

مشارکت پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افقی تعمیم یافته جهت بهبود کنترل فرکانس ریز شبکه های جزیره ای

فرشید حبیبی^۱، دانشجوی دکتری؛ قباد شفیعی^۲، استادیار؛ حسن بیورانی^۳، استاد

۱- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - f.habibi@eng.uok.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - q.shafiee@uok.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - bevrani@uok.ac.ir

چکیده: بحران انرژی، مسائل زیست محیطی و همچنین ملاحظات اقتصادی منجر به استفاده از راه حل های جدید در سیستم های قدرت مدرن شده است. یکی از رویکردهای جدید، استفاده از مفهوم پاسخ بار است. در این روش، بارهای هوشمند را در تنظیم دینامیک های سیستم به صورت پیوسته مشارکت می دهند. در این مقاله یک روش جدید پاسخ بار، برای کنترل فرکانس ریز شبکه های جزیره ای ارائه شده است. روش پیشنهادی بر اساس مشخصه افقی تعمیم یافته است که بارهای اکتیو و راکتیو قابل کنترل را با استفاده از مکانیسمی مشخص، تغییر می دهد. کارکرد مناسب روش پیشنهادی، با تغییر سیستماتیک بارهای اکتیو و راکتیو در طی چندین سناریوی مختلف شبیه سازی نشان داده شده است. در این شبیه سازی ها، فرکانس و ولتاژ سیستم در دو حالت مختلف بررسی و مشاهده گردیده است؛ حالتی که فقط کنترل کننده های مرسوم سمت تولید وجود داشته باشد و همچنین حالتی که غیر از کنترل کننده های مرسوم، حلقه پاسخ بار پیشنهادی نیز مشارکت داشته باشد. نتایج شبیه سازی، کارکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی و کمک به بهبود پایداری سیستم را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: ریز شبکه ها، پاسخ بار، مشخصه افقی تعمیم یافته، خانه های هوشمند، بارهای کنترل پذیر.

Generalized droop characteristic-based Demand Response for Frequency Control in Isolated Microgrids

Farshid Habibi¹, PhD student; Qobad Shafiee², Assistant Professor; Hassan Bevrani³, Professor

1- Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: f.habibi@eng.uok.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: q.shafiee@uok.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: bevrani@uok.ac.ir

Abstract: Environmental concerns, energy and economical-technical issues make modern power networks to use alternative approaches such as demand response (DR). The DR is an ability of system to contribute smart loads in dynamic regulation, continuously. This paper presents a new DR approach for frequency control of isolated microgrids. The proposed method is based on a generalized droop characteristic (GDC), changing controllable active and reactive loads through a set of special equations. To verify the control method, several scenarios are simulated in which the system frequency and voltage are studied. The simulation results are carried out in the presence of the proposed DR control loop in comparison with the conventional generation side controller. The results show proposed control methodology provides appropriate performance and improved stability.

Keywords: Controllable loads, demand response, generalized droop characteristic, microgrids, smart home.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳

نام نویسنده مسئول: قباد شفیعی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - خیابان پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی - مرکز پژوهشی ریز شبکه و شبکه های هوشمند.

۱- مقدمه

از جمله مهم‌ترین دینامیک‌های سیستم قدرت، فرکانس سیستم است که پایداری آن از تعادل میان تولید و مصرف حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، نامتعادلی فرکانسی تأثیر مستقیم نامتعادلی میان تولید و مصرف در شبکه است. نوسانات فرکانس، اثرات سویی بر کارکرد سیستم دارد. از جمله مشکلات امنیتی، قابلیت اطمینان و همچنین کاهش بازدهی. یک نوسان شدید ممکن است منجر به خروج واحدهای نیروگاهی و حتی ناپایداری گردد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین دینامیک‌ها که بایستی ارزیابی، مشاهده و کنترل گردد، فرکانس سیستم‌های قدرت است [۱]. اغلب فرکانس سیستم قدرت در دو حالت اساسی عادی و اضطراری مورد مطالعه و کنترل قرار می‌گیرد. در حالت عادی، حلقه‌های اولیه^۱ و ثانویه^۲ اقدام به تنظیم فرکانس می‌کنند. در حالی که در حالت اضطراری، بازدهی تحت فرکانس پایین^۳ (UFLS) و همچنین جزیره‌ای کردن موقتی سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. نکته قابل توجه که در تمامی روش‌های ذکر شده وجود دارد این است که طرف مصرف، مشارکت پبوسته‌ایی در تنظیم دینامیک‌های شبکه ندارد و محدود به حالت گذرای اضطراری است. بنابراین، از قابلیت‌های مناسبی که طرف بار می‌تواند داشته‌باشد، استفاده مناسبی صورت نگرفته‌است.

پاسخ بار (DR)^۴ ابتدا در سال ۱۹۸۰ معرفی گردید: توانایی کنترل و دست‌کاری بارهای طرف مصرف برای روشن/خاموش کردن و یا تغییر مصرف بارها در شرایط مختلف و به‌منظور پاسخ به مسائل کیفیت توان، امنیت سیستم، ولتاژ و فرکانس و همچنین محدودیت‌های فنی و اقتصادی که بایستی توسط اپراتورهای شبکه انجام گیرد [۳، ۴]. پاسخ بار یک روش جستجوی سریع، برای یافتن تعادل میان تولید و مصرف است. همچنین، پاسخ بار می‌تواند به‌عنوان یک اقدام کنترلی اولیه و ابتدایی در تنظیم دینامیک‌ها مشارکت داده‌شود [۵]. علاوه بر این موارد، پاسخ بار می‌تواند مزایای فراوانی از جمله اثرات مفید زیست‌محیطی به واسطه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش ندادن ظرفیت تولید، کاهش انرژی مصرفی، نیاز کمتر به توان ذخیره چرخان به واسطه دینامیک سریع فراهم نماید. در کل، می‌توان گفت که استفاده از این روش باعث بهره‌برداری ارزان‌تر از سیستم قدرت می‌شود. بنابراین این روش برای سیستم‌هایی جدید مانند ریزشبکه‌ها (MG)^۵ که با محدودیت تولید توان روبرو هستند، می‌تواند بسیار مناسب باشد [۶].

یک تحقیق و بازمینی کلی از پاسخ بار و مشارکت آن با حلقه‌های مرسوم (LC)^۶ کنترل فرکانس در [۷] ذکر شده‌است. یکی از مسائل مهم ارتباط مخابراتی سریع و ایمن میان بارهای سبک و واحدهای تولیدی است که در این مرجع به آن پرداخته می‌شود. روش کنترلی بارهای سبک کنترل‌پذیر، بر اساس اختلاف فرکانسی انجام شده‌است. همچنین، انواع روش‌های مشارکت پاسخ بار در تنظیم دینامیک‌های سیستم از جمله روش متمرکز و غیرمتمرکز در مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌است. در روش مشارکت پاسخ بار متمرکز، یک کنترل‌کننده

مرکزی پس از دریافت و پردازش اطلاعات موردنیاز دستورات را به صورت سلسله‌مراتبی به کنترل‌کننده‌های سطح پایین از طریق لینک‌های مخابراتی ارسال می‌کند. از نیازمندی‌ها و معایب این روش، می‌توان به ارتباط و کانال مخابراتی پیچیده و دوطرفه، هزینه بالا و قابلیت اطمینان پایین اشاره کرد. در حالت‌هایی که تعداد مشارکت‌کننده‌های طرف دیماند در تنظیم فرکانس خیلی زیاد باشد، احداث ارتباط مخابراتی دو طرفه ایمن، بسیار سخت و هزینه‌بر خواهد بود. همچنین، هنگامی که به هر دلیل خطایی در کنترل متمرکز رخ دهد، کل سیستم تحت کنترل متأثر خواهد بود. در حالی که در روش غیرمتمرکز، تصمیمات و رویه‌های کنترلی توسط کنترل‌کننده‌های محلی و بر اساس اندازه‌گیرهای محلی و پراکنده در سیستم اعمال می‌شود. در این روش نیازی به ارتباط مخابراتی دیجیتال نخواهد بود، اما فراهم کردن دسترسی به تعداد زیاد اندازه‌گیرهای فرکانسی، هزینه‌بر خواهد بود [۷].

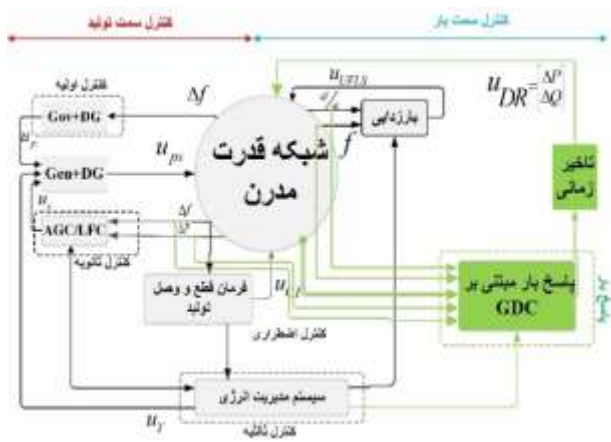
مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مشارکت یخچال و فریزرهای خانگی به‌عنوان یک بار کنترل‌پذیر در کنترل اولیه فرکانس در [۸] ذکر شده‌است. این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از این بارهای کنترل‌پذیر می‌تواند کمک شایانی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مسائل زیست‌محیطی داشته‌باشد. رسیدن به حداکثر سود در مورد یک بار انرژی در یک بازار زمان واقعی، یکی از اولویت‌های مهم پاسخ بار است که در [۹] به آن پرداخته شده‌است. اغلب، استراتژی حداکثر سود پاسخ بار با حل مسئله تصادفی مارکوف که نیاز به پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد دارد، به دست می‌آید. برای مقابله با این پیچیدگی محاسباتی، یک رویکرد تقریبی دوگانه پیشنهاد داده‌شده که با استفاده از ساختار آستانه راه‌حل بهینه، مسئله را به یک مورد برنامه‌ریزی خطی تبدیل کرده‌است. روش در نظر گرفته شده در این مقاله، سود حاصله از پاسخ بار را به سه برابر افزایش داده‌است.

در شبکه قدرت چند کشور مختلف، مشارکت پاسخ بار در تنظیم دینامیک‌ها در حال آزمایش و توسعه است که نمونه‌ایی از این تحقیقات در [۱۰-۱۲] ذکر شده‌است. در [۱۰]، یک سیستم مدیریت هوشمندانه انرژی برای ساختمان‌های خانگی در نظر گرفته شده که پاسخ و مدیریت بار دینامیکی و فعالی را برای این خانه‌ها فراهم می‌آورد. پژوهش مورد نظر که به‌صورت موردی انجام شده بر روی کاهش هزینه‌های برق متمرکز است. در [۱۱]، یک طرح قیمت‌گذاری عملی برای تشویق مصرف‌کنندگان مختلف برای شرکت در پاسخ بار پیشنهاد شده‌است. از طرف دیگر، نفوذ منابع تجدیدپذیر انرژی و کاهش تعداد نیروگاه‌ها و ژنراتورهای سنکرون در شبکه‌های قدرت، سبب کم‌شدن اینرسی شبکه خواهد شد. جهت مقابله با این مسئله، تحقیق انجام شده در [۱۲] مشارکت پاسخ بار به‌منظور بهبود اینرسی شبکه قدرت بریتانیا را ارائه داده‌است. همچنین، روش‌های مختلفی برای اعمال پاسخ بار از جمله استفاده از روش تصادفی پاسخ بار [۱۳] در نظر گرفته شده‌است. بر این اساس، فرض شده روش در نظر گرفته شده در کل سیستم پراکنده

شبهه‌سازی‌های مختلف، در بخش ۴ آمده‌است. این سناریوها در نرم‌افزار MATLAB/SimPowerSystems شبهه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. سرانجام، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی در بخش ۵ ذکر شده‌است.

۲- مشارکت پاسخ بار با حلقه‌های کنترل فرکانس مرسوم

سیستم‌های قدرت مدرن برای تنظیم تولید و مصرف، متعاقب رخداد خطاهای مختلف، نیاز مبرمی به هوش و انعطاف‌پذیری در کنترل و تنظیم دینامیک‌ها دارند. امروزه به دلیل افزایش تعداد ریزشبهه‌ها، تغییر ساختارها، محدودیت‌های محیطی و همچنین پیچیدگی‌های موجود، این مسئله بسیار مهم‌تر شده‌است. از طرف دیگر در ریزشبهه‌ها، قسمت اعظمی از ژنراتورهای سنکرون با تولیدات پراکنده و منابع تجدیدپذیر هم‌چون میکروتوربین‌ها، پانل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، منابع ذخیره انرژی، سلول سوختی و غیره جای‌گزین شده‌اند [۳۲]. بنابراین، اینرسی چرخان کلی سیستم به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته و سبب ضعف آن در برابر اغتشاش‌های احتمالی می‌شود [۳۳، ۳۴]. به همین منظور بایستی حلقه‌های کنترل فرکانس مرسوم با شرایط جدید تطبیق داده شوند طوری که مفهوم پاسخ بار بتواند در بهبود پایداری سیستم مفید واقع گردد. حلقه‌های کنترل فرکانسی در سیستم‌های قدرت مدرن و با حضور حلقه مبتنی بر پاسخ بار در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در سمت تولید، علاوه بر ژنراتورهای سنکرون، منابع تولید پراکنده در حلقه‌های اولیه و ثانویه فرکانس می‌توانند مشارکت داشته باشند. کنترل اولیه با استفاده از کارکرد گاورنر ژنراتورهای سنکرون، از افت ممتد فرکانس جلوگیری کرده و افت را به یک مقدار مشخص محدود می‌کند، ولی از بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی ناتوان است. در حالی که کنترل ثانویه، خطای حالت ماندگار فرکانس را حذف و آن را به مقدار نامی برمی‌گرداند. در این حلقه، اغلب از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انترگرالی (PI) استفاده می‌شود. کنترل ثالثیه، نظارت واحدهای بالادستی نظیر EMS/ISO^۸ بر سیستم است. همچنین، این حلقه می‌تواند بر حلقه‌های اولیه و ثانویه نظارت کرده و حدود کاری آن‌ها را تعیین نماید. جزئیات



شکل ۱: حلقه‌های مدرن کنترل فرکانس در حضور حلقه پاسخ بار.

شده‌باشد و همه بارها از نوع هوشمند و کنترل‌پذیر باشد. بنابراین نیاز به واحد کنترلی متمرکز و تجهیزات پیچیده برطرف می‌شود.

تأثیر مشارکت پاسخ بار در فرکانس ریزشبهه‌ها با حضور منابع تجدیدپذیر انرژی و تولیدات پراکنده در شرایط مختلف در [۱۶-۱۴] ذکر شده‌است. در نتیجه، قابلیت اطمینان این سیستم‌ها با مشارکت پاسخ بار و تولیدات پراکنده، به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد.

با توجه به اینکه در خانه‌های هوشمند، اغلب بارهای کنترل‌پذیر وجود دارند، یک ظرفیت همیشه در دسترس و فرمان‌پذیر، برای شبکه ایجاد می‌شود. به همین دلیل، در [۲۰-۱۷] پاسخ بار به‌عنوان یک ذخیره چرخان برای تنظیم فرکانس مورد بررسی قرار گرفته‌است.

همچنین، مزایای اقتصادی پاسخ بار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن در [۲۳-۲۱] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مباحث مربوط به قیمت‌گذاری مشارکت پاسخ بار و صرفه‌های اقتصادی برای مشترکین از جمله مواردی است که در این مقالات مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مقالات زیادی به قطع و وصل بارهای کنترل‌پذیر بر اساس سطوح آستانه فرکانس پرداخته که می‌توان به مقالات [۲۶-۲۴] اشاره کرد. تأثیر مشارکت و هماهنگی میان پاسخ بار با روش‌های مرسوم کنترل فرکانس سیستم‌های قدرت چندناحیه‌ای در [۲۷] بررسی شده‌است. در این پژوهش، با استفاده از روابط و معادلات ریاضی استخراج شده، ابتدا میزان اغتشاش و سپس ناحیه‌ای که اغتشاش رخ داده‌است، تعیین می‌شود. تأثیر مشارکت غیرمتمرکز و تصادفی بارهای اکتیو در الگوریتم پاسخ بار و به‌منظور بهبود کنترل فرکانس در [۲۸] مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

پاسخ بار بر اساس روش‌های خلاقانه و هوشمند قادر است، هدف‌های چندگانه‌ای را در سیستم‌های قدرت محقق سازد. به صورت کلی، در بسیاری از مطالعات صورت‌گرفته برای پایداری شبکه از تغییر توان منابع استفاده می‌شود، در حالی که ظرفیت منابع محدود است. کنترل و مدیریت پاسخ بار در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌گرفته از جمله [۳۱-۲۹]، با استفاده از روش مبتنی بر مشخصه افتی صورت گرفته‌است. در این تحقیق، یک روش جدید برای اعمال پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته (GDC-based DR) در مشارکت با کنترل فرکانس ثانویه معرفی شده‌است. ایده اصلی در این مقاله، دست‌کاری و قطع و وصل بارهای کنترل‌پذیر به‌منظور بهبود پایداری سیستم به‌صورت مشارکت پیوسته است. روش مدنظر به‌طور اختصاصی برای بهبود فرکانس طراحی شده اما در شبهه‌سازی‌ها نشان داده می‌شود که پروفایل ولتاژ را نیز بهبود می‌بخشد.

بخش‌های مختلف مقاله به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد: در بخش ۲ بر مشارکت پاسخ بار با حلقه‌های کنترل فرکانس مروری انجام شده‌است. معادلات و روابط ریاضی پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته در بخش ۳ آمده‌است. برای نشان‌دادن کارکرد مناسب روش ارائه شده، یک ریزشبهه جزیره‌ای در نظر گرفته شده‌است. به جهت ارزیابی روش کنترلی مدنظر، چندین سناریو در نظر گرفته شده که نتایج

مقاومت خط R در مقابل X صرف نظر کرد. در این حالت زاویه توان δ بسیار کوچک است و می توان $\sin \delta = \delta$ و $\cos \delta = 1$ در نظر گرفت. با این ساده سازی ها، معادلات (۴) و (۵) به شکل معادلات زیر ساده می شوند:

$$\delta \cong \frac{XP}{U_1 U_2} \quad (۶)$$

$$U_1 - U_2 \cong \frac{XQ}{U_1} \quad (۷)$$

همان گونه که در [۳۶] ذکر شده است، معادلات (۶) و (۷) می توان به صورت (۸) و (۹) بازنویسی کردند، طوری که فرم کلی معادلات مشخصه افقی را نشان دهند. معادلات بیان می کنند که فرکانس سیستم تنها به تغییرات توان اکتیو و ولتاژ سیستم تنها به تغییرات توان راکتیو وابسته است.

$$f - f_0 = -k_p (P - P_0) \quad (۸)$$

$$U_1 - U_0 = -k_q (Q - Q_0) \quad (۹)$$

برای سیستم هایی که خطوط توان در آن ها بسیار طولانی نیستند، دیگر X از R بسیار بزرگ تر نیست و بایستی هر دو مقدار X و R در معادلات و روابط در نظر گرفته شوند. در این چنین شرایطی، برای ساده سازی معادلات (۲) و (۳)، یک ماتریس تبدیل چرخشی خطی T استفاده می شود که P و Q را به ترتیب به P' و Q' تبدیل می کند.

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & -R \\ R & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

با اعمال ماتریس تبدیل و بعضی ساده سازی ها، فرم تعمیم یافته مشخصه افقی مطابق معادلات زیر به دست می آید:

$$f - f_0 = -k_p (P' - P'_0) = -k_p \frac{X}{Z} (P - P_0) + -k_p \frac{R}{Z} (Q - Q_0) \quad (۱۱)$$

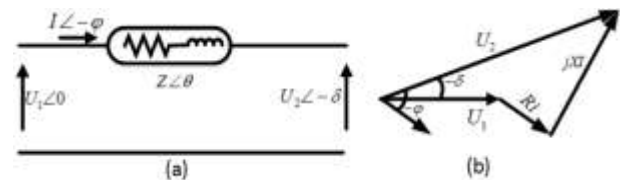
$$U_1 - U_0 = -k_q (Q' - Q'_0) = -k_q \frac{R}{Z} (P - P_0) + -k_q \frac{X}{Z} (Q - Q_0) \quad (۱۲)$$

برخلاف حالت اول، معادلات بالا نشان می دهند که نوسانات فرکانس و ولتاژ، هم زمان به تغییرات توان اکتیو و راکتیو ارتباط دارند. به عبارت دیگر، به منظور تنظیم فرکانس و ولتاژ سیستم، هم توان اکتیو و هم توان راکتیو بایستی کنترل و ارزیابی گردند.

۳-۲- پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افقی تعمیم یافته

در بیش تر مطالعات پاسخ بار، اغلب از فرم مرسوم مشخصه افقی استفاده شده است [۲۹-۳۱]. به طور کلی می توان گفت که این روش مناسب ریزش شبکه ها نیست؛ زیرا که در این شبکه ها خطوط طولانی انتقال توان وجود ندارد. بنابراین مدل ویرایش شده مشخصه افقی برای این چنین سیستم هایی نیاز است. به همین منظور در این مقاله تلاش

روش های کنترلی سمت تولید در [۲، ۳۵] ذکر شده است. در سمت بار، علاوه بر حلقه مرسوم بارزدایی تحت فرکانس پایین، الگوریتم پاسخ بار (DR) نیز حضور دارد. الگوریتم پاسخ بار می تواند ورودی های متفاوتی داشته باشد از جمله فرکانس و ولتاژ سیستم، تغییرات فرکانس، ولتاژ و توان. همچنین، می تواند از سیستم بالادستی نظیر EMS/ISO نیز ورودی دریافت نماید. این ورودی می تواند به منظور تنظیم کردن آستانه های تصمیم گیری باشد. سیگنال های ورودی از طریق الگوریتم پاسخ بار آنالیز و بررسی شده، بعد از یک تأخیر که به دلیل کانال های مخابراتی ایجاد می شود، فرمان و سیگنال خروجی الگوریتم پاسخ بار به سیستم ارسال می گردد. این فرمان حاوی اطلاعاتی در رابطه با تغییرات بارهای کنترل پذیر اکتیو و راکتیو سیستم و در راستای کم کردن اثر اغتشاشات است. این بارهای کنترل پذیر و منعطف در خانه های هوشمند ریزش شبکه ها که در حال گسترش هستند، یافت می گردد. بسته به شرایط و وضعیت سیستم ممکن است قسمتی یا کل بارهای منعطف در الگوریتم پاسخ بار مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: (a) انتقال توان در یک خط. (b) دیاگرام فازوری.

۳-۲- پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افقی تعمیم یافته

۳-۱- مشخصه افقی تعمیم یافته

توان ظاهری یک خط همان گونه که در شکل ۲ نشان داده می شود، برابر است با:

$$S = P + jQ = U_1 I^* = U_1 \left(\frac{U_1 - U_2}{Z} \right)^* \quad (۱)$$

که P، Q، U_1 ، U_2 و Z به ترتیب توان اکتیو، توان راکتیو، ولتاژ سمت تولید، ولتاژ سمت بار و امپدانس خط است. بر این اساس، توان اکتیو و راکتیو خط به صورت معادلات زیر است:

$$P = \frac{U_1^2}{Z} \cos \theta - \frac{U_1 U_2}{Z} \cos \theta + \delta \quad (۲)$$

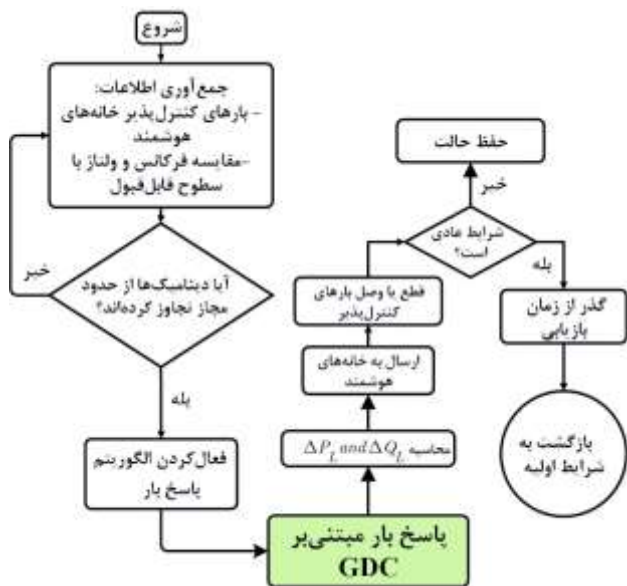
$$Q = \frac{U_1^2}{Z} \sin \theta - \frac{U_1 U_2}{Z} \sin \theta + \delta \quad (۳)$$

با جای گذاری $Z = R + jX$ در معادلات (۲) و (۳):

$$P = \frac{U_1}{R^2 + X^2} [R(U_1 - U_2 \cos \delta) + XU_2 \sin \delta] \quad (۴)$$

$$Q = \frac{U_1}{R^2 + X^2} [-RU_2 \sin \delta + X(U_1 - U_2 \cos \delta)] \quad (۵)$$

به طور کلی معادلات توان سیستم در دو حالت کلی مورد مطالعه قرار می گیرند. در خطوط طولانی $X \gg R$ است. به همین دلیل می توان از



شکل ۲: فلوچارت پاسخ بار مبتنی بر الگوریتم GDC.

فلوچارت کلی مشارکت پاسخ بار براساس روش پیشنهادی در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، اندازه‌گیری‌های هوشمند فرکانس و ولتاژ سیستم را جمع‌آوری کرده، سپس با سطوح استاندارد مقایسه می‌گردد. در صورتی که دینامیک‌های موجود از سطوح عادی و نرمال تجاوز کنند، باتوجه به مقادیر بارهای منعطف و کنترل‌پذیر در خانه‌های هوشمند، الگوریتم موردنظر اقدام به پاسخ‌دهی به شرایط غیرعادی می‌کند. به این صورت که پس از محاسبه بارهایی که بایستی تغییر نمایند و بعد از گذشت مقدار زمان تأخیر کانال‌های مخابراتی، بارهای از قبل تعیین شده از سیستم جدا می‌شوند. زمان تأخیر در نظر گرفته شده برای اعمال پاسخ بار حدود ۰/۱ ثانیه است. زمان بازیابی و اتصال مجدد بارها، بسته به شرایط سیستم و الگوریتم پیشنهادی صورت می‌گیرد. در صورتی که شرایط نرمال باشد این زمان بازیابی محاسبه شده و بعد از گذشت زمان مقرر، بار به سیستم متصل خواهد شد. در غیر این صورت (شرایط غیرعادی)، وضعیت حفظ خواهد شد.

جهت محاسبه ضرایب k_p و k_q به صورت مرسوم در سیستم‌های قدرت، یک بار پله‌ای $\Delta P_L + j\Delta Q_L$ به سیستم اعمال می‌شود. سپس بر اساس انحرافات فرکانس و ولتاژ سیستم، معادلات (۱۸) یافت می‌شوند:

$$\begin{cases} k_p = -\frac{\Delta F}{\Delta P_L} \\ k_q = -\frac{\Delta V}{\Delta Q_L} \end{cases} \quad (18)$$

بر این اساس، برای یک اغتشاش بار پله‌ای $(\Delta P + j\Delta Q)$ ضرایب k_p و k_q به صورتی که در شکل ۴ (الف و ب) نشان داده شده است، به دست می‌آیند. این مقادیر در شبیه‌سازی‌های بخش بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شده که مشخصه افتی تعمیم‌یافته‌ای که قابلیت اجرا در تمامی شرایط و سیستم‌ها را داشته باشد، ارائه شود. مدل ارائه شده برای سیستم‌هایی نظیر ریز شبکه‌ها بسیار می‌تواند مناسب باشد. در ادامه معادلات لازم برای اعمال پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته ارائه می‌شود. با در نظر گرفتن معادلات مشخصه افتی مرسوم و تعمیم‌یافته یک نکته مهم وجود دارد و آن هم این است که نوسانات فرکانس و ولتاژ هم چون رابطه (۱۲) تابعی از نوسانات توان اکتیو و راکتیو است.

$$\begin{cases} \Delta f = f_F(\Delta P, \Delta Q) \\ \Delta V = f_V(\Delta P, \Delta Q) \end{cases} \quad (13)$$

در حالی که براساس الگوریتم پاسخ بار، نوسانات ولتاژ (ΔV) و فرکانس (Δf) سیگنال‌های ورودی و نوسانات توان اکتیو (ΔP) و راکتیو (ΔQ) سیگنال‌های خروجی هستند.

$$\begin{cases} \Delta P = f_P(\Delta f, \Delta V) \\ \Delta Q = f_Q(\Delta f, \Delta V) \end{cases} \quad (14)$$

به این منظور، معادلات (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} -k_p \frac{X}{Z} & -k_p \frac{R}{Z} \\ -k_q \frac{R}{Z} & -k_q \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (15)$$

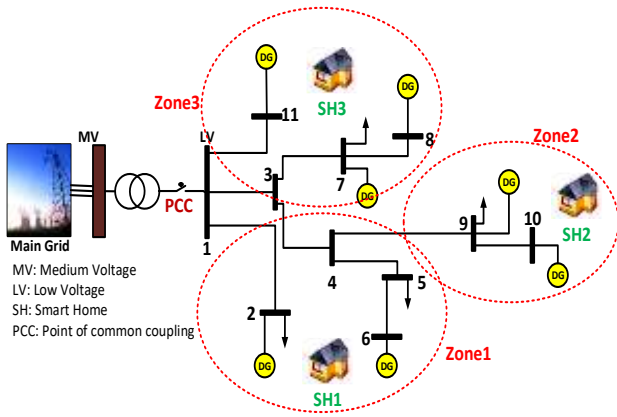
همان‌طور که در رابطه (۱۴) آمده است، بایستی خروجی الگوریتم ΔP و ΔQ باشند. یعنی خروجی الگوریتم برداری همانند معادله (۱۶) است که به سیستم قدرت، دستورات تغییر در بارهای اکتیو و راکتیو را صادر می‌نماید.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = g(f, V) \quad (16)$$

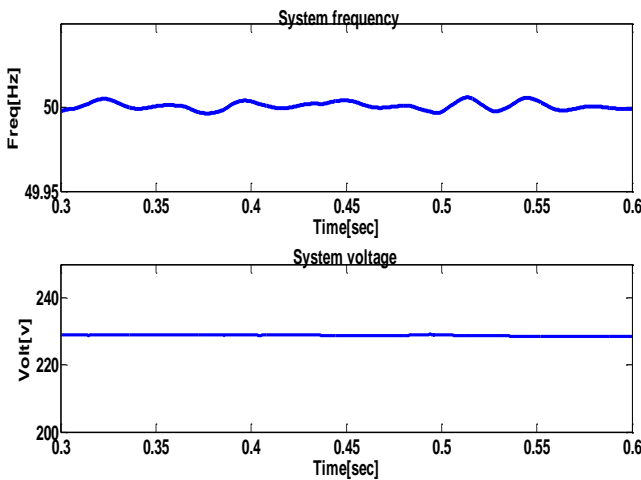
با معکوس کردن ماتریس (۱۵) و بعضی جای‌گذاری‌ها و ساده‌سازی‌ها، نهایتاً فرم زیر که بر اساس مشخصه افتی تعمیم‌یافته است، حاصل می‌گردد. براساس این رابطه، ΔP و ΔQ به عنوان سیگنال‌های خروجی، تابعی از هر دو مقدار نوسانات فرکانس Δf و نوسانات ولتاژ ΔV است. همچنین، همان‌گونه که مشخص است در رابطه نهایی هم X و R وجود دارد. این موارد می‌توانند عمومیت رابطه نهایی استخراج شده را نشان بدهد.

رابطه (۱۷) فرم نهایی ارائه شده برای اعمال پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته است. این معادله قابلیت استفاده در سیستم‌های با خطوط طولانی و هم‌چنین کوتاه را دارد.

$$g(f, V) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z \Delta U \cdot k_p \cdot R + \Delta F \cdot k_q \cdot X}{k_p \cdot k_q R^2 + X^2} \\ \frac{Z \Delta F \cdot k_q \cdot R - \Delta U \cdot k_p \cdot X}{k_p \cdot k_q R^2 + X^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$



شکل ۴: ریزشبهه آزمون.



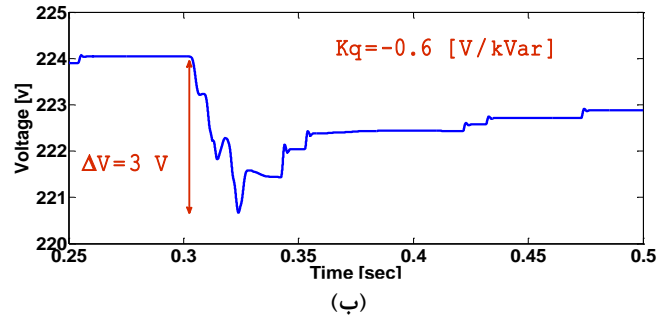
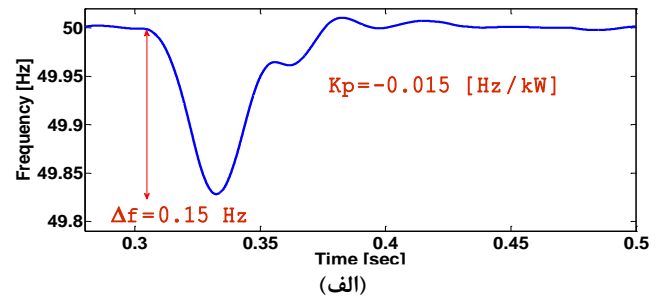
شکل ۵: فرکانس و ولتاژ ریزشبهه در حالت عادی.

جدول ۱: مشخصات بارها در ناحیه‌های متفاوت

ناحیه	بارهای کنترل‌پذیر		۱۰ kW	۴ kVar
	بارهای غیر کنترل‌پذیر			
۱	بارهای کنترل‌پذیر		۴۵+j۵ (kVA)	
	بارهای غیر کنترل‌پذیر			
۲	بارهای کنترل‌پذیر		۱۵ (kW)	۷ kVar
	بارهای غیر کنترل‌پذیر			
۳	بارهای کنترل‌پذیر		۵ (kW)	۲ kVar
	بارهای غیر کنترل‌پذیر			
			۲۰+j۱۰ (kVA)	

جدول ۲: مشخصات بارها در ناحیه ۱

ناحیه	بارهای کنترل‌پذیر	۱۰+j۴ (kVA)	توان نامی (VA)	
			دستگاه	
۱	کنترل‌پذیر		تهویه هوا	۱۵۰۰+j۶۰۰
			ظرف شویی	۱۵۰۰+j۶۰۰
			لباس شویی	۱۵۰۰+j۶۰۰
			گرمایش هوا	۲۰۰۰+j۸۰۰
			گرمایش آب	۲۰۰۰+j۸۰۰
			فریزرها	۱۵۰۰+j۶۰۰
بارهای غیر کنترل‌پذیر (kVA)			۴۵+j۵	



شکل ۳: یافتن ضرایب افتی براساس معادلات (۱۸): الف) k_p ب) k_q .

۴- سیستم آزمون و نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی و آزمون کارکرد روش کنترلی پیشنهادی، یک سیستم توزیع ۱۱ باسه به‌عنوان یک ریزشبهه جزیره‌ای در نظر گرفته می‌شود. [۳۷]. دیاگرام تک‌خطی سیستم آزمون در شکل ۵ نشان داده می‌شود. سیستم آزمون شامل چندین منبع تولید پراکنده جهت تأمین توان بارهای ریزشبهه و چندین بار کنترل‌پذیر و غیر کنترل‌پذیر است. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، ریزشبهه به ۳ ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود. در هر ناحیه یک خانه هوشمند، منابع تولید پراکنده و بارهای کنترل‌پذیر و غیر کنترل‌پذیر وجود دارند. مشخصات بارها در ناحیه‌های متفاوت در جدول ۱ آورده شده است. خانه‌های هوشمند توانایی قطع و وصل و کاهش بارهای کنترل‌پذیر را به وسیله اطلاعات و فرامین دریافتی از شبکه داراست. این داده‌ها توسط الگوریتم پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته تولید می‌گردند. به‌عنوان مثال، بارهای کنترل‌پذیر و غیر کنترل‌پذیر ناحیه ۱ در جدول ۲ داده شده است. همان‌گونه که ذکر گردید، بارهایی می‌توانند مشارکت در الگوریتم پاسخ بار داشته باشند که قطع و وصل آن‌ها به مصرف‌کننده ضرر و زیانی نرساند. براساس جدول ۲، این قبیل بارها می‌توانند بارهایی نظیر ماشین‌های لباس‌شویی، ماشین‌های ظرف‌شویی، سیستم تهویه هوا و غیره باشند. برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی، چندین سناریو در نظر گرفته می‌شود که در ادامه معرفی خواهند شد. حالت عادی و نرمال سیستم در شکل ۶ نشان داده می‌شوند. همان‌گونه که مشخص است فرکانس و ولتاژ سیستم در حالت پایدار و عادی هستند. شبیه‌سازی سیستم آزمون و پیاده‌سازی روش پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SimPowerSystems انجام شده است.

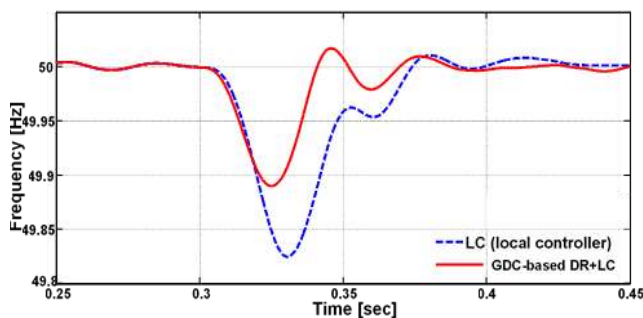
کنترل‌کننده‌های محلی (LC) طرف تولید که مشتمل بر حلقه‌های کنترل اولیه و ثانویه فرکانس است، حضور دارد. درحالی‌که در حالت دوم، غیر از کنترل‌کننده‌های محلی، پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته نیز مشارکت می‌نماید.

براین اساس، منحنی‌های آبی رنگ نتایج کارکرد کنترل‌کننده‌های محلی (LC) طرف تولید را نشان می‌دهند. درحالی‌که نتایج مشارکت الگوریتم در نظر گرفته شده با کنترل‌کننده‌های مرسوم (GDC-based DR+LC) با رنگ قرمز نشان داده شده است.

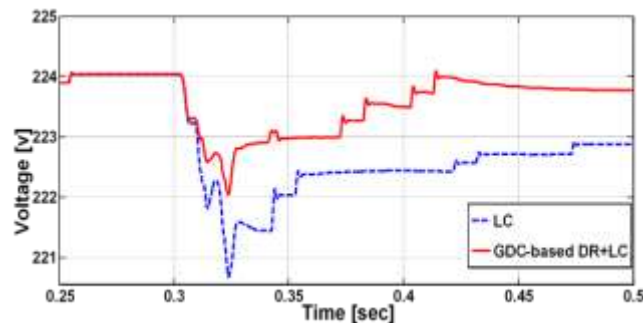
در اولین سناریو، یک بار پله‌ای $10 + j5$ (kVA) به‌طور ناگهانی در زمان 0.3 ثانیه از زمان شبیه‌سازی به سیستم وصل می‌شود. نتایج این رخداد در شکل ۷ (الف-د) نشان داده می‌شود. فرکانس و ولتاژ سیستم تحت کارکرد دو مد کنترلی در شکل ۷ (الف و ب) مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان افت و همچنین سرعت بازایی به مقدار نامی در دینامیک‌ها بهبود یافته است. تغییرات بارهای اکتیو و راکتیو کنترل‌پذیر که خروجی الگوریتم مورد نظر است، در شکل ۷ (ج و د) به ترتیب نشان داده می‌شود.

الگوریتم مورد نظر با تغییر پیوسته بارهای اکتیو و راکتیو کنترل‌پذیر خانه‌های هوشمند، می‌تواند در تنظیم بهتر دینامیک‌ها نقش بسیار مؤثری ایفا کند. با توجه به شکل‌ها مشخص است که الگوریتم پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته توانسته فرکانس و ولتاژ را به‌صورت مناسب‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌های مرسوم کنترل و تنظیم نماید. بارهای جدا شده از سیستم طی یک زمان مشخص و تقریباً طولانی می‌تواند دوباره به حالت اولیه برگردد. زمان بازایی بر اساس شرایط سیستم و توسط الگوریتم اعمالی تعیین می‌شود. با توجه به شکل‌های ۷ (ج و د) مشخص است که الگوریتم توانسته مشارکت پیوسته‌ای از بارهای کنترل‌پذیر در تنظیم دینامیک‌ها بگیرد. عدم وجود تغییرات آنی در بارهای کنترل‌پذیر اکتیو و راکتیو به دلیل تاخیر زمانی در نظر گرفته شده برای اعمال پاسخ بار است. در بخش معرفی اشاره گردید که این تاخیر به دلیل وجود کانال‌های مخابراتی و همچنین زمان مورد نیاز محاسبات ایجاد می‌شود. در دومین سناریو، تأثیر خروج یک واحد منبع تولید پراکنده 100 کیلووات بررسی می‌شود. بنابراین، منبع تولید پراکنده با 6 ریزشبه، در زمان 0.3 ثانیه از سیستم خارج می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در شکل ۸ (الف-د) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص است که کنترل‌کننده پیشنهادی توانسته باز هم کارکرد مناسبی را از خود در کنترل دینامیک‌ها نشان دهد.

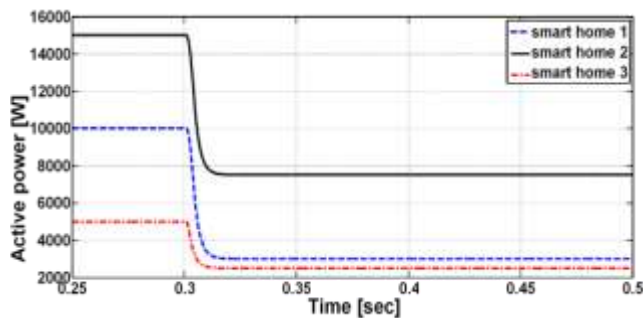
لازم به ذکر است که بارهای راکتیو واقعی و خالصی که مقدار آن‌ها در خانه‌های هوشمند، قابل تنظیم باشد، وجود ندارد. در این شبیه‌سازی‌ها برای کنترل و مدیریت بارهای راکتیو، فرض شده است که وسیله‌های الکتریکی م صرفاً مشخصی از توان راکتیو دارند. اگر این وسایل قطع شوند، مصرف توان راکتیو آن‌ها حذف می‌شود و این به منزله کنترل توان راکتیو خواهد بود.



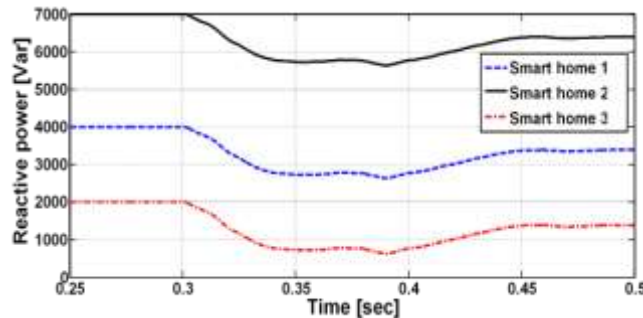
(الف)



(ب)



(ج)

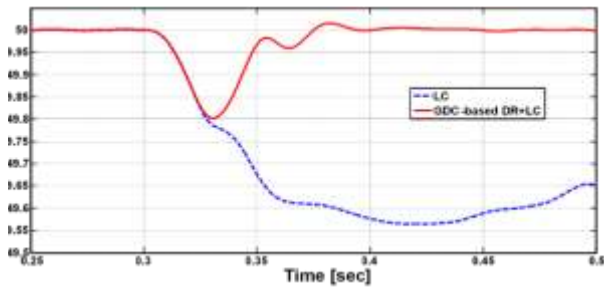


(د)

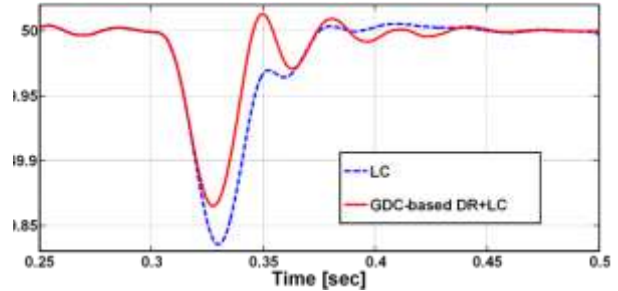
شکل ۶: کارکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور اغتشاش یک بار پله‌ای: (الف) فرکانس (ب) ولتاژ (ج) تغییرات توان اکتیو (د) تغییرات توان راکتیو بر اساس پاسخ بار.

۴-۱- ارزیابی کیفی روش کنترل پیشنهادی

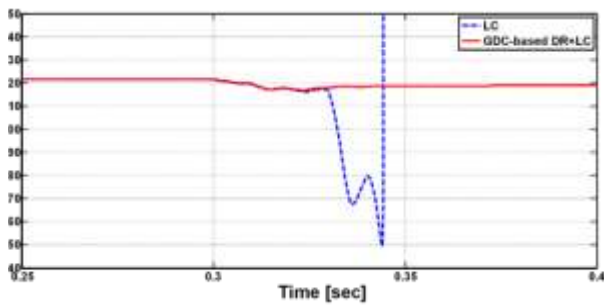
در سناریوهای شبیه‌سازی شده، دینامیک‌های ولتاژ و فرکانس ریزشبه جزیره‌ای در دو حالت مختلف مقایسه شده‌اند. در حالت اول، فقط



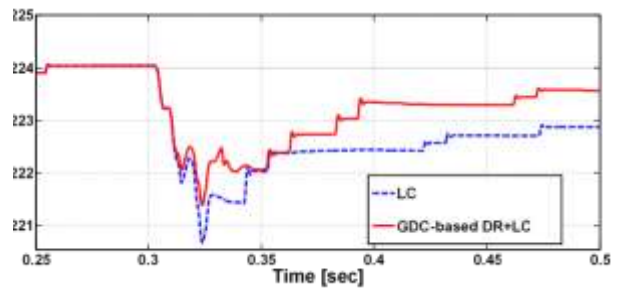
(الف)



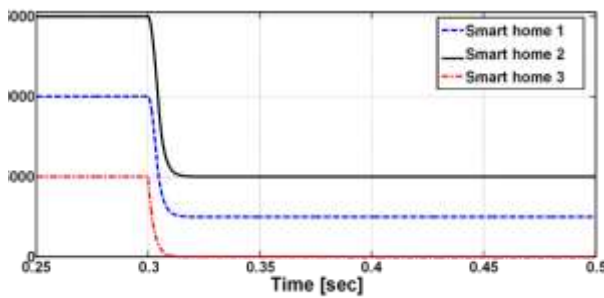
(الف)



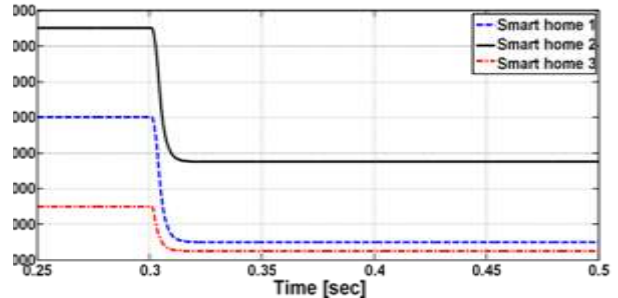
(ب)



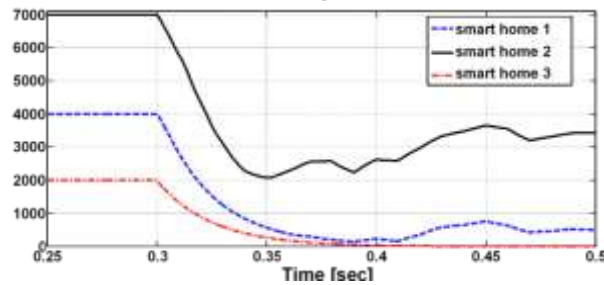
(ب)



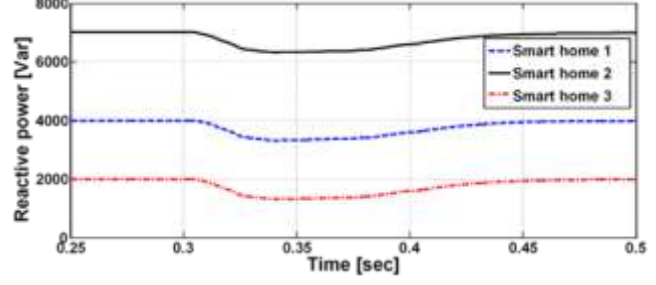
(ج)



(ج)



(د)



(د)

شکل ۸: تأثیر رخداد همزمان بار پله‌ای و خروج DG: الف) فرکانس (ب) ولتاژ (ج) تغییرات توان اکتیو (د) تغییرات توان راکتیو بر اساس پاسخ بار.

باتوجه به شکل‌ها و نحوه تغییرات بارهای اکتیو و راکتیو، معلوم است که حاشیه‌های پایداری فرکانس و ولتاژی سیستم در شرایط حضور کنترل‌کننده مبتنی بر پاسخ بار به خوبی حفظ می‌شود. در بخش معرفی، به این مسئله اشاره شد که در واقع روش کنترلی پیشنهادی برای سیستم با نسبت‌های متفاوت X/R ارایه شده است. فرض مورد اشاره در واقع برای سیستم آزمون در نظر گرفته شده، استخراج گردید و همان گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، این نسبت حدوداً برابر مقدار ۱۳ است که مشخصه سیستم‌های توزیع است. در سیستم‌های انتقال، این نسبت بیش از ۱۰ برابر است جایی که می‌توان از R برابر X صرف نظر کرد.

شکل ۷: تأثیر خروج واحد DG باس ۶: الف) فرکانس (ب) ولتاژ (ج) تغییرات توان اکتیو (د) تغییرات توان راکتیو بر اساس پاسخ بار.

در سناریوی بعدی، تأثیر یک رخداد بسیار شدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این سناریو، اغتشاش بار پله‌ای و خروج منبع تولید پراکنده به صورت همزمان رخ می‌دهد. نتایج این رخداد در شکل ۹ (الف-د) نشان داده می‌شود. همان طور که نتایج نشان می‌دهند، افت فرکانس سیستم با وجود کنترل‌کننده مرسوم پایدار نمی‌شود. این مسئله می‌تواند سبب فعال شدن برخی رله‌های حفاظتی سیستم قدرت گردد. پس در این شرایط امکان خارج شدن واحدهای تولیدی و حتی خاموشی در سیستم وجود دارد؛ اما با وجود کنترل‌کننده پیشنهادی، این افت به شکل قابل ملاحظه‌ای کنترل و محدود شده است.

جدول ۳: نتایج عددی شاخص $\int_0^T |\Delta F|^2 dt$

سناریو	کنترلر	کنترلر مرسوم (LC)	روش پیشنهادی
بار پله‌ایی		۰/۰۰۰۵۸۶۴	۰/۰۰۰۴۰۵۳
خروج DG		۰/۰۰۰۵۲۰۲	۰/۰۰۰۳۴۸۶
بار پله‌ایی+خروج DG		ناپایدار	۰/۰۰۰۸۰۱۲

جدول ۴: نتایج عددی شاخص $\int_0^T |\Delta V|^2 dt$

سناریو	کنترلر	کنترلر مرسوم (LC)	روش پیشنهادی
بار پله‌ایی		۱/۳۳۹	۰/۹۲۵۴
خروج DG		۲/۵۹۶	۱/۹۵۶
بار پله‌ایی+خروج DG		ناپایدار	۳/۰۱۲۵

۲-۴- ارزیابی کمی روش کنترلی

در سناریوهای قبلی، کارکرد روش‌های کنترلی به‌صورت کیفی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش دو شاخص کمی مطابق معادلات (۱۹) برای دینامیک‌های فرکانس و ولتاژ سیستم در نظر گرفته می‌شود. نتایج محاسبه شده این شاخص‌ها، در جدول‌های ۳ و ۴ داده شده‌است. در این حالت نیز می‌توان دریافت که کارکرد روش کنترلی پیشنهادی از حالت‌های دیگر مناسب‌تر بوده است؛ زیرا در تمامی سناریوها، تحت روش کنترلی پیشنهادی، مقدار شاخص‌ها به مراتب کم‌تر بوده‌است.

$$\begin{cases} \int_0^T |\Delta F|^2 dt \\ \int_0^T |\Delta V|^2 dt \end{cases} \quad (19)$$

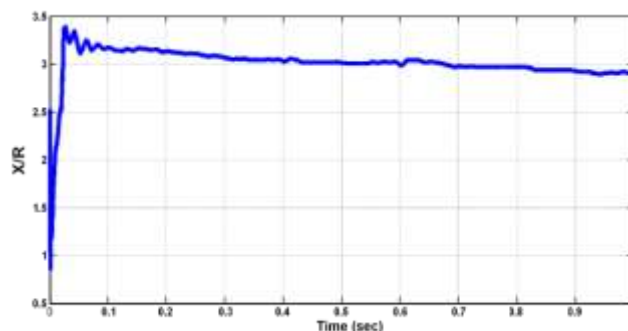
۳-۴- مقایسه کارکرد روش در نظر گرفته شده نسبت به روش

مرسوم کنترل افتی

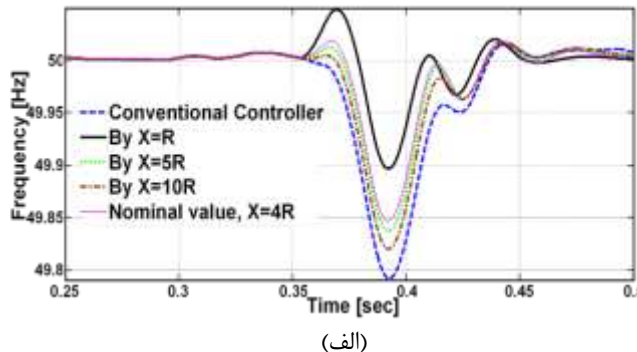
باتوجه به نتایج سناریوی مربوط به ارزیابی عمومیت روش کنترلی پیشنهادی، این قابلیت برای روش مدنظر اثبات گردید که در سیستم‌های متفاوت توزیع یا انتقال می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. روابط پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته، با استفاده از پارامترهای تأثیرگذار و بنیادی سیستم هم‌چون مقاومت (R) و راکتانس خط (X) و هم‌چنین اختلاف فرکانسی (Δf) و نوسانات ولتاژ (ΔV) یافت شده‌است. هم‌چنین، کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی در چندین سناریوی مختلف، مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

به جهت ارزیابی دقیق‌تر کارکرد روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم کنترل افتی [V] که در معادلات (۸) و (۹) آورده شده‌است، در یک سناریوی جدید این مورد نیز مقایسه شده‌است. همان‌طور که در ۱۲ (الف و ب) مشخص است، روش پیشنهادی در رخداد یک بار پله‌ایی (kVA) $10 + j20$ ، با مدیریت بهتر بارهای کنترل‌پذیر نسبت به روش مرسوم، می‌تواند نقش مطلوب‌تری در کنترل ولتاژ و فرکانس سیستم ایفا نماید.

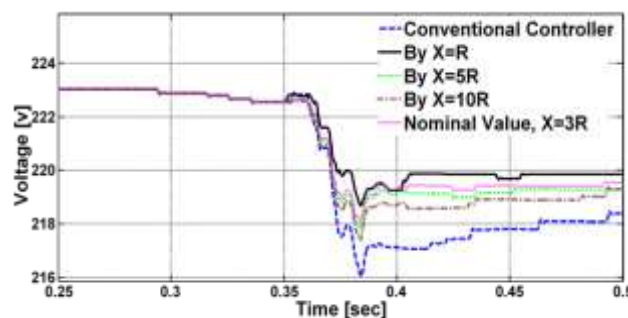
در آخرین شبیه‌سازی به جهت بررسی عمومیت روش پیشنهادی، نسبت X/R متفاوتی در سناریوی بار پله‌ایی و خروج منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شده‌است. بنابراین، برای X/R مقادیر ۱، ۵ و هم‌چنین ۱۰ در نظر گرفته شده‌است. متناظر با این مقادیر، فرکانس و ولتاژ سیستم تحت رخداد بار پله‌ایی و خروج منبع تولید پراکنده، شبیه‌سازی شده و در شکل ۱۱ (الف و ب) نشان داده می‌شود. زمان رخداد خطا ۰/۳۵ ثانیه است. واضح است که کنترل‌کننده موردنظر توانسته کارکرد مناسب و بهینه خود را در تمامی شرایط حفظ نماید. مقدار نامی X/R در شکل‌ها نیز نشان داده شده‌است. این نتیجه می‌تواند عمومیت استفاده از روش پیشنهادی در سیستم‌های متفاوت را به‌خوبی نشان دهد.



شکل ۹: نسبت X/R در سیستم آزمون



(الف)

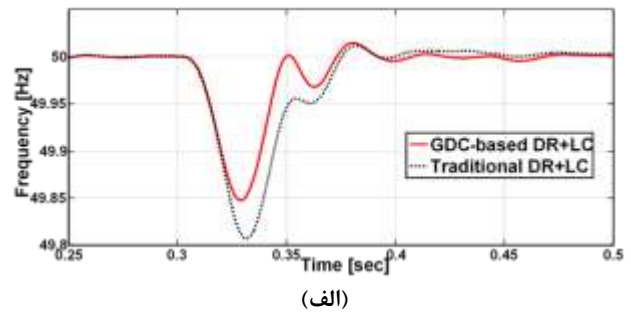


(ب)

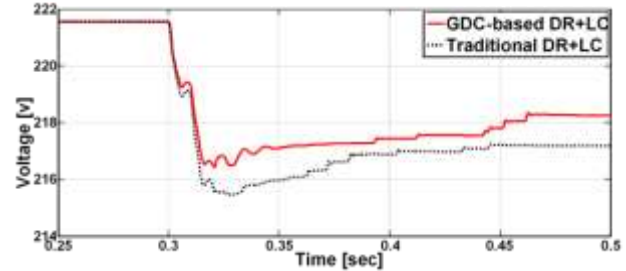
شکل ۱۰: تأثیر نسبت X/R بر کارکرد الگوریتم پیشنهادی: (الف) فرکانس سیستم (ب) ولتاژ سیستم.

مراجع

- [۱] فاطمه جمشیدی، محمدمهدی قنبریان، اسما تفکر، «کنترل مقاوم فرکانس ریزشبه‌کی جزیره‌ای با کنترل گر PI تنظیم‌شده با منطق فازی و الگوریتم رقابت استعماری»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحات: ۱۰۵۹-۱۰۶۷، پاییز ۱۳۹۷.
- [۲] علی کریمی، حسین فلاح‌زاده ابرقوئی، مجید نبیری پور، «روش کنترل جدید برای مبدل منبع ولتاژ و ژنراتور سنکرون به‌منظور کنترل فرکانس در یک ریزشبه‌کی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۲، صفحات: ۸۹۱-۹۰۶، تابستان ۱۳۹۷.
- [3] F. C. Schewpe, R. D. Tabors, J. L. Kirtley, H. R. Outhred, F. H. Pickel, and A. J. Cox, "Homeostatic utility control," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-99, no. 3, pp. 1151-1163, May 1980.
- [4] M. Hussain and Y. Gao, "A review of demand response in an efficient smart grid environment," *Electr. J.*, vol. 31, no. 5, pp. 55-63, Jun. 2018.
- [۵] داود روشن دوست، رحمت اله هوشمند، اسکندر قلی پور، مصطفی نصرت آبادی، «طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبه‌کی صنعتی مبتنی بر منابع CHP از طریق برنامه‌ریزی تولید و پاسخ تقاضا»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۳، صفحات: ۱۹۷-۲۰۹، پاییز ۱۳۹۵.
- [6] P. U. Herath, V. Fusco, M. N. Caceres, G. K. Venayagamoorthy, S. Squartini, F. Piazza, and J. M. Corchado, "Computational Intelligence-Based Demand Response Management in a Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, pp. 732-740, Jan. 2019.
- [7] K. Dehghanpour and S. Afsharnia, "Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: A review on technical aspects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1267-1276, Sep. 2015.
- [8] S. Wang, S. Bi, and Y.-J. A. Zhang, "Demand Response Management for Profit Maximizing Energy Loads in Real-Time Electricity Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6387-6396, Nov. 2018.
- [9] M. Aunedi, P. Aristidis Kountouriotis, J. E. Ortega Calderon, D. Angeli, and G. Strbac, "Economic and environmental benefits of dynamic demand in providing frequency regulation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2036-2048, 2013.
- [10] S. L. Arun and M. P. Selvan, "Intelligent Residential Energy Management System for Dynamic Demand Response in Smart Buildings," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1329-1340, Jun. 2018.
- [11] H. Yang, J. Zhang, J. Qiu, S. Zhang, M. Lai, and Z. Y. Dong, "A Practical Pricing Approach to Smart Grid Demand Response Based on Load Classification," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 179-190, Jan. 2018.
- [12] Y. Bian, H. Wyman-Pain, F. Li, R. Bhakar, S. Mishra, and N. P. Padhy, "Demand Side Contributions for System Inertia in the GB Power System," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 3521-3530, Jul. 2018.
- [13] M. R. Vedady Moghadam, R. T. B. Ma, and R. Zhang, "Distributed Frequency Control in Smart Grids via Randomized Demand Response," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2798-2809, Nov. 2014.
- [14] A. Mohsenzadeh, C. Pang, and M.-R. Haghifam, "Determining Optimal Forming of Flexible Microgrids in the Presence of Demand Response in Smart Distribution Systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3315-3323, Dec. 2018.
- [15] M. Vahedipour-Dahraie, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "Evaluation of reliability in risk-constrained scheduling of autonomous microgrids with demand response and renewable resources," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 6, pp. 657-667, Apr. 2018.
- [16] M. L. Little, S. F. Rabbi, K. Pope, and J. E. Quaicoe, "Unified Probabilistic Modeling of Wind Reserves for Demand Response



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: مقایسه کارکرد روش پیشنهادی با روش مرسوم [۷] پاسخ بار مبتنی بر معادلات (۸) و (۹): (الف) فرکانس سیستم (ب) ولتاژ سیستم.

۵- نتیجه‌گیری

بحران انرژی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی سبب استفاده منابعی غیر از منابع مرسوم در سیستم‌های قدرت مدرن شده است. یکی از جدیدترین این‌ها ایده پاسخ بار است که نظریه‌ای برای استفاده بهینه از ظرفیت‌های طرف بار سیستم قدرت است. در این مقاله تلاش شده است که روشی جدید برای اعمال پاسخ بار ارائه گردد. روش مرسوم در کنترل پاسخ بار، براساس مشخصه افتی است که این روش برای ریزشبه‌کی‌ها که خطوط انتقال طولانی وجود ندارد، مناسب نیست. به‌همین دلیل روش مدنظر در این پژوهش، پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته است. این روش برای تمامی سیستم‌ها اعم از انتقال، توزیع و هم‌چنین ریزشبه‌کی‌ها قابلیت به‌کارگیری را خواهد داشت. برای ارزیابی و آزمودن روش پیشنهادی چندین سناریو شبیه‌سازی می‌شود که در آن ولتاژ و فرکانس سیستم در دو حالت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در حالت اول، فقط کنترل‌کننده‌های مرسوم طرف تولید قرار دارند درحالی‌که در حالت دوم، غیر از کنترل‌کننده‌های مرسوم، حلقه پاسخ بار مبتنی بر مشخصه افتی تعمیم‌یافته نیز مشارکت پیوسته‌ای دارد. روش مدنظر تحت اغتشاش بار پله‌ای، خروج ناگهانی منابع تولید پراکنده و رخداد هم‌زمان این خطاها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها، کارکرد مناسب روش کنترلی پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد. زیرا که در آن‌ها نوسانات ولتاژ و فرکانس به مراتب کمتر می‌شود و حاشیه‌های پایداری به‌خوبی حفظ می‌گردد. هم‌چنین، دو شاخص کارکردی برای ولتاژ و فرکانس سیستم در نظر گرفته‌شده و برای سناریوهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده، کارکرد مناسب روش پیشنهادی را به صورت کمی نیز نشان می‌دهد.

- Systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1282–1291, Mar. 2018.
- [28] G. Benysek, J. Bojarski, R. Smolenski, M. Jarnut, and S. Werminski, “Application of Stochastic Decentralized Active Demand Response (DADR) System for Load Frequency Control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1055–1062, Mar. 2018.
- [29] A. Molina-Garcia, I. Munoz-Benavente, A. D. Hansen, and E. Gomez-Lazaro, “Demand-side contribution to primary frequency control with wind farm auxiliary control,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2391–2399, Sep. 2014.
- [30] A. Molina-Garcia, F. Bouffard, and D. S. Kirschen, “Decentralized demand-side contribution to primary frequency control,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 411–419, Feb. 2011.
- [31] Z. Xu, J. Østergaard, and M. Togeby, “Demand as frequency controlled reserve,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1062–1071, Aug. 2011.
- [۳۲] احسان هوشمند، رضا نوروزیان، عباس ربیعی، «اشتراک‌گذاری بهینه انرژی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۸، شماره ۲، صفحات: ۹۳۱–۹۴۲، تابستان ۱۳۹۷.
- [33] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, “Intelligent frequency control in an AC microgrid: Online PSO-based fuzzy tuning approach,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1935–1944, Dec. 2012.
- [34] F. Habibi, A. H. Naghshbandy, and H. Bevrani, “Robust voltage controller design for an isolated Microgrid using Kharitonov’s theorem and D-stability concept,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 656–665, Jan. 2013.
- [35] H. Bevrani, B. Francois, and T. Ise, *Microgrid dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2017.
- [36] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, “A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, Jul. 2007.
- [37] H. Bevrani and S. Shokoohi, “An intelligent droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in Islanded microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1505–1513, Sep. 2013.
- and Frequency Regulation in Islanded Microgrids,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 5671–5681, Nov. 2018.
- [17] N. Padmanabhan, M. Ahmed, and K. Bhattacharya, “Simultaneous Procurement of Demand Response Provisions in Energy and Spinning Reserve Markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 4667–4682, Sep. 2018.
- [18] K. Ghahary, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. I. Alizadeh, “Optimal reserve market clearing considering uncertain demand response using information gap decision theory,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 101, pp. 213–222, Oct. 2018.
- [19] A. Banshwar, N. K. Sharma, Y. R. Sood, and R. Shrivastava, “Market-based participation of energy storage scheme to support renewable energy sources for the procurement of energy and spinning reserve,” *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 326–344, May 2019.
- [20] A. Fattahi, A. Nahavandi, and M. Jokarzadeh, “A comprehensive reserve allocation method in a micro-grid considering renewable generation intermittency and demand side participation,” *Energy*, vol. 155, pp. 678–689, Jul. 2018.
- [21] S. Bahrami, M. H. Amini, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalao, “A Decentralized Electricity Market Scheme Enabling Demand Response Deployment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4218–4227, Jul. 2018.
- [22] Q. Hu, F. Li, X. Fang, and L. Bai, “A Framework of Residential Demand Aggregation With Financial Incentives,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 497–505, Jan. 2018.
- [23] K. Khezeli and E. Bitar, “Risk-Sensitive Learning and Pricing for Demand Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6000–6007, Nov. 2018.
- [24] Y. Tang, F. Li, Q. Chen, M. Li, Q. Wang, M. Ni, and G. Chen, “Frequency prediction method considering demand response aggregate characteristics and control effects,” *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 936–944, Nov. 2018.
- [25] Y.-K. Wu and K.-T. Tang, “Frequency Support by Demand Response – Review and Analysis,” *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 327–331, Jan. 2019.
- [26] A. Malik and J. Ravishankar, “A hybrid control approach for regulating frequency through demand response,” *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 1347–1362, Jan. 2018.
- [27] P. Babahajyani, Q. Shafiee, and H. Bevrani, “Intelligent Demand Response Contribution in Frequency Control of Multi-Area Power

زیر نویس‌ها

- ¹ Primary frequency control
- ² Secondary frequency control
- ³ Under frequency load shedding (UFLS)
- ⁴ Demand response (DR)
- ⁵ Microgrid (MG)
- ⁶ Local Controller (LC)
- ⁷ Generalized droop based-Demand response
- ⁸ Energy management system/Independent system operator (EMS/ISO)