

کنترل غیر متمرکز انرژی الکتریکی نواحی حساس به عنوان میکروگرید جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر بدون تغییر فرکانس

محمد حسین خانزاده^{*۱}

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۴/۲۹، پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۳)

چکیده

در تغذیه نواحی حساس، به منظور افزایش قابلیت اطمینان سامانه و رسیدن به حداکثر خودگردانی، استفاده از چند منبع تغذیه که به صورت غیرمتمرکز کنترل می‌شوند، ضروری است. از طرفی، قابلیت عملکرد مستقل از شبکه سراسری، به عنوان یک میکروگرید جزیره‌ای، قدمی مهم در اطمینان از عملکرد پایدار و پیوسته ناحیه در زمان از دست رفتن شبکه سراسری می‌باشد. در استفاده از تولیدات پراکنده، به منظور اشتراک‌گذاری بار با کنترل غیرمتمرکز بر روی مبدل‌های منبع ولتاژ، از روش کنترل افت استفاده می‌شود. از معایب روش کنترل افت، تغییر فرکانس شبکه در زمان تغییر توان اکتیو خروجی مبدل‌هاست. در این مقاله با معرفی سامانه کنترلی مکمل برای روش کنترل افت، تغییرات فرکانس در نواحی شامل بارهای حساس حذف شده، به طوری که فرکانس مرجع مبدل‌های منبع ولتاژ به صورت شناور نسبت به تغییرات توان خروجی تغییر می‌کند. از ویژگی‌های سامانه کنترلی پیشنهادی می‌توان به قابلیت اشتراک‌گذاری بار متناسب با ظرفیت واحدها، سرعت پاسخ‌دهی بالا در اشتراک‌گذاری بار، عدم حساسیت سیستم کنترلی به خطوط ارتباطی در ساختار میکروگرید و نیز امکان اضافه کردن و کم کردن واحدهای تولید توان بدون تغییر در ساختار کنترلی میکروگرید اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی در محیط PSCAD تصدیق بر عملکرد صحیح سامانه کنترلی پیشنهادی است.

کلید واژه‌ها: میکروگرید، مبدل منبع ولتاژ (VSC)، کنترل غیرمتمرکز، اشتراک‌گذاری بار، تثبیت فرکانس.

Decentralized Control of Electrical Energy for Sensitive Areas as Inverter-Based Islanded Microgrid without Frequency Change

M. H. Khanzadeh*

Imam Hossein University

(Received: 20/07/2014; Accepted: 04/08/2015)

Abstract

Supplying sensitive areas by utilizing various type of energy sources with decentralized control, in order to improve reliability and reach maximum autonomous operation capability, is essential. In addition, autonomous operation in the area as an islanded microgrid is an important step to have certainty of sustainable operation during black out or failure of stiff power system. In utilizing distributed generation inside microgrid, due to share loads by decentralized control on Voltage Source Converters (VSC), droop control method is employed. one disadvantage of droop control is the change in frequency respect to the change in output active power. In this paper, by introducing novel supplementary control system for droop control, the frequency changes in areas including sensitive loads are omitted. This goal is reached by floating reference frequency of VSCs according to output active power changes. Load sharing proportional to the units' size, insensitive to connective line in microgrid structure and capability of changing the number of power units without changing the microgrid structure, are the features of the proposed control system. Simulation results in PSCAD are a confirmation of novel control system operation.

Keywords: Microgrid, Voltage Source Converter (VSC), Decentralized Control, Load Sharing, Fixed Frequency.

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

۱. مقدمه

اکثر تکنولوژی‌های روز شامل سامانه‌های مصرف کننده انرژی الکتریکی، سامانه‌های ذخیره کننده انرژی الکتریکی و همچنین اکثر تولیدات پراکنده از توان DC استفاده می‌کنند [۱۳]. به همین دلیل برخی از مراجع برتری‌هایی را برای میکروگرید DC نسبت به میکروگرید AC در نظر گرفته‌اند [۱۴ و ۱۵]. حال آنکه میکروگریدهای AC شباهت بیشتری به سامانه‌های قدرت مرسوم دارند و در ساختار آن‌ها باید ولتاژ DC به AC تبدیل شود. افزایش تعداد منابع انرژی در میکروگرید با ظرفیت‌های پایین که به صورت مستقیم به شبکه وصل نمی‌شوند، مباحث مربوط به میکروگرید مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت را مطرح کرده است [۷]. بنابراین در این میکروگریدها، منابع انرژی متصل شده به شبکه، چه از جنس تولیدات پراکنده و چه از جنس سامانه‌های ذخیره انرژی پراکنده باید توانایی اضافه شدن به شبکه و یا کم شدن از آن را بدون اینکه تأثیر زیادی بر پایداری میکروگرید بگذارند، داشته باشند [۱۶].

یکی از پرکاربردترین مبدل‌های الکترونیک قدرت که در میکروگریدها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مبدل منبع ولتاژ (VSC) است. در زمینه کنترل مبدل‌های منبع ولتاژ که بتواند عملکرد صحیح میکروگرید را تضمین کند، بر روی کنترل فاز و دامنه ولتاژ خروجی این مبدل‌ها تحقیقاتی انجام شده است [۱۷ و ۱۸]. برای میکروگریدها دو مد عمده عملکرد تعریف می‌شود: عملکرد متصل به شبکه و عملکرد جزیره‌ای [۱۹ و ۲۰]. در حالت متصل به شبکه^۸ واحدهای تولید پراکنده درون میکروگرید 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 میکروگرید را استراتژی کنترل جریان می‌نامند [۲۱]. حال آنکه میکروگریدها به دلیل توانایی عملکرد مستقل یا جزیره‌ای^۹ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در عملکرد جزیره‌ای میکروگریدها، وظیفه پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه بر عهده VSCها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کنترل مبدل‌های میکروگرید جزیره‌ای ارائه شده است که کنترل متمرکز و غیرمتمرکز میکروگریدها از جمله آن روش‌ها هستند [۱۰].

برای مثال روش‌های کنترل بر مبنای خطوط ارتباطی بین مبدل‌ها که مزیت‌ها و معایب این سامانه کنترلی را می‌توان در مراجع دنبال کرد که به عنوان کنترل متمرکز میکروگرید شناخته می‌شوند [۲۲]. کنترل یک میکروگرید 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 میکروگرید، ظرفیت کم ذخیره‌سازی انرژی، نبود اینرسی در شبکه و میزان بالای عدم قطعیت در ساختار میکروگرید را می‌توان از عوامل مهم این امر معرفی کرد [۱۱].

استفاده از تولیدات پراکنده (DG^۱) در سامانه‌های قدرت امروزی باعث شده است که نحوه تولید انرژی الکتریکی و تأمین انرژی مورد نیاز بارهای الکتریکی درون شبکه تغییر پیدا کند. در واقع با افزایش میزان مصرف انرژی و اولویت‌های اقتصادی، روشی و محیط‌زیستی، استفاده از تولیدات پراکنده در سامانه‌های تولید انرژی امروزی امری اجتناب‌ناپذیر است [۱]. از طرفی تغذیه انرژی نواحی حساس، مانند سایت‌های نظامی دور از دسترس و یا مستقل، توجیهی انکارناپذیر برای استفاده از تولیدات پراکنده و انرژی‌های تجدیدپذیر خواهد بود. استفاده از DGها، باعث افزایش قابلیت اطمینان سامانه و همچنین کاهش نیاز برای گسترش سامانه قدرت می‌شود. علاوه بر این موضوع، بهبود شاخص‌های کیفیت توان، تنظیم ولتاژ بهتر و اصلاح ضریب توان از مزایای استفاده از DGها می‌باشد که در سامانه‌های تولید مرکزی امکان‌پذیر نیست [۲].

یکی دیگر از مزایای استفاده از تولیدات پراکنده، نزدیکی محل تولید و مصرف انرژی به یکدیگر است. این به کارگیری DGها، تلفات انرژی که در خطوط انتقال انرژی اتفاق می‌افتد را نداشته و از طرفی بحث‌های مربوط به سرویس رزرو و تأمین توان راکتیو بارها را مورد پوشش قرار می‌دهد [۳]. تولیدات پراکنده در سامانه‌های توزیع به عنوان واحدهای کمکی تولید انرژی شناخته می‌شوند و اصولاً قیود روشی مبتنی بر پایداری ولتاژ و محدودیت‌های تزریق توان و همچنین عدم قطعیت در تولید توان الکتریکی، نیاز به کنترل این سامانه‌ها را بالا برده است [۴].

میکروگریدها از این لحاظ که محلی برای تجمیع DGها می‌باشند به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. به بیان دیگر، یک میکروگرید به عنوان یک سامانه قدرت با ابعاد کوچک شناخته می‌شود که از تولیدات پراکنده، سامانه‌های ذخیره انرژی (EES^۲) و انواع بارهای الکتریکی و حرارتی تشکیل شده است [۶ و ۷]. به صورت کلی، تولیدات پراکنده بر اساس استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^۳، از جمله باد و خورشید از طریق توربین‌های بادی (WT^۴) و سلول‌های فوتوولتائیک (PV^۵)، پایه‌گذاری شده‌اند [۴]. 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 میکروگریدها نقش مهمی را بازی می‌کنند [۸]. سامانه‌های تولید انرژی از باد و خورشید به دلیل ابعاد کوچک‌تر، قابلیت اتصال به هر نقطه از سامانه قدرت را دارند [۹-۱۱]. در مراجع به معرفی انواع تولیدات پراکنده و منابع توزیع شده انرژی (DER^۶) پرداخته شده و نحوه عملکرد آن‌ها را توضیح داده شده است [۱۲].

¹ Distributed Generation

² Energy Storage System

³ Renewable Energies

⁴ Wind Turbine

⁵ Photovoltaic

⁶ Distributed Energy Resources

⁷ Voltage Source Converter

⁸ Grid-Connected

⁹ Islanded

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 [۲۶]. در میکروگرید مورد بحث، که به عنوان میکروگرید 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 میکروگرید 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 میکروگرید جزیره‌ای، نگه داشتن تعادل در تولید توان بسیار مهم بوده و این موضوع مورد توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است [۲۷-۲۹]. از طرفی به منظور حفظ تعادل در تولید توان و مصرف می‌توان از باززدایی^۲ استفاده کرد. علاوه بر میکروگریدها در سامانه‌های قدرت مرسوم که مصرف انرژی الکتریکی از طریق کنترل کننده مرکزی قابل تنظیم نمی‌باشد، پیاده‌سازی می‌شود.

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 [۳۰]. از طرفی برای کنترل و پایداری ولتاژ سامانه و اشتراک‌گذاری توان راکتیو بر روی واحدها از کنترل افت توان راکتیو / ولتاژ (Q/V) به عنوان راه حلی عملی نام برده شده است [۱۷]. به بیانی دیگر، مشخصه افت P/F ارتباط طبیعی توان اکتیو با فرکانس خواهد بود و مشخصه افت Q/V ارتباط توان راکتیو با ولتاژ. 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. به بیان دیگر، در سامانه‌های قدرت مرسوم که خطوط انتقال خاصیت غالب سلفی دارند، با کنترل زاویه ولتاژ در هر باس میزان توان اکتیو جاری شده در خطوط مرتبط به باس مورد نظر کنترل می‌شود. به طوری که کنترل زاویه ولتاژ متناسب با کنترل فرکانس است. علاوه بر این موضوع، از طریق کنترل سطح دامنه ولتاژ توان راکتیو عبوری کنترل خواهد شد. به دلیل ماهیت مقاومتی میکروگریدها از افت توان اکتیو/ولتاژ (P/V) استفاده می‌شود [۵] و [۳۱]. شکل (۱) مشخصه افت P/F برای سه واحد VSC در یک میکروگرید را نشان می‌دهد. نمونه کاملی از انواع روابط مربوط به کنترل افت برای اشتراک‌گذاری بار بر روی مبدل‌های منبع ولتاژ را می‌توان در مراجع یافت [۳۲].

برای درک عملکرد کنترل افت و آشنایی با متغیرهای شکل (۱)، به بحث عملکرد موازی مبدل‌های منبع ولتاژ پرداخته می‌شود. در

عملکرد موازی مبدل‌های الکترونیک قدرت در یک میکروگرید دارای مزایای فراوانی نسبت به سامانه‌های تغذیه مرکزی، از جمله افزایش قابلیت اطمینان، بهبود پاسخ دینامیکی و سهولت نگهداری تجهیزات است [۲۳]. یکی از مباحث مهم در پایداری میکروگرید 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 میکروگرید جزیره‌ای، مبدل‌های منبع ولتاژ علاوه بر وظیفه اشتراک‌گذاری بار باید خصوصیتی از جمله تنظیم ولتاژ و فرکانس کل میکروگرید و همچنین استفاده از بازخوردهای محلی برای کنترل شرایط عملکرد خود را داشته باشند [۲۴]. به منظور اشتراک‌گذاری بار بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت و داشتن کنترلی غیرمتمرکز در ساختار میکروگرید از روش کنترل افت^۱ استفاده می‌شود. معرفی روش کنترل افت و مزیت‌ها و معایب این روش در بخش دوم ارائه شده است. در روش کنترل افت، با استفاده از کاهش و یا افزایش فرکانس خروجی VSCها، توان اکتیو تولیدی آن‌ها کنترل شده و بار به اشتراک گذاشته می‌شود. بنابراین همواره تغییرات فرکانس را در این روش خواهید داشت. در این مقاله با استفاده از یک سامانه کنترلی مکمل در ساختار روش کنترل افت، علاوه بر حفظ کردن مزیت‌های این روش در پایداری سامانه و اشتراک‌گذاری بار، تغییرات فرکانسی منابع به صورت کامل حذف شده و در تمام شرایط بهره‌برداری از میکروگرید، فرکانس ثابتی را در شبکه خواهید داشت.

در ادامه مطالب فوق که به عنوان مقدمه آورده شده‌اند، در بخش دوم از این مقاله به اشتراک‌گذاری بار و معرفی کنترل افت پرداخته می‌شود. سپس در بخش سوم سامانه کنترلی پیشنهادی تعریف شده و در بخش چهارم با پیاده‌سازی سامانه کنترلی پیشنهادی بر روی دو سامانه متفاوت در محیط نرم‌افزار PSCAD، عملکرد آن را مورد مطالعه قرار داده می‌شود. در بخش پنجم جمع‌بندی کلی مقاله را خواهد بود.

۲. اشتراک‌گذاری بار و کنترل افت

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، برای داشتن شبکه‌ای پایدار باید بارها را بر روی واحدهای تولید توان الکتریکی به اشتراک گذاشت. در کنترل متمرکز میکروگریدها، وجود خطوط ارتباطی بین VSCها و یک کنترل کننده مرکزی ضروری است تا بتوان سیگنال‌های دریافتی از شبکه را تحلیل و سپس سیگنال‌های مورد نیاز مبدل‌ها را به آن‌ها ارسال کرد [۱۷]. بنابراین این موضوع علاوه بر پیچیده کردن ساختار میکروگرید، در مواردی که فاصله بین اینورترها زیاد باشد، اشتراک‌گذاری سیگنال‌های دینامیکی مبدل‌ها هزینه‌بر و غیر عملی خواهد بود [۲۵]. از این رو کنترل غیرمتمرکز واحدها به عنوان روشی مؤثر در برطرف کردن معایب کنترل متمرکز ارائه شد [۲۵]. در سامانه‌های قدرت مرسوم، به دلیل وجود ژنراتورهای سنکرون، میزان

² Load Shedding

¹ Droop Control

افت ژنراتورهای سنکرون پیشنهاد شده است که در مقالات زیادی به انواع آن، از جمله کنترل افت ایستا، کنترل افت بهبود یافته، کنترل افت با امپدانس مجازی خروجی و کنترل افت برای بارهای غیرخطی و هارمونیک‌ها نام برد [۳۹-۳۶]. در کنار مزایای اشاره شده برای کنترل افت، می‌توان معایب زیر را به عنوان اصلی‌ترین مشکلات استفاده از این روش کنترلی نام برد:

- روش کنترل افت وابسته به امپدانس خروجی مبدل‌ها و خطوط ارتباطی در ساختار میکروگرید می‌باشد.
- کنترل افت تنظیم ولتاژ و فرکانس ضعیفی دارد.
- کنترل افت به شدت وابسته به مقدار ضریب افت بوده و در مواردی باعث ناپایداری سامانه می‌شود، به طوری که اگر بخواهید به صورت دقیق اشتراک‌گذاری بار را داشته باشید، متغیرهای میکروگرید از محدوده مجاز خارج شده و اگر بخواهید افت فرکانس کمی داشته باشید، اشتراک‌گذاری بار به صورت دقیق و با دینامیک قابل قبول انجام نخواهد شد.

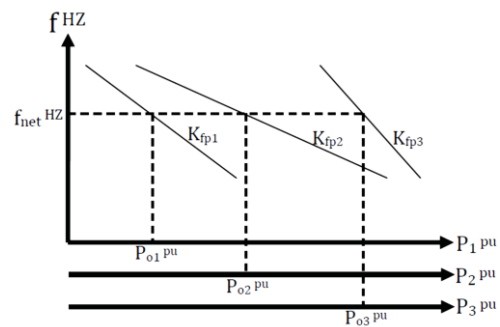
در این مقاله، با استفاده از روشی به عنوان دنبال کردن فرکانس (FT¹)، اقدام به پیاده‌سازی روش کنترل افت در میکروگرید کرده و این روش میزان وابستگی کنترل افت به خطوط ارتباطی و امپدانس خروجی مبدل‌ها را کاهش می‌دهد. سپس با اعمال سامانه کنترلی پیشنهادی به صورت مکمل بر روی FT، فرکانس شبکه را در اشتراک‌گذاری بار اکتیو به وسیله کنترل افت در مقدار نامی تثبیت کرده و مشکل تنظیم فرکانس ضعیف میکروگرید در استفاده از کنترل غیرمتمرکز را مرتفع ساخته‌ایم.

۳. کنترل کننده مکمل پیشنهادی

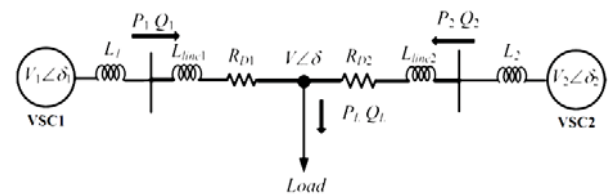
در ابتدا، نحوه پیاده‌سازی FT را توضیح داده و سپس سامانه کنترلی مکمل را به آن اعمال می‌شود. ماهیت کلی کنترل افت، سیگنال-کوچک بوده و با فرض‌هایی از جمله سنکرون بودن صفحه dq برای تمامی مبدل‌ها تعریف شده است و علاوه بر این موضوع، کنترل افت مرسوم در تغییرات کوچک در ساختار شبکه جواب قابل قبولی می‌دهد در حالی که امکان وقوع تغییرات بزرگ، از جمله خروج بارهای بزرگ و یا واحدهای تولیدی، در میکروگرید وجود دارد [۲۵]. سامانه کنترلی FT، روشی مفید در پیاده‌سازی کنترل افت با توجه به مطالب ذکر شده خواهد بود.

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

ابتدا یک شبکه ساده تشکیل شده از دو واحد VSC و یک بار مشترک را در نظر بگیرید. شکل (۲) نمونه‌ای از ساختار این شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مشخصه افت سه واحد VSC با کنترل غیرمتمرکز



شکل ۲. میکروگرید 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:

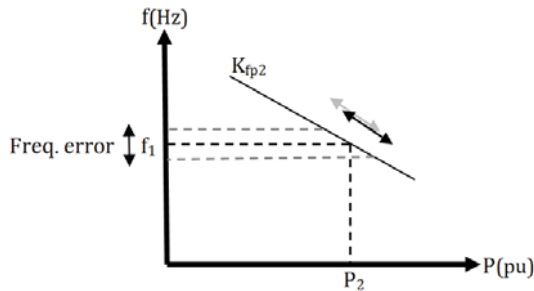
$$f_i^* = f_n + K_{fpi}(P_n - P_{oi}) \quad (1)$$

در روابط فوق، همانطور که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است، f_n فرکانس نامی سیستم در نقطه کار نامی هر واحد (P_n) می‌باشند. P_{oi} و K_{fpi} به ترتیب ضریب افت توان اکتیو و توان اکتیو خروجی VSC می‌باشد. لازم به ذکر است که K_{fpi} عددی مثبت و کوچک و متناسب با ظرفیت واحد می‌باشد. ضرایب افت توان اکتیو و راکتیو در VSCها با توجه به مقادیر مجاز تغییرات فرکانس و ولتاژ تعیین می‌شوند. رابطه ۲ نحوه محاسبه K_{fpi} بر اساس این تغییرات را نشان می‌دهد:

$$K_{fpi} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{oi Max}} \quad (2)$$

مقدار ضریب افت، نقش مهمی را در پایداری میکروگرید بازی می‌کند [۳۳]. به منظور تحلیل دینامیکی مسئله و لزوم وجود ضریب افت برای داشتن شبکه‌ای پایدار در اشتراک‌گذاری بار، مرجع [۳۴] 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 ما را از خطوط ارتباط سیگنالی بین VSCها بی‌نیاز می‌کند و از آن می‌توان در اشتراک‌گذاری بارها استفاده کرد [۳۵]. به بیان دیگر، کنترل افت به منظور پیاده‌سازی ساختاری مشابه مشخصه

¹ Frequency Tracking



شکل ۵. عملکرد کنترل کننده pi در تثبیت فرکانس

در روش FT برای داشتن فرکانسی واحد در شبکه، فرکانس خروجی هر واحد را به فرکانس خروجی واحد Master نزدیک می‌شود. این عمل از طریق یک PI کنترلر انجام می‌شود. در واقع PI کنترلر اقدام به تغییر فرکانس لحظه‌ای تولیدی توسط واحدها کرده و اختلاف فرکانس بین واحدها در حالت پایدار را صفر می‌کند.

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:

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

همان‌طور که در شکل (۴) بلاک دیاگرام روش کنترلی FT 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 PI کنترلر می‌باشند.

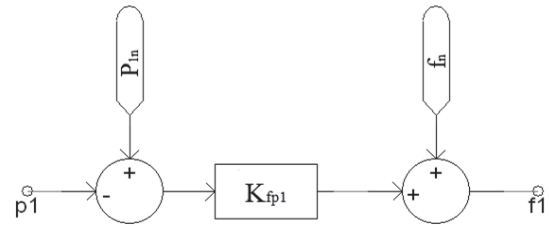
با توجه به آنچه که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود، یک قطب در سمت چپ محور موهومی قرار دارد که در واقع این سامانه مرتبه ۱ جلوی نوسانی شدن و ناپایدار شدن سامانه در تغییرات بار را خواهد گرفت. مقادیر ویژه سامانه کنترلی توسط رابطه (۵) قابل محاسبه خواهد بود:

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

بنابراین وجود یک انتگرال‌گیر در سامانه کنترلی برای پایدارسازی میکروگرید حین تغییرات لازم می‌باشد.

برای بهتر معرفی کردن تابع تبدیل، رابطه (۴) را به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌شود.

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

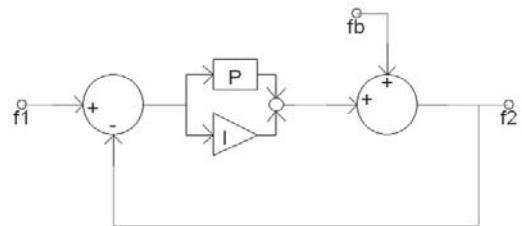


شکل ۳. مدل کنترلی استفاده شده برای واحد Master در محیط pscad

در سامانه کنترلی نشان داده شده در شکل (۳)؛

- K_{fp1} : ضریب افت تعیین شده برای واحد Master؛
- P_1 : توان تولیدی توسط واحد مورد نظر؛
- P_{1n} : توان نامی واحد اول بر حسب پریونیت؛
- f_{1n} : فرکانس نامی شبکه؛
- f_1 : فرکانس تولیدی توسط واحد Master.

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 Master می‌باشند. بنابراین ساختار سامانه کنترل باید این امر را مهیا سازد. بدین منظور با استفاده از یک کنترل کننده PI در حلقه کنترلی مبدل دوم، اقدام به حذف خطای فرکانسی بین دو منبع کرده‌ایم. شکل (۴) به صورت کلی نحوه اعمال کنترل کننده PI بر سامانه را نشان می‌دهد:



شکل ۴. سامانه تکمیل کننده کنترل FT برای هر واحد Slave

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

- f_1 : فرکانس تولیدی توسط واحد Master پس از پیاده‌سازی کنترلر افت؛
- f_b : فرکانس تعیین شده برای واحد Slave پس از پیاده‌سازی کنترلر افت؛
- f_2 : فرکانس خروجی دستور داده شده به واحد دوم یا Slave.

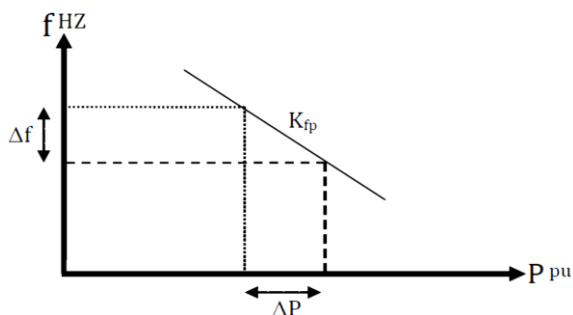
در میکروگریدهایی که از VSC تشکیل شده‌اند، به منظور داشتن کنترل غیرمتمرکز، نمی‌توان به صورت دستوری فرکانس و توان تولیدی هر واحد را تعیین کرد. بنابراین باید روشی ارائه شود که در آن علاوه بر تثبیت فرکانس، به صورت غیرمتمرکز میکروگرید را کنترل کرده و در حین عملکرد پایدار، بارها درون شبکه به خوبی به اشتراک گذاشته شوند. شکل (۵) نحوه عملکرد FT برای واحد دوم را نشان می‌دهد.

در نتیجه:

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

رابطه (۱۴)، 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 [۳۴ و ۴۰].

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، مقدار ضریب افت در اشتراک‌گذاری بار و عملکرد دینامیکی سامانه بسیار مهم است. هر چه ضریب افت افزایش پیدا کند، سامانه دارای دینامیکی بهتر بوده و اشتراک‌گذاری بار با دقت بهتری انجام می‌شود ولی تغییرات فرکانس بالا بوده و از حد مجاز عبور می‌کند. از طرفی ضریب افت کوچک دارای مزیت کاهش فاصله گرفتن فرکانس از مقدار نامی بوده اما دینامیک و اشتراک‌گذاری بار به خوبی ضریب افت بالا نخواهد بود. بنابراین انتخاب ضریب افت قدمی مهم در اشتراک‌گذاری بار و کنترل غیرمتمرکز VSCها می‌باشد. در این کار با توجه به مزیت‌های استفاده از ضریب افت بالا، مشکل تغییرات فرکانس را با ایجاد یک سامانه کنترلی مکمل برطرف ساخته و بار اکتیو را با دقت کافی و دینامیک قابل قبول بر روی VSCها به اشتراک می‌گذارند. شکل (۶) رابطه تغییرات فرکانس با تغییرات توان اکتیو را نشان می‌دهد که برای یک واحد رسم شده است:



شکل ۶. رابطه خطی تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات توان اکتیو خروجی یک واحد VSC

شکل (۶)، رابطه (۱) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، هر واحد، فرکانس نامی شبکه (۵۰ HZ) را در توان نامی خود به شبکه تحمیل می‌کند. حال به منظور تثبیت فرکانس در زمان تولید توان‌های غیر از توان نامی، می‌توان به صورت شناور فرکانس نامی تعریف شده برای هر مبدل را تغییر داد. در این سامانه کنترلی، سیگنال اعمال شده به هر مبدل به عنوان فرکانس نامی، پس از گذر از مراحل زیر، به مبدل اعمال می‌شود:

- ابتدا سیگنال فرکانس خروجی مبدل به عنوان بازخورد انتخاب شده؛
- این سیگنال با میزان فرکانس در نظر گرفته شده برای مبدل مقایسه شده؛
- میزان خطای حاصل از مقایسه از یک PI کنترلر عبور کرده؛

در رابطه (۶)، سیگنال فرکانس تولیدی توسط واحد دوم به ازای P_{01} و P_{02} به عنوان ورودی‌های سامانه کنترلی نشان داده شده است.

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

$$P_1 = P_{01} + P_{02} \quad (7)$$

بنابراین با جای گذاری 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.

$$\begin{aligned} f_2(s) = & \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1 + k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + k_{fp1} P_{n1}) - \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{1 + k_p + \frac{k_i}{s}} \times \\ & (k_{fp1} P_{01}(s)) + \frac{1}{1 + k_p + \frac{k_i}{s}} \times (f_n + \\ & k_{fp2} P_{n2}) - \frac{1}{1 + k_p + \frac{k_i}{s}} \times (k_{fp2} (P_1(s) - P_{01}(s))) \end{aligned} \quad (8)$$

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 روابط (۹ و ۱۰) نشان داده می‌شود.

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

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

اگر تغییراتی به صورت پله در توان درخواستی شبکه داشته باشید، تغییرات فرکانس خروجی واحد دوم در حالت پایدار با توجه به رابطه (۱۱) محاسبه خواهد شد.

$$\Delta f_2(t) = -(k_{fp1} \times \Delta P_{01}) \quad (11)$$

اگر به رابطه (۱۱) توجه کنید، طبق رابطه (۱) عبارت سمت راست رابطه نمایانگر تغییرات فرکانس در واحد Master می‌باشد. بنابراین تغییرات فرکانس در واحد دوم طبق سامانه کنترلی FT کاملاً منطبق بر واحد Master بوده و هیچ گونه اختلاف فرکانسی در حالت عملکرد پایدار در شبکه وجود نخواهد داشت.

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

$$\Delta f_2(t) = -(k_{fp2} \times \Delta P_{02}) \quad (12)$$

اگر روابط (۱۱ و ۱۲) را مورد بررسی قرار دهیم، ثابت می‌شود:

$$(k_{fp2} \times \Delta P_{02}) = (k_{fp1} \times \Delta P_{01}) \quad (13)$$

فرکانس و به صورت خطی و با همان ضریب افت جابه‌جا می‌شود.

۴. نتایج شبیه‌سازی

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

۴-۱. شبکه تحت مطالعه شماره ۱

برای نشان دادن عملکرد سامانه کنترلی پیشنهادی، میکروگرید تحت مطالعه شامل دو VSC و خطوط ارتباطی غالباً مقاومتی و بارهای متمرکز را در شکل (۹) مشاهده می‌شود.

در جدول پیوست (۱) مقادیر متغیرها و پارامترهای مرتبط با شبکه شکل (۹) ارائه شده است.

در شکل (۹)، یک میکروگرید 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 (۹) میدل‌های 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 میکروگرید حین عملکرد پایدار است.

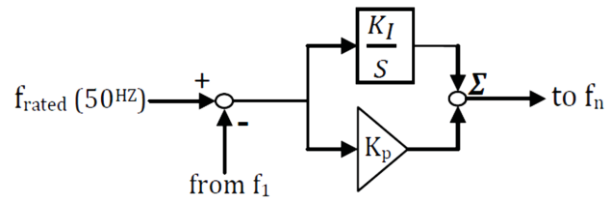
فرض بر این است که واحدهای تولید توان، توانایی تولید ولتاژ در مقدار نامی تعیین شده را داشته باشند. بنابراین سامانه کنترلی تنها بر روی فرکانس و توان اکتیو اشتراک گذاشته شده اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته هیچکدام از پارامترهای شبکه نادیده گرفته نشده‌اند. میدل‌های الکترونیک قدرت در این شبکه توسط اندوکتانس‌های L_1 و L_2 به شبکه وصل شده‌اند. این راکتانس‌ها مقادیری بزرگ‌تر از راکتانس خطوط ارتباطی و البته غیر برابر با همدیگر می‌باشند تا به حداکثر غیرمتقارن بودن در شبکه دست پیدا کنید. توان نامی واحد دو، یا به زبان دیگر واحد Slave نصف توان نامی واحد اول یا Master در نظر گرفته شده است. بنابراین در اشتراک‌گذاری بار انتظار داریم توان تأمین شده توسط این واحد یک سوم کل توان مصرفی در شبکه باشد. از طرفی ضریب افت برای واحد اول ۰/۱۲ در نظر گرفته شده است، بنابراین طبق رابطه (۱۵) برای داشتن اشتراک‌گذاری قابل قبول بر روی واحدها،

• خروجی این سامانه کنترلی مکمل به عنوان فرکانس نامی به میدل اعمال می‌شود.

به بیانی دقیق‌تر، به منظور بررسی بهتر عملکرد سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی، رابطه (۱۵) معرفی می‌شود. رابطه (۱۵)، مدل شکل (۷) را به صورت ریاضی بیان می‌کند.

$$f_n = K_p(f_{rated} - f_i) + K_I \int (f_{rated} - f_i) dt \quad (15)$$

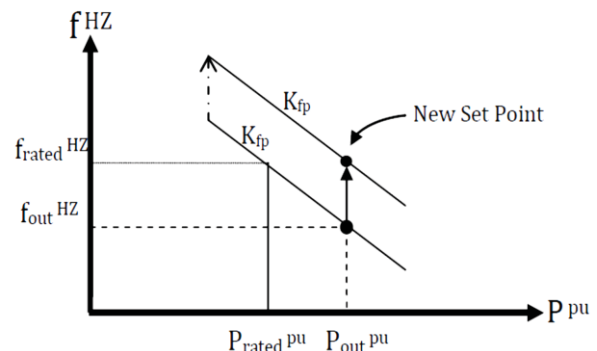
در رابطه فوق، f_i فرکانس خروجی واحد نام بعد از اعمال روش کنترل افت و FT است. از طرفی f_{rated} فرکانس نامی مد نظر برای شبکه به منظور تثبیت در نظر گرفته می‌شود. ضرایب K_p و K_I به ترتیب میزان بهره تناسبی و انتگرال‌گیر کنترل کننده PI هستند. خروجی این رابطه، f_n ، به عنوان سیگنال فرکانس مرجع اعمال شده در شکل (۳) و رابطه (۱) است. لازم به ذکر است در سامانه‌های کنترلی مرسوم و بدون سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی، f_n برابر با ۵۰ Hz و ثابت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷. سامانه کنترلی مکمل

بر طبق آنچه که شکل (۷) نشان می‌دهد، سیگنال خروجی میدل با فرکانس ۵۰ هرتز مقایسه شده و پس از عبور از PI کنترلر به ورودی f_n اعمال می‌شود. از این طریق فرکانس خروجی میدل همواره در مقدار تعیین شده باقی می‌ماند و هیچگونه نوسانی نخواهد داشت.

شکل (۸) نحوه عملکرد سامانه کنترلی مکمل را در زمان افت فرکانس خروجی به ازای افزایش توان تولیدی VSC نشان می‌دهد:

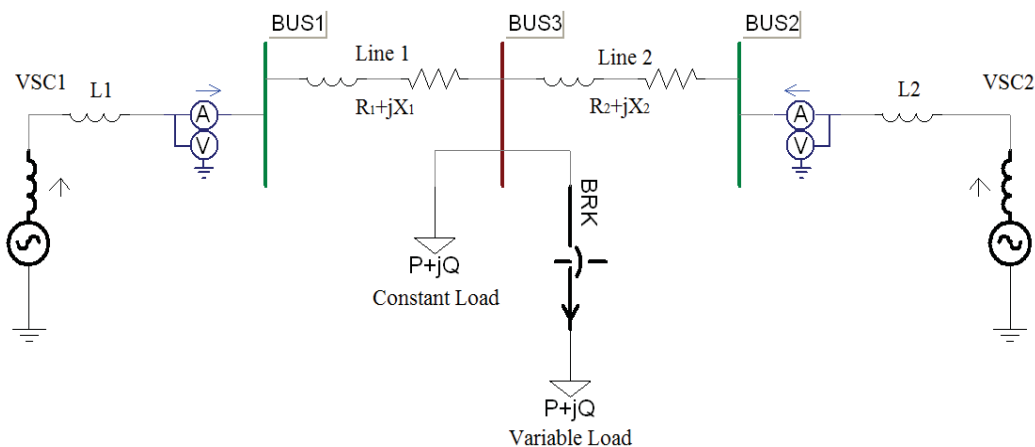


شکل ۸. نحوه عملکرد سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، توان خروجی VSC از P_{rated} به P_{out} تغییر کرده، بنابراین فرکانس خروجی با توجه به کنترل افت و روش FT از f_{rated} به f_{out} تغییر خواهد کرد. در سامانه کنترلی مکمل، نقطه کار میدل، بدون تغییر در توان خروجی آن به سمت افزایش

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 اشتراک گذاری بار در این شرایط غیر متقارن بحث شود.

شکل (۱۰) نتیجه پیاده سازی سامانه کنترلی FT بدون استفاده از سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۹. مدل میکروگرید استاندارد تحت مطالعه

شکل (۱۲) مدل گسترش یافته شکل (۹) می باشد. بر خلاف شبکه استاندارد برای پیاده سازی سامانه های کنترلی مختلف، این شبکه شامل پنج VSC می باشد. در این شبکه برای هر VSC توان نامی مشخص و متفاوت با بقیه مبدل ها در نظر گرفته شده است. هر واحد می تواند بیانگر یک DER در شبکه باشد برای مثال واحد پنجم با توجه به ظرفیت پایین تری که نسبت به بقیه واحدها دارد می تواند یک DG باشد که از سلول خورشیدی و باتری تغذیه می شود و واحد اول به عنوان بزرگترین واحد و به عنوان Master یک دیزل ژنراتور با قابلیت اطمینان بالا باشد. مقادیر پارامترهای مربوط به عناصر به کار رفته در میکروگرید شکل (۱۲) در جدول پیوست (۲) ارائه شده است.

علاوه بر تعداد مبدل های به کار گرفته شده در شبکه، وجود خطوط ارتباطی مختلف با پارامترهای متفاوت می تواند ساختاری متفاوت با شبکه های مرسوم و متقارن را در اختیار ما بگذارد. میکروگرید تحت مطالعه شامل شش خط ارتباطی می باشد که هر کدام منابع تولید توان را به بار و یا به یکدیگر متصل کرده اند. از طرفی بارهای محلی برای تکمیل شبکه تحت مطالعه در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. همانند آنچه که در مدل استاندارد شکل (۹) داشتیم، علاوه بر بارهای محلی، بار شبکه به دو قسمت تقسیم می شود. قسمت اول، بار ثابت در شبکه بوده که همواره در مدار است و قسمت دوم، بار متغیر می باشد که در زمانی خاص وارد مدار شده و سپس خارج می شود. بر اساس مقادیر انتخاب شده برای عناصر واقع در شبکه در جدول پیوست (۲)، همان طور که مشاهده می شود، ظرفیت نامی واحدها متفاوت و ظرفیت کل شبکه حدود ۲/۳ MW تعیین شده است. لازم به ذکر است که فرض شده است میکروگرید توانایی تأمین

ضریب افت برای واحد دوم باید ۰/۲۴ تعیین شود. مقادیر بارهای ثابت و متغیر، بر مبنای ۱ MVA در جدول (۳) نشان داده شده اند که این نقطه عملکرد طوری تعیین شده که واحدها نزدیک مقادیر نامی بهره برداری شوند و در انتها، ولتاژ و فرکانس نامی شبکه به ترتیب ۲۰ KV و ۵۰ HZ انتخاب شده اند. در بهره برداری از شبکه فوق، فرض شده است که بار ثابت همواره در مدار بوده ولی بار متغیر به مدت

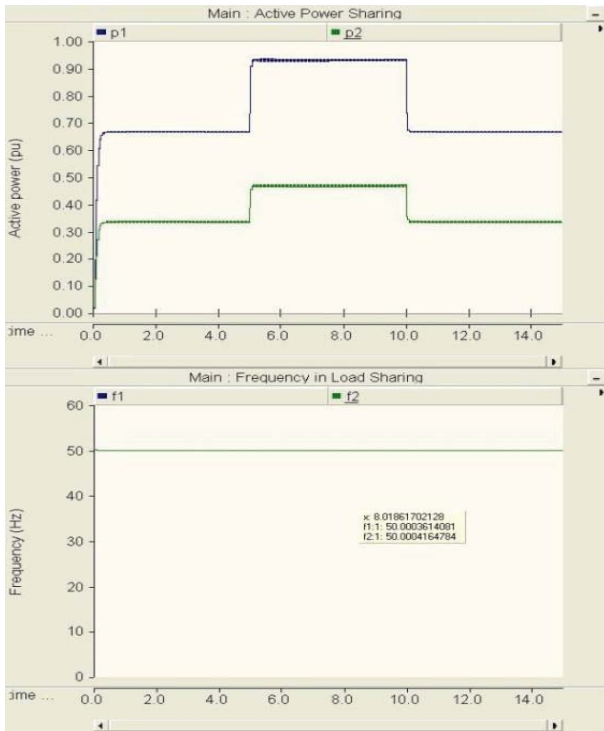
در شکل (۱۰)، توان تولیدی توسط واحدهای VSC نشان داده شده است. با اعمال FT به VSC ها توان مورد نیاز بارها با توجه به ظرفیت هر واحد به اشتراک گذاشته شده است. از طرفی فرکانس خروجی واحدها به دلیل استفاده از کنترل افت در روش FT در زمان اضافه شدن بار به شبکه (ثانیه پنجم) افت کرده و پس از خارج شدن بار در ثانیه دهم دوباره به میزان قبل بازگشته است. در شبکه مورد نظر اشتراک گذاری بار با دقت کافی انجام شده است و تنها موضوع قابل بحث، تغییرات فرکانس به ازای تغییرات بار است.

عملکرد سامانه کنترلی مکمل و نتیجه شبیه سازی صورت گرفته را در شکل (۱۱) مشاهده می شود.

بر طبق آنچه که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، با استفاده از سامانه کنترلی مکمل، اشتراک گذاری بار بر روی واحدها، متناسب با ظرفیت آنها صورت گرفته و فرکانس خروجی واحدهای VSC با دقت قابل قبولی بر روی میزان نامی تعیین شده (۵۰ HZ) قرار گرفته است. این موضوع تصدیقی بر عملکرد صحیح سامانه کنترلی پیشنهادی در میکروگرید استاندارد شکل (۹) می باشد.

۲-۴. شبکه تحت مطالعه شماره ۲

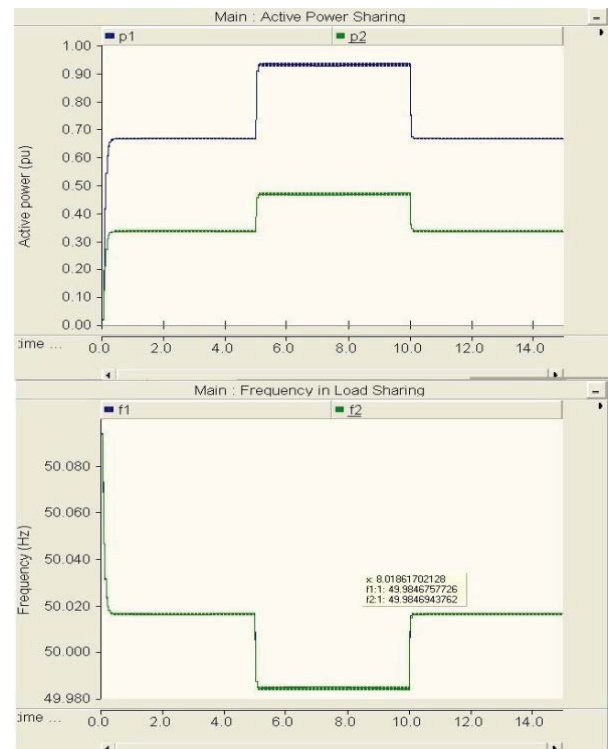
شکل (۱۲) مدل میکروگرید گسترش یافته را نشان می دهد. این شبکه گسترش یافته تحت مطالعه، شامل بارهای محلی و متمرکز و همچنین خطوط ارتباطی غالباً مقاومتی است. در واقع هدف از ارائه این شبکه، دستیابی به حداکثر عدم تقارن در ساختار آن و نزدیک بودن پارامترهای آن به عملی می باشد.



شکل ۱۱. توان خروجی واحدهای VSC و فرکانس خروجی آن‌ها با اعمال سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی

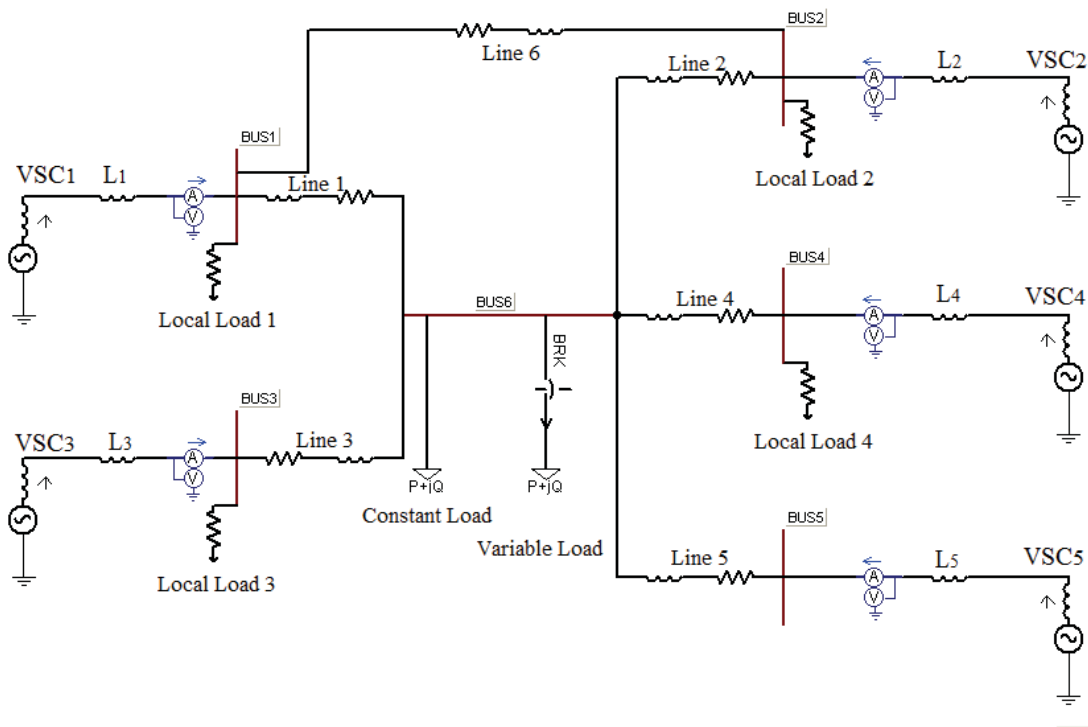
مقایسه نتایج به دست آمده از اعمال سامانه کنترلی مکمل به روش کنترلی با FT با حالتی که از سامانه کنترلی مکمل استفاده نشده است، کارآمدی آن را نشان داده می‌شود.

بار بیشتر از مقدار نامی برای مدت زمان کوتاه را داشته باشد.

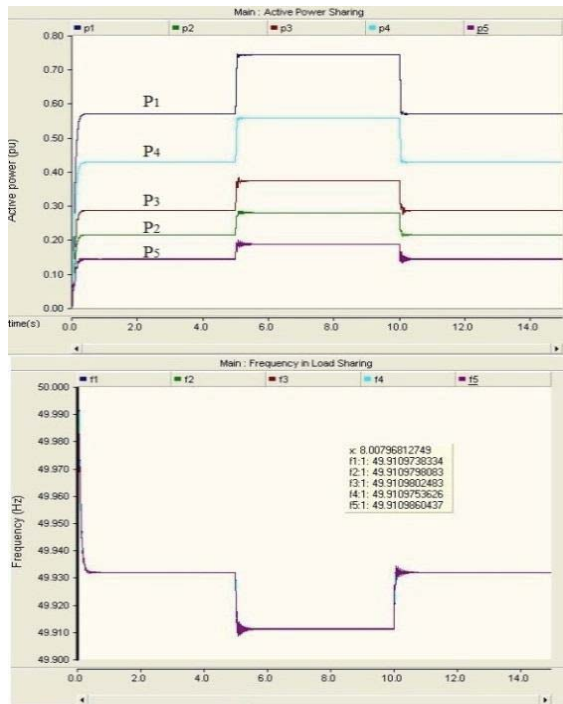


شکل ۱۰. توان اکتیو به اشتراک گذاشته شده و فرکانس واحدهای تولید توان، بدون اعمال کنترل کننده مکمل

حال پس از شناخت میکروگرید گسترش یافته تحت مطالعه و برای بررسی عملکرد سامانه کنترلی، به نقد نتایج شبیه‌سازی پرداخته و با



شکل ۱۲. مدل میکروگرید گسترش یافته تحت مطالعه



شکل ۱۳. توان اکتیو به اشتراک گذاشته شده بر روی VSCها و فرکانس واحدها بدون استفاده از سامانه کنترلی مکمل

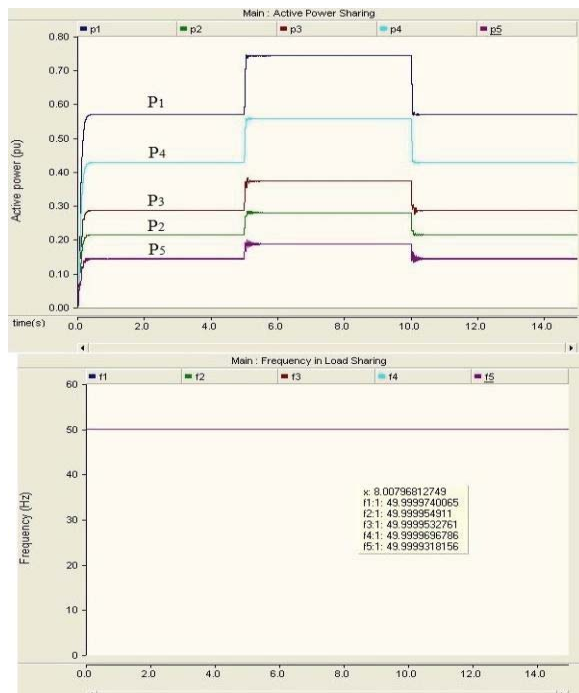
الف) عملکرد عادی شبکه: شکل (۱۳) نتایج حاصل از اشتراک گذاری بار بر روی واحدها با استفاده از روش FT و بدون اعمال سامانه کنترلی مکمل را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۳)، نتایج حاصل از اعمال روش FT بدون استفاده از سامانه کنترلی مکمل را مشاهده می‌شود. با توجه به ضریب افت تعیین شده برای واحد شماره ۱ (۰/۱۲)، اشتراک گذاری بار با دینامیکی سریع و به صورت کاملاً قابل قبول بر روی واحدهای VSC انجام شده است. از طرفی افت فرکانس تا ۴۹/۹۱۸۵۷ Hz را در خروجی مبدل‌ها مشاهده می‌شود. حال به اعمال سامانه کنترلی مکمل به روش FT پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود که با اعمال سامانه کنترلی مکمل تغییری در اشتراک گذاری بار بر روی واحدهای VSC ایجاد نشده است. حال آنکه با دقت بسیار خوبی، فرکانس تولیدی واحدها در مقدار فرکانس نامی تعیین شده نگه داشته شده و هیچگونه نوسان و یا تغییر فرکانسی در زمین اضافه شدن بار به شبکه و خروج بار از آن مشاهده نمی‌شود. جدول (۱) نقطه کار واحدهای تولید توان در میکروگرید را با توجه به شرایط بهره برداری ذکر شده در جدول پیوست (۲)، در ثانیه هشتم نشان می‌دهد.

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

$f_{i(t=8)}$ Hz:	۴۹/۹۹۹۹	$P_{1(t=8)}$ pu:	۰/۷۴۲
$P_{2(t=8)}$ pu:	۰/۲۷۹	$P_{3(t=8)}$ pu:	۰/۳۷۲
$P_{4(t=8)}$ pu:	۰/۵۵۷	$P_{5(t=8)}$ pu:	۰/۱۸۶



شکل ۱۴. توان اکتیو به اشتراک گذاشته شده بر روی VSCها به همراه فرکانس تولیدی واحدها بعد از اعمال سامانه کنترلی مکمل

ب) خروج واحد VSC شماره سه از مدار: از موارد دیگر بررسی عملکرد سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی در پایدارسازی و اشتراک گذاری بار در شبکه، از دست دادن تولید یک واحد به دلیل خروج آن واحد و یا خارج شدن خط ارتباطی آن واحد با بقیه سامانه از مدار می‌باشد. بنابراین در این قسمت برای بررسی سامانه کنترلی در شرایط از دست رفتن توان تولیدی یک واحد، اقدام به خروج واحد سوم از شبکه در حین عملکرد پایدار کرده و سپس پایداری و اشتراک گذاری بار بعد از خروج واحد تولید توان در شبکه را مورد بررسی قرار داده می‌شود.

شکل (۱۵) توان تولیدی توسط واحدهای VSC و همچنین فرکانس مبدل‌ها قبل و بعد از خروج واحد سوم از مدار را نشان می‌دهد.

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

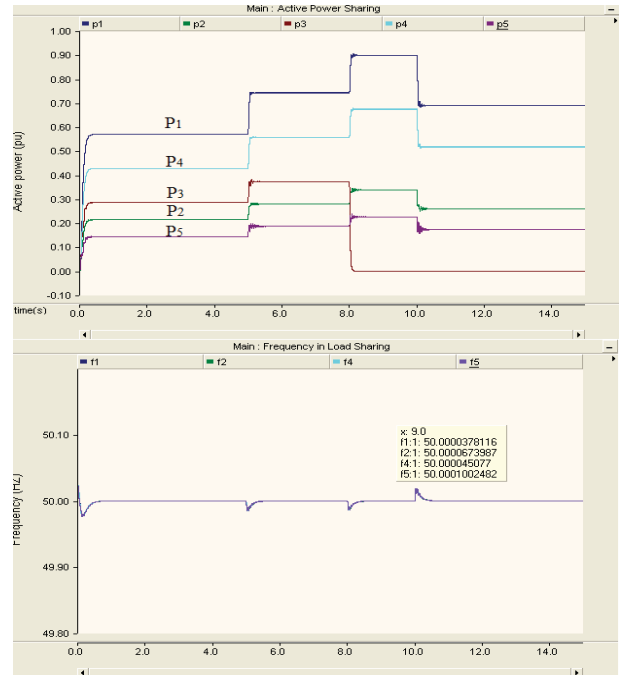
قبل از خروج واحد سوم ($t=7$)		بعد از خروج واحد سوم ($t=9$)	
$P_{1(t=7)}^{pu}$	۰/۷۴۲۲	$P_{1(t=9)}^{pu}$	۰/۸۹۷۸
$P_{2(t=7)}^{pu}$	۰/۲۷۹۲	$P_{2(t=9)}^{pu}$	۰/۳۳۷۴
$P_{3(t=7)}^{pu}$	۰/۳۷۲۴	$P_{3(t=9)}^{pu}$	۰
$P_{4(t=7)}^{pu}$	۰/۵۵۶۹	$P_{4(t=9)}^{pu}$	۰/۶۷۳۶
$P_{5(t=7)}^{pu}$	۰/۱۸۶۶	$P_{5(t=9)}^{pu}$	۰/۲۲۵۲

۵. نتیجه گیری

برای تغذیه بارهای موجود در نواحی حساس، داشتن انرژی الکتریکی با پارامترهای ثابت مهم و ضروری می باشد. از جمله این پارامترها، فرکانس برق اعمالی به ناحیه را می توان نام برد. در کنترل غیرمتمرکز یک میکروگرید مبتنی بر اینورتر، داشتن عملکردی پایدار در شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است. در کنار عملکرد پایدار شبکه، با توجه به امکان وجود تغییرات در میزان توان مورد نیاز شبکه و همچنین در اغتشاش‌هایی از جمله از دست رفتن یک یا چند واحد تولید توان، اشتراک‌گذاری بار نقش مهمی را بازی می‌کند. روش کنترل افت به عنوان روشی کاربردی در اشتراک‌گذاری بار بر روی واحدهای VSC می‌باشد. با استفاده از FT، کنترل افت بر سامانه اعمال شده و در این مقاله سامانه کنترلی مکمل نوینی برای تثبیت فرکانس در اشتراک‌گذاری بار بر روی VSCها معرفی شده است. بر اساس عملکرد کنترل افت در اشتراک‌گذاری بار، به ازای تغییرات توان اکتیو در ساختار میکروگرید جزیره‌ای، فرکانس مبدل‌ها نیز تغییر می‌کند. با اعمال سامانه کنترلی مکمل بر فرکانس مرجع تعیین شده برای VSCها، مشکل تغییرات فرکانس مرتفع شده و شبکه‌ای پایدار را خواهید داشت. از مزایای استفاده از سامانه کنترلی مکمل به همراه FT می‌توان به این موارد اشاره کرد: تثبیت فرکانس میکروگرید با سرعت بالا برای داشتن شبکه‌ای پایدار، اشتراک‌گذاری بار متناسب با ظرفیت واحدها، سرعت پاسخ‌دهی بالا در اشتراک‌گذاری بار، عدم حساسیت سامانه کنترلی به خطوط ارتباطی در ساختار میکروگرید، قابلیت اضافه کردن و کم کردن واحدهای تولید توان بدون تغییر در ساختار کنترلی میکروگرید و در آخر تثبیت فرکانس شبکه در مقدار نامی تعیین شده.

۶. مراجع

- [1] Peng, F. Z. "Special Issue on Distributed Power Generation"; IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 1157-1158.
- [2] Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Kjaer, S. B. "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems"; IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 1184-1194.
- [3] Arbolea, P.; Diaz, D.; Guerrero, J. M.; Garcia, P.; Briz, F.; Gonzalez-Moran, C.; Aleixandre, J. G. "An Improved Control Scheme Based in Droop Characteristic for Microgrid Converters"; Elect. Power Syst. Res. 2010, 80, 1215-1221.
- [4] Rocaber, J.; Luna, A.; Blaabjerg, F.; Rodriguez, P. "Control of Power Converters in AC Microgrids"; IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 4734-4748.



شکل ۱۵. توان خروجی و فرکانس خروجی واحدها پس از خروج واحد سوم با استفاده از سامانه کنترلی مکمل پیشنهادی

فرض شده است در ثانیه هشتم به طور ناگهانی توان تولیدی واحد سوم صفر شود. طبق آنچه که در شکل (۱۵) 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 (۱۵) می‌توان به این نکته اشاره کرد که در میکروگرید کنترل شده با سامانه پیشنهادی، هرگونه 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 همان‌طور که اشاره شد، باید ظرفیت تولید توان در میکروگرید وجود داشته باشد، در غیر این صورت سامانه‌های حفاظتی اقدام به خروج بارهای دارای اولویت پایین‌تر، می‌کند. در کنار اشتراک‌گذاری قابل قبول بار بر روی واحدها، فرکانس خروجی واحدها در مقدار نامی تعیین شده تثبیت شده و کمترین نوسانات ممکن در زمان تغییرات در ساختار شبکه را دارد.

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 میکروگرید و مدل گسترش یافته این شبکه، مشاهده شد که سامانه کنترلی مکمل به همراه FT عملکرد قابل قبول و 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 با تثبیت فرکانس در مقدار نامی، با توجه به ضریب افت تعیین شده برای واحد Master، به طور دقیق انجام شده است.

- [24] Sao, C. K.; Lehn, P. W. "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids"; IEEE Trans. Power Syst. 2008, 23, 1088-1098.
- [25] Mohamed, Y. A. I.; El-Saadany, E. F. "Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids"; IEEE Trans. Power Electron. 2008, 23, 2806-2816.
- [26] Cho, C.; Jeon, J.; Kim, J.; Kwon, S.; Park, K.; Kim, S. "Active Synchronizing Control of a Microgrid"; IEEE Trans. Power Electron. 2011, 3707-3719.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] De, D.; Ramanarayanan, V. "Decentralized Parallel Operation of Inverters Sharing Unbalanced and Nonlinear Loads"; IEEE Trans. Power Electron. 2010, 25, 3015-3025.
- [30] Lasseter, R. H.; Piagi, P. "Microgrid: A Conceptual Solution"; In Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Specialists Conf. 2004, 6, 4285-4290.
- [31] Vandoom, T. L.; Meersman, B.; Degroote, L.; Renders, B.; Vandeveld, L. "A Control Strategy for Islanded Microgrids with DC-link Voltage Control"; IEEE Trans. Power 2011, 26, 703-713.
- [32] Engler, A. "Applicability of Droops in Low Voltage Grids"; DER J. 2005, 1, 1-5.
- [33] Iyer, S. V.; Belur, M. N.; Chandorkar, M. C. "A Generalized Computational Method to Determine Stability of a Multi-Inverter Microgrid"; IEEE Trans. on Power Electron 2010, 25, 2420-2432.
- [34] Sao, C. K.; Lehn, P. W. "Autonomous Load Sharing of Voltage Source Converters"; IEEE Trans. Power Del. 2005, 20, 1009-1016.
- [35] 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.
- [36] Guerrero, J.; de Vicuna, L.; Matas, J.; Castilla, M.; Miret, J. "A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation System"; IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 1205-1213.
- [37] Chiang, S. J.; Yen, C. Y.; Chang, K. T. "A Multi-module Parallelable Series-Connected PWM Voltage Regulator"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2001, 48, 506-516.
- [38] Borup, U.; Blaabjerg, F.; Enjeti, P. "Sharing of Nonlinear Load in Parallel Connected Three-Phase Converters"; IEEE Trans. Ind. 2001, 37, 1817-1823.
- [39] Lin, T.; Cheng, P. "Design of a New Cooperative Harmonic Filtering Strategy for Distributed Generation Interface Converters in an Islanding Network"; IEEE Trans. Power Electron. 2007, 22, 1919-1927.
- [40] 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.
- [5] Engler, A.; Osika, O.; Barnes, M.; Hatziargyriou, N. "DB2 Evaluation of the Local Controller Strategies [Online]. Available www.microgrids.eu/micro2000, 2005.
- [6] Pepermans, G.; Driesen, J.; Haeseldonckx, D.; Belmans, R.; D'haeseleer, W. "Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues"; Energy Policy 2005, 33, 787-798.
- [7] Green, T. C.; Prodanovic, M. "Control of Inverter-Based Microgrids"; Elect. Power Syst. Res. 2007, 77, 1204-1213.
- [8] 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.
- [9] Kroposki, B.; Lasseter, R.; Ise, T.; Morozumi, S.; Papatlianassiou, S.; Hatziargyriou, N. "Making Microgrids Work"; IEEE Power Energy Mag. 2008, 6, 40-53.
- [10] Katiraei, F.; Iravani, M. R.; Hatziargyriou, N.; Dimeas, A. "Microgrids Management"; IEEE Power and Energy Magazine 2008, 6, 54-65.
- [11] Katiraei, F.; Iravani, M. R. "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units"; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 21, 1821-1831.
- [12] Chen, S. X.; Gooi, H. B.; Wang, M. Q. "Sizing of Energy Storage for Microgrids"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 142-151.
- [13] Kwasinski, A. "Quantitative Evaluation of DC Microgrids availability: Effects of System Architecture and Converter Topology Design Choices"; IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 835-851.
- [14] Balog, R. S.; Krein, P. T. "Bus Selection in Multi-bus DC Microgrids"; IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 860-867.
- [15] Huddy, S. R.; Skufca, J. D. "Amplitude Death Solutions for Stabilization of DC Microgrids with Instantaneous Constant-Power Loads"; IEEE Trans. Power Electron. 2013, 28, 247-253.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Lasseter, R. H.; Akhil, A.; Marnay, C.; Stephens, J.; Dagle, J.; Guttromson, R.; Meliopoulos, A.; Yinger, R.; Eto, J. "The CERTS Microgrid Concept, White Paper on Integration of Distributed Energy Resources"; California Energy Comm., Office of Power Technologies, U.S. Dept. Energy, LBNL-50829. [Online]. Available: <http://certs.lbl.gov>; 2002.
- [20] Barsali, S.; Ceraolo, M.; Pelacchi, P.; Poli, D. "Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply"; in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, 2002, pp. 789-794.
- [21] Kazmierkowski, M. P.; Malesani, L. "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey"; IEEE Trans. Ind. Electron. 1998, 45, 691-703.
- [22] 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.
- [23] Kim, J.; Choi, H.; Cho, B. H. "A Novel Droop Method for Converter Parallel Operation"; IEEE Trans. Power Electron. 2002, 17, 25-32.

۷. پیوست

جدول پیوست ۱. مقادیر پارامترهای عناصر استفاده شده در شکل (۹)

Line 1(Ω):	$1+j\cdot 0.942$	L_1 :	0.001^H
Line 2(Ω):	$1/1+j\cdot 0.157$	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 :	$1+j\cdot 0.2$	f_n :	50^{Hz}
بار متغیر MVA :	$0.4+j\cdot 0.4$	V_n :	20^{KV}

جدول پیوست ۲. مقادیر پارامترهای استفاده شده در میکروگرید گسترش

یافته تحت مطالعه (شکل ۱۲)

Line 1(Ω):	$1+j\cdot 0.942$	L_1 :	0.001^H
Line 2(Ω):	$1/1+j\cdot 0.2512$	L_2 :	0.0015^H
Line 3(Ω):	$0.8+j\cdot 0.628$	L_3 :	0.0012^H
Line 4(Ω):	$1+j\cdot 0.1256$	L_4 :	0.003^H
Line 5(Ω):	$1+j\cdot 0.1570$	L_5 :	0.001^H
Line 6(Ω):	$1/2+j\cdot 0.1570$		
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} :	0.2^{MW}	K_{fp5} :	0.48
بار محلی ۱:	0.01^{MW}	بار محلی ۳:	0.008^{MW}
بار محلی ۲:	0.009^{MW}	بار محلی ۴:	0.01^{MW}
بار ثابت MVA :	$1/6+j\cdot 0.1$	f_n :	50^{Hz}
بار متغیر MVA :	$0.5+j\cdot 0.1$	V_n :	20^{KV}