

کنترل سلسله‌مراتبی جدید ریزشبکه‌های دارای منابع پراکنده با واسط VSI

محسن فضل‌ی، مریم السادات اخوان حجازی، گئورگ قره پتیان، حمید رضا بقائی

دانشگاه کاشان، دانشگاه کاشان، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
m.fazli@grad.kashanu.ac.ir, mhejazi@kashanu.ac.ir, grptian@aut.ac.ir, hrbaghaee@aut.ac.ir

چکیده

کنترل ریزشبکه‌های دارای منابع پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع و مناطق دور افتاده از اهمیت بالایی در شبکه‌های هوشمند انرژی برخوردار است. کنترل غیرمتمرکز ریزشبکه‌های دارای منابع پراکنده با واسط VSI که در تحقیقات قبلی ارائه شده است دارای نواقص و کمبودهایی چون عدم تحلیل اغتشاشات سیگنال بزرگ و صرفاً تحلیل برخی اتفاقات سیگنال کوچک می‌باشد. در این مقاله طرح کنترل سلسله‌مراتبی ریز شبکه‌ها که در کارهای قبلی بیشتر به سطح اولیه و ثانویه آن پرداخته شده است به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که هر سه سطح کنترل سلسله‌مراتبی برای هر دو حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه و عملکرد متصل به شبکه ارائه می‌گردد. این کنترلر این خاصیت را دارد که یک حلقه‌ی کنترلی جدید به حلقه‌های کنترل داخلی آن اضافه شده است. مزیت این حلقه‌ی کنترلی جدید این است که علاوه بر رخدادهای سیگنال کوچک بلکه در مقابل اغتشاشات سیگنال بزرگ نیز پایداری ریزشبکه را حفظ نموده و توزیع توان به بارها و شبکه را با عملکرد مطلوبی اجرا می‌نماید. در ادامه یک ریز شبکه شامل چهار واحد تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، با بار محلی و با حضور شبکه‌ی توزیع اصلی در نرم افزار **SIMULINK/MATLAB** طراحی و شبیه‌سازی می‌شود و صحت عملکرد مطلوب کنترلر سلسله‌مراتبی مشاهده می‌گردد.

کلید واژه

انرژی‌های تجدیدپذیر - اینورتر منبع ولتاژ (VSI) - تولید پراکنده - ریزشبکه - کنترل اکتیو - کنترل سلسله‌مراتبی.

1- مقدمه

تولید منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از این منابع در تولیدات پراکنده مورد توجه زیادی قرار گرفته است، که به تنهایی و یا بصورت یک شبکه کوچک الکتریکی می‌توانند انرژی برق نواحی روستایی، دور افتاده، مناطق حساس و با امنیت بالا و ... را تامین نمایند. مدیریت سمت تقاضا می‌تواند با استفاده از سیستم‌های تولید و ذخیره انرژی محلی، مبتنی بر شبکه‌های کوچک و ریزشبکه‌ها متقاعد گردد. ریزشبکه، یک شبکه‌ی توزیع الکتریکی در مقیاس کوچک و سطح ولتاژ فشار ضعیف (LV) می‌باشد که بایستی به طور محلی توانایی حل مسایل انرژی و همینطور افزایش انعطاف پذیری را داشته باشد.

افزایش روز افزون مصرف سوخت‌های فسیلی و روند رو به کاهش این منابع، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را تبدیل به راهکاری الزامی کرده است. از طرفی محدودیت‌های اجرای خطوط انتقال برای نواحی دور افتاده و مشکلات اقتصادی و محیطی تولید در مقیاس بزرگ، زمینه ساز تجدید ساختار در شبکه برق شده است. تولید پراکنده (DG) نقش مهمی را برای ایجاد یک شبکه برق تجدید ساختار یافته ایفا می‌نماید. در مفهوم کلی تولید پراکنده به تولید در مقیاس کوچک و در نزدیکی محل مصرف گفته می‌شود. از این رو با توجه به کوچک بودن بودن ظرفیت

ما میتوانیم شبکه‌ی توزیع آینده را به عنوان تعدادی ریزشبکه که به صورت داخلی به یکدیگر متصل شده‌اند تصور نماییم، که در آن هر کاربر مسئول قسمت ذخیره‌سازی و تولید انرژی مصرفی، و انرژی که با همسایگان به اشتراک می‌گذارد، می‌باشد [1].

الکترونیک قدرت نقش مهمی را جهت دستیابی به این تحول تکنولوژی ایفا می‌نماید. در واقع تجهیزات الکترونیک قدرت به عنوان واسط بین منابع پراکنده و ریزشبکه‌ها استفاده می‌شوند و تجهیزات الکترونیک قدرتی که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند اینورترهای منبع ولتاژ یا VSIها هستند.

کنترل VSIهای موازی‌شده در یک ریزشبکه، کاری هست که در سال‌های گذشته اقدامات متعددی روی آن انجام شده است. اساس کار کنترل این ریزشبکه‌ها بر مبنای کنترل افقی می‌باشد. کنترل افقی برگرفته از شبکه‌های قدرت سنتی با ژنراتورهای سنکرون می‌باشد که هرگونه تغییر در توان اکتیو موجب تغییر در فرکانس شده و تغییرات توان راکتیو، تغییرات دامنه‌ی ولتاژ را در پی دارد. در منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پیل سوختی، پنل‌های خورشیدی، میکروتوربین و ... که به وسیله مبدل به شبکه متصل میشوند بطور طبیعی فرکانس خروجی مستقل از توان خروجی است [2].

در این وضعیت VSIها به دو روش متمرکز و غیرمتمرکز می‌توانند کنترل بشوند. کنترل متمرکز بر پایه لینک‌های ارتباطی مشابه روش پایه-پیرو (Master-Slave) است. در [3] یک استراتژی پایه-پیرو ارائه شده که در آن واحد DG غالب که دارای ظرفیت توان بالاتری است، وظیفه‌ی کنترل ولتاژ ریزشبکه را دارد. در روش کنترل غیرمتمرکز هر واحد با کنترل‌کننده‌ی محلی خودش کنترل می‌شود که البته از اغتشاشات کل سیستم آگاه نیست و مستقل از سایر کنترل‌کننده‌ها عمل می‌کند. این روش بر پایه کنترل افقی فرکانس می‌باشد [4]. اگرچه روش افقی، فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ ثابت را تضمین نمی‌کند ولی مزیت اجتناب از کنترل بر پایه ارتباطات مخابراتی، آن را تبدیل به یک راه حل رقابتی برای کنترل ریزشبکه نموده است. مصالحه‌ی بین کنترل متمرکز و غیرمتمرکز، طرح کنترل سلسله مراتبی

است. در مفهوم سیستم‌های قدرت، کنترل سلسله مراتبی شامل سه سطح کنترلی است: اولیه، ثانویه و ثالثیه [1].

در زمینه‌ی کنترل غیرمتمرکز ریزشبکه‌ها کارهای زیادی جهت توزیع توان اکتیو و راکتیو با کنترل کردن دو کمیت مستقل فرکانس سیستم و دامنه‌ی ولتاژ پایه انجام شده است [1 و 2][4-7]. در این مقاله‌ها، از مشخصه‌های افقی فرکانس برای توزیع توان اکتیو استفاده شده است. به دنبال همین موضوع برخی مقالات مشابه [8] از رابطه‌ی زاویه‌ی قدرت با توان اکتیو جهت توزیع توان استفاده نموده‌اند. کنترل زاویه این مزیت را دارد که در طول بهره‌برداری جزیره‌ای، توزیع توان می‌تواند بدون تغییری در فرکانس سیستم انجام بشود. این سطح کنترلی همان سطح کنترل اولیه می‌باشد.

یکی از معایب روش‌های کنترل بر پایه‌ی افت این است که در مد جزیره‌ای، ولتاژ و فرکانس ریزشبکه با تغییر در بار، تغییر می‌کنند. پس به دنبال تغییری در بار، یک مکانیزم برای بازیابی فرکانس و ولتاژ سیستم به مقادیر نامی، می‌بایست وجود داشته باشد [6] و [9]. پیرو اصطلاح استفاده شده در کنترل سیستم قدرت الکتریکی، این مکانیزم بازیابی به عنوان کنترل ثانویه‌ی ولتاژ و فرکانس نامیده شده و روی یک مقیاس زمانی بزرگتر واقع می‌شود. و همینطور در ادامه برای بهبود قابلیت اطمینان و عملکرد VSIهایی که با کنترلر افقی کنترل می‌شوند، حلقه‌های کنترل امپدانس مجازی ارائه شدند [9-11].

موضوع مهمی که در تمامی کارهای قبلی مشاهده می‌شود بررسی ریزشبکه در شرایط نرمال و یا وقوع رخداد‌های سیگنال کوچک می‌باشد و درخصوص کنترلی که هنگام وقوع پیشامدهای سیگنال بزرگ نیز به خوبی عمل نموده و با حفظ پایداری سیستم، توزیع توان مطلوب را تضمین نماید، راه کاری ارائه نشده است.

در یک ریزشبکه‌ی واقع شده در یک منطقه روستایی و یا دور افتاده که وقوع رخداد‌های سیگنال بزرگ به مانند اتصال کوتاه، صاعقه، از دست رفتن خطوط بین واحدهای DG و ... موجب خاموشی و پیامد‌های منفی می‌گردد، ارائه کنترلی که در مقابل این حوادث، بهره‌برداری ریزشبکه و تامین توان سمت تقاضا را تضمین نماید از اهمیت ویژه

دارد. مشخصه‌های معروف کنترل افقی نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند [4]:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega^* - G_P(s) \cdot (P - P^*) \\ E &= E^* - G_Q(s) \cdot (Q - Q^*) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن ω و E فرکانس و دامنه‌ی مرجع ولتاژ خروجی، و ω^* و E^* مرجع‌های آنها می‌باشند. P و Q توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی بوده، P^* و Q^* مرجع‌های آنها هستند. $G_P(s)$ و $G_Q(s)$ تابع تبدیل‌های افقی می‌باشند که می‌توان آنها را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$G_P(s) = k_{pP} + \frac{k_{iP}}{s} \quad (2)$$

$$G_Q(s) = k_{pQ} \quad (3)$$

که k_{iP} و k_{pQ} ضرایب افقی استاتیکی هستند و k_{pP} می‌تواند بعنوان اینرسی مجازی سیستم در نظر گرفته شود، و نیز به عنوان یک ترم افقی گذرا شناخته می‌شود. مقدار این ضرایب استاتیکی بدین صورت انتخاب می‌گردند: k_{iP} برابر با ماکزیمم انحراف فرکانس، تقسیم بر توان اکتیو نامی است، و k_{pQ} مساوی بیشترین انحراف دامنه‌ی ولتاژ، تقسیم بر توان راکتیو نامی می‌باشد [6].

همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، با استفاده از تبدیل کلارک و انتقال مقادیر سه فاز به مختصات $\alpha\beta$ ، مقادیر توان لحظه‌ای به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$p = v_{ca} \cdot i_{\alpha} + v_{cb} \cdot i_{\beta} \quad (4)$$

$$q = v_{cb} \cdot i_{\alpha} - v_{ca} \cdot i_{\beta}$$

که در رابطه فوق $v_{ca\beta}$ و $i_{\alpha\beta}$ به ترتیب ولتاژ خازن و جریان خروجی در مختصات $\alpha\beta$ می‌باشند. سپس با عبور از یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ω_c مقادیر توان اکتیو و راکتیو P و Q بدست می‌آیند [2]:

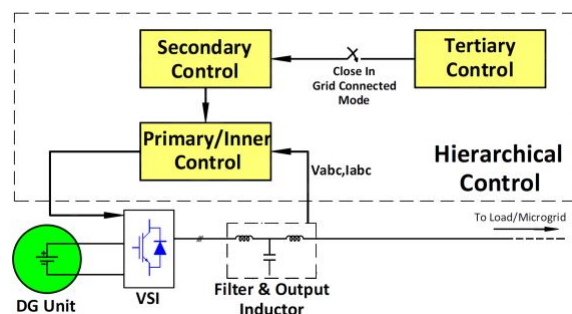
$$(P, Q) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot (p, q) \quad (5)$$

سطح کنترل اولیه همچنین می‌تواند شامل حلقه‌ی امپدانس مجازی نیز باشد که به مقدار ولتاژ مرجع v_{ref} اضافه می‌گردد و به صورت معمول رفتار سلفی در فرکانس خط را تضمین می‌نماید (شکل 2). اگرچه امپدانس سری یک

ای برخوردار است. که در این مقاله با ارائه یک کنترلر جدید اضافه شده در حلقه‌های کنترل داخلی، این مشکل مرتفع گردیده و در هنگام وقوع اغتشاشات سیگنال بزرگ ریزش‌بکه پایداری خود را حفظ نموده و به توزیع توان سیستم ادامه می‌دهد. در ادامه بخش‌های بعدی این مقاله بدین صورت طبقه‌بندی شده‌اند: 2- ساختار کنترل سلسله‌مراتبی 3- حلقه‌های کنترل داخلی/کنترل اولیه 4- کنترل ثانویه 5- کنترل ثالثیه 6- شبیه‌سازی ریزش‌بکه و کنترل سلسله‌مراتبی 7- نتیجه‌گیری.

2- ساختار کنترل سلسله‌مراتبی

همانطور که اشاره شد ساختار کلی کنترل سلسله‌مراتبی ریزش‌بکه متشکل از سه سطح کنترلی اولیه، ثانویه و ثالثیه می‌باشد. کنترل اولیه، با حلقه‌های کنترل داخلی VSI و تنظیم نقاط اولیه توزیع توان، سر و کار دارد. در کنترل ثانویه، انحرافات فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ بازبایی می‌گردد. سومین کنترل، توزیع توان بین شبکه و ریزش‌بکه را در نقطه اتصال (PCC)، تنظیم می‌نماید (شکل 1).



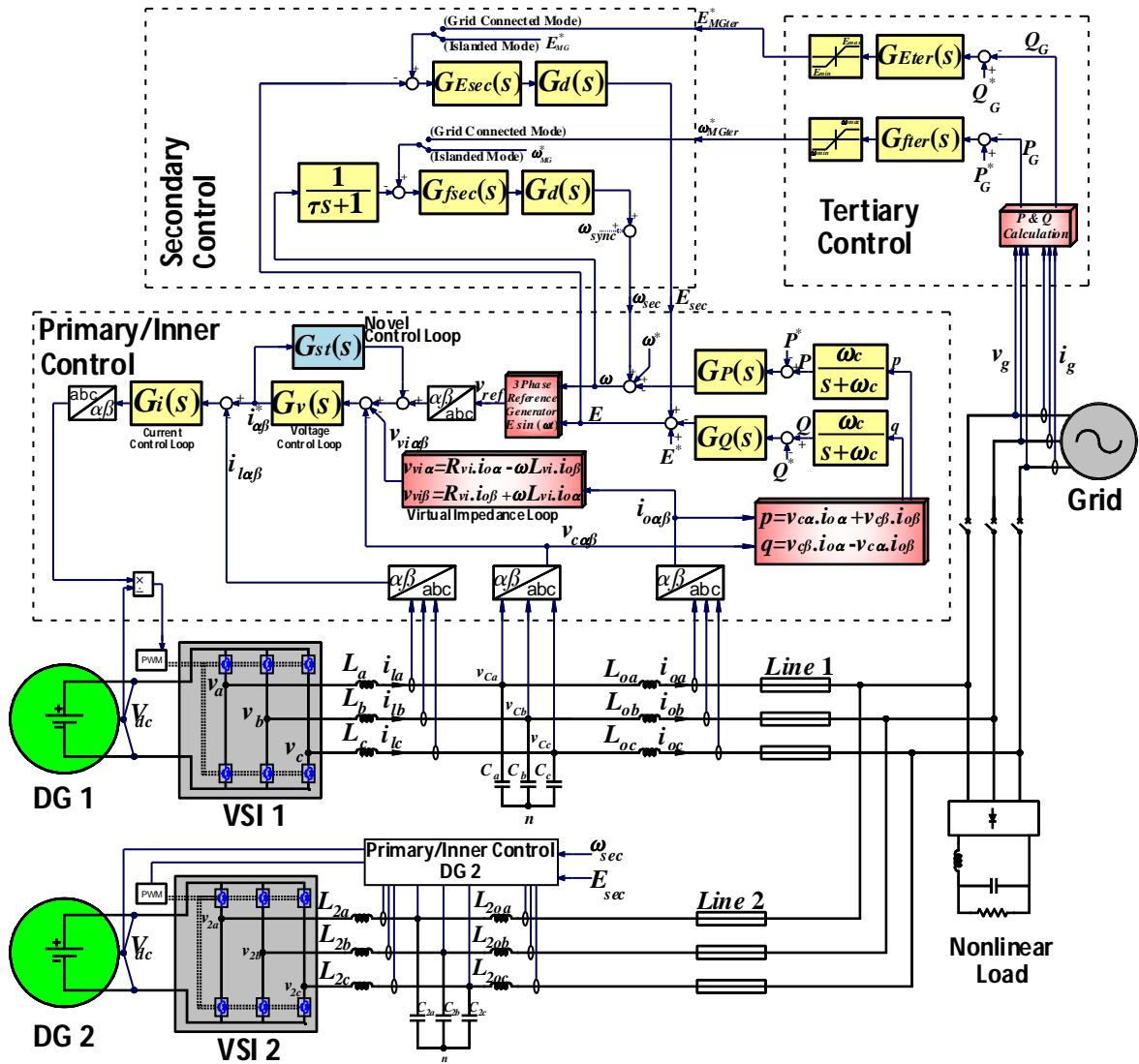
شکل 1- نمای کلی کنترل سلسله‌مراتبی

3- حلقه‌های کنترل داخلی/کنترل اولیه

شکل 2، یک ریزش‌بکه‌ی نمونه شامل دو واحد DG مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر با ولتاژ تولیدی DC را نشان می‌دهد که به واسطه‌ی VSI یک بار غیرخطی را تغذیه می‌نمایند. که این ریزش‌بکه می‌تواند در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه بهره‌برداری شود.

3-1- کنترل افقی:

کنترل ارائه شده برای VSI‌های موازی شده در ریزش‌بکه در اولین سطح کنترل، بر پایه کنترل افقی می‌باشد که مسئولیت تنظیم فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ مرجع v_{ref} را مطابق با میزان توزیع توان‌های اکتیو و راکتیو (P و Q)



شکل 2- بلوک دیاگرام کنترل سلسله مراتبی ریز شبکه با دو DG و یک بار

کنترل جریان، و یک حلقه کنترلی جدید اضافی می باشند. حلقه های کنترلی ولتاژ و جریان ارائه شده شامل ترمهای تناسبی/ارزونانسی (PR) هستند که در فرکانس پایه و هارمونیک های 5، 7 و 11 تنظیم می گردند. با توجه به لزوم دفع کردن هارمونیک های ولتاژ ناشی از بارهای غیرخطی، نه تنها حلقه کنترلی جریان بلکه حلقه کنترلی ولتاژ نیز در دنبال کردن هارمونیک های جریان جهت تغذیه ی بارهای غیرخطی سهیم می باشد. تابع تبدیل های کنترلی ولتاژ و $G_i(s)$ و کنترلی جریان $G_v(s)$ به صورت زیر مدل می شوند:

$$G_v(s) = k_{pV} + \sum_{h=1,5,7,11} \frac{k_{rhV} s}{s^2 + (\omega_o h)^2} \quad (7)$$

ژنراتور به طور غالب سلفی است، ولی مقدار امپدانس مجازی می تواند به صورت دلخواه انتخاب گردد. در اینجا مقادیر سلف و مقاومت این امپدانس مجازی به ترتیب L_{vi} و R_{vi} می باشند و داریم [6]:

$$\begin{aligned} v_{vi\alpha} &= R_{vi} \cdot i_{o\alpha} + \omega L_{vi} \cdot i_{o\beta} \\ v_{vi\beta} &= R_{vi} \cdot i_{o\beta} + \omega L_{vi} \cdot i_{o\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

2-3- حلقه های کنترل داخلی

همانطور که مشاهده می شود بعد از هر VSI یک فیلتر LC به همراه یک سلف خروجی لحاظ شده است. حلقه های کنترل داخلی که برای هر VSI در نظر گرفته شده است بر پایه ی قاب مرجع $\alpha\beta$ ، حلقه های کنترلی ولتاژ،

$$E_{rest} = \left(k_{pE} + \frac{k_{iE}}{s} \right) \cdot (E_{MG}^* - E_{MG}) \quad (11)$$

که در روابط فوق، k_{pE} ، k_{iE} ، k_{pF} ، k_{iF} ضرایب کنترلر تناسبی/انتگرالی می‌باشند و E_{rest} و ω_{rest} به ترتیب مقادیر انحراف فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ می‌باشند که میبایست از محدوده مجاز تجاوز نکنند [1].

جهت تحلیل پایداری سیستم و تنظیم پارامترهای کنترل ثانویه فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ یک مدل کنترلی در مرجع [6] ارائه شده است. این مدل کنترلی را می‌توان در دیاگرام شکل 2 مشاهده نمود. تابع تبدیل‌های استفاده شده در این طرح کنترلی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$G_{f \text{ sec}}(s) = k_{pF} + \frac{k_{iF}}{s} \quad (12)$$

$$G_{E \text{ sec}}(s) = k_{pE} + \frac{k_{iE}}{s} \quad (13)$$

$$G_d(s) = \frac{1}{s + 1.5\omega_s} \quad (14)$$

به طوریکه $G_d(s)$ تابع تبدیلی است که تاخیر حاصل از خطوط مخابراتی را مدل می‌نماید.

در کنترل ثانویه‌ی نشان داده شده در شکل 2، یک پارامتر ω_{sync} نیز می‌تواند به فرکانس اضافه شود که مقررات سنکرون سازی فرکانس هنگام اتصال به شبکه را ارضا می‌نماید و به صورت زیر تعریف می‌شود که در حالت سنکرونیزم مقدار $(v_{g\beta}v_{c\alpha} - v_{g\alpha}v_{c\beta})$ صفر می‌شود [6]:

$$\omega_{syn} = (v_{g\beta}v_{c\alpha} - v_{g\alpha}v_{c\beta}) \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right) \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (15)$$

5- کنترل ثالثیه

زمانیکه ریزشبه در حال بهره برداری در مد متصل به شبکه است، توزیع توان میان ریزشبه و شبکه میبایست کنترل بشود. این موضوع می‌تواند در داخل ریزشبه با تنظیم فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ، کنترل بشود. با اندازه‌گیری مقادیر توان اکتیو و راکتیو عبوری از نقطه اتصال ریزشبه و شبکه (PCC) P_G و Q_G ، و مقایسه‌ی آنها با مقادیر

$$G_v(s) = k_{pI} + \sum_{h=1,5,7,11} \frac{k_{rhI}s}{s^2 + (\omega_o h)^2} \quad (8)$$

که در آنها $\omega_o = 2\pi f$ و k_{pI} و k_{pV} به ترتیب ضرایب ترم تناسبی کنترلرهای ولتاژ و جریان بوده، و k_{rhI} و k_{rhV} به ترتیب ضرایب ترم رزونانسی کنترلرهای ولتاژ و جریان در فرکانس پایه به ازای h مساوی 1، و سایر هارمونیک‌ها به ازای h برابر با 5، 7 و 11 می‌باشند [6].

حلقه کنترلی جدید ارائه شده در این مقاله که از حلقه‌ی کنترل ولتاژ فیدبک می‌گیرد شامل یک ترم تناسبی/انتگرالی می‌باشد. در بلوک دیاگرام کنترلی ریزشبه این کنترلر با تابع تبدیل $G_{st}(s)$ نمایش داده شده است و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G_{st}(s) = k_{pst} + \frac{k_{ist}}{s} \quad (9)$$

این کنترلر اثرات تشدید ایجاد شده‌ی ترم‌های رزونانسی کنترلر ولتاژ را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد تا ضمن حفظ تاثیر این ترم‌های رزونانسی بر دنبال نمودن هارمونیک‌ها، حاشیه‌ی پایداری نیز تا حد مطلوبی افزایش یابد. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان خواهد داد که با افزودن این کنترلر، ریزشبه نه تنها در مواجهه با رخداد‌های سیگنال کوچک، بلکه در مقابله با وقوع حوادث سیگنال بزرگ مانند اتصال کوتاه نیز پایداری خود را حفظ نموده و به بهره‌برداری خود ادامه می‌دهد.

4- کنترل ثانویه

به منظور جبران انحرافات فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ، میبایست یک کنترلر ثانویه برای ریزشبه در نظر گرفته شود. کنترلر ثانویه تضمین می‌نماید که بعد از هر تغییر در بار و تولید داخلی ریز شبکه، انحرافات فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ، به سمت صفر میل می‌کنند. جهت جبران انحرافات فرکانس و دامنه‌ی ولتاژ از یک کنترلر تناسبی/انتگرالی استفاده می‌شود و رابطه‌ی کلی کنترلر ثانویه به صورت زیر قابل دستیابی است:

$$\omega_{rest} = \left(k_{pF} + \frac{k_{iF}}{s} \right) \cdot (\omega_{MG}^* - \omega_{MG}) \quad (10)$$

مطلوب آنها یعنی P_G^* و Q_G^* می‌توان آنها را به شرح زیر کنترل نمود [11]:

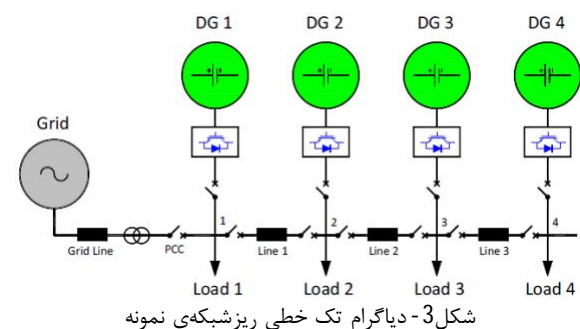
$$\omega_{MGter}^* = \left(k_{pPg} + \frac{k_{iPg}}{s} \right) \cdot (P_G^* - P_G) \quad (16)$$

$$E_{MGter}^* = \left(k_{pQg} + \frac{k_{iQg}}{s} \right) \cdot (Q_G^* - Q_G) \quad (17)$$

بلوک دیاگرام کنترل ثالثیه مطابق با روابط فوق در شکل 2 قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد زمانیکه ریزشبه در مد جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود کنترلر ثالثیه غیر فعال است و مقادیر مرجع فرکانس و ولتاژ ریزشبه در کنترلر ثانویه متناسب با ریزشبه انتخاب می‌گردند. در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه این مقادیر مرجع، توسط کنترلر ثالثیه تولید می‌شوند.

6- شبیه‌سازی ریزشبه و کنترل سلسله‌مراتبی

در این قسمت یک ریزشبه‌ی نمونه شامل چهار واحد DG در مبنتی بر منابع انرژی تجدیدپذیر که در نقطه‌ی PCC به شبکه‌ی توزیع اصلی متصل هستند در نرم افزار شبیه‌سازی مدل سازی شده است. هر واحد DG دارای یک بار محلی می‌باشد که دیاگرام تک خطی این سیستم را می‌توان در شکل 3 مشاهده نمود. در جدول 1 پارامترهای طراحی و مدلسازی ریزشبه‌ی مورد مطالعه آورده شده است.



6-1- بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای

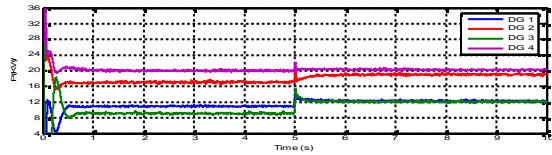
در شکل 4 منحنی توزیع توان در ریزشبه جهت تامین بارهای محلی در مد جزیره‌ای نشان داده شده است. منحنی ولتاژ و فرکانس بهره‌برداری ریزشبه در شکل‌های 5 و 6 نمایش داده شده اند که به صورت مطلوب می‌باشند. در شکل 7 ریزشبه تحت تاثیر افزایش بار پله‌ای قرار گرفته

است. این افزایش بار بدین صورت است که در لحظه‌ی $t=5s$ مقدار 4 کیلووات به باس DG1 و 3 کیلووات به باس DG3 افزوده شده است و مشاهده می‌شود این افزایش بار توسط DGها به خوبی پوشش داده می‌شود. در مطالعه‌ی بعدی یک خطای اتصال کوتاه سه فاز متقان که اغتشاش بسیار سنگینی به حساب می‌آید، در وسط خط بین باس DG1 و DG2، در لحظه‌ی $t=4s$ اتفاق می‌افتد و بعد از شش سیکل بر طرف می‌گردد (شکل 8 تا 11). دیده می‌شود که زمانیکه ریزشبه با کنترل سلسله‌مراتبی جدید کنترل می‌شود بعد از پاک شدن خطا، منحنی ولتاژ به حالت پایدار باز می‌گردد و توزیع توان بدون مشکل ادامه پیدا می‌کند. حال آنکه زمانیکه کنترل ریزشبه فاقد حلقه‌ی کنترلی جدید می‌باشد، ولتاژ و پخش بار ریزشبه ناپایدار شده و توزیع توان مطلوب نیست.

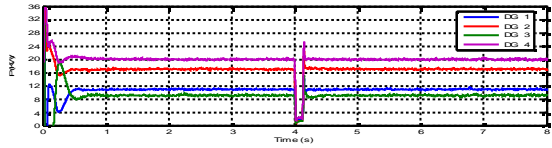
یکی از حوادثی که در شبکه توزیع و در محل مصرف زیاد رخ می‌دهد خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین است. که علاوه بر اغتشاش سنگین نامتعادلی بسیار شدیدی در سیستم ایجاد می‌نماید. لذا مهم است که ریزشبه در مواجهه با این پیشامد عملکرد خوب و مقاومی داشته باشد. در اقدام بعدی شبیه‌سازی ریزشبه، یک خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین در خط بین DG1 و DG2 در لحظه‌ی $t=4s$ رخ می‌دهد و بعد از 5 سیکل بریکر عمل نموده و خط از مدار جدا می‌شود. که می‌توان نتایج آن را در شکل‌های 12 تا 15 مشاهده نمود. با مشاهده‌ی این منحنی‌ها می‌توان به عملکرد مطلوب طرح کنترلی جدید ریزشبه پی برد. بطوریکه بدون این کنترلر جدید ریزشبه در مقابل این اغتشاش سیگنال بزرگ ناپایدار می‌گردد.

6-2- بهره‌برداری در حالت متصل به شبکه

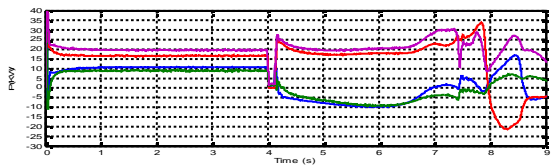
در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه طرح کنترل سلسله‌مراتبی با وجود سطح کنترل ثالثیه کامل می‌شود. شکل 16 توزیع توان میان ریزشبه، بار و شبکه اصلی را نمایش می‌دهد. که ریزشبه ضمن تامین توان بارهای محلی 10 کیلووات نیز به شبکه تزریق می‌نماید. شکل 17 نشان می‌دهد که ولتاژ درون ریزشبه و ولتاژ شبکه‌ی توزیع اصلی در طول این مد بهره‌برداری با یکدیگر سنکرون هستند. در شکل‌های 18 تا 20 خطای تک فاز به زمین که از اهمیت ویژه‌ای در ریزشبه‌ها و شبکه‌ی توزیع برخوردار



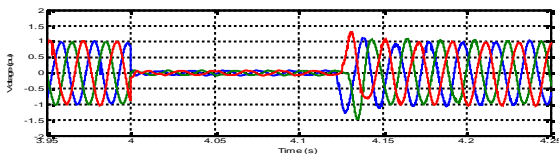
شکل 7- توزیع توان در ریزشبه در حالت جزیره‌ای - در شرایط افزایش بار پله‌ای



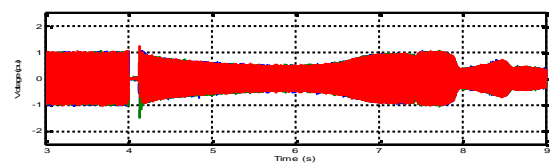
شکل 8- توزیع توان در ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای - در شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن



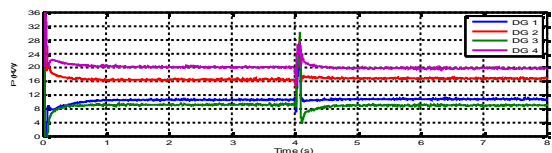
شکل 9- توزیع توان در ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای (بدون حلقه‌ی کنترلی جدید) - در شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن



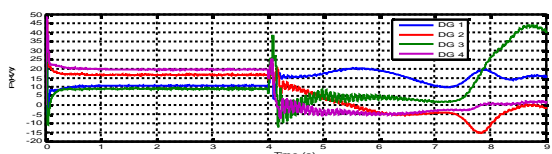
شکل 10- منحنی ولتاژ ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای - در شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن



شکل 11- منحنی ولتاژ ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای (بدون حلقه‌ی کنترلی جدید) - در شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن



شکل 12- توزیع توان در ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین

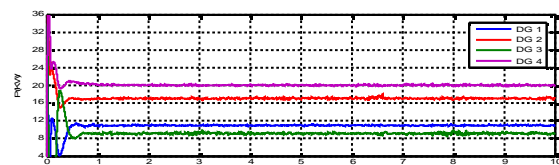


شکل 13- توزیع توان در ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای (بدون حلقه‌ی کنترلی جدید) - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین

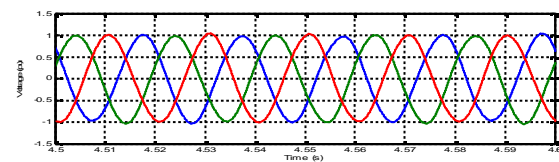
است در این مد عملکرد نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین صورت که یک خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین در خط بین DG2 و DG3 در لحظه $t=4s$ رخ می‌دهد و بعد از 5 سیکل بریکر عمل نموده و خط را از مدار خارج می‌کند. در این وضعیت DG1 و DG2 از شبکه جدا می‌گردند و بار محلی خود را به خوبی تامین می‌نمایند. در شکل 19 شکل موج ولتاژ باس DG1 و در شکل 20 شکل موج ولتاژ نقطه‌ی PCC در لحظه‌ی خطا نشان داده شده است که پس از پاکسازی خطا ولتاژها پایدار شده و توزیع توان در ریزشبه ادامه پیدا می‌کند.

جدول 1- پارامترهای ریزشبه‌ی طراحی شده

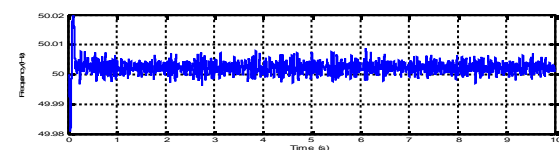
DG 1	14.7kVA	Load 1	11kW+j8.1kVAr
DG 2	23.5kVA	Load 2	17.2kW+j12.6kVAr
DG 3	13.6kVA	Load 3	9kW+j6.5kVAr
DG 4	28.4kVA	Load 4	20kW+j16.1kVAr
System Voltage (L-L), f	415V, 50Hz		
V _{dc}	1500Vdc		
Z _{Line1}	0.3756+j0.1936Ω		
Z _{Line2}	0.1878+j0.0968Ω		
Z _{Line3}	0.1935+j0.1118Ω		
L, C	75.8mH, 50μF		
L ₀₁ , L ₀₂ , L ₀₃ , L ₀₄	10.8, 6.94, 12.96, 5.9mH		
k _{pP1} , k _{iP1}	0.25e-3, 1.25e-6		
k _{pP2} , k _{iP2}	0.161e-3, 0.8036e-6		
k _{pP3} , k _{iP3}	0.3e-6, 1.5e-6		
k _{pP4} , k _{iP4}	0.136e-3, 0.682e-6		
k _{pQ1} , k _{pQ2} , k _{pQ3} , k _{pQ4}	0.725, 0.466, 0.87, 0.395		
R _{vi} , L _{vi}	1 Ω, 4e-4mH		
k _{pV} , k _{r1V} , k _{r5V} , k _{r7V} , k _{r11V}	0.35, 400, 4, 20, 11		
k _{pI} , k _{r1I} , k _{r5I} , k _{r7I} , k _{r11I}	0.7, 100, 30, 30, 30		
k _{pst} , k _{ist}	50, 1.35		
k _{pE} , k _{iE}	0.5e-3, 0.1		
k _{pE} , k _{iE}	0.1e-3, 0.11		
τ	50ms		
k _{pPg} , k _{iPg} , k _{pQg} , k _{iQg}	0.7e-3, 9.8, 0.25e-3, 13		



شکل 4- توزیع توان در ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای



شکل 5- شکل موج ولتاژ ریزشبه در حالت بهره‌برداری ریزشبه

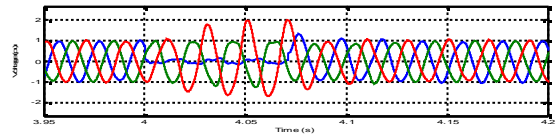


شکل 6- منحنی فرکانس ریزشبه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای

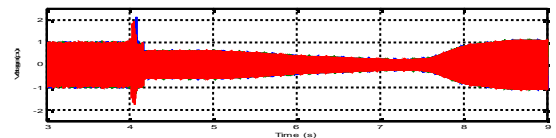
کنترلی جدید در حلقه‌های کنترل داخلی VSI مشکلات و نواقص قبلی کنترل ریزشبهه مانند ناپایداری در مواجهه با رخداد‌های سیگنال بزرگ بر طرف گردید. مشاهده شد که با اضافه شدن این حلقه‌ی کنترلی جدید پایداری سیستم تا حد بسیار زیادی افزایش پیدا کرد به صورتی که ریزشبهه در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه‌ی توزیع اصلی، هم در شرایط اتفاقات سیگنال کوچک نظیر افزایش پله‌ای بار و هم در شرایط اغتشاشات سیگنال بزرگ مانند اتصال کوتاه سه فاز و تک فاز به زمین که در شبکه‌های توزیع محلی پر اتفاق است، پایداری خود را حفظ نموده و توزیع توان به بار و شبکه را به خوبی اجرا می‌نماید.

مراجع

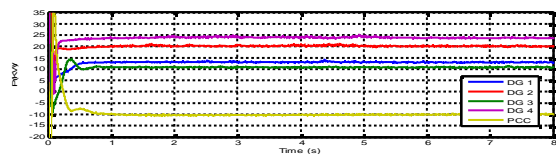
- [1] Guerrero, et al "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control", *IEEE Trans.*, 2013.
- [2] P. Divshali, et al "Decentralized Cooperative Control Strategy of Microsources for Stabilizing Autonomous VSC-Based Microgrids" *IEEE Trans.* Vol. 27, No. 4, N2012.
- [3] J.A. Lopes, et al "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Trans.* 2006, Vol. 21, no. 2, pp. 916–924.
- [4] M. Chandorkar, et al "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 136–143, Jan./Feb. 1993.
- [5] T. C. Green, et al "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans.* vol. 22, no. 2, 2007.
- [6] J.C. Vasquez, et al "Modeling, Analysis, and Design of Stationary-Reference-Frame Droop-Controlled Parallel Three-Phase Voltage Source Inverters" *IEEE Trans*, Vol. 60, No. 4, 2013.
- [7] R. Majumder, et al, "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 796–808, 2010.
- [8] R. Majumder, et al "Angle droop versus frequency droop in a voltage source converter based autonomous microgrid," in *Proc. IEEE PES Gen. Meeting*, 2009, pp. 1–8.
- [9] F. Katiraei et al "Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units," *IEEE Trans.* vol. 21, no. 4, 2006.
- [10] F. Katiraei, et al "Microgrids management," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, 2008.
- [11] J. M. Guerrero, et al "Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—A general approach toward standardization," *IEEE Trans.* vol. 58, 2011.



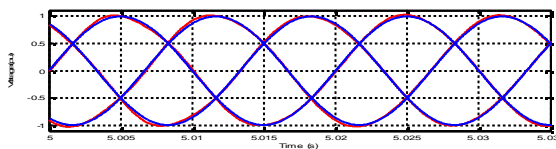
شکل 14- منحنی ولتاژ ریزشبهه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین



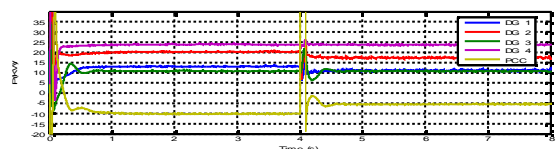
شکل 15- منحنی ولتاژ ریزشبهه در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای (بدون حلقه‌ی کنترلی جدید) - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین



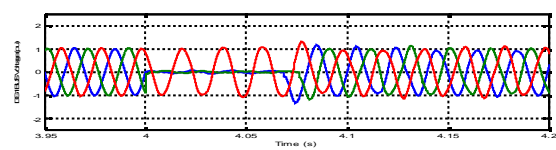
شکل 16- توزیع توان در ریزشبهه در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه



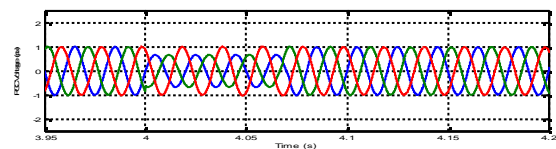
شکل 17- شکل موج ولتاژ ریزشبهه و ولتاژ شبکه



شکل 18- توزیع توان در ریزشبهه در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین



شکل 19- منحنی ولتاژ باس DGI در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین



شکل 20- منحنی ولتاژ نقطه‌ی PCC در حالت بهره‌برداری متصل به شبکه - در شرایط خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین

7- نتیجه گیری

در این مقاله طرح کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبهه مورد بررسی و مدل سازی قرار گرفت و با ارائه‌ی یک حلقه‌ی