اینکه در این مقاله در هر مرحله که فرکانس به آن مرز مشخص شده افت می‌کند طبق یک محاسبه خاص بارزدایی انجام می‌گیرد؛ می‌توان به منظور کاهش قطعی بار پیشنهاد داد که برای مقالات بعدی از یک الگوی پیش‌بین افت فرکانس در انجام عملیات بارزدایی استفاده شود تا به سبب آن در صورت پایدار ماندن فرکانس در زمان‌های پیش‌رو (یعنی پیش بینی عدم رسیدن فرکانس به مرز بعدی فرکانس) از حذف اضافی بار جلوگیری شود تا بدین سبب مقدار بار کمتری از سیستم قطع گردد و فرکانس سیستم همچنان در محدوده پایدار خود باقی بماند. پیاده‌سازی این طرح می‌تواند کمک بسزایی را در جهت کاهش هزینه‌های قطعی بار داشته باشد.

مراجع

- [1] U. Rudez, and R. Mihalic, 2011. A novel approach to underfrequency load shedding. *Electric Power Systems Research*, 81(2), pp.636-643.
- [2] J.A. Laghari, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, and H. Mohamad, 2013. Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: a review. *energy conversion and management*, 75, pp.130-140.
- [3] D. Sodin, R. Ilievska, A. Čampa, M. Smolnikar, & U. Rudez, (2020). Proving a concept of flexible under-frequency load shedding with hardware-in-the-loop testing. *Energies*, 13(14), 3607.
- [4] U. Rudez, & R. Mihalic, (2019, June). RoCoF-based improvement of conventional under-frequency load Shedding. In 2019 IEEE Milan PowerTech (pp. 1-5). IEEE.
- [5] T. Madiba, R. C. Bansal, N. T. Mbungu, M. Bettayeb, R. M. Naidoo, & M. W. Siti, (2022). Under-frequency load shedding of microgrid systems: a review. *International Journal of Modelling and Simulation*, 42(4), 653-679.
- [6] E. Grebe, J. Kabouris, S. Lopez Barba, W. Sattinger, and W. Winter, "Low frequency oscillations in the interconnected system of Continental Europe", in 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010, pp. 1-7.
- [7] T. Skrljanc, R. Mihalic, & U. Rudez, (2023). A systematic literature review on under-frequency load shedding protection using clustering methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113294.
- [8] B. Potel, V. Debusschere, F. Cadoux, & U. Rudez, (2019). A real-time adjustment of conventional under-frequency load shedding thresholds. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(6), 2272-2274.
- [9] T. krjanc, R. Mihalic, & U. Rudez, (2020). Principal Component Analysis (PCA)-Supported Underfrequency Load Shedding Algorithm. *Energies*, 13(22), 5896.
- [10] M. Sun, G. Liu, M. Popov, V. Terzija, & S. Azizi, (2021). Underfrequency load shedding using locally estimated RoCoF of the center of inertia. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4212.
- [11] J. Grozdanovski, R. Mihalic, & U. Rudez, (2021). WAMS-Supported Power Mismatch Optimization for Secure Intentional Islanding. *Energies*, 14(10), 2790.
- [12] M. Sun, G. Liu, M. Popov, V. Terzija, & S. Azizi, (2021). Underfrequency load shedding using locally estimated RoCoF of the center of inertia. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4212-4222.
- [13] H. Awad, & A. Hafez, (2022). Optimal operation of under-frequency load shedding relays by hybrid optimization of particle swarm and bacterial foraging algorithms. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 763-774.
- [14] 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.
- [15] Azimi S M, Rahimi H, Mirzabeigi A. Stabilization and control of power systems using under frequency load shedding due to spinning reverse. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (4) :163-172
- [16] T. Senjyu, T. Nakaji, Uezato, K. and Funabashi, T., 2005. A hybrid power system using alternative energy

- facilities in isolated island. IEEE Transactions on energy conversion, 20(2), pp.406-414.
- [17] A. Ketabi, and M.H. Fini, 2014. An underfrequency load shedding scheme for islanded microgrids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 62, pp.599-607.
- [18] L. Sigrist, I. Egido, and L. Rouco, 2010, November. Frequency stability boundary of small isolated power systems. In Electrical and Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2010 IEEE 26th Convention of (pp. 000229-000233). IEEE.
- [19] S.Y. Obara, 2007. Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator. International journal of Hydrogen energy, 32(3), pp.323-336.
- [20] V.V. Terzija, 2006. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 21(3), pp.1260-1266.
- [21] 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.
- [22] U. Rudez, and R. Mihalic, 2011. Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes. IEEE Transactions on Power Systems, 26(2), pp.839-846.
- [23] S. M. S. Kalajahi, H. Seyedi, & K. Zare, (2021). Under-frequency load shedding in isolated multi-microgrids. Sustainable Energy, Grids and Networks, 27, 100494.
- [24] A. Darbandsari, & T. Amraee, (2022). Under frequency load shedding for low inertia grids utilizing smart loads. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 135, 107506.
- [25] A. A. Zadeh, A. Sheikhi, & W. Sun, (2021). A Novel Probabilistic Method for Under Frequency Load Shedding Setting Considering Wind Turbine Response. IEEE Transactions on Power Delivery, 37(4), 2640-2649.