

روش کنترل جدید برای مبدل منبع ولتاژ و ژنراتور سنکرون به منظور کنترل فرکانس در یک ریز شبکه

علی کریمی^۱، دانشجوی دکتری؛ حسین فلاحزاده ابرقوئی^۲، استادیار؛ مجید نیری پور^۳، استاد

۱- گروه برق، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی، ایران - alikarimi.ep@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - مرکز آموزش عالی اقلید، اقلید، فارس، ایران - hossein.fallahzadeh@eghli.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - nayeri@sutech.ac.ir

چکیده: منابع تولید پراکنده که استفاده از آن‌ها روز به روز در حال افزایش است بدون سیستم کنترل دقیق عملکرد مناسب و مؤثری نخواهند داشت. منابع تولید پراکنده در مقایسه با ژنراتور سنکرون به علت عدم داشتن اینرسی کافی، تأثیر کمتری در کنترل فرکانس شبکه دارند. منابع تولید پراکنده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه‌های فشار ضعیف متصل می‌گردند، به طوری که این مبدل‌ها در دو مد کنترل ولتاژ و توان کار می‌کنند. در این مقاله روش کنترل جدیدی به منظور بررسی نقش مشارکتی مبدل‌های منبع ولتاژ با ماشین سنکرون در کنترل فرکانس ریز شبکه ارائه می‌گردد. در این راستا ابتدا روش کنترل ترکیبی دروپ فرکانس-زاویه بهبود یافته همراه با کنترل کننده تطبیقی غیرخطی در مبدل‌ها به منظور کنترل توان و فرکانس ارائه می‌گردد. در نهایت، صحت عملکرد روش ارائه شده، با استفاده از شبیه سازی سیستم نمونه در نرم افزار سیمولینک متلب مورد ارزیابی و تأیید قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: نقش مشارکتی مبدل منبع ولتاژ، دروپ ترکیبی فرکانس-زاویه، کنترل فرکانس

Novel control method of voltage source converter and synchronous generator to frequency control in a microgrid

A. karimi¹, PHD student; Hossein Fallahzadeh-Abarghouei², Assistant Professor; M. Nayeripour³, Professor

1- Department Of electrical, Nourabad mamasani Branch, Islamic Azad University, Nourabad mamasani, Iran, Email: alikarimi.ep@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Higher Education Center of Eghlid, Eghlid, Fars, Iran, Email: hossein.fallahzadeh@eghli.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: nayeri@sutech.ac.ir

Abstract: Now days using of distributed generations (DG) are growing. Without considering appropriate controller, their operation is not useful and efficiency. DG has less impact on the network frequency than synchronous generator (SG) due to its low inertia compared to SG. DGs using power electronic converters are connected to low-voltage networks, so that converters work in voltage control mode and power control mode. In this paper, a new control method to investigate the role of participatory voltage source converters with synchronous machine to frequency control of the microgrid has been presented. In this regard, the cascaded frequency-angle loop control with adaptive nonlinear controller in order to power sharing and frequency control is used. In the following, new algorithm for evaluating the effects of VSCs with synchronous generator is presented. Finally, the accuracy and authenticity of the proposed method, using simulations used in software Simulink Matlab evaluated and approved.

Keywords: Participatory voltage source converter, Cascaded droop frequency-angle, Frequency control

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، ۱۳۹۶/۰۱/۱۸، ۱۳۹۶/۰۳/۳۱، ۱۳۹۶/۰۶/۱۹ و ۱۳۹۶/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۳

نام نویسنده مسئول: مجید نیری پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت ثابت نگهداشتن فرکانس با ایجاد توازن توان اکتیو بین منبع تولید و مصرف کننده تحقق می‌یابد. عدم تعادل توان اکتیو از تأثیر آن بر سرعت یا فرکانس ژنراتور احساس می‌شود، در صورت کاهش بار و اضافه بودن تولید ژنراتور تمایل به افزایش سرعت روتور و فرکانس خود دارد و در حالت افزایش بار و کمبود تولید، سرعت و فرکانس ژنراتور کاهش خواهد یافت. ولتاژ و فرکانس از مشخصه‌های اصلی یک شبکه می‌باشند که کیفیت توان یک شبکه الکتریکی را بیان می‌کند. در واقع مسئله کنترل فرکانس به تنظیم و تعادل توان اکتیو بین تولیدکننده‌های موجود شبکه و مصرف‌کننده‌ها توان بستگی دارد و با افزایش مصرف نسبت به میزان تولید توان اکتیو، فرکانس شبکه کاهش و با کاهش مصرف نسبت به تولید توان اکتیو فرکانس شبکه افزایش می‌یابد. در یک شبکه قدرت که شامل تعداد زیادی تولیدهای بزرگ می‌باشد کنترل توان اکتیو توسط سیستم کنترل فرکانس-بار که بر روی گاورنر ژنراتورهای سنکرون قرار دارند صورت می‌گیرد و با توجه به مشخصه افتی هر یک از این سیستم‌های کنترل فرکانسی تغییرات توان اکتیو بین واحدهای مختلف تولیدی تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه تعادل توان اکتیو بین تولید و مصرف را نمی‌توان به صورت لحظه‌ای برقرار کرد و با تأخیر همراه می‌باشد و میزان مصرف نیز دائم در حال تغییر است فرکانس شبکه نیز دچار تغییرات می‌گردد که میزان این تغییرات فرکانسی به عوامل مختلفی از جمله مشخصه پاسخ فرکانسی گاورنرها، میزان و نسبت تغییرات بار و پاسخ فرکانسی ژنراتورهای تولیدکننده توان اکتیو بستگی دارد. بنابراین لازم است که به منظور اطمینان از صحت عملکرد تجهیزات شبکه در ارتباط با عملکرد مطلوب از نقطه نظر فرکانسی، محدوده مجازی به عنوان استاندارد مجاز تغییرات فرکانسی در نظر گرفته شود که به طور نمونه بین 0.2% تا 0.5% در استانداردهای مختلف در نظر گرفته می‌شود. در شبکه‌هایی که تولیدات پراکنده نیز در تولید توان اکتیو سهم دارند فرکانس نیز می‌تواند تحت تأثیر تغییرات توان اکتیو این تولیدکننده‌ها قرار گیرد. این موضوع در شبکه‌های جزیره‌ای که در واقع به عنوان بخشی از شبکه اصلی قدرت بوده و بنا به هر علتی از شبکه اصلی جدا شده و در حال بهره‌برداری می‌باشد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این شبکه جزیره‌ای لازم است تعادل توان بین منابع تولیدات پراکنده موجود و بارها صورت پذیرد که با توجه به مدهای عملکردی ژنراتورهای تولیدکننده توان و نحوه برقراری این تعادل توان اهمیت مسئله دوچندان می‌شود چراکه ممکن است در این حالت به منظور تنظیم فرکانس تعدادی از بارها با توجه به استراتژی معین و از پیش تعیین شده‌ای از شبکه خارج شود و همچنین مدهای عملکردی ژنراتورها تغییر داده شود. به طور نمونه تعدادی از ژنراتورها را بر روی مد تولید توان ثابت و تعادل نهایی توان اکتیو را توسط یک یا چند منبع دیگر تولید کننده توان اکتیو برقرار کرد. عملاً به منظور برقراری تعادل توان اکتیو و راکتیو بین تولید و مصرف یکی از باس‌های شبکه به عنوان باس بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. ژنراتور متصل به این باس با برقراری تعادل توان اکتیو و راکتیو، اندازه و

زاویه ولتاژ را در این باس تثبیت می‌کند و سایر منابع تولید در این شبکه می‌توانند در مدهای مختلف از جمله تزریق ثابت توان اکتیو و یا راکتیو قرار گیرند. در بررسی عملکرد شبکه‌ای که شامل تعدادی تولیدات پراکنده می‌باشد و به یک باس بی‌نهایت متصل می‌باشد مشکلی از نظر فرکانس وجود ندارد زیرا فرض می‌شود که ژنراتور متصل به این باس با تنظیم تعادل توان اکتیو و راکتیو فرکانس شبکه را تنظیم و ولتاژ باس خود را به عنوان مرجع تثبیت می‌کند. در صورتی که توان ژنراتور متصل به این باس که به عنوان باس بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود محدود باشد و یا این باس نقطه اتصال به شبکه دیگر باشد فرض در نظر گرفتن باس بی‌نهایت فرض درستی نبوده و در صورت عدم توانایی این نقطه اتصال در تنظیم و برقراری تعادل توان، ولتاژها و فرکانس شبکه دچار تغییرات خواهد شد. در این حالت تثبیت فرکانس و ولتاژ این شبکه که به عنوان یک شبکه جزیره‌ای در نظر گرفته می‌شود اهمیت اساسی داشته و لازم است کلیه واحدهای تولیدی با به کارگیری یک استراتژی کنترلی مناسب و هماهنگ به طور مشترک در تنظیم فرکانس نقش داشته باشند. مطابق تعریف، پایداری فرکانس به مفهوم توانایی سیستم در حفظ و تثبیت فرکانس شبکه به دنبال وقوع هر نوع اختلال هست. [۱]. این تغییر فرکانسی در شبکه‌های قدرت بزرگ معمولاً به دنبال اختلال‌های بزرگ از جمله ورود و خروج بارهای بزرگ، خط و یا واحدهای تولیدی است که پایداری فرکانسی توانایی این سیستم قدرت را در حفظ تعادل توان و برگرداندن فرکانس به مقدار قبلی بیان می‌کند. از آنجا که تغییر تعادل توان اکتیو در کل شبکه موجب تغییر فرکانس شبکه خواهد شد، سیستم کنترل می‌تواند از سیگنال فرکانس به عنوان فیدبکی در تعادل و تنظیم توان اکتیو (و یا به طور معکوس) استفاده کند. در این راستا لازم است مطابق با یک مشخصه معینی محدوده مجازی برای تغییر فرکانس در نظر گرفته شود که متناسب با آن سیگنال مرجع تغییر توان‌های تولیدی واحدها توسط سیستم‌های کنترل تعیین شود. در این حالت پایداری فرکانس مفهوم قرارگرفتن فرکانس در این محدوده می‌باشد. در شبکه‌های شامل تولید پراکنده که به صورت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد همین مفاهیم قابل کاربرد می‌باشد با این تفاوت که تعدادی از واحدهای تولید از جمله سلول‌های خورشیدی و پیل‌های سوختی از طریق مبدل مربوطه که بدون اینرسی می‌باشند به شبکه متصل می‌شوند و فرکانس آن‌ها توسط شبکه و یا توسط حلقه قفل‌شده فاز تعیین می‌شود. در این صورت برای هر یک از مبدل‌های موجود مشخصه‌ای مجازی به صورت رابطه خطی با شیب افت تغییر فرکانس برحسب تغییر توان اکتیو تولیدی آن در نظر گرفته می‌شود. در این حالت لازم است سیستم هماهنگی بین تولیدکننده‌ها وجود داشته که تعادل توان و تنظیم فرکانس شبکه جزیره‌ای را برقرار و در نتیجه پایداری فرکانس را تضمین کند. در صورتی که منابع موجود توانایی تأمین توان و تثبیت فرکانس را نداشته باشند، به منظور حفظ پایداری و تنظیم فرکانس لازم است تعدادی از بارها از شبکه خارج شود و در غیر این صورت منبع

سنکرونی که تعیین کننده فرکانس اصلی شبکه می باشد حالت سنکرون خود را از دست داده و از شبکه خارج می شود که خروج واحدهای اینورتری دیگر را به دنبال خواهد داشت.

افزایش نفوذ تولیدات پراکنده از یک طرف با ایجاد ظرفیت بالاتر می تواند کمک به بهبود تعادل توان اکتیو و تنظیم فرکانس نماید. اما در صورتی که این منابع تولید پراکنده به صورت اینورتری بوده که به صورت مجازی برای آن مشخصه افتی و یا به عبارت دیگر اینرسی مجازی در نظر گرفته می شود، از حد معینی بیشتر باشد، منابع ژنراتور سنکرون موجود قادر به نگهداری فرکانس اصلی شبکه که بقیه مبدل های اینورتری از آن تبعیت کند نمی باشد و موجب ناپایداری فرکانسی خواهد شد. بنابراین از دید پایداری فرکانسی لازم است میزان این تولیدات پراکنده از حد معینی بیشتر نباشد. عموماً به یک مجموعه متصل به هم از منابع تولید پراکنده، بارها و سیستم های ذخیره انرژی یک ریزشبه می گویند. ریزشبه ها عموماً در سه مد متصل به شبکه، جزیره ای و گذر بین این دو حالت کار می کنند [۲-۳]. مفهوم ریزشبه به منظور غلبه بر مشکلات واحدهای مستقل منابع تولید پراکنده توسعه داده می شود [۴-۶]. همچنین این مفهوم سطح جدیدی از کنترل پذیری را در الگوی شبکه های هوشمند برق ایجاد می کند [۷]. به هر حال به دلیل اینکه منابع تولید پراکنده و ریزشبه ها به طور گسترده ای روی شبکه توزیع شده اند، میزان سطح رؤیت پذیری و کنترل پذیری آن ها مسائل مهمی در عمل و کنترل سیستم توزیع هستند [۸-۹]. مسائل مهم مرتبط با عمل ریزشبه عبارتند از تعامل بین واحدهای منابع تولید پراکنده و شبکه اصلی، تنظیم و کنترل فرکانس در مد جزیره ای [۸، ۱۰]، تقسیم صحیح توان در مد جزیره ای به منظور جلوگیری از جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده ها، گذر بی نقص بین مدهای متصل به شبکه و جزیره ای و عمل پایدار مقاوم در طی اتفاقات احتمالی نظیر باز بست خروج از فاز و شرایط خطا که برای تمامی آن ها باید راه حل مناسبی یافت شود. مسائل پایداری مرتبط با عمل ریزشبه اساساً شامل کمبود منابع انرژی مسلط در حالت خودگردان، ثابت زمانی های متفاوت منابع تولید پراکنده های تزویج شده به صورت الکترونیکی و ماشین های سنکرون، کمبود میرایی برای دینامیک فرکانس که منجر به ناپایداری زاویه فرکانس می شود [۳] و ناپایداری به دلیل تغییر حالت کاری هستند. کنترل فرکانس اولیه به عنوان یک وظیفه اساسی برای کنترل و پایداری ریزشبه در طول عملکرد ایزوله به شمار می رود. کنترل مناسب فرکانس منجر به تقسیم توان به صورت مناسب بین واحدها در حالت استاتیکی و دینامیکی، بهبود کیفیت توان و نهایتاً بهبود عملکرد کلی سیستم می گردد. توسعه مفهوم منابع تولید پراکنده، الگوی تولید و انتقال انرژی را از دیدگاه شبکه های برق هوشمند تغییر داده است [۱۱]. روش های کنترل اصلی که تاکنون برای کنترل ریزشبه های ارائه شده اند، شامل روش های دروپ و تقسیم توان اکتیو [۱۲]، روش غیرمتمرکز [۱۵-۱۳]، روش پیشرو-پیرو [۱۶] و دروپ ولتاژ و فرکانس زاویه [۱۷، ۱۹] می باشند. در میان این روش ها روش دروپ کنترل از اطلاعات محلی استفاده می کند، بنابراین

پذیرفته شده ترین روش برای ریزشبه ها جهت بهبود قابلیت اطمینان سیستم و تحقق ساختار کنترل خودگردان است. هدف اصلی دروپ کنترل تقسیم توان اکتیو و راکتیو کل ریزشبه بین واحدها مطابق با ظرفیت توانی آن ها است [۱۱، ۱۷]. روش های کنترل دروپ متداول عموماً دارای مشکلاتی هستند که مهم ترین آن ها شامل تنظیم فرکانس ضعیف به دلیل عملکرد فرکانس متغیر، تقسیم توان ضعیف به دلیل امپدانس های تطبیق نشده خط، حاشیه پایداری کم [۱۱، ۲۰] عدم توانایی برای کار در تمام نقاط کاری بدون باز پیکره بندی و حالت های گذرای در شرایط گذر بین مدهای کاری جزیره ای و متصل به شبکه هستند. پایداری یک ریزشبه کنترل دروپ شده را می توان با استفاده از کنترل مکمل [۲۱] یا گین های دروپ تطبیقی [۲۲] بهبود داد. یک راه حل جایگزین برای حل مشکلات کنترل دروپ متداول استفاده از دروپ زاویه بار به جای دروپ فرکانس است [۲۱، ۲۳، ۲۴]. دروپ زاویه عملکرد فرکانس ثابت را ایجاد می کند اما از صحت تقسیم توان کم و حاشیه پایداری کم رنج می برد. این مسئله هنگامی که زاویه بار بزرگ است شدت بیشتری پیدا می کند [۲۳]. در [۲۵] یک کنترل دروپ چندمتغیره برای مبدل منبع جریان با استفاده از جداسازی محورهای dq در شبکه های ضعیف ارائه شده است. این نوع کنترل کننده سنکرون سازی خودکار را آسان تر و پایداری مبدل منبع ولتاژ در شبکه های ضعیف را بهبود می بخشد. در [۲۶] روش کنترل جدیدی جهت بهبود عملکرد دینامیکی سیستم با استفاده از تقسیم توان در یک ریزشبه جزیره ای ارائه می گردد. در این مرجع حلقه امپدانس مجازی جهت بهبود پاسخ دینامیکی ریزشبه ها مورد استفاده قرار می گیرد. در [۲۷]، با استفاده از روش سیگنال باس فرکانسی، عملکرد هماهنگی تنظیم توان بین اجزاء ریزشبه در حالت غیرمتمرکز و تغییر مدهای کاری (توان ثابت-ولتاژ ثابت) منابع تولید پراکنده با استفاده از حد آستانه فرکانس-ولتاژ پیاده سازی می گردد. همچنین کنترل کننده ثانویه متمرکز اختیاری برای محاسبه بازگرداندن فرکانس باس تعریف می گردد. در این مرجع روش ارائه شده برای منابع تولید پراکنده دارای مبدل های الکترونیک قدرت می باشد و دارای دینامیک سریع می باشند. روش های کنترلی ارائه شده نیز نیاز به لینک مخابراتی دارد. به شبکه در [۲۸-۳۰]، از روش سیگنال دادن باس با استفاده از حد آستانه فرکانس-ولتاژ باس های متفاوت به منظور تغییر مد ولتاژ و توان برای هماهنگی منبع تولید پراکنده و منابع ذخیره ساز انرژی استفاده شده است. در مطالعات گذشته کنترل فرکانس در ریزشبه بیشتر توسط ژنراتورهای سنکرون یا منابع تولید توان دارای اینرسی صورت می گرفت. مبدل های تولید توان مبتنی بر اینورتر به علت نداشتن اینرسی تأثیر ناچیزی در کنترل فرکانس دارند. در [۳۱] یک روش کنترل مناسب به منظور تنظیم ولتاژ بار و فرکانس یک ریزشبه در طی جزیره ای شدن برای یک سیستم چند ریزشبه ای ارائه شده است. روش کنترل پیشنهادی موجب تبادل راحت توان بین حالت جزیره ای و اتصال به شبکه می گردد. پارامترهای این کنترل کننده با استفاده از روش کنترل پیشگو تطبیقی تنظیم می گردد. در [۳۲] یک

در این مقاله ابتدا به بررسی کنترل توان در مبدل‌های منبع ولتاژ و کنترل‌کننده پیشنهادی برای مبدل‌های منابع تولید پراکنده پرداخته می‌شود. در گام بعد مدل‌سازی ژنراتور سنکرون توان محدود مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ ارائه می‌گردد. در ادامه الگوریتمی جهت بررسی تأثیر حضور مبدل‌ها در کنار ژنراتور سنکرون بر فرکانس ریزش شبکه ارائه می‌گردد. سپس بررسی مدل ارائه‌شده با در نظر گرفتن کنترل‌کننده غیرخطی بیان می‌گردد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از بخش سیمولینک نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

۲- کنترل توان مبدل منبع ولتاژ

با توجه به خروجی DC برخی منابع و همچنین ثابت نبودن فرکانس یا فرکانس بالا، اتصال این‌گونه منابع به صورت مستقیم به شبکه فشار ضعیف مناسب نیست. بنابراین از مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور اتصال منابع به شبکه استفاده می‌شود. این مبدل‌ها به منظور کنترل ولتاژ و فرکانس ریزش‌ها در حالت ایزوله یا متصل به شبکه در دو مد کنترل توان و ولتاژ کار می‌کنند. زمانی که ریزش‌ها به شبکه سراسری متصل است با توجه به اینکه تمام منابع ولتاژ و فرکانس خود را از شبکه اصلی می‌گیرند، در مد کنترل توان کار می‌کنند. اگر ریزش‌ها از شبکه اصلی جدا گردد یکی از مبدل‌ها به صورت مد کنترل ولتاژ و بقیه مبدل‌ها به صورت مد کنترل توان کار می‌کنند. در حالت کلی اگر چندین مبدل در ریزش‌ها باشد برای تقسیم توان بین آن‌ها می‌توان از روش دروپ استفاده نمود. در کنترل دروپ متداول تغییرات ولتاژ و فرکانس از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند.

$$\omega = \omega_0 - m_d P \quad (1)$$

$$E = E_0 - n_d Q \quad (2)$$

که در رابطه (۱-۲)، ω_0 ، ω ، E_0 ، E به ترتیب عبارت‌اند از اندازه ولتاژ لحظه‌ای، ولتاژ نامی خروجی مبدل، فرکانس لحظه‌ای و فرکانس نامی خروجی مبدل شبکه است. ضرایب m_d و n_d ضرایب دروپ فرکانس و ولتاژ می‌باشند که این ثابت‌های دروپ با توجه به ظرفیت نامی منابع تولید پراکنده بر اساس روابط (۳-۴) به دست می‌آیند.

$$m_d = \frac{\Delta \omega_{\max}}{P_{\max}} \quad (3)$$

$$n_d = \frac{\Delta E_{\max}}{Q_{\max}} \quad (4)$$

که در رابطه (۳-۴) $\Delta \omega_{\max}$ ، $\Delta E_{\max}$ ، $P_{\max}$ ، $Q_{\max}$ به ترتیب عبارت‌اند از حداکثر تغییرات فرکانس، ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو هر کدام از منبع تولید پراکنده است. در صورتی که ضرایب دروپ در مد جزیره‌ای افزایش داده شوند، صحت تقسیم توان به قیمت کاهش تنظیم فرکانس و ولتاژ بهبود می‌یابد [۲۲-۲۳]. همچنین ضرایب دروپ بزرگ‌تر بر پایداری سیستم اثر بدی گذاشته و محدودیت‌هایی در مورد عملکرد خوب سیستم و پایداری آن به وجود می‌آورد. به عبارت دیگر بین صحت

روش کنترل جدید برای منبع ذخیره‌ساز انرژی با استفاده از کنترل دروپ فرکانس-ولتاژ و دروپ توان اکتیو و راکتیو ارائه می‌گردد. کنترل ریزش‌ها به علت عدم وجود اینرسی کافی پیچیده می‌گردد. منبع ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند به عنوان یک منبع توان اصلی فرکانس و ولتاژ ریزش‌ها را حفظ نماید. بنابراین در این مرجع با استفاده از ترکیب کنترل دروپ فرکانس-ولتاژ و دروپ توان اکتیو و راکتیو یک روش جدید برای این منبع اصلی توان پیاده‌سازی می‌گردد.

در این مقاله تأثیر حضور مبدل‌های منبع ولتاژ مبتنی بر اینورتر در حضور ژنراتورهای سنکرون به منظور کنترل فرکانس در ریزش‌ها حالت جزیره‌ای بررسی می‌گردد. به طور کلی ریزش‌ها در دو مد اتصال به شبکه اصلی و جدا از شبکه کار می‌کند. فرکانس و ولتاژ ریزش‌ها در حالت اتصال به شبکه اصلی از شبکه اصلی دریافت می‌گردد و منابع تولید پراکنده در مد کنترل توان کار می‌کنند. در حالت جدا از شبکه به صورت جداگانه کنترل می‌گردد. در این حالت ولتاژ و فرکانس ریزش‌ها با طراحی مناسب کنترل‌کننده‌های مناسب بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت کنترل می‌گردند. در این حالت منابع تولید پراکنده در مد کنترل ولتاژ کار می‌کنند [۳۳]. در [۳۴] یک روش کنترلی که از کنترل‌کننده‌های تناسبی رزونانسی با قابلیت ردیابی سیگنال سینوسی و حذف اغتشاشات جهت اتصال اینورترهای متصل به شبکه استفاده می‌گردد، ارائه می‌گردد. به منظور بررسی تأثیر مبدل‌های منبع تولید توان اینورتری توان خروجی ژنراتور سنکرون محدود در نظر گرفته می‌شود. در مدل ارائه‌شده در [۳۵] یک سیستم کنترل سلسله مراتبی ترکیبی برای مبدل‌های تولید توان مبتنی بر اینورتر ارائه می‌گردد که در این مقاله این سیستم کنترلی بهبود یافته این مدل همراه با کنترل‌کننده تطبیقی غیرخطی که نیاز به لینک مخابراتی ندارد، پیاده‌سازی می‌گردد. منابع تولید پراکنده با استفاده از این سیستم کنترل پیشنهادی در کنترل فرکانس ریزش‌ها مشارکت می‌کنند. برای مبدل‌های منبع ولتاژ مبتنی بر اینورتر روش کنترل پیشنهادی با در نظر گرفتن توان خروجی محدود ژنراتور سنکرون دارای مزیت‌های ذیل می‌باشد:

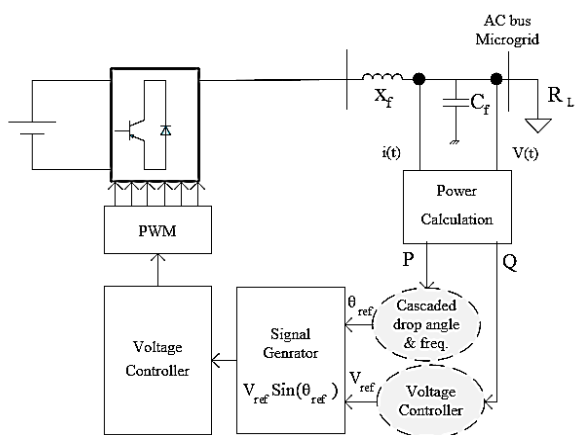
۱- بدون نیاز به تغییر مدهای کنترل‌کننده نیازهای مربوط به مدهای کاری ریزش‌ها را برآورده می‌کند.

۲- ساختار کنترل‌کننده شامل سه حلقه ترکیبی دروپ زاویه-فرکانس و دروپ توان است. هماهنگی و تطبیق موجود بین آن‌ها منجر به بهبود صحت تقسیم توان و عملکرد فرکانس نامی در حالت ماندگار می‌گردد. در مقایسه با روش‌های دروپ فرکانس متداول که انحراف فرکانس حالت ماندگار دارد، این ویژگی یک مزیت چشمگیر تلقی می‌شود.

۳- کنترل‌کننده پیشنهادی عملکرد تقلیدشده‌ای از ماشین سنکرون با مؤلفه‌های توان سنکرون‌کننده و میراکننده قابل کنترل را فراهم می‌کند که درجات آزادی اضافی برای بهبود عملکرد دینامیکی در سیستم‌های متشکل از چندین مبدل و ماشین سنکرون را ایجاد می‌کند.

۳- ساختار کنترل کننده پیشنهادی

به منظور غلبه بر مشکلات ذکر شده در بخش های قبلی، یک ساختار کنترلی جامع که اساس آن از مرجع [۳۵] گرفته شده است، ارائه می گردد. ساختار کنترل پیشنهادی شامل حلقه های کنترل زاویه، فرکانس و توان بوده و به طور هم زمان ولتاژ و فرکانس را کنترل می کند. عمل فرکانس ثابت و تقسیم صحیح توان می تواند توسط دروپ ترکیبی زاویه-فرکانس تحقق یابد. شکل ۲ بلوک دیاگرام سیستم کنترل و مدیریت توان پیشنهادی را برای یک واحد تولید پراکنده مبتنی بر VSC را نشان می دهد.



شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل پیشنهادی مبتنی بر VSC

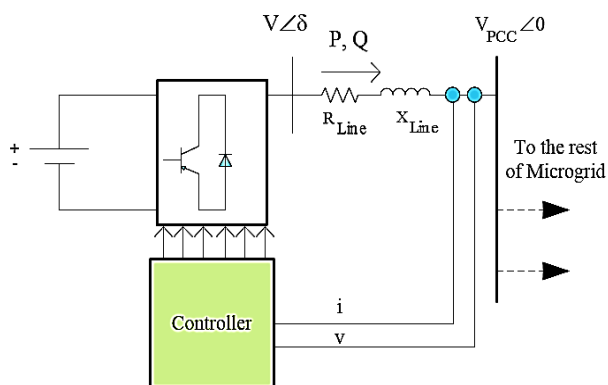
مطابق شکل ۲، جریان و ولتاژ خروجی مبدل ها اندازه گیری می شود و سپس به منظور محاسبه توان اکتیو و راکتیو به بلوک محاسبه کنترل توان فرستاده می شوند. با محاسبه توان اکتیو و راکتیو و ارسال این توان ها به دو بلوک کنترل کننده فرکانس-زاویه و ولتاژ، ولتاژ مرجع مبدل ساخته می گردد. شکل ۳ سیستم کنترل دروپ ترکیبی زاویه-فرکانس پیشنهادی را نشان می دهد. در این سیستم، حلقه کنترل فرکانس از دو حلقه سری زاویه و فرکانس تشکیل شده است و توان مرجع را تعیین می کند. همچنین این سیستم شامل یک حلقه سنکرون کننده توان می باشد که فرکانس خروجی VSC را براساس توان های مرجع و اکتیو تنظیم می کند. این حلقه سنکرون کننده توان اینرسی اضافی را برای فرکانس فراهم می کند و این کار با تقلید از ممان اینرسی ژنراتور سنکرون متداول انجام می شود [۳۶]. حلقه های زاویه و فرکانس مانند میرا کننده هایی برای نوسانات فرکانس و زاویه عمل می کنند و در مرحله بعد توان سنکرون کننده را فراهم می کنند. توان های سنکرون کننده و میرا کننده توسط روابط (۸) و (۹) به دست می آید.

$$\Delta P_{\text{damp}} = -\frac{1}{n} \Delta \omega \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{synch}} = -\frac{1}{m} \Delta \delta \quad (9)$$

تقسیم توان، کیفیت توان، پاسخ گذرا و پایداری سیستم یک مصالحه ذاتی وجود دارد.

به طور کلی تئوری تقسیم توان برای ریز شبکه متشکل از یک منبع تولید پراکنده که در شکل ۱ نشان داده شده است، تشریح می شود. این منبع تولید پراکنده از طریق امپدانس متصل کننده $R_{\text{Line}} + jX_{\text{Line}}$ که متشکل از امپدانس فیلتر، ترانس و خط انتقال است که به باس بار مشترک PCC متصل شده است.



شکل ۱: شماتیک مبدل منبع ولتاژ

توان اکتیو و راکتیو که هر منبع تولید پراکنده به ریز شبکه ارسال می کند توسط روابط (۵) و (۶) بیان می گردد.

$$P = \frac{V}{R^2 + X^2} (XV_{\text{PCC}} \sin(\delta_{\text{DG}}) + R(V - V_{\text{PCC}} \cos(\delta_{\text{DG}}))) \quad (5)$$

$$Q = \frac{V}{R^2 + X^2} (RV_{\text{PCC}} \sin(\delta_{\text{DG}}) + X(V - V_{\text{PCC}} \cos(\delta_{\text{DG}}))) \quad (6)$$

که در رابطه های (۵-۶)، V ، V_{PCC} و δ_{DG} به ترتیب عبارتند از اندازه ولتاژ خروجی مبدل قبل و بعد از خط اتصال دهنده به شبکه و زاویه ولتاژ خروجی مبدل قبل از خط اتصال دهنده به شبکه می باشد. یک راه جایگزین برای تقسیم توان حقیقی ایجاد دروپ زاویه است. زاویه توان مبدل منبع ولتاژ برخلاف ژنراتورهای سنکرون می تواند به طور لحظه ای تغییر کند. در روش دروپ زاویه، افت فرکانس کمتری نسبت به روش دروپ فرکانس وجود دارد. بنابراین استفاده از دروپ زاویه راه دیگری برای تقسیم توان حقیقی است.

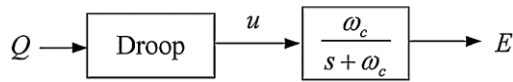
رابطه مورد استفاده در این حالت از معادله (۷) به دست می آید.

$$\delta = \delta_{\text{set}} - dP \quad (7)$$

که در رابطه (۷)، δ_{set} ، δ و d به ترتیب عبارتند از زاویه مرجع، زاویه لحظه ای و ضریب دروپ می باشد، دروپ زاویه یک عملکرد تقریباً فرکانس ثابت را ایجاد می کند و افت فرکانس کمتری نسبت به روش دروپ دارد. اما از ضعف صحت تقسیم توان و حاشیه پایداری کم رنج می برد. به هر حال با افزایش بهره دروپ زاویه-توان، یک واحد تولید پراکنده به راحتی می تواند ناپایدار شود [۱۴، ۱۰].

سیستم کنترل دامنه ولتاژ در شکل ۴ نشان داده شده است که بلوک دروپ رابطه (۱۵) را پیاده سازی می کند. همچنین از یک فیلتر پایین گذر جهت حذف نوسانات ناخواسته و نویز استفاده شده است.

$$u = E_0 - n_q Q \quad (15)$$



شکل ۴: کنترل کننده ولتاژ

در رابطه (۱۵) u و n_q به ترتیب متغیر کنترلی و ضریب دروپ ولتاژ-توان راکتیو می باشند. در نهایت شکل موج سینوسی مرجع که دامنه آن خروجی شکل ۴ و فاز آن خروجی شکل ۳ می باشد، ایجاد می گردد. با استفاده از کنترل کننده های ولتاژ و جریان و دستگاه مختصات dqo جریان لازم به منظور تولید این ولتاژ مرجع ایجاد می گردد. در نهایت ولتاژ ریزشکه با تولید این ولتاژ مرجع ایجاد می گردد.

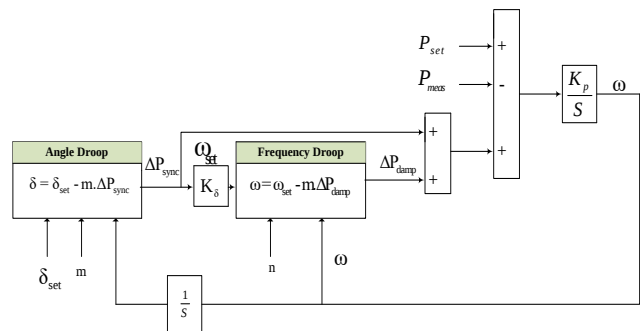
۴- سیستم کنترل پیشنهادی برای ژنراتور سنکرون

همان طور که قبلاً ذکر شد یکی از ویژگی های کنترل کننده پیشنهادی تقلید از رفتار ژنراتور سنکرون است. مطابق با این ویژگی روش کنترل دروپ پیشنهادی می تواند برای ژنراتور سنکرون نیز توسعه داده شود تا علاوه بر تنظیم فرکانس حالت ماندگار، تقسیم صحیح توان نیز تضمین شود. برای این منظور از سیستم کنترل کننده پیشنهادی شکل ۵ استفاده می گردد. شکل ۵ ساختار کنترل دروپ مشارکتی را برای ژنراتور سنکرون نشان می دهد. با توجه به [۳۷]، توان خروجی مبدل به زاویه توان رابطه مستقیم دارد. بنابراین با تغییر این زاویه مرجع از نقطه کار سیستم (در حدود ۴۵ تا ۶۰ درجه بسته به سیستم) می توان توان خروجی را محدود نمود. معادله (۱۶) محدودسازی توان خروجی بر اساس زاویه بار را نشان می دهد.

$$\delta_{new} = \delta_{set} - \theta \quad (16)$$

که در آن θ معادل کسر توان برحسب پریونیت از حد آستانه ماشین می باشد. البته این محدودسازی استاتیک نیست و با تغییر نقطه کار ماشین سنکرون تغییر می یابد اما در هر صورت نسبت به ماکزیمم توان قابل انتقال محدود می گردد. بنابراین با کنترل زاویه توان می توان خروجی ژنراتور سنکرون را محدود نمود که در شکل زیر با کنترل بر روی زاویه توان مرجع این محدودسازی صورت می گیرد.

در شکل ۵، ابتدا تغییرات سرعت با استفاده از اندازه گیری سرعت محور رتور محاسبه می شود و زاویه نیز به واسطه انتگرال گیری از تغییرات سرعت به دست می آید. تا زمانی که دروپ اصلی برای تغییرات بار استفاده می گردد بعد از ثابت نمودن تغییرات زاویه ی بار، تغییرات فرکانس ثابت می گردد و توان اولیه به منظور تولید توان مرجع ژنراتور سنکرون می تواند از طریق دیزل ژنراتور تولید گردد.



شکل ۳: سیستم کنترلی دروپ ترکیبی زاویه-فرکانس پیشنهادی

که همان ΔP_{synch} توان سنکرون کننده سعی در بازگرداندن زاویه به مقدار مرجع آن را داشته در حالی که ΔP_{damp} توان میراکننده سعی در میرا کردن نوسانات فرکانس دارد. در رابطه (۹) ضرایب m و n به ترتیب ضرایب دروپ توان سنکرون کننده-زاویه و دروپ توان میراکننده و سرعت می باشند. در استراتژی جدید میرای اضافی $K_d = -\frac{1}{n}$ وجود دارد که جهت میرا کردن نوسانات زاویه به کار گرفته می شود و در نتیجه کنترل کننده پایداری بهتری را نتیجه می دهد. دینامیک سیستم اضافه شده توسط رابطه (۱۰) تعیین می گردد.

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{K_p}{n}(\omega - \omega_{set}) - \frac{K_p}{m}(\delta - \delta_{set}) - K_p(P - P_{set}) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) K_p همان گین انتگرال گیر بعد از مجموع توان های اکتیو مبدل است. همچنین رابطه بین فرکانس VSC و زاویه بار مطابق رابطه (۱۱) است.

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (11)$$

همان طور که قبل نیز ذکر شد، در حالت جزیره ای از دو حلقه دروپ ترکیبی فرکانس-زاویه سری به منظور تقسیم صحیح توان اکتیو و میرایی نوسانات زاویه و فرکانس استفاده می شود. اولین حلقه دروپ زاویه مقدار فرکانس مرجع را برای حلقه دروپ فرکانس فراهم می کند که از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$\Delta\omega_{set} = K_\delta(\delta_{set} - \delta) \quad (12)$$

که در رابطه فوق $K_\delta = \frac{n}{m}$ براساس این مقدار مرجع حلقه دروپ فرکانس مقدار مرجع توان را تعیین می کند که از معادله (۱۳) به دست می آید.

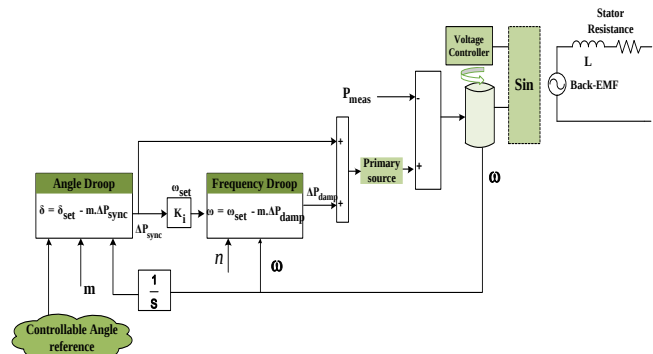
$$\Delta P_{set} = \frac{1}{n}(\Delta\omega_{set} - \Delta\omega) \quad (13)$$

در حالت ماندگار ورودی انتگرال گیر صفر خواهد بود. بنابراین معادله (۱۴) ساختار مورد استفاده جهت کنترل را نشان می دهد.

$$P = P^* - \frac{1}{m}\delta - \frac{1}{n}\omega = P_{set} + \frac{1}{m}\delta_{set} - \frac{1}{m}\delta - \frac{1}{n}\omega \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) P^* ، $\Delta\omega_{set}$ همان توان مرجع و تغییرات فرکانس مرجع برای دروپ فرکانس است.

کنترل‌کننده‌های غیرخطی است. انواع مختلفی از کنترل‌کننده‌های غیرخطی ارائه شده است. امروزه فن گام به عقب، به عنوان یک روش مناسب برای سیستم‌های با ساختار غیرخطی مطرح شده است. در فن گام به عقب که یک روش بازگشتی است، در هر گام با انتخاب مناسب ورودی کنترلی مجازی، به پایداری زیرسیستم‌های آن گام پرداخته می‌شود. این روند تا رسیدن به ورودی کنترلی اصلی و پایداری تمام سیستم انجام می‌شود. یکی از مزیت‌های این فن، قابلیت تخمین اغتشاش و تضمین کران‌داری خطای تخمین است. در این حالت، با انتخاب خطای تخمین به عنوان یک متغیر حالت کمکی، پایداری مجانبی سیستم و پایداری تخمین تضمین می‌گردد. اگرچه روش‌های گام به عقب تطبیقی توانایی کاهش اثر اغتشاش را دارند؛ اما حضور اغتشاش‌های بزرگ موجب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود. بنابراین، لازم است تا کنترل‌کننده تطبیقی به نحوی طراحی شود که تا حد امکان اثر اغتشاش و خطای تخمین بر روی خروجی سیستم را نیز کاهش دهد. در نتیجه ارائه یک روش گام به عقب تطبیقی مقاوم لازم است که ضمن تخمین اغتشاش وارد شده به ریزشبه و استفاده از تخمین به دست آمده در قانون کنترلی، اثر خطای تخمین بر روی خروجی را به مقدار از پیش تعیین شده‌ای کاهش دهد. لازم به ذکر است که خطای تخمین در لحظات اولیه از شروع تخمین، مقدار بزرگی است. این امر می‌تواند موجب ایجاد نوسانات زیاد در لحظات اولیه از پاسخ حلقه بسته سیستم گردد. در نتیجه، مهم‌ترین ویژگی کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم پیشنهادی، افزایش سرعت همگرایی و زمان نشست سیستم و کاهش نوسانات و فرا جهش‌ها و به طور کلی، بهبود عملکرد حالت گذرای سیستم است. طراحی کنترل‌کننده استفاده شده در این مقاله با استفاده از روش لیاپانوف اثبات می‌گردد. معادله (۱۸) مدل‌سازی دینامیکی کل سیستم در حالت غیرخطی را نشان می‌دهد. مدل VSC شکل ۱ را در نظر بگیرید:



شکل ۵: ساختار کنترل دروپ مشارکتی برای ژنراتور سنکرون

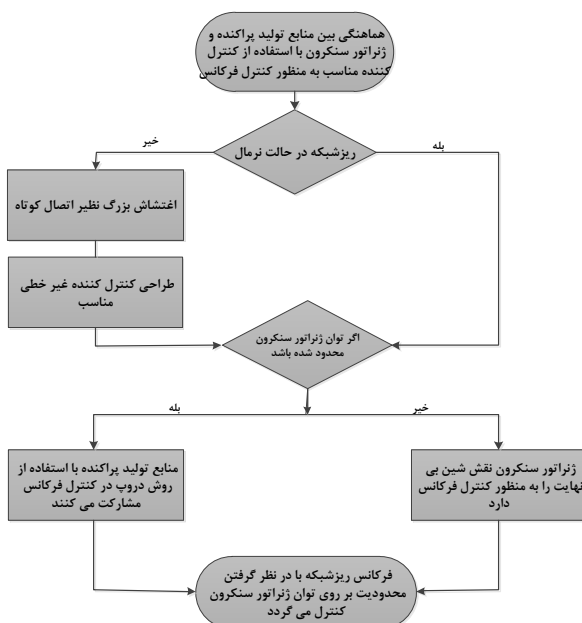
$$P_{\text{prime}} = f(\Delta\delta, \Delta\omega, P^*) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) مشاهده می‌گردد که توان ورودی ژنراتور سنکرون تابعی خطی از تغییرات زاویه، فرکانس و مرجع بار می‌باشد که طبق از رابطه (۱۴) به دست می‌آید. در ریزشبه‌هایی که دارای ژنراتور سنکرون می‌باشند به دلیل این که ژنراتور سنکرون دارای اینرسی قابل توجه می‌باشند، بنابراین کنترل فرکانس به طور عمده توسط ژنراتور سنکرون صورت می‌گیرد. در ریزشبه‌ای که دارای ژنراتور سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ می‌باشند توان این مبدل‌ها در مقایسه با توان تولید ژنراتور سنکرون ناچیز بوده بنابراین کنترل فرکانس بیش‌تر توسط ژنراتور سنکرون صورت می‌گیرد. همان‌طور که در الگوریتم شکل ۶ مشخص است، با محدود کردن توان خروجی ژنراتور سنکرون مبدل‌های منبع ولتاژ براساس سیستم کنترل پیشنهادی با افزایش توان خود به منظور جبران کمبود توان مصرفی به مشارکت در کنترل فرکانس می‌پردازند. کمبود توان ناشی از محدود کردن توان ژنراتور سنکرون توسط منابع اینورتری جبران می‌گردد و فرکانس ریزشبه را در محدوده مشخص کنترل می‌شود.

۵- بررسی مدل ارائه شده با در نظر گرفتن کنترل کننده غیر خطی

در این مقاله هدف اصلی بهبود روش ترکیب دروپ فرکانس و زاویه مربوط به [۳۵] به منظور کنترل بهتر فرکانس می‌باشد. از آنجایی که در روش پیشنهادی خطی حلقه قفل زاویه را حذف می‌گردد که این مهم‌ترین مزیت نسبت به کارهای گذشته می‌باشد. به دلیل خاصیت غیرخطی بودن سیستم قدرت می‌توان در کنترل‌کننده پیشنهادی از روش‌های کنترلی غیرخطی استفاده نمود. در این قسمت از کنترل‌کننده غیرخطی جهت بهبود عملکرد سیستم در اغتشاشات بزرگ استفاده می‌گردد.

به طور کلی کنترل‌کننده‌های خطی با توجه به اینکه در محدوده محلی نزدیک به نقطه کار سیستم مؤثر هستند، بنابراین وجود اغتشاش‌های با دامنه و یا انرژی زیاد در سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده‌های خطی منجر به کاهش کارایی سیستم و حتی ناپایداری می‌گردد. یکی از راه‌کارهای مقابله با اثر اغتشاش‌های بزرگ، به کارگیری



شکل ۶: الگوریتم کنترل فرکانس ریزشبه در حضور ژنراتور سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (28)$$

مشتق زمانی تابع لیپانوف (۲۸)، برابر است با:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2 \quad (29)$$

با جای گذاری (۲۳) درون (۲۹) داریم:

$$\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 + e_2(e_1 + \dot{e}_2) \quad (1)$$

طبق رابطه (۱۹) و (۲۷)، دینامیک $\dot{e}_2$ برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_{2ref} \\ &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_{3ref} + a_3e_3 - \dot{x}_{2ref} \end{aligned} \quad (31)$$

با جایگذاری (۳۱) در (۱) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_1e_1^2 + e_2(e_1 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_{3ref} \\ &\quad + a_3e_3 - \dot{x}_{2ref}) \end{aligned} \quad (32)$$

حال با انتخاب مقدار x_{3ref} به صورت زیر:

$$\begin{aligned} x_{3ref} &= \frac{1}{a_3}(-k_2e_2 - e_1 - a_1x_1 - a_2x_2 \\ &\quad + \dot{x}_{2ref}) \end{aligned} \quad (33)$$

و جایگذاری در (۳۲)، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_2 = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 + a_3e_2e_3 \quad (34)$$

در مرحله سوم که آخرین مرحله از الگوریتم گام به عقب است، هدف طراحی قانون کنترلی u_f به نحوی است که پایداری مجانبی e_3 را تضمین کند. علاوه بر این، در دینامیک x_3 ، ترم اغتشاش وجود دارد. در این پروژه، هدف این است که ضمن تخمین، مقدار اغتشاش d ، اثر خطای تخمین در لحظات اولیه و گذرای تخمین d ، بر سیستم بکاهد. بنابراین، لازم است تا قانون کنترل به صورت مقاوم در برابر اثر اغتشاش و تطبیقی برای تخمین d طراحی گردد. ابتدا لم زیر را ارائه می گردد:

لم ۱: معیار کاهش اثر ورودی اغتشاش بر روی متغیر حالت سوم سیستم (۱۸) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sup \frac{\|d - \hat{d}\|_2}{\|e_3\|_2} < \gamma \quad (35)$$

رابطه (۳۵)، برقرار است اگر، نامساوی زیر برقرار گردد:

$$\dot{V}_3 + \frac{1}{\gamma^2}e_3^2 - (d - \hat{d})^2 < 0 \quad (36)$$

به عبارت دیگر، اگر (۳۶) تضمین شود، آنگاه سمت چپ نامساوی (۳۵) و معیار کارایی H_∞ برای یک مقدار از پیش تعریف شده γ کوچک تر خواهد شد. از طرف دیگر، لازم است تا مقدار اغتشاش d به وسیله $\hat{d}$ تقریب زده شود. بنابراین لازم است تا یک دینامیک جدید به متغیرها حالت مسئله اضافه گردد. در این گام، تابع لیپانوف به صورت زیر انتخاب می شود:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{\beta}{2}(d - \hat{d})^2 \quad (37)$$

به جای این که شرایط کافی برای منفی معین شدن تابع لیپانوف را به دست آوریم، مشتق تابع لیپانوف (۳۷) را در لم ۱ و رابطه (۳۶)، جای گذاری می گردد، بنابراین:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 + \frac{1}{\gamma^2}e_3^2 - \beta(d - \hat{d})^2 \\ = \dot{V}_2 + e_3\dot{e}_3 + \beta(d - \hat{d})(\dot{d} - \dot{\hat{d}}) + \frac{1}{\gamma^2}e_3^2 \\ - (d - \hat{d})^2 \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{x}_3 = u_f + E \frac{V_L}{X} x_2 \cos(x_1) - \omega_c x_3 + \theta$$

در رابطه فوق متغیرهای حالت عبارت اند از ω, δ, p می باشد. ضرایب a_1, a_2 و a_3 به ترتیب عبارت اند از $\frac{K_p}{m}, -\frac{K_p}{n}$ و K_p می باشند.

هدف طراحی کنترل کننده گام به عقب تطبیقی مقاوم جهت به حداقل رساندن اثر ناشی از حضور d و حصول ردیابی مناسب با حداقل حالت گذرا، است. برای این کار لازم است دینامیک خطای سیستم بررسی گردد.

گام اول: در گام اول، فرض می شود متغیر حالت x_2 ورودی کنترلی مجازی است، و مقدار مطلوب x_{2ref} آن به نحوی انتخاب می شود که متغیر حالت x_1 به سیگنال مرجع x_{1ref} برسد و دینامیک خطای e_1 را پایدار گردد. با جای گذاری

$$x_2 = x_{2ref} + e_2 \quad (19)$$

در دینامیک خطای

$$\begin{aligned} e_1 = x_1 - x_{1ref} \implies \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref} \implies \dot{e}_1 \\ &= x_2 - \dot{x}_{1ref} \end{aligned} \quad (20)$$

خواهیم داشت:

$$\dot{e}_1 = x_{2ref} - \dot{x}_{1ref} + e_2 \quad (21)$$

تابع لیپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (22)$$

بنابراین،

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1\dot{e}_1 \\ &= e_1(x_{2ref} - \dot{x}_{1ref} + e_2) \end{aligned} \quad (23)$$

با انتخاب قانون کنترلی پایدار ساز

$$x_{2ref} = -k_1e_1 + \dot{x}_{1ref} \quad (24)$$

و جایگذاری در (۲۳)، مشتق زمانی تابع لیپانوف برابر است با:

$$\dot{V}_1 = -k_1e_1^2 + e_1e_2 \quad (25)$$

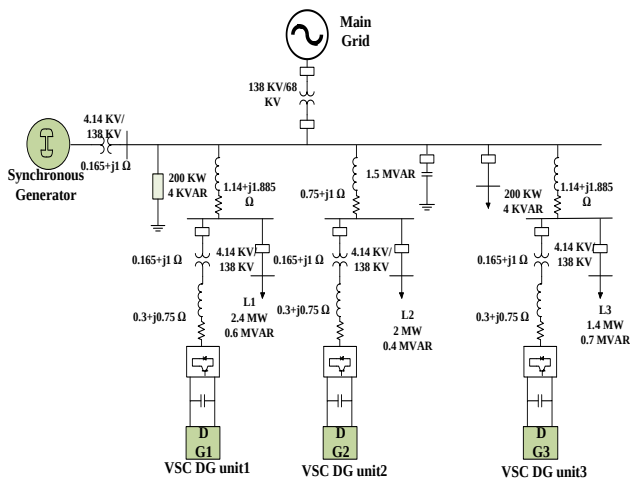
گام دوم: در گام اول x_{2ref} به نحوی به دست می آید که دینامیک e_1 پایدار باشد و خطای e_1 به صفر میل کند. در گام دوم، با انتخاب x_3 به عنوان ورودی کنترلی مجازی، هدف طراحی قانون کنترلی x_{3ref} به نحوی است که دینامیک e_2 به صفر همگرا شود و در واقع متغیر حالت x_2 به مقدار x_{2ref} همگرا گردد. نتیجه این خواهد بود که با همگرایی x_2 به x_{2ref} ، نه تنها پایداری دینامیک e_1 ، بلکه پایداری e_2 نیز تضمین شود. همانند به صورت قبل، خطای e_3 را به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$e_3 = x_3 - x_{3ref} \implies x_3 = x_{3ref} + e_3 \quad (26)$$

مانند گام قبل، با جای گذاری (۲۶) در (۱۸)، دینامیک $\dot{x}_2$ برابر است با:

$$\dot{x}_2 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_{3ref} + a_3e_3 \quad (27)$$

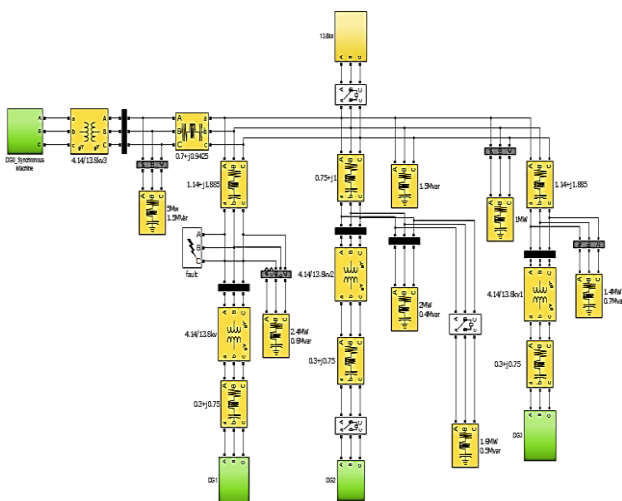
با انتخاب تابع لیپانوف زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۷: شبکه تست مورد مطالعه برای بررسی سه مبدل منبع ولتاژ
جدول شماره ۱: پارامترهای سیستم مورد مطالعه

پارامترها	ژنراتور سنکرون	منبع تولید (۱) پراکنده (۱)	منبع تولید (۲) پراکنده (۲)	منبع تولید (۳) پراکنده (۳)
ولتاژ خط به خط (ولت)	۴۱۴۰	۴۱۴۰	۴۱۴۰	۴۱۴۰
ماکزیمم ولتاژ خط به خط (ولت)	۴۷۶۰	۴۷۶۰	۴۷۶۰	۴۷۶۰
اندوکتانس استاتور	۲ میلی هانری	-	-	-
مقاومت استاتور	۰/۲ اهم	-	-	-
M	1×10^{-6}	1×10^{-7}	83×10^{-6}	125×10^{-6}
N	1×10^{-1}	1×10^{-2}	83×10^{-3}	125×10^{-3}
K_{δ}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
K_p	۱۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱
اینرسی جنبشی رتور	-	-	-	-
فرکانس قطع (هرتز)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
ضریب دروپ ولتاژ	1×10^{-5}	$2/5 \times 10^{-3}$	$2/5 \times 10^{-3}$	$2/5 \times 10^{-3}$

شکل ۸: مدل ریز شبکه مورد مطالعه در نرم افزار سیمولینک متلب را نشان می دهد.



شکل ۸: مدل سیمولینک ریز شبکه مورد مطالعه

اثبات می گردد که با در نظر گرفتن $\hat{d} = \frac{1}{\beta} e_3$ نامساوی رابطه (۳۵) برقرار می گیرد و معیار کارایی نامی H_{∞} به صورت رابطه (۳۹) خواهد بود.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_3 + \frac{1}{\gamma^2} e_3^2 - \beta (d - \hat{d})^2 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \\
 &+ e_3 (d - \hat{d}) - \beta \hat{d} (d - \hat{d}) \\
 &- (d - \hat{d})^2 \\
 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \\
 &- \left(d - \frac{(e_3 + 2\hat{d} - \beta \hat{d})}{2} \right)^2 \quad (39) \\
 &< 0
 \end{aligned}$$

۶- نتایج شبیه سازی

در این قسمت روش پیشنهادی بر روی ریز شبکه مورد مطالعه شکل ۷ بررسی می گردد. ریز شبکه شامل سه مبدل منبع ولتاژ با یک ژنراتور سنکرون که از [۳۴] گرفته شده است، می باشد. شبیه سازی سیستم مورد مطالعه برای تمام سناریوها در مدت زمان ۳/۹ ثانیه اجرا می گردد. با توجه به اینکه ریز شبکه باید بتواند در سناریوهای تعریف شده به طور دقیق کار کند بنابراین حالت های بحرانی محتمل برای یک ریز شبکه در نظر گرفته می شود. این حالت ها عبارت اند از:

- ۱- ایجاد نقطه اتصال کوتاه در شبکه و بررسی وضعیت آن
- ۲- بررسی تأثیر جزیره ای شدن ریز شبکه از شبکه بالادستی
- ۳- بررسی تغییر توان بار مصرفی
- ۴- بررسی تأثیر مدل گاورنر در حالتی که فقط ژنراتور سنکرون و یکی از مبدل های منبع ولتاژ کار کنند.

هریک از سناریوهای ذکر شده، با یا بدون در نظر گرفتن محدودیت توان خروجی ماشین سنکرون در ریز شبکه مورد مطالعه بررسی می گردد. در ضمن به منظور بررسی و صحت روش پیاده شده از سه مدل استفاده می گردد که مدل ۱ همان مدل ارائه شده در مرجع [۳۴]، مدل ۲ همان مدل ارائه شده در این مقاله با کنترل کننده غیر خطی گام به عقب و مدل ۳ نیز مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن کنترل کننده غیر خطی می باشد. در این حالت شبیه سازی سناریوهای حالت جزیره ای و اتصال به شبکه بالادستی برای این ریز شبکه در مدت ۶ ثانیه بررسی می گردد. پارامترهای این سیستم در جدول ۱ داده شده است. در جدول ۱، ضریب K_p برای منابع مبدل ولتاژ تعریف شده است در صورتی که همین ضریب برای مدل تقلیدی ژنراتور سنکرون نقش همان اینرسی ژنراتور را دارد. با توجه به این جدول نیز مشاهده می گردد که اینرسی جنبشی رتور تنها برای ژنراتور سنکرون تعریف شده است به دلیل آن که تنها ژنراتور سنکرون دارای اینرسی می باشد و منابع مبدل ولتاژ فاقد اینرسی می باشند.

۱-۶- تأثیر اتصال کوتاه

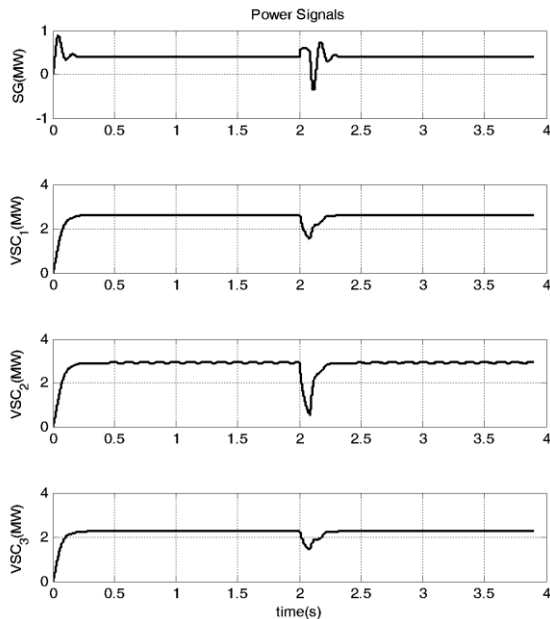
در این بخش یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن در نقطه متناظر با باس متصل به منبع تولید پراکنده مبدل منبع ولتاژ دوم خطای سه فاز متقارن ایجاد می‌گردد. در این سناریو سیستم کنترل به‌خوبی فرکانس ریز شبکه را در حالت بدون و با محدودیت توان ژنراتور سنکرون کنترل می‌کند. شبیه‌سازی مربوط به این دو حالت در ادامه بررسی می‌گردد.

۱-۶-۱- ریز شبکه با سه مبدل منبع ولتاژ و بدون محدودیت

ماشین سنکرون

در این حالت در شبکه نشان داده‌شده در شکل ۷ ریز شبکه به‌صورت جدا از شبکه اصلی کار می‌کند و در نقطه متناظر با باس متصل به منبع تولید پراکنده مبدل منبع ولتاژ دوم خطای سه فاز متقارن در لحظه ۲ ثانیه ایجاد می‌گردد و ماشین سنکرون به‌صورت بدون محدودیت در مدار قرار می‌گیرد. نمودار وضعیت فرکانس ریز شبکه و توان تولیدی مبدل منبع ولتاژ و ژنراتور سنکرون در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده‌است.

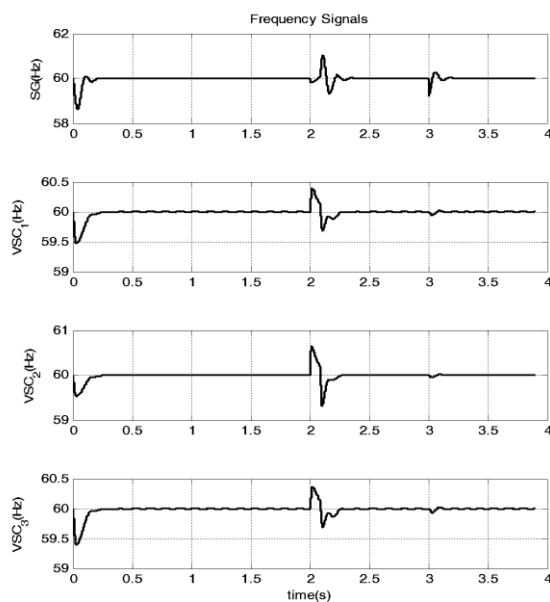
همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است در لحظه وقوع خطا در لحظه ۲ ثانیه فرکانس و توان دچار اغتشاش می‌گردند که بعد از رفع خطا این اغتشاشات و نوسانات در زمان کمتر از ۰/۱ ثانیه برطرف می‌گردد. خطای به‌وجود آمده به‌دلیل نزدیک‌بودن به باس متناظر با مبدل منبع ولتاژ دوم دارای تأثیر بیشتر بر فرکانس و توان محلی این منبع دارد. با توجه به این‌که در لحظه وقوع خطا توان‌های اکتیو منابع به شدت دچار تغییر می‌گردند، در این زمان کنترل‌کننده با عملکرد صحیح و مناسب تغییرات توان را کنترل نمود و با توجه به کنترل مناسب تغییرات توان، فرکانس را نیز بعد از تغییرات شدیدی در این لحظه به مقدار نامی خود بر می‌گرداند.



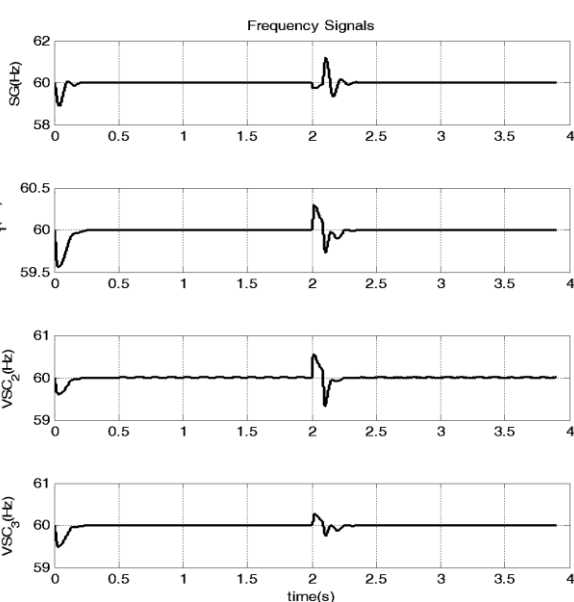
شکل ۱۰: نمودار وضعیت توان برای ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به ازای خطای در لحظه ۲ ثانیه

۱-۶-۲- ریز شبکه با سه مبدل منبع ولتاژ و با محدودیت ماشین سنکرون

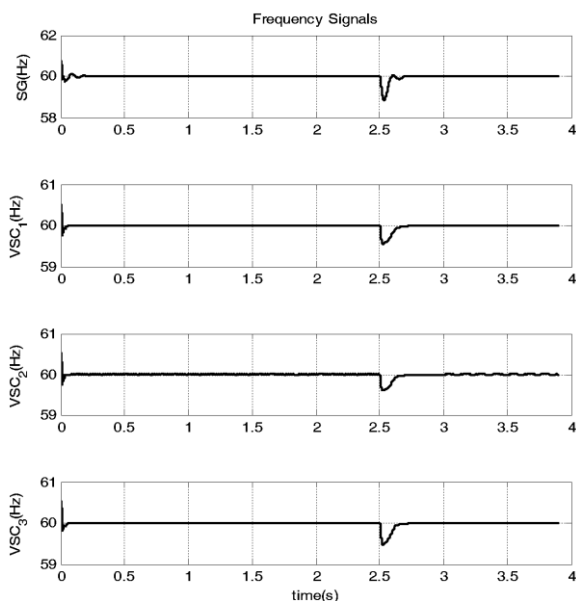
در این حالت با اعمال محدودیت بر روی توان ماشین سنکرون مطالعه تأثیر مبدل‌های منبع ولتاژ در حالت خطای سه فاز متقارن در لحظه ۲ ثانیه بررسی می‌گردد. شکل ۱۱ نمودار وضعیت فرکانس ژنراتور سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ را نشان می‌دهد.



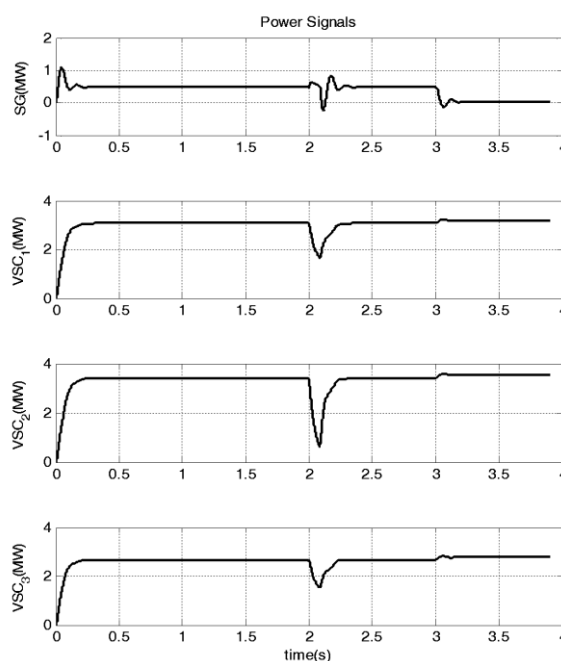
شکل ۱۱: وضعیت فرکانس ماشین سنکرون و مبدل منبع ولتاژ به ازای خطای در لحظه ۲ ثانیه و محدودسازی توان در لحظه ۳ ثانیه



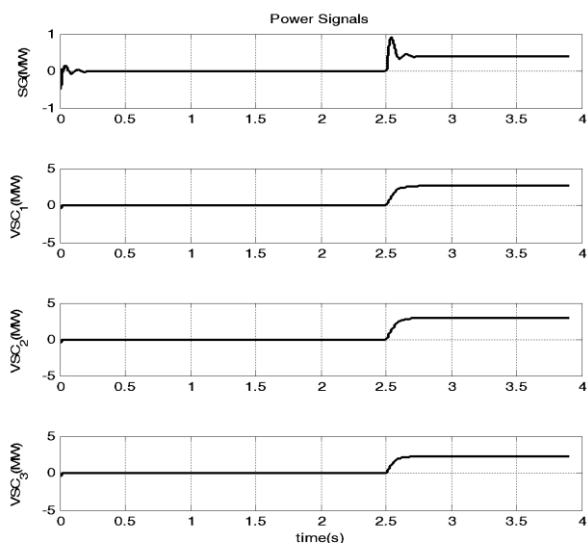
شکل ۹: نمودار وضعیت فرکانس برای ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به ازای خطای در زمان ۲ ثانیه



شکل ۱۳: نمودار وضعیت فرکانس برای ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به‌ازای جزیره‌سازی در لحظه ۲/۵ ثانیه



شکل ۱۲: وضعیت توان ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به‌ازای خطای در لحظه ۲ ثانیه و محدودسازی توان در لحظه ۳ ثانیه



شکل ۱۴: نمودار وضعیت توان برای ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به‌ازای جزیره‌سازی در لحظه ۲/۵ ثانیه

در هنگام اتصال به شبکه سراسری و با توجه به عدم در نظرگیری اینرسی و مقامت خط برای منبع ولتاژ، مبدل‌های منبع ولتاژ و ماشین سنکرون دخالتی در تأمین توان ریزشکبه و مشارکت در کنترل فرکانس ندارند. در لحظه ۲/۵ ثانیه با وقوع حالت جزیره‌ای، توان مورد نیاز ریزشکبه توسط مجموعه منبع تولید پراکنده‌ها فراهم می‌شود. در این حالت جریان منابع تولید پراکنده در زمانی که ریزشکبه به حالت جزیره‌ای می‌رود، افزایش می‌یابد. شکل ۱۵ جریان سه فاز مبدل منبع ولتاژ ۱ در لحظه‌ای که ریزشکبه به حالت جزیره‌ای می‌رود را نشان می‌دهد.

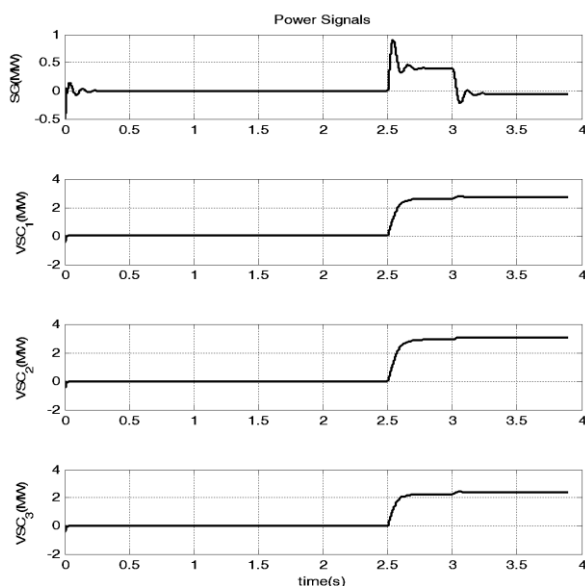
نمودار شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات توان اکتیو منابع تولید توان در لحظه وقوع خطاست که مقدار توان ماشین سنکرون به محدوده ۰ وات کاهش می‌یابد. در این لحظه این اختلاف توان ایجاد شده به وسیله مبدل‌های منبع ولتاژ جبران شده است. این رویداد در ثانیه سوم قابل رؤیت است. طبق تئوری بیان شده مبدل‌های نزدیک‌تر به ناحیه محلی ماشین سنکرون که مسلماً با امپدانس معادل کمتری نیز متصل شده‌اند سهم بیشتری در این جبران سازی و اشتراک در کنترل فرکانس خواهند داشت.

۶-۲- تأثیر جزیره‌ای شدن

در این حالت با در نظر گرفتن مجموعه ماشین سنکرون و مبدل(های) منبع ولتاژ به صورت یک ریزشکبه به بررسی جزیره‌ای شدن و تأثیر آن بر ریزشکبه مفروض از لحاظ پایداری فرکانسی و تقسیم توان پرداخته می‌شود. در ادامه حالت‌های مربوط به محدودیت بر روی ماشین سنکرون و بدون محدودیت نیز بررسی می‌گردد.

۶-۲-۱- شبکه با سه مبدل منبع ولتاژ و بدون محدودیت ماشین سنکرون

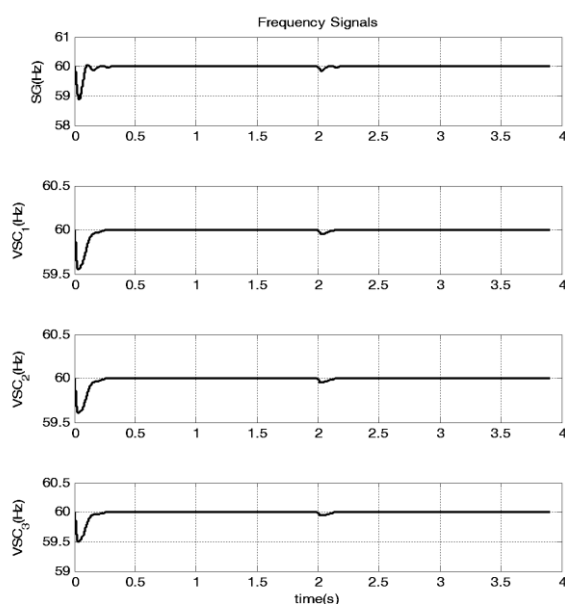
در این حالت جزیره‌سازی تعمداً برای ریزشکبه در لحظه ۲/۵ ثانیه روی داده است. در این حالت محدودیت بر روی توان ماشین سنکرون در نظر گرفته نشده است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییرات فرکانس و توان مبدل‌های منبع ولتاژ و ژنراتور سنکرون را نشان می‌دهند.



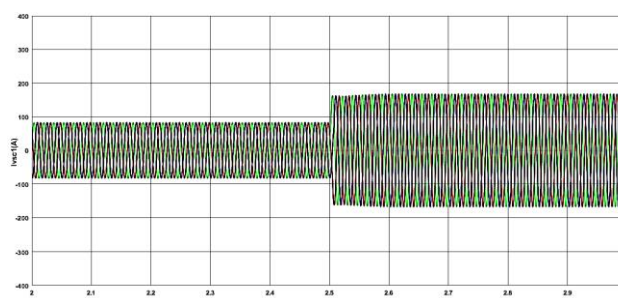
شکل ۱۷: ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به ازای جریزه‌سازی در لحظه ۲/۵ ثانیه و محدودسازی توان ماشین در لحظه ۳ ثانیه

۶-۳-۱- شبکه با سه مبدل منبع ولتاژ و بدون محدودیت ماشین سنکرون

در این حالت طبق شبکه شکل ۱۳ و در باس بار مرتبط با مبدل منبع ولتاژ دوم مقدار بار اضافی به میزان (مگاوار) $0.5 + j1.6$ به شبکه افزوده می‌شود. نتایج مربوط به فرکانس و توان مبدل منبع ولتاژها و ژنراتور سنکرون به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ آمده‌است.



شکل ۱۸: نمودار وضعیت فرکانس ریزش شبکه به هنگام افزودن بار در لحظه ۲ ثانیه



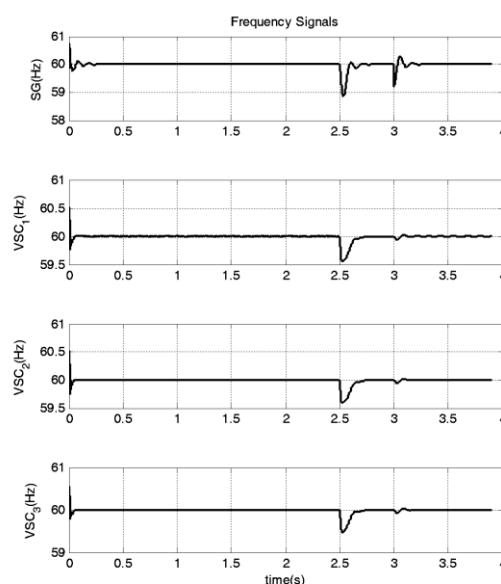
شکل ۱۵: جریان سه فاز مبدل منبع ولتاژ ۱ در زمان جریزه‌سازی لحظه ۲/۵ ثانیه

۶-۲-۲- شبکه با سه مبدل منبع ولتاژ و همراه با محدودیت ماشین سنکرون

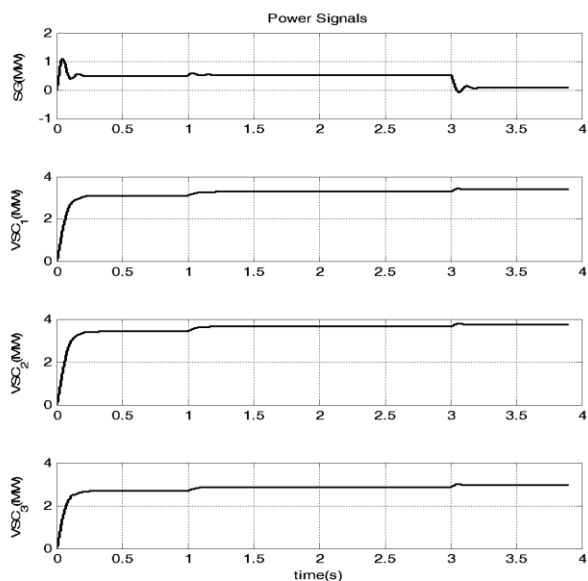
در این حالت در ۲/۵ ثانیه جریزه‌سازی تعمیدی اتفاق می‌افتد. سپس در لحظه ۳ ثانیه محدودیت بر روی توان ماشین سنکرون اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای فرکانس و توان مبدل‌های منبع ولتاژ به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آمده‌است. در هنگام وقوع محدودیت بر روی ماشین سنکرون در لحظه ۳ ثانیه میزان توان مبدل افزایش یافته و فرکانس ریزش شبکه را به مقدار نامی خود برمی‌گردانند.

۶-۳-۳- تغییر بار مصرفی

در این حالت ریزش شبکه در حالت جریزه‌ای کار می‌کند و بار اضافی به صورت لحظه‌ای در مدار قرار می‌گیرد. در لحظه ورود بار به شبکه افت لحظه‌ای فرکانس اتفاق می‌افتد که با مشارکت منابع تولید پراکنده این افت فرکانسی برطرف می‌گردد.

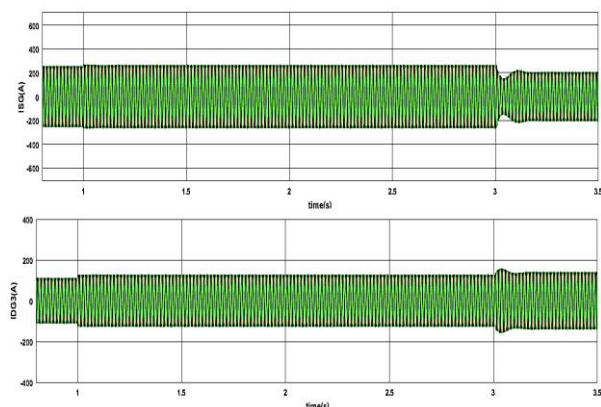


شکل ۱۶: نمودار وضعیت فرکانس برای ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به ازای جریزه‌سازی در لحظه ۲/۵ ثانیه و محدودسازی توان ماشین در لحظه ۳ ثانیه



شکل ۲۱: نمودار وضعیت توان برای مجموعه ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به‌هنگام افزایش بار در لحظه ۱ ثانیه و اعمال محدودیت توان خروجی ماشین در لحظه ۳ ثانیه

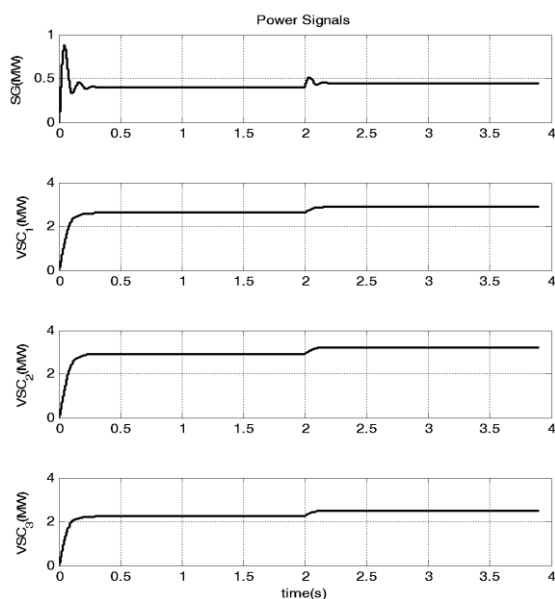
شکل ۲۲ جریان سه فاز ژنراتور سنکرون و مبدل منبع ولتاژ ۳ در لحظه‌ی افزایش بار و محدودسازی توان ژنراتور را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲۲ در زمان یک ثانیه، با افزایش بار جریان ژنراتور سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ جهت تأمین بار مصرفی زیاد می‌گردد. مطابق شکل ۲۲ در زمان ۳ ثانیه، با کاهش جریان خروجی ژنراتور جریان خروجی سایر مبدل‌ها افزایش می‌یابد به‌طوری‌که بار مصرفی تأمین گردد و فرکانس ریزشبه کنترل گردد.



شکل ۲۲: جریان سه فاز ژنراتور سنکرون و مبدل منبع ولتاژ ۳ به‌هنگام افزایش بار در لحظه ۱ ثانیه و اعمال محدودیت توان خروجی ماشین در لحظه ۳ ثانیه

۴-۶- تأثیر حضور مدل گاورنر

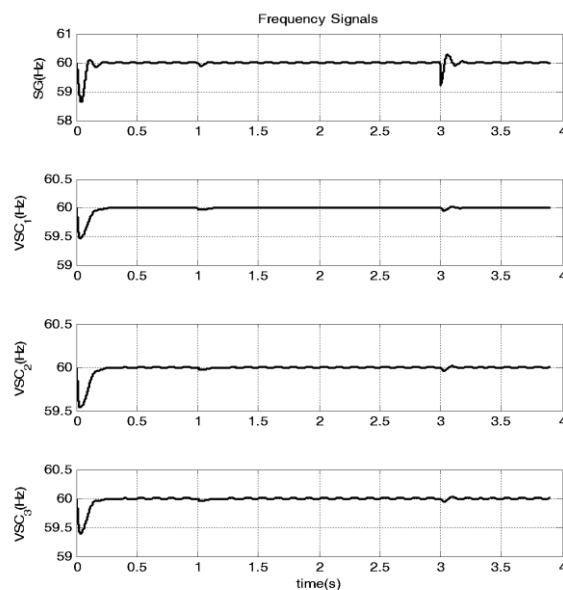
در این وضعیت دو مبدل منبع ولتاژ که در شکل ۷ وجود دارند، کار نمی‌کنند. در این حالت یک ژنراتور سنکرون و یک مبدل منبع ولتاژ



شکل ۱۹: نمودار وضعیت توان برای مجموعه ماشین سنکرون و مبدل‌های منبع ولتاژ به‌هنگام افزودن بار در لحظه ۲ ثانیه

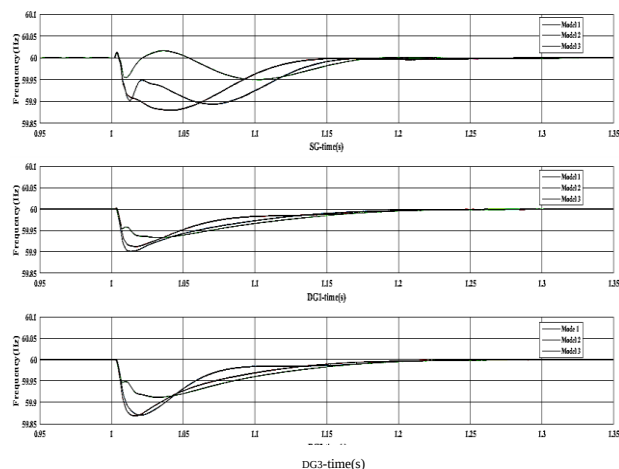
۶-۳-۲- ریزشبه با سه مبدل منبع ولتاژ و با محدودیت ماشین سنکرون

در این حالت محدودیت بر روی توان خروجی ماشین سنکرون اعمال شده و نتایج تغییرات فرکانس و توان خروجی منابع تولید توان در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده می‌شود. در هنگام وقوع محدودیت بر روی ماشین سنکرون میزان توان مبدل‌ها افزایش یافته و مبدل‌ها در کنترل فرکانس ریزشبه مشارکت می‌کنند.



شکل ۲۰: نمودار وضعیت فرکانس برای ریزشبه به‌هنگام افزایش بار در لحظه ۱ ثانیه و اعمال محدودیت توان خروجی برای ماشین سنکرون

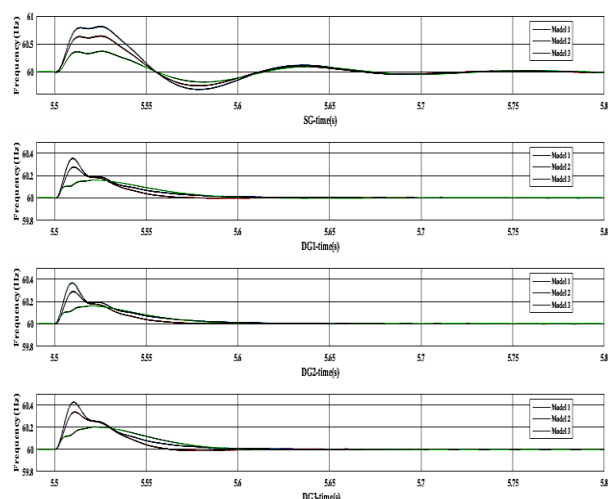
را نشان می‌دهد. پاسخ زمانی مدل ۲ نسبت به دو مدل ۱ و ۳، دارای پاسخی سریع‌تر با نوسانات کمتر و میرایی سریع‌تر می‌باشد.



شکل ۲۵: شکل موج فرکانس ژنراتور سنکرون و منابع تولید پراکنده مدل‌های ۱، ۲ و ۳ زمانی که ریزش شبکه از شبکه اصلی در زمان یک ثانیه جدا می‌گردد

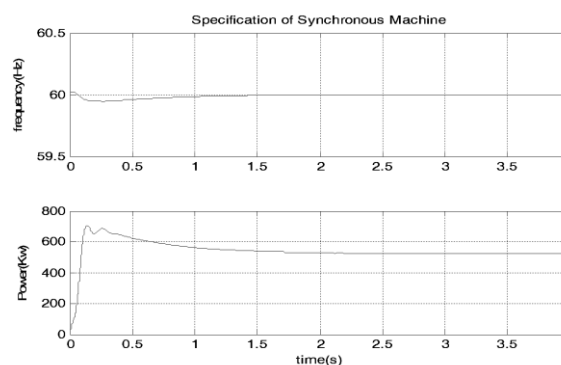
۶-۵-۲- اتصال به شبکه اصلی

در این حالت مبدل منبع ولتاژ ۱، ۲ و ۳ با ژنراتور سنکرون به عنوان منابع تولید توان می‌باشند. در لحظه ۵/۵ ثانیه ریزش شبکه به شبکه اصلی متصل می‌گردد. در این حالت به علت این که توان تزریقی به ریزش شبکه زیاد می‌گردد، بنابراین فرکانس ریزش شبکه افزایش می‌یابد. شکل ۲۶ تغییرات فرکانس مربوط به سه مدل را نشان می‌دهد. پاسخ زمانی مدل ۲ نسبت به دو مدل ۱ و ۳، دارای پاسخی سریع‌تر با نوسانات کمتر و میرایی سریع‌تر می‌باشد.

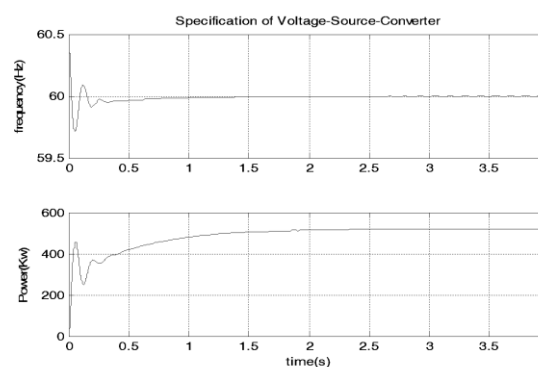


شکل ۲۶: شکل موج فرکانس ژنراتور سنکرون و منابع تولید پراکنده مدل‌های ۱، ۲ و ۳ زمانی که ریزش شبکه از شبکه اصلی در زمان ۵/۵ ثانیه جدا می‌گردد

بارهای ریزش شبکه را تغذیه می‌کنند. در مورد بلوک گاورنر که مدل‌سازی شده مخرج این تابع تبدیل مربوط به مدل مرتبه اول و صفر صورت مربوط به خاصیت تأخیر این بلوک است که به صورت پیش فاز به سیستم وارد می‌شود. مطابق با اشکال ۲۳ و ۲۴، با توجه به تغییرات اعمالی در ریزش شبکه توان و فرکانس با تأخیری که به واسطه مدل‌سازی سیستم گاورنر است به مقدار نامی خود می‌رسند. همان‌طور که از شبیه‌سازی مشخص است، بلوک مدل گاورنر فقط تأخیر در پاسخ ایجاد می‌کند.



شکل ۲۳: نمودار وضعیت فرکانس و توان برای ماشین سنکرون



شکل ۲۴: نمودار وضعیت فرکانس و توان برای مبدل

۶-۵-۵- بررسی مدل ارائه شده با در نظر گرفتن کنترل کننده غیر خطی

در این حالت شبیه‌سازی مربوط به سه مدل در دو سناریو اتصال به شبکه اصلی و جدا از آن بررسی می‌گردد.

۶-۵-۱- جدا از شبکه

در این حالت مبدل منبع ولتاژ ۱ و ۳ با ژنراتور سنکرون به عنوان منابع تولید توان می‌باشند. در لحظه یک ثانیه ریزش شبکه از شبکه اصلی جدا می‌گردد به علت این که توان تزریقی به ریزش شبکه کاهش می‌یابد، بنابراین فرکانس ریزش شبکه می‌افتد. شکل ۲۵ تغییرات فرکانس مربوط به سه مدل

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش کنترل جدیدی به منظور بررسی نقش مشارکتی مبدل منبع ولتاژ با ماشین سنکرون در کنترل فرکانس ریزش شبکه مورد بررسی قرار گرفت. ساختار کنترل کننده شامل سه حلقه ی ترکیبی دروپ زاویه-فرکانس و دروپ توان همراه با کنترل کننده کمکی غیرخطی می باشد. هماهنگی بین کنترل کننده ها منجر به بهبود صحت تقسیم توان و عملکرد فرکانس نامی در حالت ماندگار می گردد. در این مقاله همچنین تأثیر مشارکت مبدل های منبع ولتاژ با ژنراتور سنکرون توان محدود بررسی گردید. در این حالت با کاهش توان خروجی ژنراتور سنکرون، مبدل ها توان خروجی خود بر اساس روش پیشنهادی را در جهت تثبیت پایداری فرکانس افزایش می دهند. برای کنترل سیستم در حالت اغتشاشات بزرگ، یک کنترل کننده غیرخطی تطبیقی مقاوم ارائه گردید که در حالت اغتشاشات بزرگ به دینامیک سیستم کمک می کند. این مسئله با مطرح کردن سه مدل بیان شده در نتایج شبیه سازی به وضوح مشاهده گردید. نهایتاً فرکانس ریزش شبکه با استفاده از روش کنترل پیشنهادی در حالت های با و بدون در نظر گرفتن محدودیت توان خروجی ماشین سنکرون، به طور دقیق کنترل گردید.

مراجع

- [13] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziairion, "Centralized control for optimizing microgrid operation," IEEE Transactions on Energy Convers., vol. 23, no. 1, pp. 241–248, Mar. 2008.
- [14] R. Majumder, "Power sharing and control in distributed generation with wireless sensor network," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 618–634, Jun. 2012.
- [15] I. Chung et al., "Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system," IEEE Transactions on Ind. Appl., pp. 1078–1088, May/Jun. 2010.
- [16] J.-F. Chen and C.-L. Chu, "Combination voltage controlled and current controlled PWM inverters for UPS parallel operation," IEEE Transactions on Power Elect., vol. 10, no. 5, pp. 547–558, Sep. 1995.
- [17] S. Ahn et al., "Power-sharing method of multiple distributed generators considering modes and configurations of a microgrid," IEEE Transactions on Power Del., vol. 25, no. 3, pp. 2007–2016, Jul. 2010.
- [18] K. D. Brabandes et al., "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," IEEE Transactions on Power Elect., vol. 22, no. 4, pp. 1107–1114, Jul. 2007.
- [19] J. Guerrero, J. C. Vasquez, and L. G. D. Vicuna, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization," IEEE Transactions on Ind. Elect., vol. 58, no. 1, pp. 158–166, Jan. 2011.
- [20] E. Baklund et al., "Energy management in autonomous microgrids using stability-constrained droop control of inverter," IEEE Transactions on Power Elect., vol. 23, no. 5, pp. 2346–2351, Sep. 2008.
- [21] R. Majumder et al., "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop," IEEE Transactions on Power Syst., vol. 25, no. 2, pp. 796–808, May 2010.
- [22] J. Kim et al., "Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible microgrid," IEEE Transactions on Power Elect., vol. 26, no. 3, pp. 698–701, Mar. 2011.
- [23] Mahdi Ashabani; Yasser A. -R. I. Mohamed; Mojtaba Mirsalim; Mohammad Aghashabani "Multivariable Droop Control of Synchronous Current Converters in Weak Grids/Microgrids With Decoupled dq-Axes Currents," IEEE Transactions on Smart Grid., vol. 6, no. 4, pp. 1610–1620, Feb. 2015.
- [24] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Angle droop versus frequency droop in a voltage source converter based autonomous microgrid," in Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- [25] R. Majumder et al., "Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation," IEEE Transactions on Power Del., vol. 25, no. 4, pp. 2768–2778, Oct. 2010.
- [۲۶] سیدعباس صارمی حصاری؛ محسن حمزه؛ احمد سالم نیا «بهبود عملکرد دینامیکی و استاتیکی سیستم تقسیم توان در ریزش شبکه ها در حالت جزیره ای» «مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، ۱۳۹۵.
- [27] Dan Wu; Fen Tang; Dragicevic, T.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. "Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, Issue: 4, pp. 882–889, 2014.
- [28] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F. Lee, "Future electronic power distribution systems a contemplative view," in Proc. Int. Opt. Elect. Electron. Equipment Conf., pp. 1369–1380, 2010.
- [29] J. Schonberger, R. Duke, and S. D. Round, "DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid," IEEE Transactions on Ind. Electron., vol. 53, no. 5, pp. 1453–1460, Oct. 2006.
- [30] D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragicevic, and F. Tang, "Coordinated power control strategy based on primary-frequency-signaling for islanded microgrids," IEEE Energy Convers. Congress Expo, pp. 1033–1038, 2013.
- [31] T. John, S. P. Lam, "Voltage and frequency control during microgrid islanding in a multi-area multi-microgrid system" IET
- [1] P. Kundur. "Power System Stability and Control" McGraw-Hill, New York, 1994
- [2] N. Hatziairgiyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul./Aug. 2007.
- [3] F. Katiraei and M. R. Iravani, "Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units," IEEE Transactions on Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1821–1831, Nov. 2006.
- [4] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547-2003.
- [5] IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected With Electric Power Systems, IEEE 1547.3-2007, 2007.
- [6] J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero, and M. Liserre, "Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter," IEEE Transactions on Ind. Elect., vol. 56, no. 11, pp. 4510–4519, Nov. 2009.
- [7] E. Santacana, G. Rackliffe, L. Tang, and X. Feng, "Getting smart," IEEE Power Energy Mag., vol. 8, no. 2, pp. 41–48, Mar./Apr. 2010.
- [8] C. Yuen, A. Oudalov, and A. Timbus, "The provision of frequency control reserves from multiple microgrids," IEEE Transactions on Ind. Elect., vol. 58, no. 1, pp. 173–183, Jan. 2011
- [9] Yuan and Y. Zhang, "Status and opportunities of photovoltaic inverters in grid-tied and micro-grid systems," in Proc. IEEE 5th Int. Power Electronics and Motion Control Conf., IPEMC 2006.
- [10] Y. A.-R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids," IEEE Transactions on Power Elect., vol. 23, no. 26, pp. 2806–2816, Nov. 2008.
- [11] A. Guerrero et al., "Distributed generation," IEEE Ind. Elect. Mag., pp. 52–64, Mar. 2010.
- [12] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Oceda, "Control of distributed uninterruptable power supplies," IEEE Transactions on Ind. Elect., vol. 50, no. 8, pp. 2845–2859, Aug. 2008.

- [۳۴] رحمت الله هوشمند، حسین محکمی، امین خدابخشیان «کنترل اینورترهای متصل به شبکه در حضور سلف غیرخطی در فیلتر LCL خروجی» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، ۱۳۹۴
- [35] S. M. Ashabaniand, Y. A. I. Mohamed, "General Interface for Power Management of Micro-Grids Using Nonlinear Cooperative Droop Control," IEEE Trans. power systems, vol. 28, No. 3, August 2013.
- [36] Q. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," IEEE Transactions on Ind. Elect., vol. 58, no. 4, pp. 1259–1267, Apr. 2011.
- [37] P. Kundur. "Power System Stability and Control" McGraw-Hill, New York, 1994.
- Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, No. 6, 1502 - 1512 May 2017.
- [32] X. Tang, X. Hu, N. Li, W. Deng, G. Zhang "A Novel Frequency and Voltage Control Method for Islanded Microgrid Based on Multienergy Storages" IEEE Transactions on smart grid, vol. 7, No. 1, 410 – 419, May 2017
- [33] I. J. Balaguer Q. Lei, S. Yang, U. Supatti, F. Zheng "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation," IEEE Transactions on Industrial Electronics Society, vol. 58, No. 1, 145 – 157, May 2010