

تحلیل و ارزیابی کنترل فرکانس مشارکتی ترکیبی ریز شبکه جزیره‌ای در حالت برون‌رفت سلول خورشیدی و تغییرات بار

مریم رحمانی^۱

فرامرز فقیهی^{۲*}

Faramarz.Faghihi@hotmail.com

بابک مظفری^۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: در این مطالعه هدف اصلی کنترل فرکانس ریز شبکه در حالت جزیره‌ای با سناریوهای ممکن الوقوع است. ریز شبکه‌ها قابلیت عملکرد در حالت مستقل از شبکه یا جزیره‌ای را دارند. یکی از مهم‌ترین مشکلات رایج در ریز شبکه‌ها در حالت عملکرد مستقل ناپایداری فرکانس و یا نوسانات فرکانس است.

روش بررسی: در جهت کنترل سریع فرکانس در هر لحظه باید تعادل توانی مابین تولید و مصرف برقرار شود که این مهم توسط منابع ذخیره انرژی از قبیل باتری قابل انجام است. واحد باتری همراه با واسط ادوات الکترونیک قدرت به دلیل دارا بودن زمان پاسخ دینامیکی خیلی سریع می‌تواند به پایداری فرکانس سیستم از طریق تزریق یا جذب توان اکتیو کمک کند. معمولاً در راستای بیشترین استفاده از ظرفیت باتری روش کنترلی کاراً بسیار مهم خواهد بود. با شبیه‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK و ارایه روش جدید کنترلی مشارکتی ترکیبی دو سناریو تعریف می‌شود، سناریو اول ریز شبکه جزیره شده صرفاً با تغییرات بار است؛ اما در سناریو دوم علاوه بر تغییرات بار پائل خورشیدی هم از ریز شبکه خارج می‌شود.

یافته‌ها: در هر دو سناریو با تغییرات بار و برون‌رفت سلول خورشیدی روش کنترلی پیشنهادی شبیه سازی شده است. مشاهده شد که نوسانات فرکانس در حد چند دهم ثانیه میرا شده و در همین زمان باتری پس از اعمال توان به مقدار کمینه خود بازمی‌گردد. همچنین انحرافات ولتاژ را در محدوده‌ی نرمال خود نگاه می‌دارد. با تنظیم ضرایب کنترلی این روند میرایی نوسانات برای فرکانس را می‌توان بهبود بخشید.

بحث و نتیجه‌گیری: روش کنترل فرکانس مشارکتی جدید با نام کنترل فرکانس مشارکتی ترکیبی سیستم ذخیره انرژی باتری و دیزل ژنراتور ارایه داده شد. این کنترل مشارکتی روش کار آبی را در طول عملکرد جزیره‌ای برای کنترل نوسانات فرکانس و بازگرداندن توان BESS به کمینه ارایه می‌دهد و با تنظیم ضرایب کنترلی می‌توان این روند میرایی برای نوسانات فرکانس را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، کنترل مشارکتی، ریز شبکه، کنترل فرکانس، سیستم ذخیره انرژی باتری.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.

۲- استادیار، عضو هیات علمی دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران (مسوول مکاتبات).

۳- دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.

Analysis and Evaluation of Hybrid Cooperative Frequency Control for Micro Grids in Islanding Mode in Case of Solar Panel Outage and Load Variation

Maryam Rahmani¹

Faramarz Faghihi^{2*}

Faramarz.Faghihi@hotmail.com

Babak Mozafari³

Accepted: 2017.02.15

Received: 2016.12.19

Abstract

Background and Objective: This paper proposes frequency control of micro grids in islanding mode with expected scenarios. Micro grids are able to operate in islanding mode. One of the most important difficulties for micro grid in islanding mode is frequency instability or frequency fluctuation.

Method: For rapid Frequency Control, power balance between generation and consumption should be provided momentary which can be achieved with ESS like batteries. Battery station with power electronics devices interface (BESS) due to having very fast dynamic response well designed can lead to improve frequency stability via absorption or injection of active power. Normally to achieve maximum usage of battery capacity considering available charge, choosing efficient control method is so crucial. Two different scenarios are considered to prove of efficiency of proposes cooperative control method using MATLAB/SIMULINK software. In the first scenario on islanding mode micro grid is studied in case of load variation but in another scenario both solar panel outage and load variation solar occurrence are simulated.

Findings: In both scenarios, the proposed control method is simulated by changing the load and solar cell outflow. It was observed that the frequency oscillations were attenuated by a few tens of seconds and at the same time the battery returned to its minimum value after power was applied. It also keeps the voltage deviations within its normal range. By adjusting the control coefficients, this damping process for frequency fluctuations can be improved.

Discussion and conclusion: A new cooperative frequency control method is introduced by combination of frequency control strategy and battery energy storage system via diesel generator attendance, the suggested method presents an efficient method during islanding mode operation of micro grid for frequency fluctuation considering minimum requested power of BESS, provide setting of control coefficients causes improvement of damping rate as well.

Key words: Solar panel, Cooperative Control, Micro Grid, Frequency Control, Battery Energy Storage System.

1- M.Sc. Student of electrical engineering department, Science and Research Branch Islamic Azad University Tehran Iran.

2- Assistant Professor academic member of electrical engineering department, Science and Research Branch Islamic Azad University Tehran Iran. *(Corresponding Author)

3- Associate professor academic member of electrical engineering department, Science and Research Branch Islamic Azad University Tehran Iran.

مقدمه

تغییر کند. بنابراین کنترل فرکانس یکی از مهم‌ترین مباحث در عملکرد جزیره‌ای است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها سیستم ذخیره‌ساز انرژی (ESS)^۳ به‌عنوان یک راه حل مناسب معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس ادوات الکترونیک قدرت بوده و دارای زمان پاسخ خیلی سریعی است. بنابراین یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی خوب طراحی شده می‌تواند به پایدارسازی سیستم از طریق جذب یا تزریق توان لحظه‌ای کمک کند. در برخی از مطالعات از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی دیگری نظیر SMES^۴ برای کنترل فرکانس استفاده شده است. همچنین تعدادی از مطالعات پیشین در زمینه‌ی به‌کارگیری ESS برای پایدارسازی سیستم‌های قدرت و منابع انرژی تجدید پذیر (RES) وجود دارد. در (۷) تا (۹)، یک طرح کنترلی برای کاهش نوسانات توان سیستم تولید انرژی بادی ارائه شده است. این طرح از انرژی ذخیره‌شده در ESS برای صاف کردن توان خروجی توربین بادی استفاده می‌کند. علاوه بر این، ESS می‌تواند در پایداری فرکانس سیستم قدرت هم شرکت کند. در (۱۰) تا (۱۲)، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی سریع عمل‌کننده، به‌طور مؤثری می‌توانند نوسانات الکترومکانیکی در سیستم قدرت را میرا کنند زیرا این سیستم‌ها می‌توانند یک ظرفیت ذخیره‌ای را علاوه بر انرژی جنبشی رتور ژنراتور فراهم‌کنند که می‌تواند تغییرات ناگهانی توان را جبران کنند. بحث معرفی ESS در ریز شبکه در (۱۳) تا (۱۷) ارایه شده است. منابع تولید پراکنده با واسطه‌های الکترونیک قدرت در (۱۳) تا (۱۵) ارایه شده‌اند. در جهت کنترل سریع فرکانس در هر لحظه باید تعادل توانی مابین تولید مصرف برقرار شود که این مهم توسط منابع ذخیره انرژی از قبیل باتری قابل انجام است (۶). واحد باتری همراه با واسطه ادوات الکترونیک قدرت جهت دنبال کردن تغییرات میکروسکوپی بار به‌کاربرده می‌شود زیرا آن‌ها

ریز شبکه قسمتی از شبکه توزیع (ولتاژ متوسط یا ولتاژ ضعیف) است که شامل منابع تولید پراکنده (اعم از منابع گازی، تجدید پذیر و ذخیره‌ساز انرژی) و بارهای الکتریکی داخل آن می‌باشند. ریز شبکه قادر است در دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه عمل کند. وظیفه انطباق دادن تولید و مصرف در حالت متصل به شبکه بر عهده شبکه اصلی و در حالت جدا از شبکه بر عهده منابع ذخیره‌ساز انرژی داخل ریز شبکه است (۱، ۲). در حالت جزیره‌ای حفظ شاخصه‌های کیفیت توان ریز شبکه کاملاً به عهده منابع داخل ریز شبکه هست درحالی‌که در حالت متصل به شبکه تا حد زیادی خود شبکه کیفیت توان مطلوب را برای بارهای ریز شبکه که مقدار زیادی از آن‌ها هارمونیکی و نامتعادل می‌باشند تأمین می‌نماید، هرچند که منابع داخل ریز شبکه نیز می‌توانند در این امر به شبکه اصلی کمک کنند (۳). ذخیره کوتاه‌مدت و بلندمدت منابع ذخیره‌ساز ریز شبکه نقش مهمی در مدیریت منابع و بارهای ریز شبکه خواهند داشت، بنابراین باید برنامه‌ریزی صحیحی در مدیریت توان و انرژی ریز شبکه انجام شود (۴). با توجه به تفاوت‌های شبکه‌های برق معمول در سطح توزیع با ریز شبکه‌ها، طراحی، بهره‌برداری و حفاظت از ریز شبکه‌ها دارای نکات جدیدی می‌باشد. یک ریز شبکه شامل فقط منابع انرژی تجدید پذیر (RES)^۱ و واحدها CHP^۲ مرسوم نظیر دیزل ژنراتور و میکرو توربین، به علت مشخصه‌ی ذاتی‌شان به‌سختی می‌توانند عملکرد دینامیکی خوبی در حالت جزیره‌ای داشته باشد. منابع انرژی تجدید پذیر، طبیعت تناوبی دارند زیرا توان خروجی آن‌ها بستگی به وجود منابع اولیه باد، خورشید و غیره دارد و بنابراین آن‌ها نمی‌توانند تأمین توان موردنیاز برای بار را تضمین کنند. از سوی دیگر، سیستم‌های CHP به علت عملکرد دینامیکی نامناسبشان هنگام تغییرات بار، محدود هستند (۵، ۶). همچنین، فرکانس ریز شبکه ممکن است به علت وجود اینرسی کم ریز شبکه به سرعت

3- Energy storage system

4- Superconducting magnetic energy storage

1- Resource energy storage

2- Cogeneration or combined heat and power

عمل می‌کند و شبکه ولتاژ و فرکانس ریز شبکه را تحمیل می‌کند. عملکرد سیستم در حالت جزیره نسبت به حالت متصل به شبکه بسیار حساس است. برخی از عواملی که عملکرد ریز شبکه جزیره وابستگی زیادی به آن‌ها دارد عبارت است از: استراتژی کنترل واحدهای DG، نوع رابطی که واحدهای DG از طریق آن به بار محلی وصل شده‌اند و نوع بار. کنترل اینورترهای واسط منابع در ریز شبکه به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود که متداول‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: کنترل PQ، کنترل دروپ و کنترل v/f . در این راستا کنترل ریز شبکه جزیره‌ای به روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز انجام می‌شود که در این مقاله مبتنی بر اصول روش کنترل متمرکز ریز شبکه جزیره‌ای، از استراتژی کنترل مشارکتی استفاده می‌شود.

استراتژی کنترل مشارکتی باتری و دیزل ژنراتور

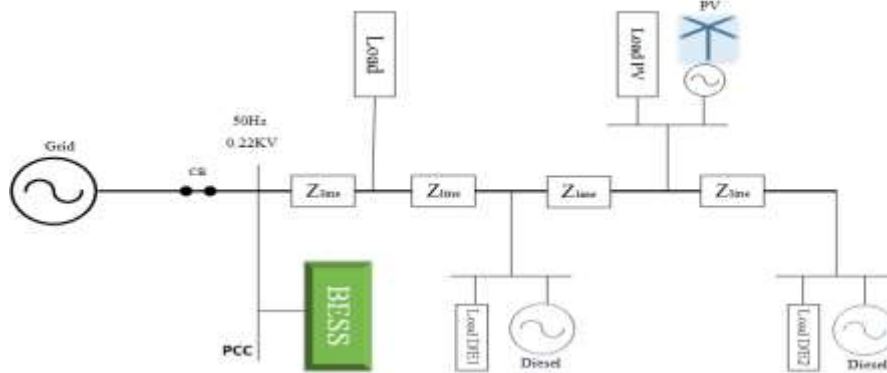
مفهوم اصلی عملکرد مستقل شامل کنترل مشارکتی، منابع ذخیره انرژی و سایر ریز منابع می‌شود. در طول عملکرد جزیره‌ای، میزان توان تولیدی و مصرفی در هر لحظه یکسان نیست. در نتیجه فرکانس و ولتاژ ریز شبکه نوسان و سیستم یک خاموشی را تجربه خواهد کرد مگر این که یک فرآیند برقراری تعادل توان مناسب موجود باشد. در حالت عملکرد جزیره‌ای با متعادل‌سازی مناسب توان ESS، ولتاژ و فرکانس ریز شبکه می‌توانند در مقادیر نامی تنظیم شوند. این تحقیق روش کنترل مشارکتی ریز شبکه را در حالت عملکرد جزیره‌ای برای فرکانس نشان می‌دهد. در این طرح کنترلی، ساختار کنترل مشارکتی دولایه به کار می‌رود. عمل کنترل اولیه در ESS و عمل کنترل ثانویه در سیستم مدیریت ریز شبکه (MMS) انجام می‌شود.

زمان پاسخ دینامیکی خیلی سریعی دارند (۱۸)؛ بالطبع حد ظرفیت باتری مورد استفاده محدود است. همچنین اگر ریز شبکه نتواند، در زمان مناسب به هدف نیل کند، عملکرد و پایداری کل سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۱۹). سیستم DG شامل یک سیستم ذخیره‌ساز منبع انرژی اولیه یا باتری (ESS) و یک اینورتر است. ESS در لینک مشترک dc نصب شده است تا توان خروجی آهسته‌تر منبع انرژی اولیه به‌خصوص سلول سوختی را تکمیل کند. ریز شبکه می‌تواند از طریق نصب ESS در DG هایی که دارای منبع انرژی اولیه با پاسخ نسبتاً آهسته هستند، در حالت عملکرد جزیره‌ای و حتی تغییرات ناگهانی بار به‌صورت پایداری عمل کند. مفهوم کنترل که شامل کنترل اولیه و ثانویه است برای پایداری فرکانس در ریز شبکه پیشنهاد شده است (۲۰). این مفهوم از روش کنترل فرکانس در شبکه قدرت بزرگ تقلید شده است. ESS توان را از طریق مشخصه دروپ جذب یا تزریق می‌کند و انحراف فرکانس با AGC کنترل‌کننده‌ی نظارتی حذف می‌شود در راستای بیش‌ترین استفاده از ظرفیت باتری، روش کنترلی کاراً بسیار مهم خواهد بود. بالطبع پایداری ریز شبکه پس از قرار گرفتن در حالت جزیره‌ای پارامتر بسیار مهم در سیستم تجدید ساختار شده خواهد بود. آن چه در این مقاله انجام می‌شود میرا کردن نوسانات فرکانس در حداقل زمان ممکن است که برای این کار از کنترل‌کننده مشارکتی PI استفاده می‌شود.

روش بررسی

ریز شبکه را می‌توان به‌صورت یک سیستم انرژی یکپارچه که شامل بارها، شبکه‌ی توزیع و واحدهای DG هست تعریف کرد (۲۱). تحت شرایط عادی یک ریز شبکه در حالت متصل به شبکه

شبیه‌سازی مدل سیمولینک



شکل ۱- سیستم نمونه شبیه‌سازی شده

Fig 1- The model system simulated

جدول ۱- مشخصات سیستم

Table 1-System specification

Diesel generator1	18 KVA
Diesel generator2	13KVA
PV Panel	20 KW
BESS	560 KWh
Load PV	(2+j3) to (6+j3) k controllable
Load D/E1	15+j8 K
Load D/E2	9+j8 K
Load	1 to 4 KW Controllable
Line impedance	0.1+0.045j

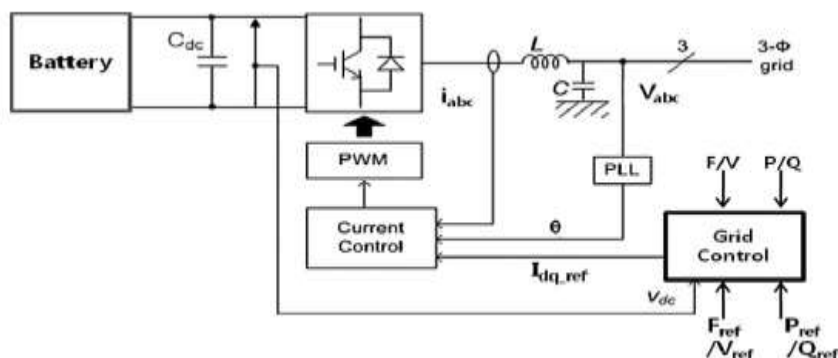
سیستم ریز شبکه شامل یک فیدر 380V است که به شبکه توزیع متصل شده است. همچنین ریز شبکه دارای یک پانل خورشیدی، دو دیزل ژنراتور، سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری، کلید انتقال استاتیکی (STS)^۱ و چهار بار است. اجزای ریز شبکه از طریق خطوط ولتاژ پایین ۳۸۰ ولتی به باس ۳۸۰ ولت متصل شده‌اند. سیستم PV دارای ظرفیت ۲۰ KW است چون توان تولیدی پانل خورشیدی dc است از طریق مبدل الکترونیک قدرت به ریز شبکه متصل شده‌اند. BESS در نزدیکی PCC به باس 220V متصل شده است و زمانی که سیستم به حالت عملکرد جزیره‌ای می‌رود مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم همچنین دارای دو منبع دیزل ژنراتور 18KVA و 13KVA است. کلید انتقال استاتیکی به باس 220V وصل شده است و برای جداسازی ریز شبکه از شبکه اصلی به کار می‌رود. سه بار از نوع خطی و RL است. جدول ۱ مشخصات سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد

مدل دیزل ژنراتور

دیزل به عنوان منبع تولید پراکنده جهت بالانس انحراف بار استفاده می شود. دیزل ژنراتور از یک تحریک کننده و یک گاورنر مطابق شکل ۲ تشکیل شده است. با تغییر توان مکانیکی ورودی، نقطه تنظیم توان خروجی دیزل ژنراتورها تغییر می کند. این دیزل ژنراتور حالت گذرای بالایی دارند. در نتیجه در ابتدا در شبیه سازی سیستم به دلیل این حالت گذرای بالا به صورت نوسانی تا $0/4$ ثانیه ابتدایی مشاهده می شود به همین دلیل شکل ها از $0/5$ ثانیه شروع می شوند.

مدل سیستم ذخیره انرژی باتری

شکل ۲ ساختار کنترلی سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS) و را نشان می دهد. کنترل کننده شامل کنترل کننده عملکرد شبکه اصلی و کنترل کننده جریانی dq است. سیستم ذخیره ساز انرژی بر اساس ادوات الکترونیک قدرت بوده و دارای زمان پاسخ خیلی سریعی است. بنابراین یک سیستم ذخیره ساز انرژی خوب طراحی شده می تواند به پایداری سیستم از طریق جذب یا تزریق توان لحظه ای کمک کند. مدل های مختلف بسیاری برای باتری با در نظر گرفتن ورودی های مختلف از جمله مقدار شارژ، دما و طول عمر تعریف شده است.



شکل ۲- ساختار سیستم ذخیره انرژی باتری

Fig 2- The structure of the battery energy storage system

مدل سلول خورشیدی

در این مقاله برای شبیه سازی سلول خورشیدی از یک منبع ولتاژ DC و اینورتر و سیستم کنترلی مربوط به آن استفاده شده است. به این ترتیب که سیستم کنترلی با نمونه برداری از جریان خط و مدولاسیون PWM با تعیین زاویه آتش اینورتر، مقدار توان لازم را فراهم می کند (۲۸).

یافته ها و بحث

ابتدا روش پیشنهادی کنترل مشارکتی ترکیبی و کنترل مشارکتی ساده را مقایسه کرده و سپس دو سناریو متفاوت برای شبکه

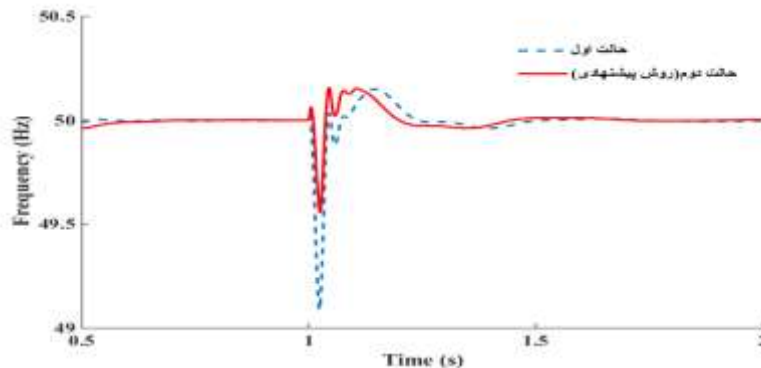
مورد نظر تعریف با توجه به استانداردهای وزارت نیرو تغییرات مجاز فرکانس $0/3$ در نظر گرفته شده است.

مقایسه روش های کنترل مشارکتی ساده و ترکیبی

سیستم ذخیره انرژی باتری در روش های کنترلی پیشین تا قبل از جزیره ای شدن با کنترل PQ و پس از جزیره ای شدن با v/f کنترل می شد اما در این مقاله روش جدیدی برای کنترل باتری ارائه می شود که عملکرد بهتری نسبت به روش قبلی خواهد داشت. در این روش باتری همواره با v/f کنترل می شود اما به محض جزیره ای شدن کنترل PQ نیز به باتری اعمال می گردد. شبیه سازی در هر دو حالت انجام شده است. شکل ۳ انحراف

مشارکتی ساده انحراف فرکانس به مقدار بیش تری نسبت به حالت دوم، کنترل مشارکتی ترکیبی کاهش یافته است. در نتیجه روش مشارکتی ترکیبی نتایج بهبود یافته‌ای خواهد داشت. حال برای بررسی این روش دو سناریو تعریف کرده و تحلیل می‌گردند.

فرکانس در هر دو حالت را نشان می‌دهد. در حالت اول کنترل مشارکتی ساده فرکانس به حدود ۴۹/۱ هرتز می‌رسد اما در حالت استفاده از کنترل مشارکتی ترکیبی، فرکانس تنها ۴۹/۵۲ هرتز کاهش یافته است. اختلاف انحراف فرکانس در دو حالت تقریباً ۰/۴ هرتز بوده است. در نتیجه در حالت اول، کنترل



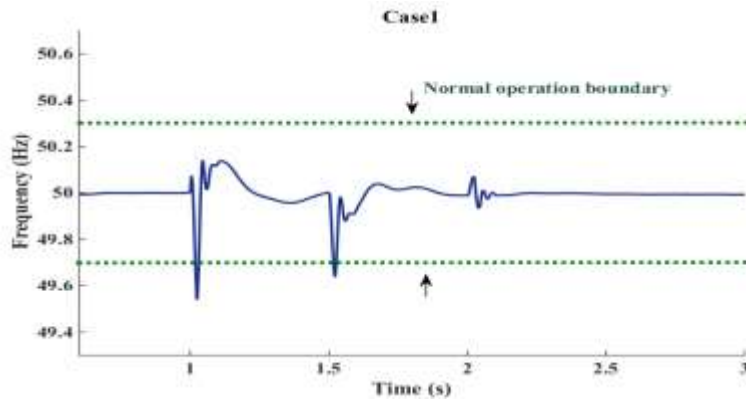
شکل ۳- انحراف فرکانس در حالت‌های ۱ و ۲

Fig 3- Frequency deviation in cases 1 and 2

BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه در لحظه ۲ ثانیه مقدار Load PV از $6+j3(k)$ به $2+j3(k)$ کاهش می‌یابد بنابراین فرکانس از ۵۰ تا ۵۰/۱ هرتز افزایش پیدا می‌کند. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با جذب توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. همچنین همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ولتاژ در زمان‌های ۱ و ۱/۵ و ۲ ثانیه دچار افت شده و با استراتژی کنترلی به‌کاربرده شده حدوداً به محدوده‌ی عملکرد نرمال خود بازمی‌گردد. در نتیجه با این روش کنترل فرکانس مشارکتی شبکه پایدار باقی‌مانده است.

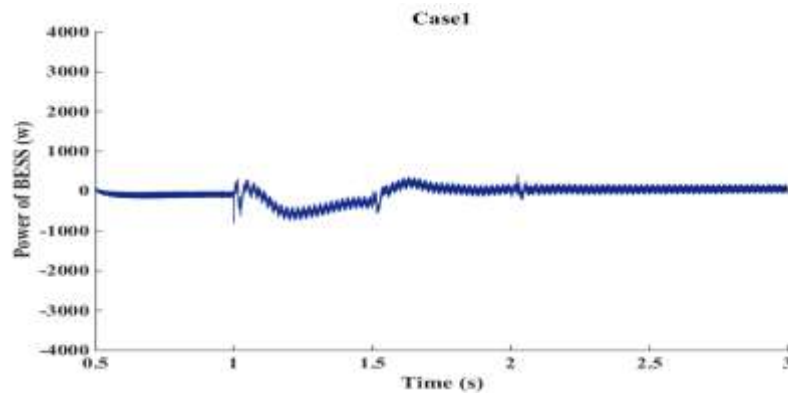
سناریو اول: ریز شبکه جزیره شده با تغییرات بار

در این سناریو ریز شبکه در لحظه ۱ ثانیه از شبکه اصلی جدا شده و جزیره‌ای می‌شود. تا لحظه جزیره‌ای شدن توان مبادله شده BESS با شبکه صفر است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است با جزیره‌ای شدن فرکانس ۵۰ تا ۴۹/۵۷ هرتز افت می‌کند در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه در لحظه ۱/۵ ثانیه مقدار Load از 1(kW) به 4(Kw) افزایش می‌یابد بنابراین فرکانس از ۵۰ تا ۴۲/۶۲ هرتز کاهش پیدا می‌کند. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی



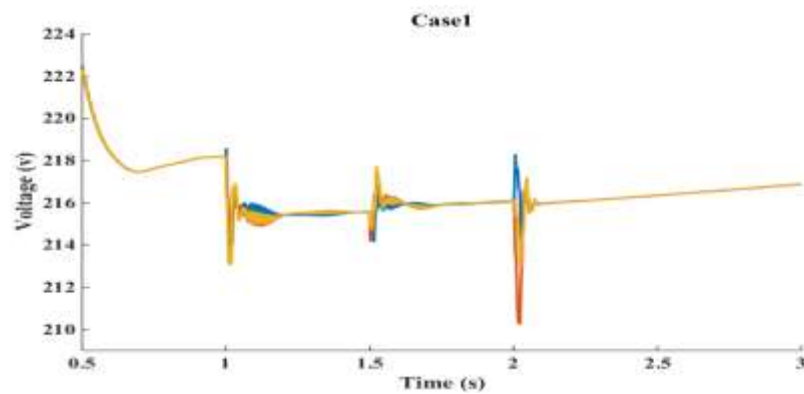
شکل ۴- انحراف فرکانس سناریو اول

Fig 4- Frequency deviation in first scenario



شکل ۵- توان خروجی سیستم ذخیره انرژی باتری سناریو اول

Fig 5- The power output of the battery energy storage system in first scenario



شکل ۶- انحراف ولتاژ سناریو اول

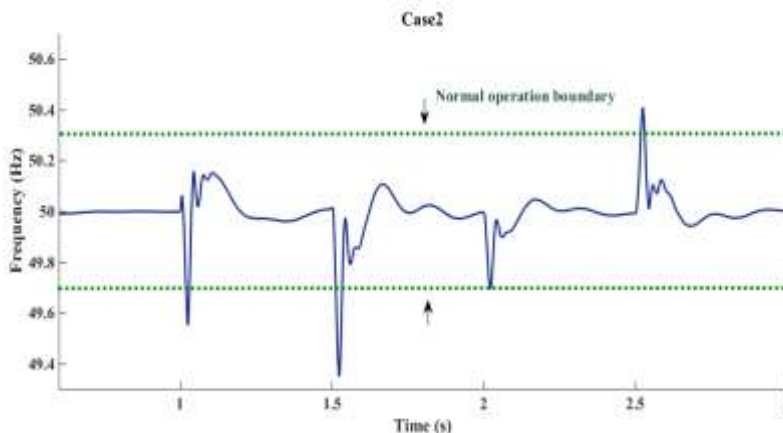
Fig 6- Voltage deviation in first scenario

لحظه ۱/۵ ثانیه مقدار Load از 1(kW) به 4(Kw) افزایش می‌یابد بنابراین فرکانس از ۵۰ تا ۴۹/۷ هرتز کاهش پیدا می‌کند. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه در لحظه ۲ ثانیه مقدار Load PV از $6+j3(k)$ به $2+j3(k)$ کاهش می‌یابد بنابراین فرکانس از ۵۰ تا ۵۰/۳۹ هرتز افزایش پیدا می‌کند. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با جذب توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. همچنین همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، ولتاژ در زمان‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ثانیه دچار افت شده و با استراتژی کنترلی به‌کاربرده شده حدوداً به محدوده‌ی عملکرد نرمال خود بازمی‌گردد.

سناریو دوم: شبکه جزیره شده با برون‌رفت سلول

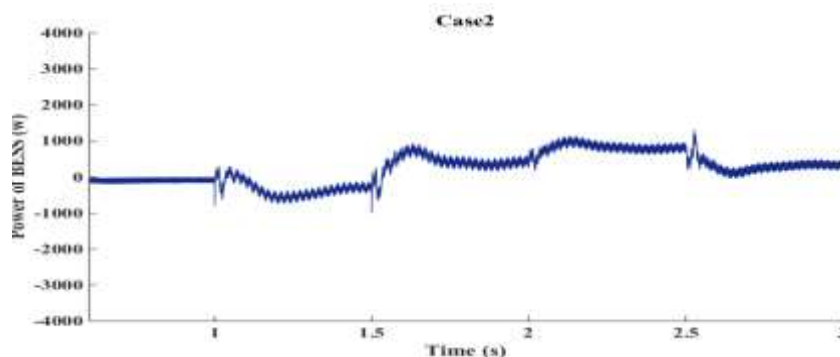
خورشیدی و تغییرات بار

در این سناریو ریز شبکه در لحظه ۱ ثانیه از شبکه اصلی جدا شده و وارد حالت عملکرد جزیره‌ای می‌شود. تا لحظه جزیره‌ای شدن توان مبادله شده BESS با شبکه صفر است. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است با جزیره‌ای شدن فرکانس ۵۰ تا ۴۹/۵۶ هرتز افت می‌کند در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه در لحظه ۱/۵ ثانیه سلول خورشیدی از مدار خارج می‌شود بنابراین فرکانس از ۵۰ تا ۴۹/۳۹ هرتز کاهش پیدا می‌کند. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه در



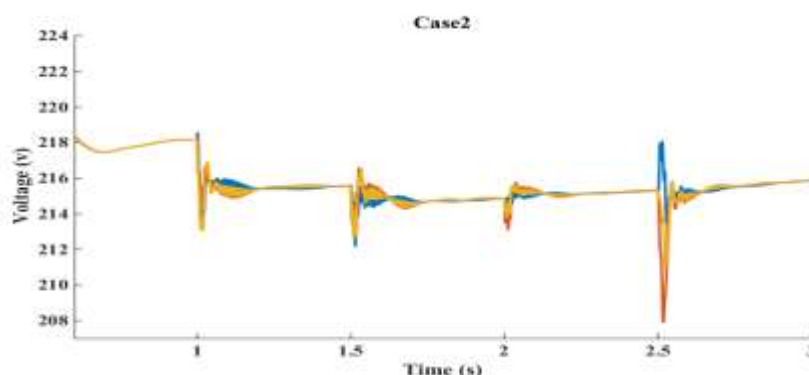
شکل ۷- انحراف فرکانس سناریو دوم

Fig 7- Frequency deviation in second scenario



شکل ۸- توان سیستم ذخیره انرژی باتری سناریو دوم

Fig 8- The power output of the battery energy storage system in second scenario



شکل ۹- انحراف ولتاژ سناریو دوم

Fig 9- Voltage deviation in second scenario

تحلیل و بحث نتایج

خروجی BESS را به صفر برمی گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آنها انجام می شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی گردد. در ادامه مقدار بار افزایش می یابد بنابراین فرکانس کاهش می یابد زیرا ولتاژ باید ثابت نگاه داشته شود در نتیجه افزایش توانی که باید ریز شبکه تولید کند تا مقدار تغییرات بار را پاسخ گو باشد، فرکانس کاهش می یابد؛ و مانند قبل BESS با تزریق توان نوسانات فرکانس را میرا می کند و سپس با کاهش بار نزدیک به پانل خورشیدی فرکانس؛ به دلیل جذب توان در ریز شبکه، افزایش می یابد و در این حالت نیز BESS با جذب توان نوسانات فرکانس را میرا می کند. در سناریو دوم، بعد از جزیره ای شدن ریز شبکه، پانل

در حالتی که کنترل مشارکتی ساده است انحراف فرکانس به مقدار کم تری نسبت به حالت دوم کاهش یافته است. در نتیجه روش مشارکتی ترکیبی نتایج بهبود یافته ای خواهد داشت. در نتیجه با استفاده از این روش دو سناریو ممکن الوقوع تعریف شد البته می توان سناریوهای ممکن الوقوع و توجیه پذیر دیگری نظیر سناریو شامل خروج دیزل ژنراتور از ریز شبکه به دلایل مختلف را نیز تعریف کرد. در سناریو اول ریز شبکه به حالت جزیره ای می رود. تا لحظه جزیره ای شدن توان مبادله شده BESS با شبکه صفر است. با جزیره ای شدن فرکانس افت می کند در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می کند و سپس کنترل ثانویه، توان

زمان باتری پس از اعمال توان به مقدار کمینه بازمی‌گردد و انحرافات ولتاژ را در محدوده‌ی نرمال خود نگاه می‌دارد. در مقایسه با کارهای پیشین در نوع کنترل مشابه از نقطه نظر زمانی برای رسیدن به پایداری ۱۰ تا ۲۰ درصد با توجه به شرایط مساله و سناریو بهبود مشاهده می‌شود. همچنین نیاز به منابع ذخیره ساز کمتری برای تثبیت فرکانس است. برای بهبود این روش می‌توان با تنظیم ضرایب کنترلی روند میرایی فرکانس و ولتاژ را بهبود بخشید که برای آن استفاده از الگوریتم‌های هوشمند همانند منطق فازی به‌عنوان کار آینده پیشنهاد می‌گردد.

منابع

1. Sao, C., Lehn, P., April 2005. Control and power management of converter fed microgrid. IEEE Transactions on Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 1009–1016.
2. Nikkhajoei, H., Iravani, R., 2007. Steady-state model and power flow analysis of electronically-coupled distributed resource units. IEEE Trans. on Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 721–728.
3. Chen, Ch., Wang, Y., Lai, et al, 2010. Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications. IEEE Trans. on Power Electron., vol. 25, no. 1, pp. 6–16, 2010.
4. Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., Dimeas, A., 2008. Microgrids management. Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 6, no. 3, pp. 54 – 65.
5. Amorim, A., Cardoso, L., Oyarzabal, J., et al, 2005. Analysis of the connection of a micro turbine to a low voltage grid, Int. Conf. Future Power System, pp. 16–18.

خورشیدی از ریز شبکه جدا می‌شود در این حالت فرکانس کاهش می‌یابد. در این لحظه BESS وارد عمل شده و با تزریق توان، نوسانات فرکانس را میرا می‌کند و سپس کنترل ثانویه، توان خروجی BESS را به صفر برمی‌گرداند که این کار از طریق تغییر نقاط تنظیم دیزل ژنراتورها و افزایش توان خروجی آن‌ها انجام می‌شود در نتیجه فرکانس به ۵۰ هرتز برمی‌گردد. در ادامه همانند سناریو اول تغییرات بار مشاهده می‌شود که استراتژی کنترلی پیشنهادی به خوبی پاسخ گو پایداری سیستم بوده است. به‌طور کلی در این دو سناریو با استراتژی کنترلی به‌کاربرده شده ولتاژ در حدود نامی خودکار می‌کند و پایداری شبکه حفظ می‌گردد. شایان‌ذکر است برای اعمال تغییرات بارها به این صورت عمل شده است که بارهای اضافی به‌صورت مثبت و منفی با بریکر در کنار مقادیر بارهای پایه قرار گرفته‌اند و در زمان مشخص برای هر سناریو اضافه یا کم می‌شود. در نتیجه با توجه به توضیحات قبل با این سناریوهای ممکن الوقوع، می‌توان انتظار داشت که استراتژی کنترلی پیشنهادی می‌تواند پایداری مناسبی برای شبکه به ثمر آورد.

نتیجه‌گیری

روش کنترل فرکانس مشارکتی جدید با نام کنترل فرکانس ترکیبی سیستم ذخیره انرژی باتری و دیزل ژنراتور ارائه داده شد. در حالتی که کنترل مشارکتی ساده است انحراف فرکانس به مقدار کم تری نسبت به حالت دوم کاهش یافته است که اختلاف انحراف فرکانس در دو حالت ۰/۴ هرتز بوده است در نتیجه روش مشارکتی ترکیبی نتایج بهبود یافته‌ای خواهد داشت. این کنترل مشارکتی روش کار آبی را در طول عملکرد جزیره‌ای برای کنترل نوسانات فرکانس و بازگرداندن توان BESS به کمینه ارائه می‌دهد. در هر دو سناریو با تغییرات بار و برون‌رفت سلول خورشیدی با روش کنترلی شبیه‌سازی شده ترکیبی پیشنهادی، مشاهده شد که نوسانات فرکانس در حد یک‌دهم ثانیه و نوسانات ولتاژ در حد یک ثانیه با روند یکسانی میرا می‌شوند و در همین

13. Thounthong, P., Rael, S., 2009. Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 247–255.
14. Yunwei, L., Mahinda, D., Poh, V., et al, 2004. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1195–1204.
15. Li, W., Kao, C., 2009. An accurate power control strategy for power electronics-interfaced distributed generation units operating in a low voltage multi bus micro grid, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 12, pp. 2977–2988.
16. Tanabe, T., Suzuki, S., Ueda, et al, 2009. Control performance verification of power system stabilizer with an EDLC in islanded micro grid, *IEEE Trans. Power and Energy*, vol. 129, no. 1, pp. 139–147.
17. Lopes, J., Moreira, C., et al, 2006. Defining control strategies for micro grids islanded operation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 916–924.
18. Thounthong, P., Rael, P., Davat, B., March 2009. Analysis of super capacitor as second source based on fuel cell power generation. *IEEE Trans. Energy Convers.* vol. 24, no. 1, pp. 247–255.
19. Xu, Y., Zhang, W., Hug, et al, 2015. Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid, *IEEE Trans. Smart Grid.*, vol. 6, no. 1, pp. 238–248.
6. Saha, A., Chowdhury, C., Chowdhury, S., et al, 2009. Modeling and performance analysis of a micro turbine as a distributed energy resource, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 2, pp. 529–538.
7. Zbiniew, L., Janusz, W., 2007. Supervisory control of a wind farm, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 985–994.
8. Teleke, S., Baran, M., Huang, A., Bhattacharya, S., et al, 2009. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 3, pp. 725–73.
9. Abbey. C., Joos, G., 2007. Supercapacitor energy storage for wind energy applications, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 769–776.
10. Pascal, M., Rachid, C., et al, 2009. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1469–1477.
11. Tripathy, S., Kalantar, M., et al, 1991. Dynamic and stability of wind and diesel turbine generators with superconducting magnetic energy storage unit on an isolated power system, *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 6, no. 4, pp. 579–585.
12. Kim, A., Seo, H., et al, 2010. Operating characteristic analysis of HTS SMES for frequency stabilization of dispersed power generation system, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 1334–1338.

21. Lopes, J., Moreira, C., Madureira, A., May 2006. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 916–924.
22. Teleke, S., Baran, M., Huang, A., Bhattacharya, S., Anderson, L., September 2009. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching. IEEE Trans. Energy Convers. vol. 24, no. 3, pp. 725–732.
23. Tiamtan, Y., 2004. Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation, PhD Thesis, University of Manchester institute of science and technology.

