

تأمین انرژی نواحی حساس به عنوان ریزشبه مبتنی بر اینورتر در زمان خاموشی سراسری سامانه قدرت

محمدحسین خانزاده^{۱*}، محمدرضا نباتی راد^۲

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۵/۲۷، پذیرش: ۹۵/۰۸/۲۲)

چکیده

تغذیه چندگانه نواحی حساس - به عنوان ریزشبه مبتنی بر اینورتر - برای افزایش قابلیت اطمینان سامانه، حفظ پایداری و عملکرد آن در زمان از دست رفتن یک یا چند واحد از منابع تغذیه کننده شبکه، بسیار مهم می باشد. از طرفی، قابلیت عملکرد جزیره ای تضمینی بر در دسترس بودن ناحیه مورد نظر، در زمان خاموشی سامانه قدرت است. برای استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر و تولیدات پراکنده در ساختار ریزشبه، استفاده از مبدل های الکترونیک قدرت، امری ضروریست. بنابراین روش دنبال کردن فرکانس (FT)، با کنترلی غیر متمرکز و به منظور پایدارسازی ریزشبه مبتنی بر اینورتر معرفی می شود. در روش نوین ارائه شده، تمام واحدها فرکانس یکی از واحدها را به عنوان واحد مرجع دنبال کرده و توان مورد نیاز شبکه را پس از اعمال کنترل افت تأمین می کنند. نتایج پیاده سازی این سامانه کنترلی بر روی دو شبکه با ساختارهایی متفاوت در نرم افزار PSCAD، تصدیق بر عملکرد صحیح آن می باشد.

کلیدواژه ها: ریزشبه، کنترل غیر متمرکز، اشتراک گذاری بار، مبدل منبع ولتاژ، دنبال کردن فرکانس (FT)

Energy Supply of Sensitive Areas as an Inverter-Based Microgrid During Stiff Power System Black Out

M. H. Khanzade*, M. R. Nabati Rad

Imam Hossein University

(Received: 18/08/2015; Accepted: 12/11/2016)

Abstract

Multi supply in sensitive areas - as an inverter based Microgrid - is necessary for improving reliability and stabilizing the network in case of losing one or some of the electricity generation units. In addition, islanded mode of Microgrids is a guarantee of continuing operation during black out or failing stiff power system. In order to utilize variety types of distributed generations and renewable energies in Microgrid structure, usage of Power Electronic Interfaces (PEI) is inevitable. As a result, Frequency Tracking (FT) method with decentralized control in order to stabilizing inverter-based Microgrid is introduced. In the proposed novel method, all generation units follow the frequency of one generation unit as a Master and provide required power in network after deployment of Droop Control. The simulation results of proposed control system on two distinct networks in PSCAD confirm its proper functioning.

Keywords: Microgrid, Decentralized Control, Load Sharing, Voltage Source Converter, Frequency Tracking (FT)

*Corresponding Author E-mail: khanzade@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

ذخیره انرژی پراکنده^۴ باید توانایی اضافه شدن به شبکه و یا کم شده از آن را بدون اینکه تأثیر زیادی بر پایداری ریزشبه بگذارند، داشته باشند [۱۰]. یکی از پر کاربردترین مبدل‌های الکترونیک قدرت که در ریزشبه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مبدل منبع ولتاژ (VSC^۵) است. در زمینه کنترل مبدل‌های منبع ولتاژ که بتواند عملکرد صحیح ریزشبه را تضمین کند، بر روی کنترل فاز و دامنه ولتاژ خروجی این مبدل‌ها تحقیقاتی انجام شده است [۱۱ و ۱۲].

برای ریزشبه‌ها دو مد عمده عملکرد تعریف می‌شود؛ عملکرد متصل به شبکه و عملکرد جزیره‌ای [۱۳ و ۱۴]. در حالت متصل به شبکه^۶ واحدهای تولیدات پراکنده درون ریزشبه از شبکه سراسری پیروی کرده و انرژی تزریقی به شبکه را با متغیرهای تعریف شده از طرف شبکه سراسری (فرکانس و ولتاژ) تطبیق می‌دهند. این حالت عملکرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبه را استراتژی کنترل جریان می‌نامند [۱۵]. حال آنکه ریزشبه‌ها به دلیل توانایی عملکرد مستقل یا جزیره‌ای^۷ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در عملکرد جزیره‌ای ریزشبه‌ها، وظیفه پایدارسازی ولتاژ و فرکانس شبکه بر عهده VSC‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کنترل مبدل‌های ریزشبه جزیره‌ای ارائه شده است که کنترل متمرکز و غیر متمرکز ریزشبه‌ها را مطرح می‌کند [۱۶]. برای مثال روش‌های کنترل بر مبنای خطوط ارتباطی بین مبدل‌ها که مزیت‌ها و معایب این سامانه کنترلی ارائه شده است [۱۷]. کنترل یک ریزشبه شامل منابع توزیع شده انرژی در حالت جزیره‌ای پیچیده‌تر از کنترل یک سامانه قدرت مرسوم می‌باشد به طوری که فاصله کم منابع توزیع شده انرژی، دینامیک‌های سریع و ثابت زمانی کوچک واحدهای تولید انرژی، طبیعت نامتعادل ریزشبه، ظرفیت کم ذخیره‌سازی انرژی و نبود اینرسی در شبکه و میزان بالای عدم قطعیت در ساختار ریزشبه را می‌توان از عوامل مهم این امر معرفی کرد [۱۸].

یکی از مباحث مهم در پایداری ریزشبه جزیره‌ای شامل مبدل‌های الکترونیک قدرت، اشتراک‌گذاری بارها بر روی منابع تولید انرژی می‌باشد که در بخش بعدی به صورت مفصل به آن پرداخته می‌شود. در ریزشبه جزیره‌ای، مبدل‌های منبع ولتاژ علاوه بر وظیفه اشتراک‌گذاری بار باید خصوصیتی از جمله تنظیم ولتاژ و فرکانس کل ریزشبه و همچنین استفاده از بازخورد‌های محلی برای کنترل شرایط عملکرد خود را داشته باشند [۱۹]. در این مقاله، با استفاده از روشی نوین، اقدام به اشتراک‌گذاری بار بر روی منابع توزیع شده در ریزشبه جزیره‌ای شده است. به طوری

در چند دهه گذشته استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ و تولیدات پراکنده (DG)^۲ اهمیت بالایی پیدا کرده است. با توجه به مزیت‌های اقتصادی و روشی استفاده از منابع انرژی توزیع شده^۳ (DER) ریزشبه‌ها به عنوان راه حلی عملی و مهم برای بهره گرفتن از مزیت‌های استفاده از تولیدات پراکنده و منابع توزیع شده انرژی، شناخته می‌شوند [۱ و ۲]. افزایش نفوذ تولیدات پراکنده در سامانه‌های قدرت باعث تغییر در نحوه تولید انرژی شده است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از تولیدات پراکنده در تأمین انرژی مورد نیاز بارها، نزدیک بودن آن‌ها به محل مصرف انرژی است [۳]. نزدیک بودن تولید به محل مصرف باعث کاهش تلفات شده که اصولاً این تلفات در خطوط انتقال به وقوع می‌پیوندد. از طرفی تولیدات پراکنده باعث تأمین سرویس‌های کمکی از جمله تأمین توان راکتیو مصرفی بارها و سرویس‌های رزرو و ذخیره انرژی هستند که این موضوع تحقیقات بسیاری را در زمینه تولیدات انرژی از طریق تولیدات پراکنده به همراه داشته است [۴]. از دیگر مزایای استفاده از منابع توزیع شده انرژی کاهش تأثیرات زیست محیطی تولید انرژی الکتریکی است [۵] که در این زمینه نیز ریزشبه‌ها به عنوان محلی مناسب شناخته می‌شوند [۶]. با نگاهی به افزایش نگرانی‌ها در مورد در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی و هزینه تولید انرژی از این منابع، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان تولیدات پراکنده در ریزشبه‌ها نقش مهمی را بازی می‌کنند [۷]. بنابراین با توجه به مطالب فوق، می‌توان ریزشبه را شبکه‌ای با ابعاد کوچک، شامل انواع بارهای الکتریکی، گرمایی و منابع توزیع شده تولید انرژی الکتریکی از جمله تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر انرژی دانست. یکی از راه‌کارهای تأمین انرژی در شرایط بحران که نیروگاه‌های بزرگ دچار آسیب شده‌اند، استفاده از تولید پراکنده و ریزشبه هاست. در چنین شرایطی می‌توان از این امکان برای تأمین انرژی نقاط حساس بهره برد. از دید سامانه قدرت، ریزشبه به عنوان یک سلول با قابلیت کنترل و از دید مصرف کننده یک ریزشبه شبکه‌ای با قابلیت اطمینان بالا، میزان تلفات پایین و دارای بازده بالای تولید انرژی می‌باشد [۸].

افزایش تعداد منابع انرژی در ریزشبه با ظرفیت‌های پایین که به صورت مستقیم به شبکه وصل نمی‌شوند، مباحث مربوط به ریزشبه مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت را مطرح کرده است [۹]. بنابراین در این ریزشبه‌ها، منابع انرژی متصل شده به شبکه، چه از جنس تولیدات پراکنده و چه از جنس سامانه‌های

⁴ Distributed Storage

⁵ Voltage Source Converter

⁶ Grid-Connected

⁷ Islanded

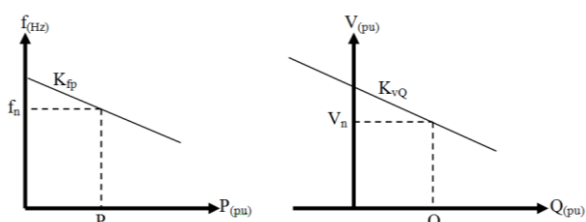
¹ Renewable Energies

² Distributed Generations

³ Distributed Energy Resources

ژنراتورهای سنکرون، روش مرسوم افت با اندازه‌گیری اختلاف فرکانس چرخشی امکان‌پذیر نخواهد بود [۲۴].

به منظور اشتراک‌گذاری بار بر روی واحدهای الکترونیک قدرتی، روش کنترل افت توان اکتیو/فرکانس (P/F) برای پیاده کردن ساختاری شبیه به سامانه‌های مرسوم قدرت ارائه شده است [۱]. از طرفی برای کنترل و پایدارسازی ولتاژ سامانه و اشتراک‌گذاری توان راکتیو بر روی واحدها از کنترل افت توان راکتیو / ولتاژ (Q/V) به عنوان راه‌حلی عملی نام برده شده است [۱۱]. به بیانی دیگر، مشخصه افت P/F ارتباط طبیعی توان اکتیو با فرکانس و مشخصه افت Q/V ارتباط توان راکتیو با ولتاژ خواهد بود. در بعضی از مراجع به این موضوع پرداخته شده است که روش کنترل افت بر اساس P/F و Q/V تنها در شبکه‌هایی با خاصیت سلفی غالب امکان‌پذیر است و به دلیل ماهیت مقاومتی ریزشبهه‌ها از افت توان اکتیو/ولتاژ (P/V) استفاده می‌شود [۲۵ و ۲۶]. شکل (۱) مشخصه کلی تغییرات فرکانس و ولتاژ را در ازای تغییرات توان اکتیو و راکتیو نشان می‌دهد. نمونه کاملی از انواع روابط مربوط به کنترل افت برای اشتراک‌گذاری بار بر روی مبدل‌های منبع ولتاژ ارائه شده است [۲۷].



شکل ۱. مشخصه افت به منظور اشتراک‌گذاری بارها روی واحدها

در این مقاله با ارائه روشی نوین، علاوه بر حذف حساسیت کنترل افت به ساختار خطوط ارتباطی و شبکه، توان اکتیو مورد نیاز ریزشبهه را به صورت دقیق و با دینامیکی سریع و قابل قبول بر روی واحدهای تولید انرژی به اشتراک گذاشته می‌شود. لازم به ذکر است که عمده تمرکز صورت گرفته بر اشتراک‌گذاری دقیق توان اکتیو بوده و این موضوع به دلیل ماهیت ریزشبهه که اصولاً برای تأمین بارهای اکتیو محلی پیکربندی می‌شود، طرح‌ریزی شده است.

حال به بحث عملکرد موازی مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC) پرداخته می‌شود. برای درک بهتر اشتراک‌گذاری بار بر روی منابع و ارتباط توان اکتیو با فرکانس لازم است در ابتدا برای یک شبکه ساده تشکیل شده از دو واحد VSC و یک بار مشترک را در نظر گرفته شود. شکل (۲) نمونه‌ای از ساختار این شبکه را نشان می‌دهد.

که به صورت کاملاً غیر متمرکز و خودکار، با توجه به ظرفیت واحدها، بارها بر روی واحدها به اشتراک گذاشته می‌شوند. در واقع هدف از کار انجام شده، ارائه ساختار کنترلی برای یک ریزشبهه جزیره‌ای می‌باشد که به صورت مستقل و بدون هیچ وابستگی به آرایش ریزشبهه و پارامترهای مربوط به ساختار شبکه بتواند ریزشبهه را پایدار ساخته و دینامیکی سریع برای مبدل‌های منبع ولتاژ درون ریزشبهه را به همراه داشته باشد. روش پیشنهادی بر اساس دنبال کردن فرکانس خروجی یکی از واحدها به عنوان مرجع^۱ در ساختار ریزشبهه و اعمال کنترل افت^۲ به صورت هم‌زمان می‌باشد. بنابراین این روش را روش دنبال کردن فرکانسی یا FT^۳ نامیده می‌شود.

۲. اشتراک‌گذاری بار

در سامانه‌های قدرت مرسوم، به دلیل وجود ژنراتورهای سنکرون، میزان قابل توجهی لختی دورانی در شبکه وجود خواهد داشت. بنابراین، در اشتراک‌گذاری بار و همچنین سنکرون کردن دیگر ژنراتورها با شبکه، لختی دورانی نقش مهمی را بازی می‌کند. به طوری که برای سنکرون کردن ژنراتورهای سنکرون با شبکه سه شرط مهم باید برقرار شود که عبارتند از: کوچک کردن اختلاف زاویه فازها و یکسان کردن فرکانس و همچنین حذف کردن اختلاف ولتاژ بین ماشین‌ها [۲۰]. در ریزشبهه مورد بحث، که به عنوان ریزشبهه بر پایه اینورتر معرفی شده است، تمام منابع توزیع شده انرژی از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل شده‌اند. بنابراین به دلیل نبود اینرسی و لختی دورانی در این شبکه، برای داشتن ساختاری پایدار و تأمین انرژی مورد نیاز بارها نمی‌توان مانند ماشین‌های سنکرون در سامانه‌های مرسوم قدرت عمل کرد. در یک ریزشبهه جزیره‌ای تمام DGها مسئولیت نگه داشتن ولتاژ و فرکانس سامانه در محدوده قابل قبول را بر عهده دارند. به دلیل ظرفیت نسبی پایین اکثر DGها در ریزشبهه جزیره‌ای، نگه داشتن تعادل در تولید توان بسیار مهم بوده و این موضوع مورد توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. با توجه به همین مطالب، DGها در ریزشبهه جزیره‌ای باید توان مورد نیاز شبکه را بر اساس ظرفیت واحدها به اشتراک بگذارند و از تولید جریان‌های چرخشی بین منابع تولید انرژی خودداری شود [۲۳]. در سامانه‌های قدرت مرسوم، هر گونه عدم تعادل در تولید توان اکتیو باعث ایجاد تغییر در فرکانس می‌شود. در نتیجه تعادل در توان اکتیو تولیدی با تفاوت فرکانس هر ژنراتور با فرکانس مرجع به دست خواهد آمد و همان طور که گفته شد در ریزشبهه شامل مبدل‌های الکترونیک قدرت و بدون حضور

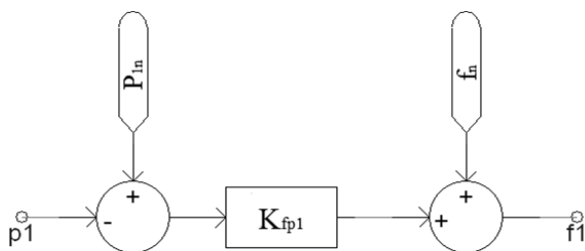
¹ Master

² Droop Control

³ Frequency Tracking

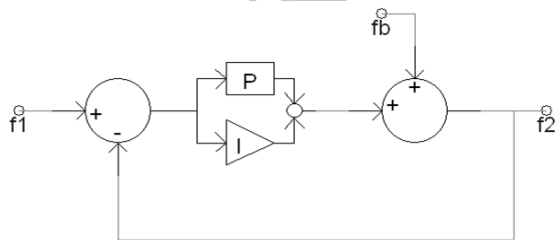
تحلیل دینامیکی ساختار آن شبکه ضروری می‌باشد و خود چالش برانگیز است. روش نوین پیشنهادی (FT) اقدامی در بهبود شرایط عملکرد ریزشبكة با توجه به مطالب اشاره شده می‌باشد.

قبل از پرداختن به روابط ریاضی حاکم بر ساختار FT، به شبکه شکل (۲) رجوع کنید. با فرض بر اینکه دو واحد VSC دارای ظرفیت‌های نامی متفاوت و مبدل شماره یک به عنوان مرجع و دیگری Slave، سامانه کنترل افت مرسوم را پیاده‌سازی می‌شود (شکل (۳)).



شکل ۳. مدل کنترلی استفاده شده برای واحد مرجع در محیط pscad در سامانه کنترلی نشان داده شده در شکل (۳) ضریب افت تعیین شده برای واحد مرجع، P_1 توان تولیدی توسط واحد مورد نظر، P_{1n} توان نامی واحد اول بر حسب پریونیت، f_n فرکانس نامی شبکه و f_i فرکانس تولیدی توسط واحد مرجع است.

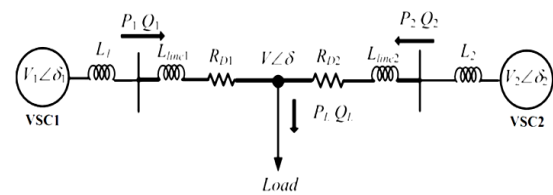
به بیان دیگر، واحد VSC شماره یک، توان نامی خود را با فرکانس نامی (50 Hz) تولید می‌کند. در روش FT دیگر واحدها ملزم به دنبال کردن فرکانس تولیدی توسط واحد مرجع می‌باشند. بنابراین ساختار سامانه کنترل باید این امر را محیا سازد. بدین منظور با استفاده از یک کنترل کننده PI در حلقه کنترلی مبدل دوم، اقدام به حذف خطای فرکانسی بین دو منبع شد. شکل (۴) به صورت کلی نحوه اعمال کنترل کننده PI بر سامانه را نشان می‌دهد:



شکل ۴. سامانه مکمل کنترلی پیشنهادی برای هر واحد Slave

در شکل (۴) متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- f_1 : فرکانس تولیدی توسط واحد مرجع پس از پیاده‌سازی کنترل افت؛
- f_2 : فرکانس تعیین شده برای واحد Slave پس از پیاده‌سازی کنترل افت؛
- f_2 : فرکانس خروجی دستور داده شده به واحد دوم یا Slave



شکل ۲. ریزشبكة پایه به عنوان شبکه‌ای استاندارد برای اعمال سامانه‌های کنترلی

در شکل (۲)، هر واحد VSC با توجه به ظرفیت نامی خود بار را تأمین می‌کند. برای اعمال کنترل افت بر VSCها در ابتدا رابطه (۱) را به عنوان رابطه اصلی در این زمینه معرفی می‌شود:

$$f_i^* = f_n + K_{pi}(P_n - P_{si}) \quad (1)$$

در روابط فوق، f_n فرکانس نامی سامانه در نقطه کار نامی هر واحد (P_n) و همچنین K_{pi} و P_{si} به ترتیب ضریب افت توان اکتیو و توان اکتیو خروجی VSC هستند. لازم به ذکر است که K_{pi} عددی مثبت و کوچک و متناسب با ظرفیت واحد است. ضریب افت توان اکتیو و راکتیو در VSCها با توجه به مقادیر مجاز تغییرات فرکانس و ولتاژ تعیین می‌شوند. رابطه (۲) نحوه محاسبه K_{pi} بر اساس این تغییرات را نشان می‌دهد:

$$K_{pi} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{si \text{ Max}}} \quad (2)$$

به منظور تحلیل دینامیکی مسئله و لزوم وجود ضریب افت برای داشتن شبکه‌ای پایدار در اشتراک‌گذاری بار، مرجع [۲۸] روابط دینامیکی مهم در این زمینه را مطرح کرده است. به صورت خلاصه با وجود اینکه کنترل افت باعث فاصله گرفتن فرکانس از مقدار نامی خود می‌شود، ولی خطوط ارتباط سیگنالی بین VSCها را کنار می‌زند و از آن می‌توان در اشتراک‌گذاری بارها استفاده کرد [۲۹].

حال پس از معرفی کلی روش کنترل افت و لزوم اعمال آن، به معرفی روش نوین پیشنهادی برای اشتراک‌گذاری توان اکتیو بر روی واحدهای تولید انرژی در ریزشبكة پرداخته می‌شود.

۳. روش دنبال کردن فرکانس در اشتراک‌گذاری بار

همان‌طور که در بخش‌های قبلی مشاهده شد، بحث‌های مربوط به کنترل افت عمدتاً در زمینه سیگنال-کوچک بوده و نتایج قابل قبولی را در تغییرات کوچک بار نشان می‌دهد. حال آنکه این موضوع خود یک محدودیت بوده و ما به ساختاری پایدارتر در تغییرات بزرگ‌تر نیاز داریم. از طرفی در مطالعات دینامیکی صورت گرفته بر روی ریزشبكة‌های شامل VSC، در ابتدا یک ریزشبكة به صورت پایدار و با شبکه‌ای سنکرون فرض شده است و سپس برای تحلیل دینامیکی شبکه در حوزه dq از این فرض استفاده شده است. در صورتی که داشتن شبکه‌ای پایدار قبل از

با توجه به آنچه که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود، سامانه کنترلی پیشنهادی دارای یک قطب در سمت چپ محور موهومی می‌باشد که در واقع این سامانه مرتبه ۱ جلوی نوسانی شدن و ناپایدار شدن سامانه در تغییرات بار را خواهد گرفت. مقادیر ویژه سامانه کنترلی توسط رابطه (۵) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\lambda = -\frac{k_i}{1+k_p} \quad (5)$$

بنابراین وجود یک انتگرال‌گیر در سامانه کنترلی برای پایدارسازی ریزشبهه حین تغییرات لازم است. برای بهتر معرفی کردن تابع تبدیل، رابطه (۴) را به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌شود.

$$f_2(s) = \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + k_{fp1}P_{n1}) - \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (k_{fp1}P_{o1}(s)) + \frac{1}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + k_{fp2}P_{n2}) - \frac{1}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (k_{fp2}P_{o2}(s)) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، سیگنال فرکانس تولیدی توسط واحد دوم به ازای P_{o1} و P_{o2} به عنوان ورودی‌های سامانه کنترلی نشان داده شده است.

در سامانه ای که از دو واحد تشکیل شده است، توان اکتیو درخواستی شبکه از مجموع توان تولیدی هر واحد تشکیل خواهد شد. در نتیجه:

$$P_1 = P_{o1} + P_{o2} \quad (7)$$

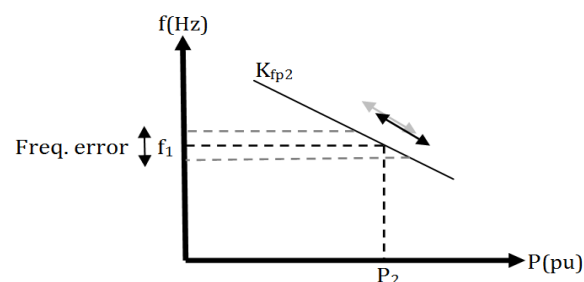
بنابراین با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۶)، تغییرات فرکانس واحد دوم به ازای تغییرات بار در کل شبکه و واحد اول به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه خواهد بود.

$$f_2(s) = \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + k_{fp1}P_{n1}) - \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (k_{fp1}P_{o1}(s)) + \frac{1}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + k_{fp2}P_{n2}) - \frac{1}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times (k_{fp2}(P_1(s) - P_{o1}(s))) \quad (8)$$

برای بهتر نشان دادن تغییرات توان در شبکه، از تابع پله استفاده می‌شود. به طوری که توان کل شبکه به صورت ناگهانی از P_{11} به P_{12} تغییر می‌کند. در نتیجه توان تولیدی توسط واحد اول نیز به صورت پله با توجه به مشخصه افت تغییر خواهد کرد. تغییرات پله در توان اکتیو درخواستی توسط شبکه و توان تولیدی واحد اول را در حوزه s به صورت رابطه‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد.

$$P_1(s) = \frac{\Delta P_1}{s} \quad (9)$$

همان طور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، وجود یک فرکانس در شبکه برای داشتن سامانه‌ای پایدار لازم و ضروری است. در ریزشبهه‌هایی که از VSC تشکیل شده‌اند، به منظور داشتن کنترل غیر متمرکز، نمی‌توان به صورت دستوری فرکانس و توان تولیدی، هر واحد را تعیین کرد. بنابراین باید روشی ارائه شود که در آن علاوه بر تثبیت فرکانس، به صورت غیر متمرکز ریزشبهه را کنترل کرده و در حین عملکرد پایدار، بارها درون شبکه به خوبی به اشتراک گذاشته شوند. شکل (۵) نحوه عملکرد FT برای واحد دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۵. عملکرد کنترل کننده pi در تثبیت فرکانس

در روش پیشنهادی برای داشتن فرکانسی واحد در شبکه، فرکانس خروجی هر واحد را به فرکانس خروجی واحد مرجع نزدیک می‌شود. این عمل از طریق یک کنترل کننده PI انجام می‌شود. در واقع کنترل کننده PI اقدام به تغییر فرکانس لحظه‌ای تولیدی توسط واحدها کرده و اختلاف فرکانس بین واحدها در حالت پایدار را صفر می‌کند. در ادامه مقاله به مزیت‌های استفاده از این روش و برتری‌هایی که دارد پرداخته می‌شود.

با توجه به رابطه (۱) و ساختار کنترلی FT می‌توان رابطه (۳) را به عنوان فرکانس خروجی واحد دوم بر اساس توان اندازه‌گیری شده در ترمینال آن به صورت زیر تعریف کرد:

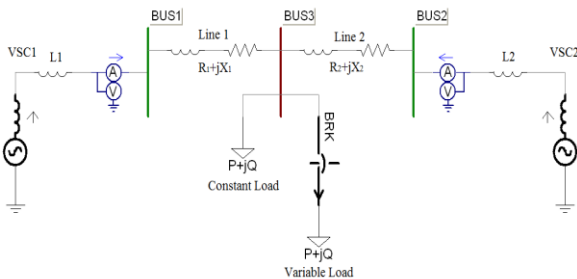
$$f_b = f_n + K_{fp2}(P_{n2} - P_{o2}) \quad (3)$$

همان طور که در شکل (۴) نمودار سامانه کنترلی پیشنهادی نشان داده شده است، اقدام به استخراج تابع تبدیل سامانه کنترلی برای تولید سیگنال فرکانس در واحد دوم می‌شود. رابطه (۴) فرکانس خروجی واحد دوم به ازای تغییرات در فرکانس واحد اول و فرکانس تولیدی توسط مشخصه افت در واحد دوم را نشان می‌دهد:

$$f_2(s) = \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times f_1(s) + \frac{1}{1+k_p + \frac{k_i}{s}} \times f_b(s) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، مقادیر k_p و k_i به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرال‌گیر در کنترل کننده PI هستند.

شبکه تحت مطالعه شماره ۱: برای نشان دادن عملکرد FT، ریزش شبکه تحت مطالعه شامل دو VSC و خطوط ارتباطی غالباً مقاومتی و بارهای متمرکز را در شکل (۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۶. مدل ریزش شبکه استاندارد تحت مطالعه

در بخش پیوست مقادیر متغیرها و پارامترهای مرتبط با شبکه شکل (۶) ارائه شده است. در این شکل، یک ریزش شبکه شامل دو VSC نشان داده شده است. هر VSC از طریق یک سلف ارتباطی به شبکه وصل شده به طوری که با L_1 و L_2 نشان داده شده‌اند. خطوط ارتباطی بین واحدها و بار مشترک با پارامترهای کامل مدل شده است به طوری که از اندوکتانس خطوط در سطح توزیع صرف نظر نشده و در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند.

VSCها در شکل (۶) مبدل‌های کنترل شونده‌ای هستند که سیگنال‌های فرکانس و ولتاژ از طریق کنترل کننده تعریف شده برای هر واحد به آن‌ها تزریق می‌شود. از طرفی شبکه شامل یک بار ثابت با مقادیر توان اکتیو و راکتیو تعیین شده و همچنین یک بار متغیر به منظور ایجاد تغییر در نقطه کار ریزش شبکه حین عملکرد پایدار می‌باشد. فرض بر این است که واحدهای تولید توان، توانایی تولید ولتاژ در مقدار نامی تعیین شده را داشته باشند. بنابراین سامانه کنترلی تنها بر روی فرکانس و توان اکتیو اشتراک گذاشته شده اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته هیچ کدام از پارامترهای شبکه نادیده گرفته نشده‌اند. مبدل‌های الکترونیک قدرت در این شبکه توسط اندوکتانس‌های L_1 و L_2 به شبکه وصل شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این راکتانس‌ها مقادیری بزرگ‌تر از راکتانس خطوط ارتباطی و البته غیر برابر با همدیگر هستند تا به حداکثر غیرمتقارن بودن در شبکه دست پیدا کرد. توان نامی واحد دو، یا به زبان دیگر واحد Slave نصف توان نامی واحد اول یا مرجع در نظر گرفته شده است. بنابراین در اشتراک‌گذاری بار انتظار می‌رود توان تأمین شده توسط این واحد $\frac{1}{3}$ کل توان مصرفی در شبکه باشد. از طرفی ضریب افت برای واحد اول 0.12 در نظر گرفته شده است، بنابراین طبق رابطه (۱۵) برای داشتن اشتراک‌گذاری قابل قبول بر روی واحدها، ضریب افت برای واحد دوم باید

$$P_{01}(s) = \frac{\Delta P_{01}}{s} \quad (10)$$

طبق قضیه مقدار نهایی در حوزه لاپلاس خواهید داشت:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s f(s) \quad (11)$$

بر اساس آنچه که قضیه مقدار نهایی در رابطه (۱۱) نشان می‌دهد، اگر تغییراتی به صورت پله در توان درخواستی شبکه داشته باشید، تغییرات فرکانس خروجی واحد دوم در حالت پایدار با توجه به رابطه (۱۲) محاسبه خواهد شد.

$$\Delta f_2(t) = -(k_{fp1} \times \Delta P_{01}) \quad (12)$$

اگر به رابطه (۱۲) توجه شود، طبق رابطه (۱) عبارت سمت راست رابطه نمایانگر تغییرات فرکانس در واحد مرجع است. بنابراین تغییرات فرکانس در واحد دوم طبق سامانه کنترلی پیشنهادی کاملاً منطبق بر واحد مرجع بوده و هیچگونه اختلاف فرکانسی در حالت عملکرد پایدار در شبکه وجود نخواهد داشت.

از طرفی، در حالت پایدار برای واحد دوم f_2 با f_1 و هر دو مقدار با f_1 برابر خواهند بود. در نتیجه طبق رابطه (۲) خواهید داشت:

$$\Delta f_2(t) = -(k_{fp2} \times \Delta P_{02}) \quad (13)$$

اگر رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) را مورد بررسی قرار دهید، ثابت می‌شود:

$$(k_{fp2} \times \Delta P_{02}) = (k_{fp1} \times \Delta P_{01}) \quad (14)$$

در نتیجه:

$$\frac{k_{fp1}}{k_{fp2}} = \frac{\Delta P_{02}}{\Delta P_{01}} \quad (15)$$

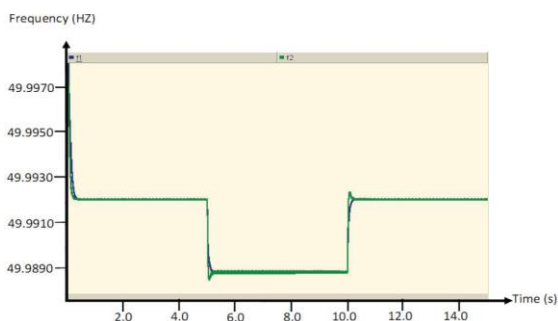
رابطه (۱۵)، شرط اشتراک‌گذاری بار بر روی واحدها با استفاده از کنترل افت می‌باشد که در بسیاری از مراجع به گونه‌ای دیگر به آن پرداخته شده است [۲۸ و ۳۰].

۴. نتایج شبیه‌سازی

برای اعمال FT بر روی ریزش شبکه و مشاهده نتایج حاصل از آن، از دو شبکه تحت مطالعه متفاوت استفاده شده است. شبکه اول به‌عنوان شبکه استاندارد معرفی می‌شود و ساختاری مشابه با ساختار شکل (۲) دارد. پس از استخراج نتایج مورد نظر، سامانه کنترلی FT را بر روی شبکه‌ای با ابعاد گسترده‌تر و شامل پنج VSC با خطوط ارتباطی غالباً مقاومتی و غیر متقارن، اعمال خواهد شد.

وارد شدن بار متغیر در شبکه، حدود 0.003 هرتز افت پیدا کرده است که بسیار ناچیز می‌باشد. این افت فرکانس کاملاً وابسته به ضریب افت در سامانه کنترل واحدها است. هر چه ضریب افت کوچک‌تر باشد، افت فرکانس کمتری را شاهد خواهید بود ولی دینامیک توان اشتراک گذاشته شده کندتر و در مواردی غیر قابل قبول خواهد شد.

شبکه تحت مطالعه شماره ۲: شکل (۹) شبکه گسترش یافته تحت مطالعه شامل بارهای محلی و متمرکز و همچنین خطوط ارتباطی غالباً مقاومتی را نشان می‌دهد. در واقع هدف از ارائه این شبکه، دستیابی به حداکثر عدم تقارن در ساختار آن و نزدیک بودن پارامترهای آن به عملی می‌باشد.



شکل ۸. فرکانس خروجی واحدهای VSC در ریزشبهه جزیره‌ای استاندارد

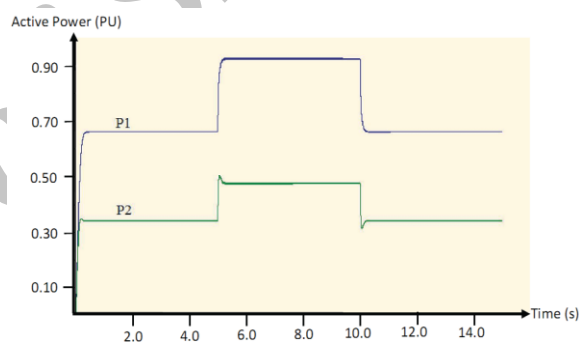
شکل (۹) مدل گسترش یافته شکل (۶) است. بر خلاف شبکه استاندارد برای پیاده‌سازی سامانه‌های کنترلی مختلف، این شبکه شامل پنج VSC است. در این شبکه برای هر VSC توان نامی مشخص و متفاوت با بقیه مبدل‌ها در نظر گرفته شده است. هر واحد می‌تواند بیانگر یک DER در شبکه باشد برای مثال واحد پنجم با توجه به ظرفیت پایین تری که نسبت به بقیه واحدها دارد می‌تواند یک DG باشد که از سلول خورشیدی و باتری تغذیه می‌شود و واحد اول به عنوان بزرگ‌ترین واحد و به عنوان مرجع یک دیزل ژنراتور با قابلیت اطمینان بالا باشد. مقادیر پارامترهای مربوط به عناصر به کار رفته در ریزشبهه شکل (۹) در جدول (۲) پیوست ارائه شده‌اند.

علاوه بر تعداد مبدل‌های به کار گرفته شده در شبکه، وجود خطوط ارتباطی مختلف با پارامترهای متفاوت می‌تواند ساختاری متفاوت با شبکه‌های مرسوم و متقارن را در اختیار ما بگذارد. ریزشبهه تحت مطالعه شامل شش خط ارتباطی می‌باشد که هر کدام منابع تولید توان را به بار و یا به یکدیگر متصل کرده‌اند. از طرفی بارهای محلی برای تکمیل شبکه تحت مطالعه در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

همانند آنچه که در مدل استاندارد شکل (۶) وجود داشت، علاوه بر بارهای محلی، بار شبکه در شکل (۹) به دو قسمت

0.024 تعیین شود. مقادیر بارهای ثابت و متغیر، بر مبنای 1 MVA در جدول نشان داده شده‌اند که این نقطه عملکرد طوری تعیین شده که واحدها نزدیک مقادیر نامی بهره‌برداری شوند و در انتها، ولتاژ و فرکانس نامی شبکه به ترتیب 20 KV و 50 HZ انتخاب شده‌اند. در بهره‌برداری از شبکه فوق، فرض شده است که بار ثابت همواره در مدار بوده ولی بار متغیر به مدت زمان پنج ثانیه در مدار قرار گیرد و سپس خارج شود. در واقع سعی شده است از این طریق تغییرات لازم به شبکه تحمیل شود تا دینامیک تغییرات توان و صحت اشتراک‌گذاری بار در این شرایط غیر متقارن بحث شود.

شکل (۷) نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته با استفاده از سامانه کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل، توان تولیدی توسط هر واحد برای اشتراک‌گذاری بار در کنترل غیر متمرکز و عملکرد جزیره‌ای ریزشبهه نشان داده شده است.



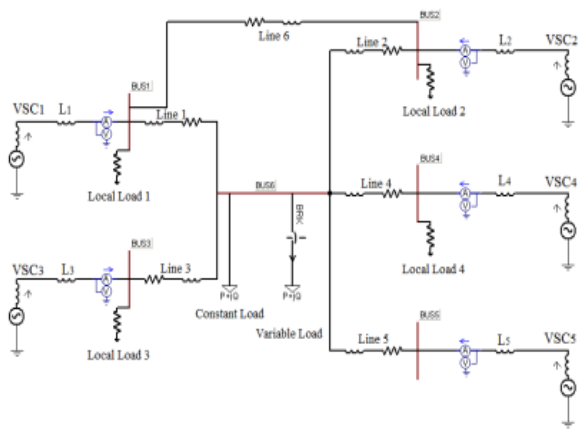
شکل ۷. توان تولیدشده توسط واحدهای VSC در ریزشبهه جزیره‌ای استاندارد

همان‌طور که انتظار می‌رفت، توان اکتیو تولید شده توسط واحد دوم به صورت دقیق نصف توان اکتیو تولید شده توسط واحد اول است. علاوه بر این موضوع هر دو واحد دارای دینامیک قابل قبول در اشتراک‌گذاری بار هستند. مقادیر بالازدگی^۱ و پایین‌زدگی^۲ واحد دوم را می‌توان با تغییر ضرایب کنترل‌کننده PI تنظیم کرد و به مقادیر دلخواه رساند. در شکل (۷) توان اکتیو اشتراک گذاشته شده در تغییرات بار نشان داده شده است، این اشتراک‌گذاری از طریق کنترل فرکانس هر واحد با توجه به مشخصه افت انجام می‌شود. بنابراین در شکل (۸) فرکانس لحظه‌ای هر واحد را به صورت هم‌زمان مشاهده می‌شود.

با توجه به آنچه که شکل (۸) نشان می‌دهد، فرکانس واحد دوم در حال دنبال کردن فرکانس واحد اول می‌باشد که تصدیقی بر صحت روش کنترلی پیشنهادی است. فرکانس شبکه در زمان

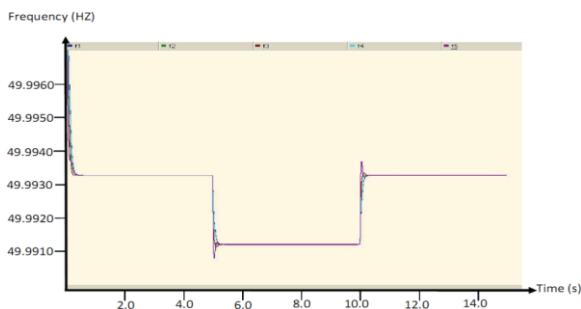
¹ Overshoot

² Undershoot



شکل ۱۰. ریزشبه گسترش یافته در محیط PSCAD

شکل (۱۱) فرکانس واحدهای VSC در ریزشبه را با شرایط بهره‌برداری ذکر شده و در حضور تغییرات بار را نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات فرکانس شبکه با توجه به شرایط بهره‌برداری ذکر شده در جدول (۲) پیوست را مشاهده می‌کنید. در این شکل فرکانس خروجی هر واحد به صورت مجزا نشان داده شده است و مشاهده می‌شود با استفاده از سامانه کنترلی پیشنهادی تمام واحدها دارای فرکانسی برابر در حالت پایدار شبکه می‌باشند.



شکل ۱۱. فرکانس خروجی واحدهای VSC در ریزشبه جزیره‌ای گسترش یافته

جدول (۱) نقطه کار واحدهای تولید توان در ریزشبه را با توجه به شرایط بهره‌برداری ذکر شده در جدول (۲) پیوست، در ثانیه هشتم نشان می‌دهد.

جدول ۱. نقطه کار واحدهای تولید توان در ریزشبه گسترش یافته در ثانیه هشتم

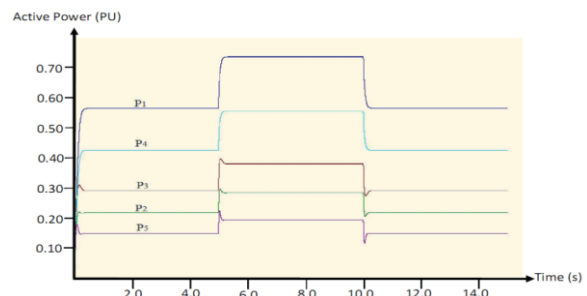
f(t=8) Hz	۴۹/۹۹۱۱	P1(t=8) pu	۰/۷۳۲۷
P2(t=8) pu	۰/۲۸۱۹	P3(t=8) pu	۰/۳۷۷۰
P4(t=8) pu	۰/۵۵۱۸	P5(t=8) pu	۰/۱۹۱۳

ب) خروج واحد VSC شماره سه از مدار: از موارد دیگر بررسی عملکرد سامانه کنترلی پیشنهادی در پایدارسازی و اشتراک‌گذاری بار در شبکه، از دست دادن تولید یک واحد به دلیل خروج آن واحد و یا خارج شدن خط ارتباطی آن واحد با

تقسیم می‌شود. قسمت اول، بار ثابت در شبکه بوده که همواره در مدار است و قسمت دوم، بار متغیر است که در زمانی خاص وارد مدار شده و سپس خارج می‌شود. هدف استفاده از بار متغیر نشان دادن عملکرد سامانه کنترلی پیشنهادی در تغییرات توان درخواستی توسط ریزشبه است. از جمله موارد مورد بررسی در زمان تغییر بار در شبکه، پایداری و دینامیک سریع و همچنین اشتراک‌گذاری قابل قبول بار روی هر واحد با توجه به ظرفیت نامی آن واحد است.

بر اساس مقادیر انتخاب شده برای عناصر واقع در شبکه در جدول (۲) پیوست، ظرفیت نامی واحدها متفاوت و ظرفیت کل شبکه حدود ۲/۳ MW تعیین شده است. لازم به ذکر است که فرض شده است ریزشبه توانایی تأمین بار بیشتر از مقدار نامی برای مدت زمان کوتاه را داشته باشد.

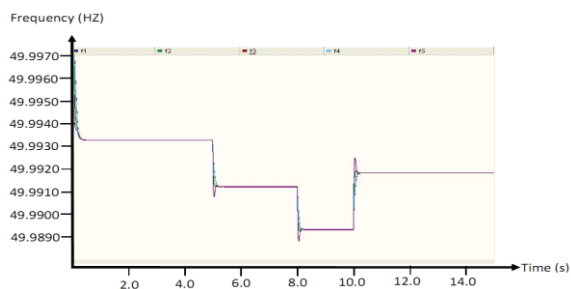
حال پس از شناخت ریزشبه گسترش یافته تحت مطالعه و برای بررسی عملکرد سامانه کنترلی، به نقد نتایج شبیه‌سازی پرداخته و مشاهده می‌شود. در این روش از کنترل، تعداد منابع و بارها و محل آن‌ها برای سامانه کنترلی مهم نبوده و بار به خوبی با توجه به مشخصه افت و اهداف مورد نظر بین واحدها به اشتراک گذاشته می‌شود.



شکل ۹. توان تولیدی توسط واحدهای VSC در ریزشبه جزیره‌ای گسترش یافته

الف) عملکرد عادی شبکه: شکل (۱۰) نتیجه شبیه‌سازی برای توان تولیدی هر واحد در شبکه را نشان می‌دهد. بر طبق آنچه این شکل نشان می‌دهد، توان اکتیو شبکه بر روی واحدهای تولیدی توان در ریزشبه با توجه به ظرفیت نامی هر واحد به صورت قابل قبولی به اشتراک گذاشته شده است. همان‌طور که در جدول (۲) پیوست نشان داده شده است، واحد اول بیشترین ظرفیت نامی و واحد پنجم کمترین ظرفیت را دارا است. از طرف دیگر با نگاهی دقیق‌تر به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که هنگام تغییرات بار در شبکه کمترین نوسان ممکن به واحدهای بزرگ تحمیل می‌شود و واحدهایی که ظرفیت کمتری دارند تغییرات را بیشتر احساس می‌کنند. بنابراین برای واحد پنجم تغییرات ناگهانی بار را به صورت بالازدگی و پایین‌زدگی جزئی مشاهده می‌کنید.

خوبی در پایداری این سامانه‌ها حین تغییرات بار و یا از دست رفتن یک یا چند واحد دارد. همچنین اشتراک‌گذاری بار شبکه بر روی واحدها که اولویت اول این سامانه است، با توجه به ضریب افت تعیین شده برای واحد مرجع می‌تواند به طور دقیق پیاده‌سازی شود.



شکل ۱۳. فرکانس واحدهای VSC با در نظر گرفتن خروج واحد سوم از مدار

جدول ۲. نقطه کار واحدهای VSC قبل و بعد از خروج واحد سوم

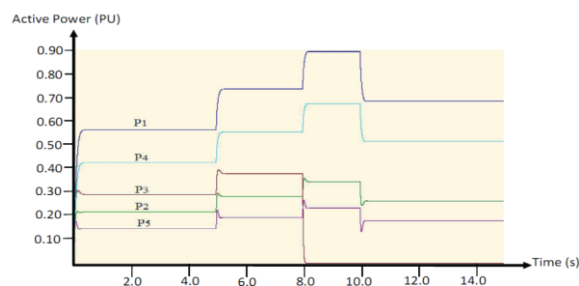
بعد از خروج واحد سوم (t=9)		قبل از خروج واحد سوم (t=7)	
P1(t=9) pu	۰/۸۸۹۷	P1(t=7) pu	۰/۷۳۲۷
P2(t=9) pu	۰/۳۴۲۷	P2(t=7) pu	۰/۲۸۲۴
P3(t=9) pu	۰	P3(t=7) pu	۰/۳۷۷۴
P4(t=9) pu	۰/۶۷۰۳	P4(t=7) pu	۰/۵۵۲۳
P5(t=9) pu	۰/۲۳۲۴	P5(t=7) pu	۰/۱۹۱۸

۵. نتیجه‌گیری

به منظور افزایش قابلیت اطمینان سامانه تغذیه انرژی الکتریکی نواحی حساس و همچنین امکان تغذیه این نواحی به صورت کاملاً مستقل از شبکه برق سراسری، کنترل غیر متمرکز این نواحی به عنوان یک ریزشبهه مبتنی بر اینورتر و همچنین وجود چند منبع تغذیه انرژی با عملکرد مستقل، نیاز خواهد بود. در این مقاله با معرفی روش کنترلی جدید برای پایداری ریزشبهه و اشتراک‌گذاری بار بر روی VSCها، اقدام به بهبود عملکرد ریزشبهه شامل منابع توزیع شده انرژی شد. روش نوین که FT نامیده شده است، با حذف خطای فرکانسی بین واحدهای تولید توان الکتریکی، شرایط را برای داشتن شبکه‌ای پایدار فراهم می‌سازد. از طرفی اشتراک‌گذاری بار با استفاده از روش کنترل افت انجام می‌شود که این مهم متناسب با ظرفیت هر واحد بوده که بتوان بیشترین استفاده را از ظرفیت نصب شده در ریزشبهه برد. از مزایای استفاده از روش کنترلی پیشنهادی می‌توان به این موارد اشاره کرد: تثبیت فرکانس ریزشبهه با سرعت بالا برای داشتن شبکه‌ای پایدار، اشتراک‌گذاری بار متناسب با ظرفیت واحدها، سرعت پاسخ دهی بالا در اشتراک‌گذاری بار، عدم

بقیه سامانه از مدار می‌باشد. بنابراین در این قسمت برای بررسی سامانه کنترلی در شرایط دست رفتن توان تولیدی یک واحد، اقدام به خروج واحد سوم از شبکه در حین عملکرد پایدار کرده و سپس پایداری و اشتراک‌گذاری بار بعد از خروج واحد تولید توان در شبکه را مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۱۲) توان تولیدی توسط واحدهای VSC قبل و بعد از خروج واحد سوم از مدار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. توان تولیدی واحدهای VSC با در نظر گرفتن خروج واحد سوم

فرض شده است در ثانیه هشتم به طور ناگهانی توان تولیدی واحد سوم صفر شود. طبق آنچه که در شکل (۱۲) نشان داده شده، پس از خروج واحد سوم توان از دست رفته با سرعت بالا بر روی بقیه واحدها به اشتراک گذاشته می‌شود. لازم به ذکر است که در این حالت به منظور بررسی بهتر موضوع امکان عبور توان تولیدی واحدها از مقدار نامی هر واحد در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل (۱۲) می‌توان به این نکته اشاره کرد که در ریزشبهه کنترل شده با سامانه پیشنهادی، هر گونه اغتشاشی در شبکه که شامل خروج خط و یا از دست رفتن تولید یک یا چند واحد درون شبکه اتفاق بیفتد، پایداری سامانه از دست نرفته و شبکه به کار خود ادامه می‌دهد. البته همان طور که اشاره شد، باید ظرفیت تولید توان در ریزشبهه وجود داشته باشد، در غیر این صورت سامانه‌های حفاظتی اقدام به خروج بارهای دارای اولویت پایین‌تر می‌کند.

به منظور تکمیل بحث، شکل (۱۳) فرکانس خروجی واحدها قبل و بعد از خروج واحد سوم در حین عملکرد پایدار ریزشبهه را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) نشان از پایداری شبکه در خروج واحد تولید توان از شبکه دارد. همان‌طور که در موارد قبلی شبیه‌سازی اشاره شد، وجود یک فرکانس تولیدی توسط واحدها در ریزشبهه ضروری است که در حالت از دست رفتن یک یا چند واحد، این مهم برقرار می‌ماند.

جدول (۲) نقطه کار واحدهای تولید توان قبل و بعد از خروج واحد سوم از مدار را نشان می‌دهد. در نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مدل استاندارد ریزشبهه و مدل گسترش یافته این شبکه، مشاهده شد که سامانه کنترلی پیشنهادی عملکرد قابل قبول و

حساسیت سامانه کنترلی به خطوط ارتباطی و ساختار ریزشبکه و در آخر قابلیت اضافه کردن و کم کردن واحدهای تولید توان بدون تغییر در ساختار کنترلی ریزشبکه. علاوه بر موارد فوق سامانه پیشنهادی قابلیت اضافه کردن متغیرها و پارامترهای کنترلی جدید را به راحتی دارا می‌باشد و از جمله این پارامترها می‌توان پارامترهای حفاظتی و همچنین بحث‌های مربوط به تولید اقتصادی توان را مطرح کرد.

۶. مراجع

- [14] Barsali, S.; Ceraolo, M.; Pelacchi, P.; Poli, D. "Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply"; IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, 2002, 789-794.
- [15] Kazmierkowski, M. P.; Malesani, L. "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey"; IEEE Trans. Ind. Elec. 1998, 45, 691-703.
- [16] Katiraei, F.; Iravani, M. R.; Hatziargyriou, N.; Dimeas, A. "Microgrids Management"; IEEE Power and Energy Magazine 2008, 6, 54-65.
- [17] Serban, E.; Serban, H. "A Control Strategy for a Distributed Power Generation Microgrid Application with Voltage and Current-Controlled Source Converter"; IEEE Trans. Power Electron. 2010, 25, 2981-2992.
- [18] Katiraei, F.; Iravani, M. R. "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units"; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 21, 1821-1831.
- [19] Sao, C. K.; Lehn, P. W. "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids"; IEEE Trans. Power Syst. 2008, 23, 1088-1098.
- [20] Cho, C.; Jeon, J.; Kim, J.; Kwon, S.; Park, K.; Kim, S. "Active Synchronizing Control of a Microgrid"; IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 3707-3719.
- [21] Chandorkar, M. C.; Divan, D. M.; Adapa, R. "Control of Parallel Connected Inverters in Standalone AC Supply Systems"; IEEE Trans. Ind. Appl. 1993, 29, 136-143.
- [22] Pogaku, N.; Prodanovic, M.; Green, T. C. "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid"; IEEE Trans. Power Electron. 2007, 22, 613-625.
- [23] De, D.; Ramanarayanan, V. "Decentralized Parallel Operation of Inverters Sharing Unbalanced and Nonlinear Loads"; IEEE Trans. Power Electron. 2010, 25, 3015-3025.
- [24] Divshali, P. H.; Alimardani, A.; Hosseinian, S. H.; Abedi, M. "Decentralized Cooperative Control Strategy of Microsources for Stabilizing Autonomous VSC-Based Microgrids"; IEEE Trans. Power Syst. 2012, 27, 1949-1959.
- [25] Engler, A.; Osika, O.; Barnes, M.; Hatziargyriou, N. "DB2 Evaluation of the Local Controller Strategies"; [Online]. Available: WWW.Microgrids.Eu/Micro2000, 2005.
- [26] Vandoor, T. L.; Meersman, B.; Degroote, L.; Renders, B.; Vandeveld, L. "A Control Strategy for Islanded Microgrids with DC-Link Voltage Control"; IEEE Trans. Power Del. 2011, 26, 703-713.
- [27] Engler, A. "Applicability of Droops in Low Voltage Grids"; Int. J. Distributed Energy Resources 2005, 1, 3-15.
- [28] Sao, C. K.; Lehn, P. W. "Autonomous Load Sharing of Voltage Source Converters"; IEEE Trans. Power Del. 2005, 20, 1009-1016.
- [29] Yu, X.; Khambadkone, A. M.; Wang, H.; Terence, S. T. S. "Control of Parallel-Connected Power Converters for Low-Voltage Microgrid-Part I: A Hybrid Control Architecture"; IEEE Trans. Power Electron. 2010, 25, 2962-2970.
- [30] Majumder, R.; Chaudhuri, B.; Ghosh, A.; Majumder, R.; Ledwich, G.; Zare, F. "Improvement of Stability and Load Sharing in an Autonomous Microgrid Using Supplementary Droop Control Loop"; IEEE Trans. Power Syst. 2010, 25, 796-808.
- [1] Lasseter, R. H.; Piagi, P. "Microgrid: A Conceptual Solution"; IEEE Trans. Power Electron. 2004, 6, 4285-4290.
- [2] Carrasco, J. M.; Franquelo, L. G.; Bialasiewicz, J. T.; Galvan, E.; Guisado, R. C. P.; Prats, M. A. M.; Leon, J. I.; Moreno-Alfonso, N. "Power Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2006, 53, 1002-1016.
- [3] Vandoor, T. L.; De Kooning, J. D. M.; Meersman, B.; Guerrero, J. M.; Vandeveld, L. "Automatic Power-Sharing Modification of P/V Droop Controllers in Low-Voltage Resistive Microgrids"; IEEE Trans. Power Del. 2012, 27, 2318-2325.
- [4] Arboleya, P.; Diaz, D.; Guerrero, J. M.; Garcia, P.; Briz, F.; Gonzalez-Moran, C.; Alexandre, J. G. "An Improved Control Scheme Based in Droop Characteristic for Microgrid Converters"; Elect. Power Syst. Res. 2010, 80, 1215-1221.
- [5] Ackermann, T. "Distributed Generation: A Definition"; Elect. Power Syst. Res. 2001, 57, 195-204.
- [6] Lasseter, R.; Akhil, A.; Marnay, C.; Stephens, J.; Dagle, J.; Guttromson, R.; Meliopolous, A. S.; Yinger, R.; Eto, J. "The CERTS Microgrid Concept"; Tech. Rep. LBNL-50829, 2002.
- [7] Mohamed, Y. A. R. I.; Zeineldin, H.; Salama, M.; Seethapathy, R. "Seamless Formation and Robust Operation of Distributed Generation Micro-Grids via Robust Direct Voltage Vector Control and Optimized Dynamic Power Sharing"; IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 1283-1294.
- [8] Lasseter, R. H. "Microgrids"; IEEE Trans. Power Eng. Soc. Winter Meeting 2002, 1, 305-308.
- [9] Green, T. C.; Prodanovic, M.; "Control of Inverter-Based Microgrids"; Elect. Power Syst. Res. 2007, 77, 1204-1213.
- [10] Bloemink, J. M.; Iravani, M. R. "Control of a Multiple Source Microgrid with Built-In Islanding Detection and Current Limiting"; IEEE Trans. Power Del. 2012, 27, 2122-2132.
- [11] Lopes, J. A. P.; Moreira, C. L.; Madureira, A. G. "Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation"; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 21, 916-924.
- [12] Gao, F.; Iravani, M. R. "A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation"; IEEE Trans. Power Del. 2008, 23, 850-859.
- [13] Lasseter, R. H.; Akhil, A.; Marnay, C.; Stephens, J.; Dagle, J.; Guttromson, R.; Meliopolous, A.; Yinger, R.; Eto, J. "The CERTS Microgrid Concept, White Paper on Integration of Distributed Energy Resources"; U.S. Dept. Energy, LBNL-50829. [Online]. Available: <http://Certs.Lbl.Gov>, 2002.

پیوست ها:

جدول ۱. مقادیر پارامترهای عناصر استفاده شده در شکل (۶)

Line 1(Ω)	$1+j0.0942$	L_1 :	0.001^H
Line 2(Ω)	$1/1+j0.157$	L_2 :	0.0015^H
P^{n1}	0.8^{MW}	K_{fp1} :	0.12
P^{n2}	0.4^{MW}	K_{fp2} :	0.24
بار ثابت MVA	$1+j0.2$	f_n :	50^{Hz}
بار متغیر MVA	$0.4+j0.04$	V_n :	20^{KV}

جدول ۲. مقادیر پارامترهای استفاده شده در ریزشبهه گسترش یافته تحت مطالعه (شکل (۹))

Line 1(Ω):	$1+j0.0942$	L_1 :	0.001^H
Line 2(Ω):	$1/1+j0.2512$	L_2 :	0.0015^H
Line 3(Ω):	$0.8+j0.0628$	L_3 :	0.0012^H
Line 4(Ω):	$1+j0.1256$	L_4 :	0.002^H
Line 5(Ω):	$1+j0.1570$	L_5 :	0.001^H
Line 6(Ω):	$1/2+j0.1570$		
P_{n1} :	0.8^{MW}	K_{fp1} :	0.12
P_{n2} :	0.3^{MW}	K_{fp2} :	0.32
P_{n3} :	0.4^{MW}	K_{fp3} :	0.24
P_{n4} :	0.6^{MW}	K_{fp4} :	0.18
P_{n5} :	0.3^{MW}	K_{fp5} :	0.48
بار محلی ۱:	0.01^{MW}	بار محلی ۳:	0.08^{MW}
بار محلی ۲:	0.09^{MW}	بار محلی ۴:	0.1^{MW}
بار ثابت MVA :	$1/6+j0.1$	f_n :	50^{HZ}
بار متغیر MVA :	$0.5+j0.01$	V_n :	20^{KV}