Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 4, 2017

Improved Hierarchical Multi-loop Voltage Control based on droop control for Inverter-based DG Units in an Islanded Microgrid

Hadi Hosseini Kordkheili [1], Mahdi Banejad [2], Ali Akbarzadeh Kalat [3]

[1] Faculty of Electrical Engineering and Robotics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

[2] Faculty of Electrical Engineering and Robotics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

[3] Faculty of Electrical Engineering and Robotics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

In this paper, a multi-loop hierarchical controller for a renewable DG based microgrid system is proposed in order to control the voltage of point of common coupling and also to perform accurate active and reactive power sharing. Inner current and voltage loops that are designed based on the dynamic model of microgrid system are used to obtain appropriate switching functions for interfaced inverters and the reference values for currents of DG units. Also, a modified droop controller is introduced to enhance the performance of designed voltage control loop. In order to improve the dynamic operation of the proposed controller in supplying demanded power for harmonically distorted loads, the extraction of harmonic components of PCC voltages is accomplished. Upper and lower limits of voltage amplitude and frequency droops are analyzed using capacity curves of each DG unit. The effect of renewable power generation uncertainty on DC link voltage variations are also compensated using an additional control loop in hierarchical structure. The main contributions of this paper are the above-mentioned multi-objective control system along with a droop control based on capacity curves. The MATLAB/SIMULINK simulation shows a proper steady state and transient performance during changes in generation and nonlinear harmonically distorted loads.

Keywords: Microgrid, Primary Control, Inner control loops, Droop control, Hierarchical control, Capacity curves.

کنترل ولتاژ چندحلقه‌ای سلسله مراتبی بهبودیافته بر اساس کنترل دروپ برای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر در یک ریزشبکهٔ جزیره‌ای

سیدهادی حسینی کردخیلی[۱]، مهدی بانژاد[۲]، علی‌اکبرزاده کلات[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه قدرت، دانشکدهٔ مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران
Hadi.h.k@ieee.org
۲- دانشیار، گروه قدرت، دانشکدهٔ مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران
m.banejad@shahroodut.ac.ir
۳- استادیار، گروه کنترل، دانشکدهٔ مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران
akbarzadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک کنترل‌کننده چندحلقه‌ای سلسله‌مراتبی برای یک ریزشبکه[۱] دارای منابع تولیدپراکنده (DG[۲]) تجدیدپذیر به‌منظور کنترل ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) و تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسب ارائه شده است. از حلقه‌های جریان و ولتاژ براساس مدل دینامیکی ریزشبکه استفاده شده است تا سیگنال‌های کلیدزنی مناسب برای اینورترهای هر DG تولید شود و سیگنال مرجع جریان برای هر DG به وجود آید. همچنین یک کنترل‌کننده دروپ[۳] اصلاح‌شده ارائه شده است تا عملکرد حلقهٔ کنترل ولتاژ را بهبود دهد. برای بهبود عملکرد دینامیکی کنترل‌کنندهٔ ارائه‌شده در هنگام تأمین توان لازم برای بارهای هارمونیکی، مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ PCC جداسازی شده‌اند. همچنین حدود بالا و پایین دروپهای دامنهٔ ولتاژ و فرکانس با استفاده از منحنی‌های ظرفیت هر DG تحلیل شده‌اند. تأثیر عدم‌قطعیت تولید توان در مولدهای تجدیدپذیر بر تغییرات ولتاژ لینک DC نیز با افزودن یک حلقه کنترل اضافی در ساختار سلسله مراتبی جبران شده است. ارائهٔ ساختار کنترلی چندهدفه یادشده در کنار کنترل دروپ مبتنی بر منحنی‌های ظرفیت، از نوآوری‌های اصلی این مقاله به شمار می‌روند. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK نشان می‌دهند روش ارائه‌شده عملکرد مناسبی را در حالت‌های ماندگار و گذرا در هنگام تغییر ناگهانی در تولید توان و یا میزان بار هارمونیکی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، کنترل اولیه، حلقه‌های کنترل داخلی، کنترل دروپ، کنترل سلسله مراتبی، منحنی‌های ظرفیت

۱- مقدمه

پدیدهٔ منابع انرژی تجدیدپذیر و استفاده از آنها در شبکه‌های توزیع به ایجاد رویکردها و ساختارهای جدیدی منجر شده است. در این میان ریزشبکه‌ها مجموعه‌ای از بارها و منابع مقیاس کوچک تجدیدپذیر مطرح شده‌اند. قابلیت مهم این ساختار جدید، امکان بهره‌برداری به‌صورت سیستم کنترل‌پذیر مستقل و مجزا از شبکه اصلی است [۱] که با توسعهٔ استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت امکان‌پذیر شده است.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران بسیاری چالش‌های کنترل یک ریزشبکه مانند تثبیت دامنهٔ ولتاژ و فرکانس، کیفیت توان و هارمونیک‌ها، استراتژی‌های تقسیم توان و غیره و درنهایت، استفاده از روش‌های کنترلی مختلف برای هر چالش را بررسی کرده‌اند. در این میان، مفهوم کنترل سلسله مراتبی، یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین رویکردها در کنترل ریزشبکه‌ها، معرفی و استفاده شده است.

[۱] تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶
نام نویسندهٔ مسئول: مهدی بانژاد
نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران – شاهرود – دانشگاه صنعتی شاهرود – دانشکدهٔ مهندسی برق و رباتیک – کدپستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱

کنترل سلسله مراتبی یک ریزشبکه، چهار سطح کنترلی را شامل می‌شود و هر سطح با انجام فرآیند کنترلی خاص خود، سیگنال مرجع را برای سطح کنترل پایین‌تر تولید می‌کند. این سطوح سلسله مراتبی عبارت‌اند از: کنترل سطح صفر (حلقه‌های کنترل داخلی)، کنترل اولیه، کنترل ثانویه و کنترل ثالثیه [۱، ۲]. حلقه‌های کنترل سطح صفر و کنترل اولیه کنترل‌کننده‌های محلی به شمار می‌روند که برای هر DG در نظر گرفته می‌شوند.

در کنترل سطح صفر، تنظیم ولتاژ و جریان خروجی انجام می‌گیرد و دو حلقهٔ کنترل ولتاژ و جریان را شامل می‌شود. مقادیر مرجع برای جریان‌های خروجی اینورتر، با کنترل‌کنندهٔ ولتاژ فراهم می‌شود. همچنین فرمان ولتاژ ورودی به PWM در اینورتر با کنترل‌کنندهٔ جریان آماده می‌شود. ورودی کنترل‌کنندهٔ ولتاژ، مقادیر مرجع دامنهٔ ولتاژ و فرکانس‌اند که با اندازه‌گیری‌های محلی و با مشخصه‌های دروپ تولید می‌شوند [۳، ٤]؛ حتی می‌توان قسمتی از کنترل‌کننده محلی را با سایر انواع کنترل‌کننده‌ها مانند کنترل‌کننده‌های مبتنی بر روش لیاپانوف مستقیم [۵، ٦] یا روش مبتنی بر پسیویتی[٤] [۷، ۸] جایگزین کرد که البته در مطالعات انجام‌شده، ساختار استفاده‌شده به‌صورت ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفته نشده است.

روش کنترل مبتنی بر منحنی‌های افتی یا دروپ در سطح کنترل اولیه استفاده می‌شوند تا تقسیم توان مناسبی میان DGهای موازی مبتنی بر اینورتر صورت گیرد. از ویژگی‌های مهم کنترل دروپ، عملکرد سریع آن و نیازنداشتن به زیرساخت مخابراتی است. اصولاً عملکرد کنترل اولیه نباید به سیستم مخابراتی وابسته باشد؛ هرچند در برخی مقالات از سیستم مخابرات با پهنای باند کم برای کاهش خطای تقسیم توان راکتیو استفاده کرده‌اند [۹].

در [۱۰، ۱۱]، روش‌های کنترل دروپ اکتیو و راکتیو توسعه‌یافته در تقسیم توان همراه با کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو با استفاده از امپدانس‌های مجازی ارائه شده‌اند و در [۱۱] روش امپدانس مجازی تطبیقی با اصلاح مرجع ولتاژ ورودی به حلقهٔ کنترل داخلی، بهبود یافته است. در [۷]، تقسیم توان راکتیو مبتنی بر دروپ با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان ظاهری و حداکثر توان اکتیو اینورتر ارائه شده است. در همین زمینه، رویکردهای دیگری نیز وجود دارد که در [۱۲، ۲۱] به آنها اشاره شده است. به‌تازگی رویکردهای کنترل اولیه بدون استفاده از دروپ نیز ارائه شده‌اند که مبتنی بر تبادل اطلاعات میان DGهای مجاورند [۱۳].

در [۱٤، ۱۵]، کنترل دروپ تعمیم‌یافته در DGهای مبتنی بر اینورتر ارائه شده است. برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو به‌صورت مستقل از یکدیگر، معادلات دروپ با عنوان دروپ تعمیم‌یافته اصلاح شده‌اند.

روش‌های کنترل هوشمند نیز به جای کنترل دروپ استفاده شده‌اند [۱٤، ۱٦، ۲۵]. در [۱٤] از کنترلر ANFIS به جای دروپ تعمیم‌یافته استفاده شده و نتایج مناسبی به‌ویژه ازنظر عملکرد مقاوم آن به دست آمده است. در [۱٦] کنترل‌کنندهٔ فرکانس با استفاده از کنترل‌کنندهٔ PI آنلاین ارائه شده است که با استفاده از یک الگوریتم فازی–PSO تنظیم می‌شود. همین موضوع در [۲۵] با استفاده از کنترل‌کنندهٔ PID مرتبه کسری فازی بهینه‌شده صورت گرفته است.

در [۱۷]، کنترل‌کننده‌های دروپ به گونه‌ای اصلاح شده‌اند که مشکلات کیفیت توان DGهای مبتنی بر اینورتر، به‌ویژه هارمونیک‌های ولتاژ را رفع کنند.

سطح کنترل ثانویه، نسبت به کنترل اولیه، حلقهٔ کنترلی بیرونی ریزشبکه به شمار می‌رود. از این سطح برای جبران نوسانات ولتاژ و فرکانس ناشی از عملکرد سطوح کنترلی اولیه استفاده می‌شود و به هر دو صورت متمرکز یا توزیع‌شده پیاده می‌شود [۱۸].

در [۲٤]، مؤلفان این مقاله قسمتی از یافته‌های خود را ارائه کرده‌اند؛ اما در آن به موارد مربوط به تحلیل حالت‌های ماندگار و دینامیکی و درنتیجه، تعیین حدود منحنی‌های دروپ و حلقه تکمیلی سمت DC اشاره نشده است و تنها دروپ مبتنی بر جریان بررسی شده‌اند.

در این مقاله، یک کنترل‌کنندهٔ چند حلقه‌ای بر مبنای ساختار سلسله مراتبی برای ریزشبکه ارائه شده است. ابتدا مدل دینامیکی کامل ریزشبکه به دست آمده است، سپس با استفاده از این مدل، منحنی ظرفیت مبتنی بر جریان (CBCC[۵]) برای هر DG در حالت ماندگار به دست آمده است که از مؤلفه‌های هارمونیکی اصلی ولتاژ و جریان استفاده می‌کند. با استفاده از CBCC هر DG، کنترل‌کنندهٔ دروپ بهبودیافته معرفی شده است. سپس به‌منظور تعیین

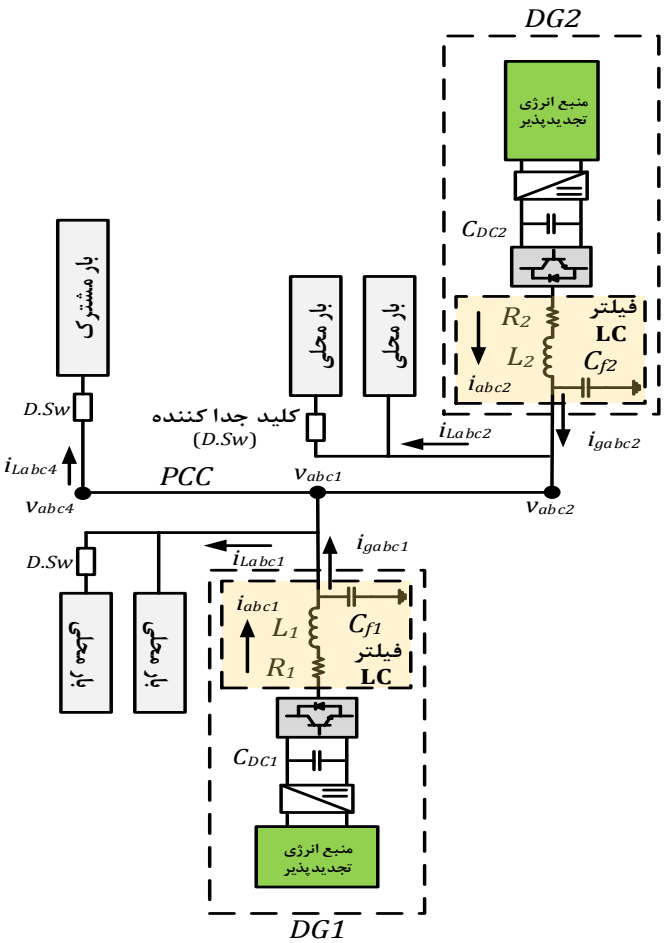
حدود عملیاتی واحدهای DG و تنظیم منحنی‌های دروپ، منحنی بیضی شکل v-f به دست آمده است. علاوه بر این، با جداسازی اولیه هارمونیک‌های ولتاژ و استفاده مجدد از آنها در فرآیند تولید مرجع ولتاژ برای کنترل‌کننده ولتاژ، عملکرد دینامیکیکنترل‌کننده ارائه‌شده در شرایط اتصال بارهای هارمونیکی به شبکه بهبود یافته است. تغییرات ولتاژ لینک DC که به دلیل عدم‌قطعیت تولید در DGهای تجدیدپذیر به وجود می‌آیند، با استفاده از یک حلقهٔ کنترلی اضافه‌شده در ساختار سلسله مراتبی، جبران و پایداری آن بررسی شده‌اند. درنهایت، کنترلرهای طراحی‌شده در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده و نتایج آن با یکی از روش‌ها مقایسه شده‌اند. ارائه ساختار کنترلی چندهدفه یادشده در کنار کنترل دروپ مبتنی بر منحنی‌های ظرفیت، از نوآوری‌های اصلی این مقاله به شمار می‌روند.

۲- مدل ریزشبکه مطالعه‌شده

شکل (۱) ساختار ریزشبکه استفاده‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. دو DG به یک ریزشبکه متصل شده‌اند و تعدادی بار محلی یا مشترک را تغذیه می‌کنند. عدم‌قطعیت بارها با بارهای موقتی نشان داده شده است که به‌طور ناگهانی وارد می‌شوند.

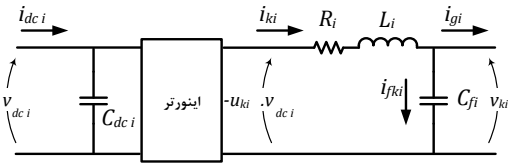
فصل مشترک میان منبع انرژی تجدیدپذیر و ریزشبکه، شامل یک لینک dc، اینورتر، فیلتر LC و سیستم کنترل محلی است. در پارامترهای فیلتر LC، مقدار مقاومت و اندوکتانس معادل مربوط به فیلتر ac، ترانسفورماتور و کابل‌های ارتباطی در نظر گرفته شده است.

برای طراحی سیستم کنترل، لازم است معادلات دینامیکی سیستم نوشته شود. با توجه به دیاگرام تک‌خطی شکل (۱) و مدار معادل تک‌فاز شکل (۲)، مدل دینامیکی برای هر DG این ریزشبکه در سیستم abc به‌صورت ذیل نوشته می‌شود:



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی ریزشبکه مطالعه‌شده

$$
\begin{aligned}
&L_i\, di_{ki}/dt + R_i i_{ki} + u_{ki} v_{dc_i} + v_{ki} = 0\\
&C_{fi}\, dv_{ki}/dt = i_{fki}\\
&C_{dci}\, dv_{dci}/dt\\
&\quad -(u_{ai} i_{ai} + u_{bi} i_{bi} + u_{ci} i_{ci}) - i_{dci} = 0
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$



شکل (۲): مدار معادل تکفاز هر DG

در یک سیستم کنترلی، دنبال‌کردن سیگنال مرجع سینوسی به میزان زیادی به پهنای باند حلقه بسته سیستم وابسته است. درواقع این پهنای باند به میزان درخور توجهی بر سرعت کنترل‌کننده و میزان خطای سیستم تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین طراحی سیستم کنترل در چارچوب گردان dq یکی از روش‌های استفاده‌شده برای رفع این وابستگی است. در واقع تمامی کمیت‌ها پیش از ورود به سیستم کنترلی، با تبدیل abc/dq [۱۹] به مقادیر DC تبدیل می‌شوند و درنتیجه، فرآیند طراحی کنترل‌کننده تسهیل خواهد شد. با این رویکرد، معادلات دینامیکی را در چارچوب گردان dq بازنویسی می‌کنیم:

$$L_i\, di_{di}/dt + R_i i_{di} - \omega L_i i_{qi} + v_{di} + u_{di} v_{dci} = 0 \qquad (۲)$$

$$L_i\, di_{qi}/dt + R_i i_{qi} + \omega L_i i_{di} + v_{qi} + u_{qi} v_{dci} = 0 \qquad (۳)$$

$$C_{fi}\, dv_{di}/dt - \omega C_{fi} v_{qi} - i_{fdi} = 0 \qquad (۴)$$

$$C_{fi}\, dv_{qi}/dt + \omega C_{fi} v_{di} - i_{fqi} = 0 \qquad (۵)$$

$$C_{dci}\, dv_{dci}/dt - u_{di} i_{di} - u_{qi} i_{qi} - i_{dci} = 0 \qquad (۶)$$

۳- ساختار سیستم کنترل

عملکرد درست ریزشبکه در گرو عملکرد صحیح سیستم کنترل آن است. به عبارت دیگر، باید دامنهٔ ولتاژ و فرکانس در بازهٔ مطلوب قرار داشته باشد و در عین حال به تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسب میان DGها و نیز تعقیب دقیق سیگنال مرجع دست یافت. در ادامه، سیستم کنترلی مبتنی بر ساختار سلسله مراتبی ارائه شده است.

۳-۱- حلقه‌های کنترل سطح صفر

سطح کنترل صفر یا به عبارت دیگر، حلقه‌های کنترل داخلی، قلب ساختار کنترل سلسله مراتبی ریزشبکه را تشکیل می‌دهند. این بخش از دو حلقهٔ کنترل جریان و کنترل ولتاژ تشکیل می‌شود [۱۹].

ولتاژ و جریان خروجی اینورتر باید سیگنال‌های مرجعی را تعقیب کند که این سیگنال‌ها به‌وسیلهٔ کنترل‌کننده‌های جریان و ولتاژ به وجود می‌آیند. به عبارت دیگر، کنترل‌کننده ولتاژ، سیگنال‌های مرجع ورودی به کنترل‌کنندهٔ جریان را ایجاد می‌کنند. این ساختار سلسله مراتبی برای دستیابی به الزامات کنترلی ریزشبکه استفاده شده است.

معادلات مدل فضای حالت مبتنی بر جریان برای هر DG مطابق (۲) و (۳) در نظر گرفته شده‌اند. این دو معادله شامل دو معادله وابسته به یکدیگرند؛ بنابراین برای جداسازی کامل این دو معادله و کنترل مستقل جریان‌های d و q ، جملات مربوطه باید به شکلی در فرآیند کنترلی حذف شوند. از سوی دیگر، هنگامی که سیستم از حالت صفر شروع به کار می‌کند، ممکن است یک فروجهش شایان توجه به دلیل مقدار غیرصفر v_{abc} روی دهد. برای رفع این دو مشکل، از جبران‌سازی پیش‌خور استفاده می‌شود. تابع کلیدزنی معادل با استفاده از روابط (۲) و (۳)، به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$u_{di} = -v_{dci}^{-1}\left(L_i \frac{di_{di}}{dt} + R_i i_{di} - \omega L_i i_{qi} + v_{di}\right) \qquad (۷)$$

$$u_{qi} = -v_{dci}^{-1}\left(L_i \frac{di_{qi}}{dt} + R_i i_{qi} + \omega L_i i_{di} + v_{qi}\right) \qquad (۸)$$

جبران‌سازی پیش‌خور، مطابق معادلات زیر اعمال می‌شود:

$$u_{di} = -v_{dci}^{-1}\left(m_{di} - \omega L_i i_{qi} + v_{di}\right) \qquad (۹)$$

$$u_{qi} = -v_{dci}^{-1}\left(m_{qi} + \omega L_i i_{di} + v_{qi}\right) \qquad (۱۰)$$

در معادلات فوق، جمله‌های m_{di} و m_{qi} ورودی‌های کنترلی هستند که در دو لوپ کنترلی مستقل از هم عمل می‌کنند تا کاملاً جریان‌های خروجی DGها را در چارچوب dq کنترل کنند. سیگنال‌های m_{di} و m_{qi} به کمک دو

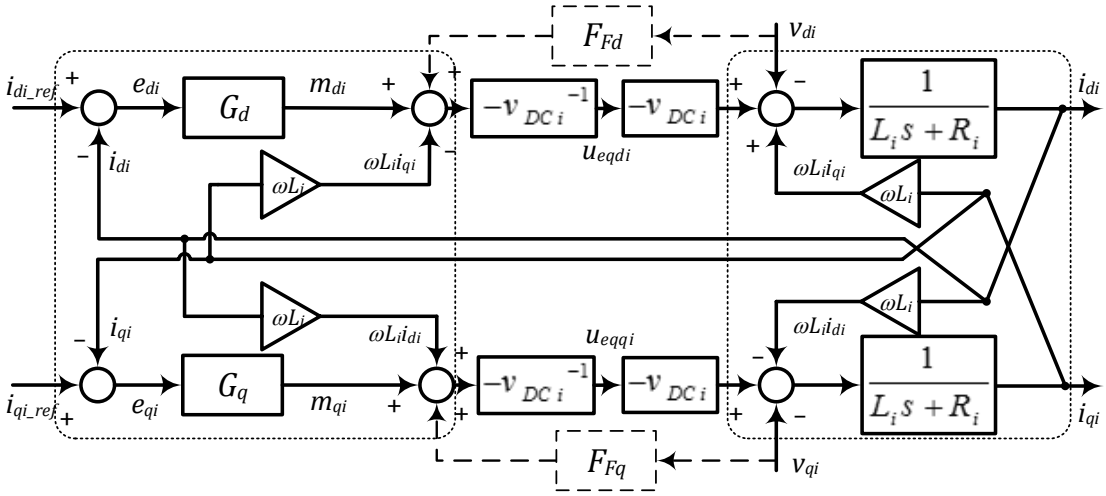
کنترل‌کنندهٔ تناسبی–انتگرالی (G_{dqi}) با ضرایب k_{Idi}، k_{Pdi}، k_{Iqi} و k_{Pqi} به دست می‌آیند:

$$m_{di} = k_{Pdi}.e_{di} + k_{Idi}.\int e_{di}dt \qquad (۱۱)$$

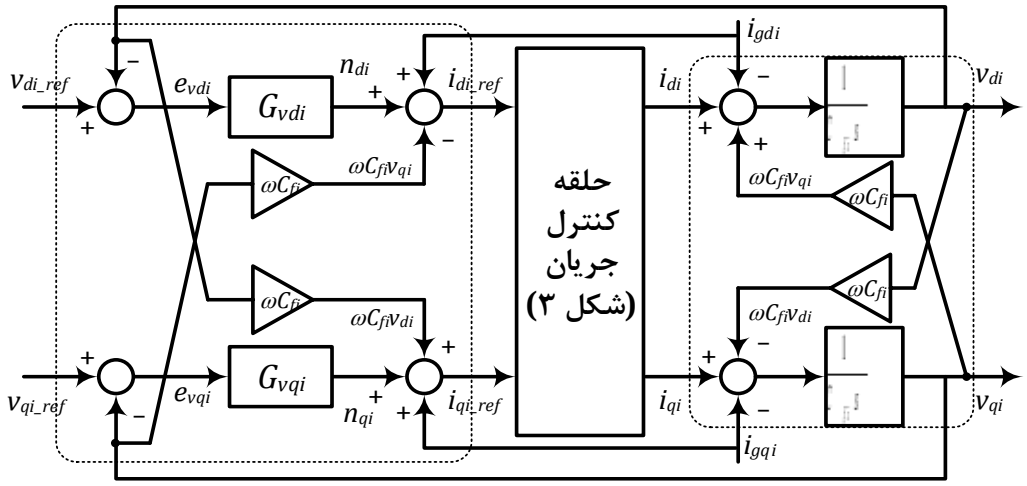
$$m_{qi} = k_{Pqi}.e_{dq} + k_{Iqi}.\int e_{qi}dt \qquad (۱۲)$$

که در آن ($e_{di}= i_{di_ref} - i_{di}$) و ($e_{qi}= i_{qi_ref} - i_{qi}$) خطاهای بین مقادیر جریان‌های مرجع (i_{dqi_ref}) و اندازه‌گیری‌شده (i_{dqi}) هر DG هستند.

از فیلتر پیش‌خور (F_{Fdq}) با پهنای باند نسبتاً بزرگ نیز استفاده شده است. یک تابع تبدیل پیشنهادی برای این فیلتر، $F_{Fdq}=1/(8\times10^{-6}s+1)$ است که به‌خوبی اغتشاشات ورودی (یعنی v_{dqi} در کنترل‌کننده جریان و i_{gdqi} در کنترل‌کننده ولتاژ) را کاهش می‌دهد و مشکلات ذکرشده در ابتدای این بخش را به‌خوبی برطرف می‌کند [۱۹].



شکل (۳): بلوک دیاگرام حلقه‌های کنترل جریان برای هر DG



شکل (٤): بلوک دیاگرام حلقه‌های کنترل ولتاژ برای هر DG

میزان تزریق توان اکتیو و راکتیو هر DG با تغییر سیگنال‌های مرجع جریان، تغییر می‌یابد. این سیگنال‌ها با استفاده از یک کنترل‌کنندهٔ ولتاژ تولید تغییرپذیرند. با استفاده از مدل فضای حالت مبتنی بر ولتاژ در (٤) و (٥) و شکل (۲)، جریان‌های i_{dqi} برابر روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$i_{di} = i_{fdi} + i_{gdi} = C_{fi}\frac{dv_{di}}{dt} - \omega C_{fi}v_{qi} + i_{gdi} \qquad (۱۳)$$

$$i_{qi} = i_{fqi} + i_{gqi} = C_{fi}\frac{dv_{qi}}{dt} + \omega C_{fi} v_{di} + i_{gqi} \qquad (۱۴)$$

در اینجا نیز از روش مجازسازی مشابه با کنترل‌کنندهٔ جریان استفاده می‌شود که در آن ورودی‌های کنترلی n_d و n_q برای کنترل ولتاژ خروجی استفاده می‌شوند:

$$i_{di_ref} = n_{di} - \omega C_{fi} v_{qi} + i_{gdi} \qquad (۱۵)$$

$$i_{qi_ref} = n_{qi} + \omega C_{fi} v_{di} + i_{gqi} \qquad (۱۶)$$

همانند حلقهٔ کنترل جریان، در اینجا نیز سیگنال‌های کنترلی n_{di} و n_{qi} از دو کنترل‌کنندهٔ تناسبی - انتگرالی (G_{vdqi}) با ضرایب k_{Pvdi}، k_{Ivdi}، k_{Pvqi} و k_{Ivqi} به دست می‌آیند:

$$n_{di} = k_{Pvdi}.e_{vdi} + k_{Ivdi}.\int e_{vdi}dt \qquad (۱۷)$$

$$n_{qi} = k_{Pvqi}.e_{vqi} + k_{Ivqi}.\int e_{vqi}dt \qquad (۱۸)$$

که ($e_{vdi}= v_{di_ref} - v_{di}$) و ($e_{vqi}= v_{qi_ref} - v_{qi}$) خطاهای بین مقادیر ولتاژهای مرجع (v_{dqi_ref}) و اندازه‌گیری‌شده (v_{dqi}) هر DG هستند.

مطابق [۱۹]، حلقه‌های کنترل جریان و ولتاژ به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) نشان داده شده‌اند.

از ساختار کنترل سلسله مراتبی برای ایجاد سیگنال مرجع ولتاژ استفاده شده است تا کنترل‌کننده‌های محلی هر DG کامل شوند. برای این کار، یک کنترل‌کنندهٔ اولیه مبتنی بر دروپ استفاده خواهد شد.

۳-۲- کنترل اولیه

تغییرات ولتاژ با کمک تقسیم توان مناسب میان DGهای ریزشبکه تثبیت می‌شوند که معمولاً با استفاده از روش کنترل دروپ در سطح کنترل اولیه انجام می‌شود.

معادلات مرسوم دروپ (P-f) و (Q-v) در هارمونیک اصلی ولتاژ به شرح ذیل‌اند:

$$f_{i1} = f_{0i} - \alpha_i (P_{i1} - P_{0i1}) \qquad (۱۹)$$

$$v_{i1} = v_{0i} - \beta_i (Q_{i1} - Q_{0i1}) \qquad (۲۰)$$

که در آن، v_{i1} و f_{i1} دامنه و فرکانس سیگنال مرجع ولتاژ هستند که به‌عنوان ورودی مرجع برای حلقه‌های کنترلی داخلی استفاده می‌شوند. سیگنال‌های v_{0i} و f_{0i}، مقادیر مرجع کنترل‌کنندهٔ اولیه به شمار می‌روند. همچنین پارامترهای α_i و β_i، ضرایب دروپ و P_{i1}، Q_{i1}، P_{0i1} و Q_{0i1} به‌ترتیب توان‌های خروجی و توان‌های مرجع هر واحد DG در فرکانس اصلی‌اند. روابط (۱۹) و (۲۰) را به‌صورت ذیل بازنویسی می‌شوند:

$$f_{i1} = f'_{0i} - \alpha_i P_{i1}, \quad v_{i1} = v'_{0i} - \beta_i Q_{i1} \qquad (۲۱)$$

که در آن:

$$f'_{0i} = f_{0i} + \alpha_i P_{0i1}, \quad v'_{0i} = v_{0i} + \beta_i Q_{0i1} \qquad (۲۲)$$

توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو خروجی هر DG مطابق روابط ذیل محاسبه می‌شوند:

$$P_i = 1.5 \times (v_{di}.i_{di} + v_{qi}.i_{qi}) \qquad (۲۳)$$

$$Q_i = 1.5 \times (v_{qi}.i_{di} - v_{di}.i_{qi}) \qquad (۲۴)$$

با هم‌جهت در نظر گرفتن بردار مرجع ولتاژ و محور d، مؤلفه q ولتاژ صفر می‌شود و درنتیجه، توان‌های اکتیو و راکتیو DGها در شرایط ماندگار و شرایط دینامیکی به شرح ذیل به دست می‌آیند:

$$P_i^* = 1.5 V_{di}^*.I_{di}^*, \quad Q_i^* = -1.5 V_{di}^*.I_{qi}^* \qquad (۲۵)$$

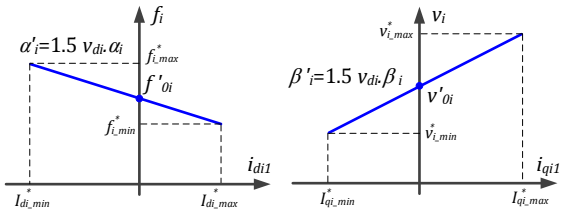
$$P_i = 1.5 v_{di}.i_{di} \quad , \quad Q_i = -1.5 v_{di}.i_{qi} \qquad (۲۶)$$

با در نظر گرفتن (۲۵)، (۲۶) و جاگذاری (۲۶) در (۲۱) و در نظر گرفتن مولفه هارمونیکی اصلی، معادلات دروپ تغییر یافته بر اساس جریانهای dq در هر یک از DGها به صورت زیر خواهد بود:

$$f_{i1} = f'_{0i} - \alpha'_i i_{di1} \qquad (۲۷)$$

$$v_{i1} = v'_{0i} + \beta'_i i_{qi1} \qquad (۲۸)$$

که در آن، α_i. v_{di1} = 1.5 α'_i و β_i. v_{di1} = 1.5 β'_i است؛ بنابراین برابر روابط (۲۷) و (۲۸)، دامنهٔ ولتاژ و فرکانس را با استفاده از مؤلفه‌های هارمونیک اصلی جریان هر DG در چارچوب dq کنترل می‌شود. شکل (۵) منحنی‌های معادلات دروپ فوق را نشان می‌دهد.



شکل (۵): منحنی‌های دروپ دامنهٔ ولتاژ و فرکانس مبتنی بر جریان هر DG در ریزشبکه

با توجه به شکل (۵)، برای هر منحنی دروپ، حدود بالا و پایینی وجود دارد که باید محاسبه شوند. این حدود مربوط به ولتاژها، فرکانس و جریان‌های dq هستند. روش محاسبه این حدود با استفاده از تحلیل حالت ماندگار در ادامه ارائه شده است.

۳-۳- تحلیل حالت ماندگار و محاسبه حدود جریان دروپ

در شرایط ماندگار، نقطه کار سیستم، همان مقادیر مرجع‌اند که با سیستم کنترل تعیین می‌شوند. با وجود این، نیاز به مؤلفه‌های هارمونیکی جریان‌ها و ولتاژها نیز وجود دارد تا مقادیر مرجع به درستی تولید شوند. این مقادیر مرجع ممکن است تغییرات ناچیزی در شرایط کار عادی داشته باشند که درخور چشم‌پوشی است؛ بنابراین میزان زمانی این تغییرات در چارچوب dq برابر صفر خواهد بود:

$$dX^*/dt = 0 \qquad (۲۹)$$

که X^* یکی از مقادیر مرجع ولتاژ یا جریان است.

با توجه به (۲)، (۳) و (۲۹)، معادلات حالت ماندگار به‌صورت زیر بدست می‌آید:

$$R_i I^*_{di} - \omega L_i I^*_{qi} + V^*_{di} + U^*_{di} V^*_{dc_i} = 0 \qquad (۳۰)$$

$$R_i I^*_{qi} + \omega L_i I^*_{di} + V^*_{qi} + U^*_{qi} V^*_{dc_i} = 0 \qquad (۳۱)$$

رابطه (٦) نیز در حالت ماندگار بازنویسی می‌شود:

$$U^*_{di} I^*_{di} + U^*_{qi} I^*_{qi} + I^*_{dci} = 0 \qquad (۳۲)$$

توابع کلیدزنی معادل در حالت ماندگار از (۳۰) و (۳۱) و با صفر نظر گرفتن مؤلفه q ولتاژ PCC در حالت ماندگار به دست می‌آید:

$$U^*_{di} = -V^{*-1}_{dc_i}(R_i I^*_{di} - \omega L_i I^*_{qi} + V^*_{di}) \qquad (۳۳)$$

$$U^*_{qi} = -V^{*-1}_{dc_i}(R_i I^*_{qi} + \omega L_i I^*_{di}) \qquad (۳٤)$$

با جایگزینی (۳۳) و (۳٤) در (۳۲)، رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$I^{*2}_{di} + I^{*2}_{qi} + \frac{V^*_{di}}{R_i} I^*_{di} - \frac{V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}}{R_i} = 0 \qquad (۳۵)$$

که معادله یک دایره با فرم کلی $x^2+y^2+Dx+F=0$ است. در این رابطه، مرکز دایره از رابطه $(h, k) = (-D/2, -E/2)$ و شعاع دایره (r) از رابطه $r^2=h^2+k^2-F$ به دست می‌آیند. بر اساس این، مقادیر h، k و r عبارت‌اند از:

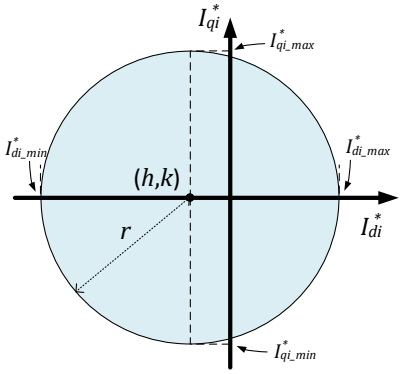
$$(h,k) = \left(-\frac{V^*_{di}}{2R_i}, 0\right)$$
$$r = (0.5R_i^{-1})\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_i V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}} \qquad (۳٦)$$

رابطه (۳۵)، منحنی ظرفیت مبتنی بر جریان (CBCC) برای هر DG در حالت ماندگار است و تزریق/مصرف جریان به/از ریزشبکه براساس این منحنی صورت می‌گیرد. شکل (٦) نمونه‌ای از CBCC حالت ماندگار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل مشخص است چهار کمیت جریان، حدود کنترلی بالا و پایین منحنی‌های دروپ قبلی‌اند که از معادله دایره به دست می‌آیند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I^*_{di_\max} = 0.5R_i^{-1}\left(-\left|V^*_{di}\right| + \sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_i V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}}\right)$$
$$I^*_{di_\min} = -0.5R_i^{-1}\left(\left|V^*_{di}\right| + \sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_i V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}}\right) \qquad (۳۷)$$

$$I^*_{qi_\max} = 0.5R_i^{-1}\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_i V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}}$$
$$I^*_{qi_\min} = -0.5R_i^{-1}\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_i V^*_{dc_i} I^*_{dc_i}} \qquad (۳۸)$$



شکل (٦): منحنی ظرفیت مبتنی بر جریان (CBCC) یک DG در شرایط ماندگار

۳-٤- تحلیل حالت دینامیکی و محاسبه حدود ولتاژ و فرکانس

یک تغییر کوچک در جریان‌های DG (ناشی از تغییرات در بار یا تولید)، ایجاد یک تغییر جریان در معادلات چارچوب dq را موجب می‌شود که این تغییرات را با Δi_{di1} و Δi_{qi1} نشان می‌دهیم. این تغییرات درواقع انحراف جریان‌ها نسبت به حالت ماندگارند که به‌صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$i_{di1} = I^*_{di1} + \Delta i_{di1}, \qquad i_{qi1} = I^*_{qi1} + \Delta i_{qi1} \tag{۳۹}$$

که در آن i_{dqi1} و I^*_{dqi1}، به‌ترتیب جریان‌های DG در دو حالت دینامیکی و ماندگارند. با استفاده از (۲۷)، (۲۸) و (۳۹)، معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$I^*_{di1} = i_{di1} - \Delta i_{di1} = \alpha_i'^{-1}(f'_{0i} - f_i + \Delta f_{i1}) \tag{٤٠}$$

$$I^*_{qi1} = i_{qi1} - \Delta i_{qi1} = -\beta_i'^{-1}(v'_{0i} - v_{i1} + \Delta v_{i1}) \tag{٤١}$$

که در آنها، Δf_{i1} و Δv_{i1}، به‌ترتیب انحرافات فرکانس و ولتاژ در نقطه PCC بر اساس مؤلفه هارمونیکی اصلی‌اند. با قراردادن (٤٠) و (٤١) در (۳۵)، رابطهٔ بین فرکانس و دامنهٔ ولتاژ به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}&\alpha_i'^{-2}(f'_{0i} - f_i + \Delta f_i)^2 + \beta_i'^{-2}(v'_{0i} - v_{i1} + \Delta v_{i1})^2 \\ &+ R_i^{-1}V^*_{di}\alpha_i'^{-1}(f'_{0i} - f_i + \Delta f_i) - R_i^{-1}V^*_{dc_i}I^*_{dc_i} = 0\end{aligned} \tag{٤٢}$$

با انجام محاسبات جبری، درنهایت رابطهٔ (٤٣) به دست می‌آید:

$$Af_i^2 + Bv_{i1}^2 + Df_i + Ev_{i1} + F = 0 \tag{٤٣}$$

که در آن:

$$A = \alpha_i'^{-2} \quad , \quad B = \beta_i'^{-2} \tag{٤٤}$$

$$D = -2\alpha_i'^{-2}f'_{0i} - 2\alpha_i'^{-2}\Delta f_{i1} - R_i^{-1}V^*_{di}\alpha_i'^{-1} \tag{٤٥}$$

$$E = -2\beta_i'^{-2}v'_{0i} - 2\beta_i'^{-2}\Delta v_{i1} \tag{٤٦}$$

$$\begin{aligned}F &= \alpha_i'^{-2}(f'_{0i} + \Delta f_{i1})^2 + \beta_i'^{-2}(v'_{0i} + \Delta v_{i1})^2 \\ &+ R_i^{-1}V^*_{di}\alpha_i'^{-1}(f'_{0i} + \Delta f_{i1}) - R_i^{-1}V^*_{dc_i}I^*_{dc_i} = 0\end{aligned} \tag{٤٧}$$

رابطه (٤٣)، معادله یک بیضی با فرم کلی $Ax^2+By^2+Dx+Ey+F=0$ است. مرکز این بیضی نقطه $(x_0, y_0) = (-D/2A, -E/2B)$ و قطرهای آن $d_1=\mu.a$ و $d_2=\mu.b$ هستند که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}&\begin{pmatrix}x_0\\ y_0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}f'_{0i} + \Delta f_{i1} + 0.5R_i^{-1}\alpha_i'V^*_{di}\\ v'_{0i} + \Delta v_{i1}\end{pmatrix} \\ &a = \alpha_i' \quad , \quad b = \beta_i' \\ &\mu = 0.5R_i^{-1}\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_iV^*_{dc_i}I^*_{dc_i}}\end{aligned} \tag{٤٨}$$

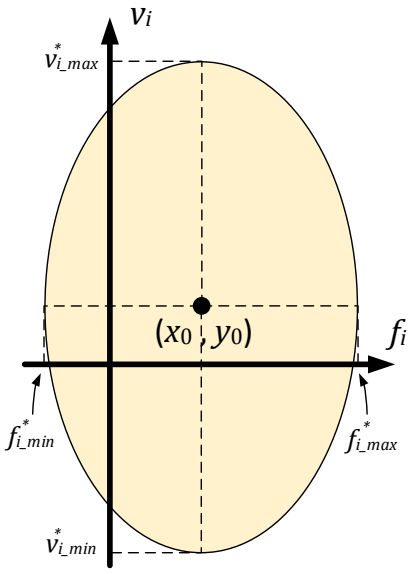
شکل (۷) منحنی بیضی شکل مربوط به رابطه (v-f) برای یک DG است. محدودیت‌های فرکانس و دامنهٔ ولتاژ با کمک این بیضی به شرح ذیل محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}f^*_{i_\max} &= {}^{d_1}\!/_2 + x_0 = f'_{0i} + \Delta f_{i1} \\ &+ 0.5R_i^{-1}\alpha_i'\left[0.5\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_iV^*_{dc_i}I^*_{dc_i}} + \left|V^*_{di}\right|\right]\end{aligned} \tag{٤٩}$$

$$\begin{aligned}f^*_{i_\min} &= -({}^{d_1}\!/_2 - x_0) = f'_{0i} + \Delta f_{i1} \\ &- 0.5R_i^{-1}\alpha_i'\left[0.5\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_iV^*_{dc_i}I^*_{dc_i}} + \left|V^*_{di}\right|\right]\end{aligned} \tag{٥٠}$$

$$\begin{aligned}v^*_{i_\max} &= {}^{d_2}\!/_2 + y_0 = v'_{0i} + \Delta v_{i1} \\ &+ 0.5R_i^{-1}\beta_i'\left[0.5\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_iV^*_{dc_i}I^*_{dc_i}}\right]\end{aligned} \tag{٥١}$$

$$\begin{aligned}v^*_{i_\min} &= -({}^{d_2}\!/_2 - y_0) = v'_{0i} + \Delta v_{i1} \\ &- 0.5R_i^{-1}\beta_i'\left[0.5\sqrt{(V^*_{di})^2 + 4R_iV^*_{dc_i}I^*_{dc_i}}\right]\end{aligned} \tag{٥٢}$$



شکل (۷): منحنی بیضی شکل رابطهٔ ولتاژ و فرکانس هر DG

از بیضی (v-f) یادشده، محدودهٔ کنترلی فرکانس و دامنهٔ ولتاژ به دست می‌آید. این بازه در عملکرد سیستم کنترل اهمیت دارد تا با آن نقطه کار، ولتاژ مناسبی برای هر DG تنظیم می‌شود. در قسمتی از منحنی بیضی واقع‌شده در ربع اول (یعنی ناحیه مثبت)، مقادیر مثبت فرکانس و دامنهٔ ولتاژ قرار دارند و ولتاژ DG باید در این ناحیه تثبیت شود.

با توجه به (٤٨)، مختصات مرکز بیضی به پارامترهای سیستم و نقاط کار آن بستگی دارد. این پارامترها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که سطح بیضی در ناحیهٔ مثبت افزایش یابد (یعنی بیضی به سمت بالا و راست حرکت داده شود). به عبارت دیگر، افزایش مساحت بیضی در ربع اول با حرکت‌دادن مرکز بیضی به سمت راست و افزایش شعاع‌های آن ممکن باشد؛ اما جابه‌جایی کنترل‌نشده بیضی مربوط به یک DG، به عملکرد نامطلوب سیستم کنترل منجر می‌شود؛ زیرا نقطهٔ مرجع ممکن است در خارج از منحنی واقع شود و عملکرد تعقیب مرجع در سیستم کنترل دچار مشکل شود. علاوه بر این، تغییر نامناسب شعاع‌ها نیز به مقادیر کمتری برای ولتاژ و فرکانس منجر می‌شود که پذیرفتنی نیست.

۳-۵- هارمونیک‌های ولتاژ خروجی در ریزشبکه

به سبب اینکه کنترل‌کننده دروپ ارائه‌شده در فرکانسِ اصلی به دست آمده است، باید مؤلفه‌های هارمونیکی مختلف ولتاژهای PCC در حلقهٔ ولتاژ، محاسبه و در نظر گرفته شوند؛ بنابراین مؤلفه‌های d و q ولتاژهای PCC به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$v_{dqi} = V_{dqi1} + \sum_{h=2}^{\infty} v_{dqih} \qquad (۵۳)$$

که در آن، V_{dqi1} و Σv_{dqih}، به‌ترتیب ولتاژهای مؤلفه‌های فرکانس اصلی و مجموع سایر مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ در چارچوب dq در نقطه PCC هستند. این مجموع ولتاژهای هارمونیکی باید با کنترل‌کنندهٔ محلی هر DG جبران شود. جمله مربوط به مجموع ولتاژهای هارمونیکی با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر (LPF) از موج اصلی استخراج می‌شود:

$$\sum_{h=2}^{\infty} v_{dqih} = (1 - LPF) v_{dqi} \qquad (۵۴)$$

که LPF یک فیلتر پایین گذر برای استخراج مؤلفه هارمونیک اصلی ولتاژهای v_{dqi} است. برای کاهش اثر بارهای غیرخطی که در اثر آنها نیز ولتاژهای PCC دچار اعوجاجات هارمونیکی می‌شوند، رابطه (۵٤) مطابق شکل (۹) به حلقهٔ کنترل ولتاژ اضافه می‌شود.

۳-٦- در نظر گرفتن تغییرات ولتاژ لینک DC ناشی از عدم‌قطعیت تولید انرژی تجدیدپذیر

در سمت DC واحدهای تولید در یک ریزشبکه، منبع انرژی تجدیدپذیر قرار دارد که دارای ماهیتی متغیر و غیر قطعی است (مانند فتوولتائیک، باد و ...)؛ بنابراین باید در تحلیل و طراحی ریزشبکه، منبع DC متغیر و غیرقطعی در سمت DC هر DG در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، ولتاژ خازن DC (یعنی v_{dci})، در طول عملکرد ریزشبکه، ثابت نخواهد بود و باید روی مقدار مشخصی تثبیت شود تا بتوان با شبکه ac تبادل توان داشت و سیستم دچار شرایط ناپایدار نشود.

از معادلات (٦)، (٧) و (٨) و با در نظر گرفتن $\tilde{u}=du/dt$، معادلات دینامیکی سمت DC به شرح ذیل به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} C_{dc_i}\tilde{v}_{dc_i} &= i_{dc_i} - v_{dc_i}^{-1}L_i\left(\tilde{i}_{di}^{\,2}+\tilde{i}_{qi}^{\,2}\right) \\ &\quad - v_{dc_i}^{-1}R_i\left(i_{di}^2+i_{qi}^2\right) - v_{dc_i}^{-1}\left(v_{di}i_{di}+v_{qi}i_{qi}\right). \end{aligned} \qquad (٥٥)$$

با در نظر گرفتن رابطه (٢٦)، (٥٥) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{dc_i}}{dt} &= \frac{M_i v_{dc_i}+N_i}{C_{dc_i}v_{dc_i}} \\ &= \frac{v_{dc_i}i_{dc_i} - v_{di}i_{di} - L_i\left(\tilde{i}_{di}^{\,2}+\tilde{i}_{qi}^{\,2}\right) - R_i\left(i_{di}^2+i_{qi}^2\right)}{C_{dc_i}v_{dc_i}}. \end{aligned} \qquad (٥٦)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} M_i &= i_{dc_i} \\ N_i &= -v_{di}i_{di} - L_i\left(\tilde{i}_{di}^{\,2}+\tilde{i}_{qi}^{\,2}\right) - R_i\left(i_{di}^2+i_{qi}^2\right) \end{aligned}$$

رابطه (٥٦)، یک تابع هموگرافیک است که به شکل یک معادله تعادل توان نوشته شده است. این معادله در شرایط دینامیک صفر (یا همان شرایط ماندگار) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v_{dc_i}i_{dc_i} = v_{di}i_{di} + R_i\left(i_{di}^2+i_{qi}^2\right). \qquad (٥٧)$$

در این معادله مشخص است تعادل توان در شرایط دینامیک صفر نیز حفظ می‌شود و سیستم ما در صورت جبران تغییرات دینامیکی، عملکرد پایداری خواهد داشت.

از (٦)، یک سیگنال کنترلی جبران‌کننده برای i_{di} ، با استفاده از حلقهٔ کنترل ولتاژ خازن سمت DC به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} i_{di_dc}^{*} &= u_{di}^{-1}\left(C_{dc_i}\tilde{v}_{dc_i} - u_{qi}i_{qi} - i_{dc_i}\right) \\ &= u_{di}^{-1}v_{dc_i}^{-1}\left(v_{dc_i}u_{dc_i} - u_{qi}v_{dc_i}i_{qi} - v_{dc_i}i_{dc_i}\right). \end{aligned} \qquad (٥٨)$$

که در آن:

$$u_{dc_i} = C_{dc_i}\tilde{v}_{dc_i}.$$

دو جمله $u_{di}\times v_{dci}$ و $u_{qi}\times v_{dci}$ در (٥٨) وجود دارند که آنها را به‌صورت زیر تخمین می‌زنند:

$$u_{di}v_{dc_i} \cong v_{di} \quad , \quad u_{qi}v_{dc_i} \cong v_{qi} = 0 \qquad (٥٩)$$

و (٥٨) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$i_{di_dc}^{*} \cong v_{di}^{-1}\left(v_{dc_i}u_{dc_i} - v_{dc_i}i_{dc_i}\right). \qquad (٦٠)$$

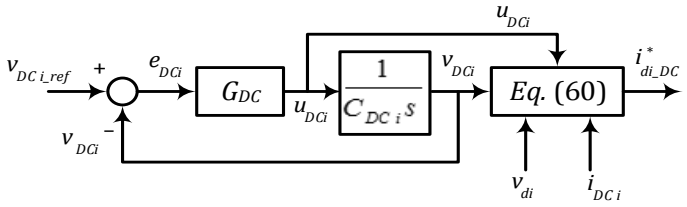
سیگنال کنترلی $i^{*}_{di_dc}$ فوق، درواقع یک مؤلفه DC است که به i_{di_ref} در سمت DC اضافه می‌شود و تغییرات ولتاژ سمت DC را جبران خواهد کرد. برای ایجاد این سیگنال کنترلی و تثبیت تغییرات غیرقطعی v_{dci}، خطای بین مقادیر ولتاژهای مرجع و اندازه‌گیری‌شده سمت DC به یک کنترل‌کننده PI (G_{dci}) به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$u_{dc_i} = k_{P dc_i}.e_{dc_i} + k_{I dc_i}.\int (e_{dc_i})dt \qquad (٦١)$$

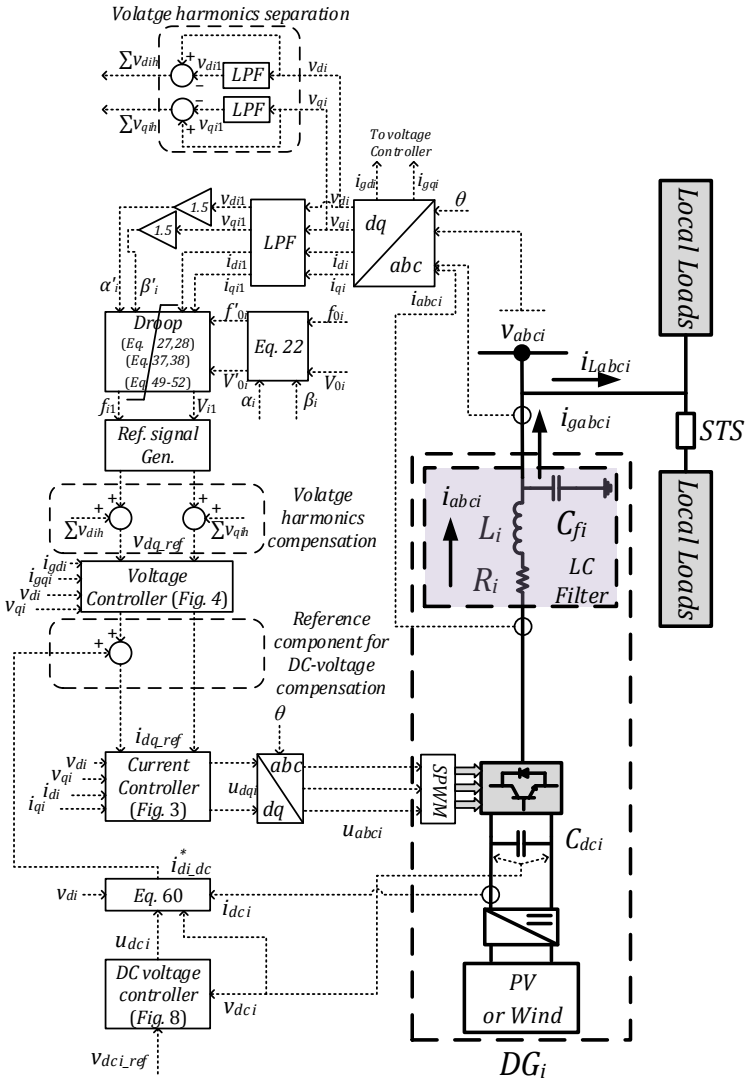
که در آن، ($e_{dci} = v_{dci_ref} - v_{dci}$) مقدار خطای یادشده است. ثابت زمانی حلقهٔ ولتاژ DC، باید بزرگ‌تر از حلقهٔ کنترل جریان باشد تا از تداخل عملکرد حلقه‌های کنترلی جلوگیری شود. شکل (٨) بلوک دیاگرام حلقهٔ کنترل ولتاژ DC ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

٤- شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور بررسی و تأیید روش کنترلی ارائه‌شده، سیستم ریزشبکه شکل (١) در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. ساختار کلی کنترل‌کنندهٔ ارائه‌شده در شکل (٩) نشان داده شده و مشخصات ریزشبکه در جدول (١) ارائه شده است.



شکل (٨): حلقهٔ کنترل ولتاژ DC و ایجاد سیگنال DC مرجع مورد نیاز



شکل (۹): کنترل‌کننده‌های محلی ارائه‌شده برای هر DG

جدول (۱): مشخصات ریزشبکه بررسی‌شده

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	۲۲۰/۳۸۰ ولت	R_{lbDGi}	۰٫۴ اهم
ولتاژ لینک DC	۹۰۰ ولت	L_{lbDGi}	۱۰ میلی هانری
فرکانس اصلی	۵۰ هرتز	R_{lDGi}	۰٫۳ اهم
فرکانس کلیدزنی	۱۰ کیلوهرتز	L_{lDGi}	۱۰ میلی هانری
R_i	۰٫۱ اهم	R_{lc}	۰٫۳ اهم
L_i	۴۵ میلی هانری	L_{lc}	۱۰ میلی هانری
C_{fi}	۱۲۰ میکروفاراد	C_{DCi}	۲۲۰۰ میکروفاراد
توان نامی	۱۵ کیلوولت‌آمپر		

روند شبیه‌سازی به این صورت در نظر گرفته شده است که ابتدا ریزشبکه در شرایط ماندگار در حال کار است و هر دو DG، بارهای ریزشبکه را تغذیه می‌کنند. سپس برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های پیشنهادی در شرایط مختلف، تغییرات تصادفی بار و تولید در دو نوع بار خطی و غیرخطی (هارمونیکی) اعمال شده‌اند. سناریوهای مد نظر عبارت‌اند از:

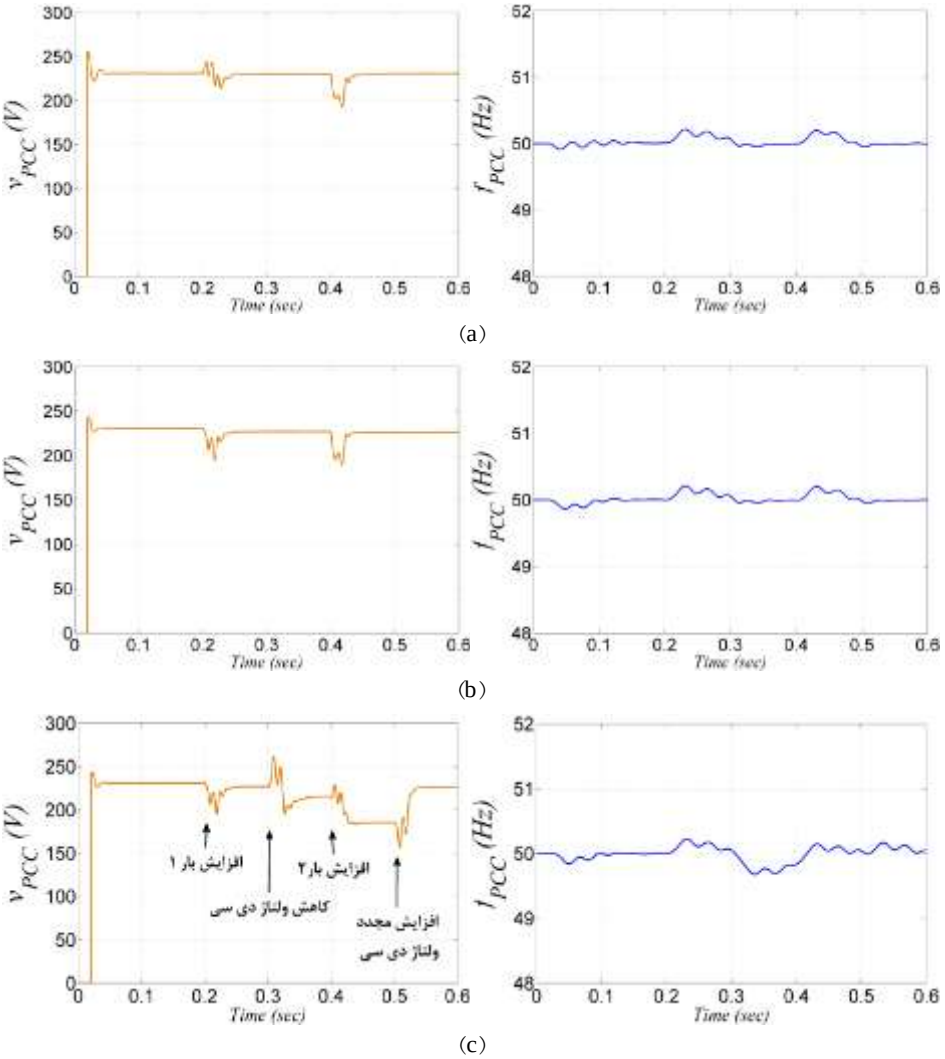
- سناریو ۱: تغییرات بار خطی در شرایط ثابت‌بودن تولید (ثابت بودن ولتاژ سمت DC)؛
- سناریو ۲: تغییرات بار غیرخطی در شرایط ثابت‌بودن ولتاژ سمت DC؛
- سناریو ۳: تغییرات بار غیرخطی در شرایط کاهش ۵۰ درصدی ولتاژ سمت DC (تغییر تولید).

هر سناریو از سه منظر تثبیت ولتاژ در نقطه PCC، هارمونیک‌های ولتاژ و تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسب میان DGها بررسی شده است. در ابتدا یک بار محلی پایه با DG ها تغذیه می‌شود. سپس تغییر بارها در دو زمان t_1=0.2 *sec* و t_2=0.4 *sec* صورت می‌گیرد که به‌ترتیب مربوط به ورود بارهای محلی و بارهای مشترک است. همچنین در هنگام تغییر ناگهانی ولتاژ سمت تولید، میزان ولتاژ DC در t_{dc1}=0.3 *sec* به میزان ۵۰٪ افت می‌کند و در t_{dc2}=0.5 *sec* به مقدار قبلی باز می‌گردد.

مقادیر نامی بارها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. فرض شده است ازنظر مقادیر نامی DGها مشکلی دربارهٔ تأمین توان اکتیو و راکتیو وجود ندارد.

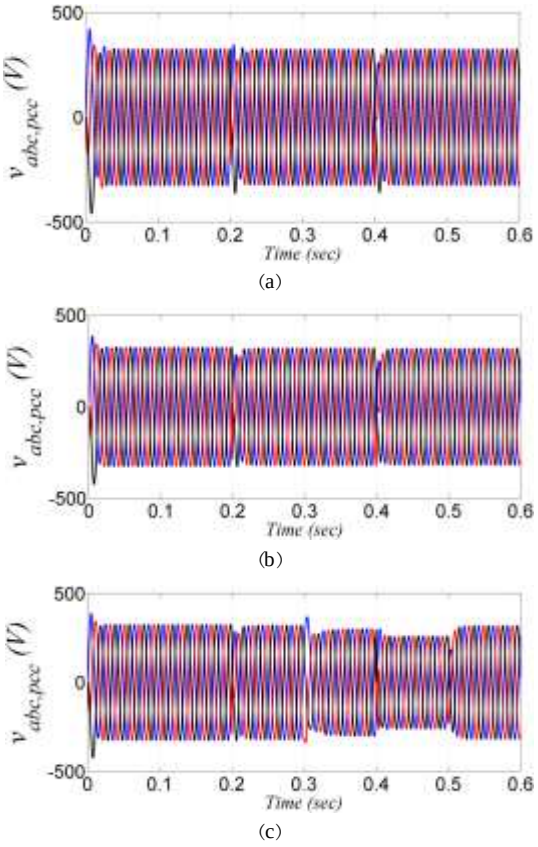
٤-١- تثبیت ولتاژ

نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده‌اند.



شکل (۱۰): تغییرات دامنه (rms) و فرکانس ولتاژ سه فاز در نقطه اتصال مشترک (PCC) (a) سناریو ۱ (b) سناریو ۲ (c) سناریو ۳

در همهٔ شبیه‌سازی‌ها، دامنهٔ ولتاژهای PCC و فرکانس آن در حد پذیرفتنی ولتاژ مرجع قرار می‌گیرد و تغییرات شایان قبولی را در طول شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین مطابق شکل (۱۱)، موج ولتاژهای PCC در همهٔ سناریوها پس از طی یک دوره گذرای بسیار کوتاه، در مقدار مطلوب حفظ شده‌اند.

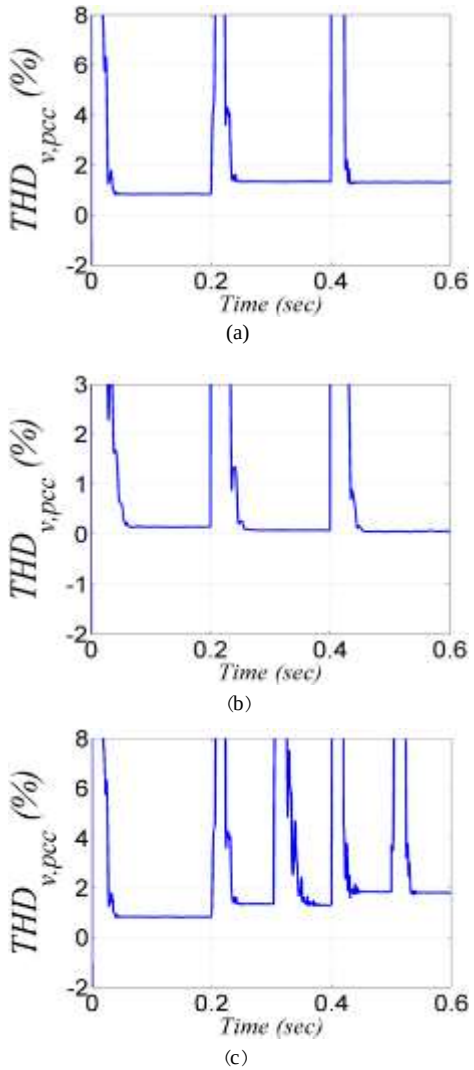


شکل (۱۱): تغییرات شکل موج ولتاژ سه فاز در نقطه اتصال مشترک (PCC) (a) سناریو ۱ (b) سناریو ۲ (c) سناریو ۳

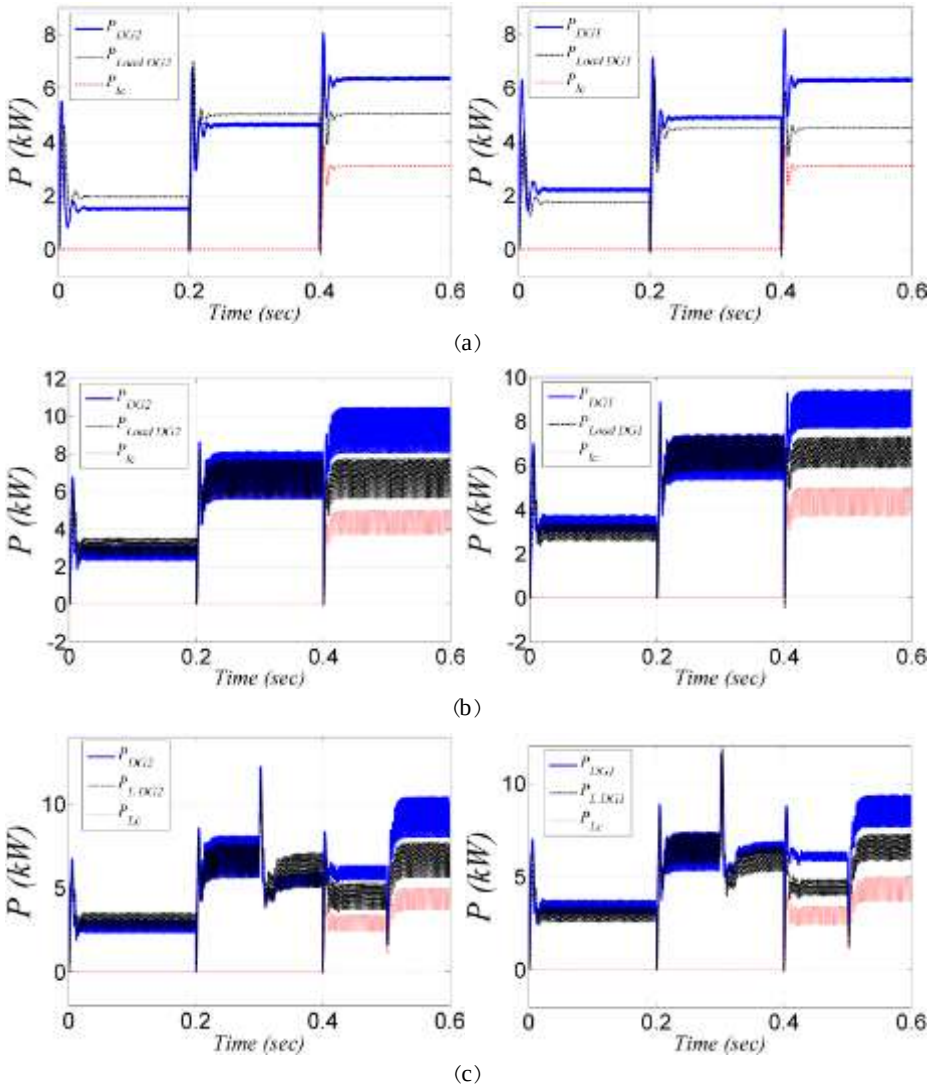
در این شکل، ولتاژهای سه فاز PCC نشان داده شده‌اند. و ازنظر هارمونیکی نیز شرایط مناسبی دارند. این شکل‌ها نشان می‌دهند تکنیک کنترل ارائه‌شده در سمت ac و dc، توانایی خوبی برای تنظیم ولتاژ DGهای ریزشبکه برای ایجاد ولتاژهای سه فاز سینوسی متعادل دارد. در سناریو دارای ولتاژ dc متغیر، ولتاژ خروجی زمانی با سیستم کنترل پیشنهادی تثبیت‌پذیر است که با وجود افت آن، مقدار توان لازم برای تغذیه بارها تأمین می‌شود. به عبارت دیگر، در صورت افت ولتاژ بیش از حد در سمت dc، عملاً توان مورد نیاز بار تأمین نمی‌شود و شاهد افت ولتاژ شدیدی خواهیم بود. این حد با توجه به شرایط محیطی محل نصب منابع تجدیدپذیر تعیین می‌شود. درواقع در این شرایط عملاً منبع انرژی تجدیدپذیر نمی‌تواند انرژی مورد نیاز بارهای ریز شبکه را تأمین کند. هرچند در هر صورت سیستم کنترلی پیشنهادی، به‌خوبی ولتاژ خروجی پایداری را ایجاد می کند، در شرایط افزایش بار در t_2=0.4 *sec*، افت ولتاژ به دلیل افت محسوس تولید و افزایش بیش از حد بار اجتناب‌ناپذیر است و باید بارگذاری کمتری برای داشتن ولتاژ مناسب در این حالت صورت گیرد.

٤-۲- هارمونیک‌های ولتاژ

شکل (۱۲) میزان THD ولتاژهای PCC را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): میزان تغییرات THD% ولتاژهای نقطه اتصال در سناریوهای مختلف (a) سناریو ۱ (b) سناریو ۲ (c) سناریو ۳



شکل (۱۳): تقسیم توان اکتیو در سناریوهای مختلف (a) سناریو ۱ (b) سناریو ۲ (c) سناریو ۳

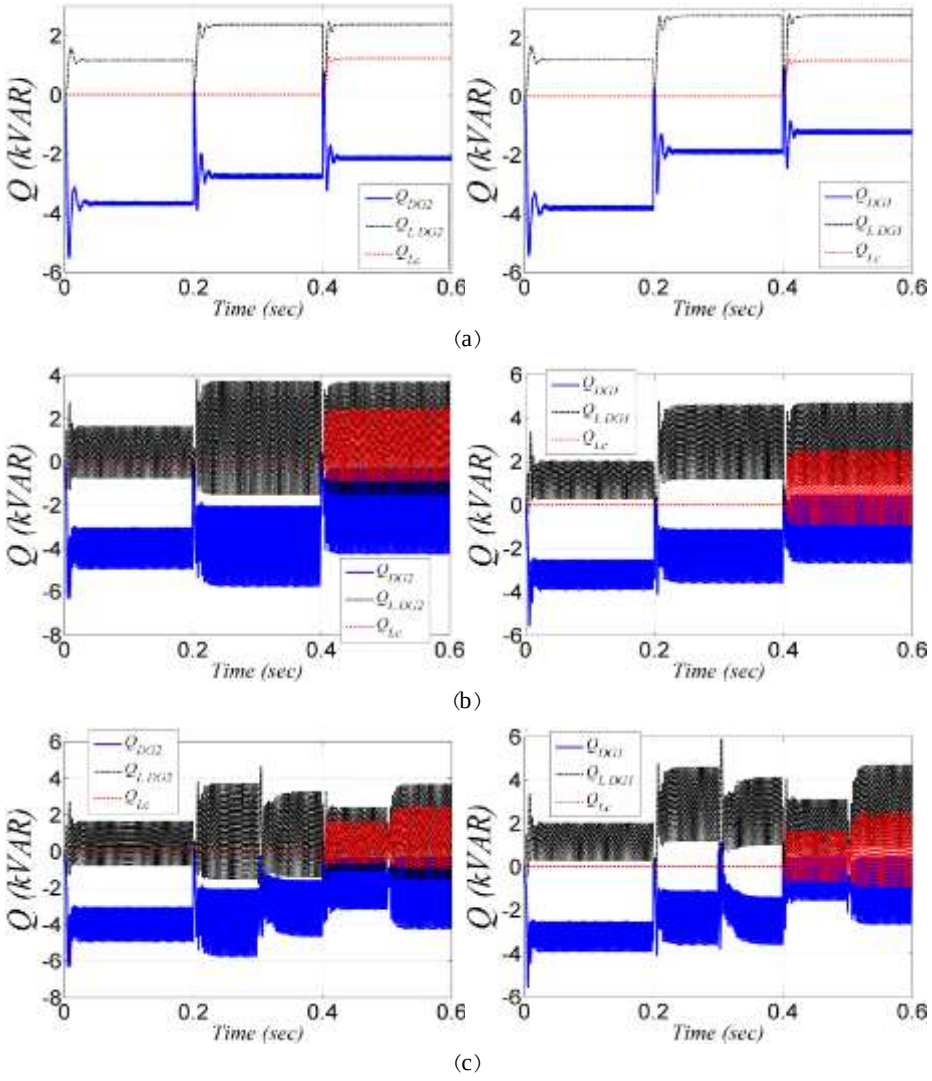
همان‌طور که در این شکل مشخص است مقادیر THD ولتاژ در بازهٔ استاندارد IEC61000-2-2 [۲۳] قرار گرفته‌اند و مقدار THD ولتاژ PCC، تقریباً تثبیت شده است و با وجود تغییر چشمگیر در مقادیر بار ریزشبکه و هارمونیک‌های آن مطابق سناریوهای شبیه‌سازی، هنوز مقدار THD در بازهٔ استاندارد حفظ شده و به عبارت دیگر، تکنیک جبران‌سازی هارمونیکی ارائه‌شده به‌خوبی عمل کرده است.

٤-۳- تقسیم توان اکتیو و راکتیو

شکل‌های (۱۳) و (١٤)، توان‌های اکتیو و راکتیو DGها را در بارهای خطی و غیرخطی ریزشبکه نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود DGها می‌توانند توان اکتیو بارهای خطی و غیرخطی محلی خود را که شامل هارمونیک اصلی و سایر هارمونیک‌هاست، در شرایط ماندگار و با زمان گذرای مناسبی تأمین کنند. از سوی دیگر، DGها توان راکتیو تولیدی با فیلتر ac را مصرف می‌کنند تا ولتاژهای PCC در مقدار مطلوب خود باقی بمانند.

پس از اینکه بار محلی در t=0.2 sec تغییر کرد، DGها با کنترل‌کننده‌های ارائه‌شده به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توان اکتیو اضافه‌شده را مطابق شکل (۱۳) تأمین کنند؛ بنابراین DGها با تعقیب مؤلفه d جریان، عملکرد مناسبی در تقسیم توان اکتیو خواهند داشت.



شکل (۱٤): تقسیم توان راکتیو در سناریوهای مختلف (a) سناریو ۱ (b) سناریو ۲ (c) سناریو ۳

توان راکتیو DGها به گونه‌ای تغییر می‌کند که در PCC ولتاژهای سینوسی داشته باشیم. با اتصال بار مشترک به PCC در t=0.4 sec، DGها به‌خوبی توان اکتیو بار را تأمین می‌کنند؛ همچنین توان راکتیو بار مشترک را نیز تأمین می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که ولتاژهای PCC در مقادیر مطلوب خود حفظ شوند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کنندهٔ چند حلقه‌ای سلسله مراتبی شامل کنترل سطح صفر، کنترل اولیه و کنترل ولتاژ DC بر اساس مدل دینامیکی ریزشبکه ارائه شده است تا دامنه ولتاژ و فرکانس آن در نقطه اتصال مشترک (PCC) تنظیم و تثبیت شود و تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسبی میان DGهای مبتنی بر اینورتر صورت گیرد. حلقه‌های کنترل جریان و ولتاژ سطح صفر برای ایجاد توابع کلیدزنی برای اینورترها و نیز ایجاد سیگنال مرجع جریان برای DGها استفاده شده‌اند. به‌منظور کامل‌شدن حلقهٔ کنترل ولتاژ، یک کنترل‌کنندهٔ دروپ بهبودیافته ارائه شده است که تأثیر بارهای غیرخطی بر ولتاژهای PCC را از میان می‌برد. در این رابطه، از جداسازی مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ PCC استفاده شده است. همچنین حدود بالا و پایین منحنی‌های دروپ ولتاژ و فرکانس با استفاده از منحنی CBCC تحلیل و محاسبه شده‌اند. به‌منظور جبران‌سازی عدم‌قطعیت تولید انرژی تجدیدپذیر و تغییرات ولتاژ لینک

DC نیز از یک حلقهٔ کنترلی اضافی استفاده شده و پایداری آن نیز بررسی شده است. بـرای بررسـی و تأییـد عملکـرد مناسـب کنتـرل‌کننـده‌هـای ارائـه‌شـده، از محـیط MATLAB/SIMULINK بـرای شـبیه‌سـازی ریزشـبکه تست استفاده شده است و نتایج، عملکرد مناسبی را نشـان می‌دهند.

مراجع

[1] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, V. de, x00F, L. G. a, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids; A General Approach Toward Standardization," Ind. Electron. IEEE Trans., Vol. 58, No. 1, pp. 158–172, 2011.

[2] A. Milczarek, M. Malinowski, and J. M. Guerrero, "Reactive Power Management in Islanded Microgrid---Proportional Power Sharing in Hierarchical Droop Control," Smart Grid, IEEE Trans., Vol. PP, No. 99, p. 1, 2015.

[3] 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," Power Electron. IEEE Trans., Vol. 23, No. 6, pp. 2806–2816, 2008.

[4] A. A. A. Radwan and Y. A. R. I. Mohamed, "Modeling, Analysis, and Stabilization of Converter-Fed AC Microgrids With High Penetration of Converter-Interfaced Loads," Smart Grid, IEEE Trans., Vol. 3, No. 3, pp. 1213–1225, 2012.

[5] E. Pouresmaeil, M. Mehrasa, and J. P. S. Catalao, "A Multifunction Control Strategy for the Stable Operation of DG Units in Smart Grids," Smart Grid, IEEE Trans., Vol. 6, No. 2, pp. 598–607, 2015.

[6] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, M. F. Akorede, B. N. Jørgensen, and J. P. S. Catalão, "Multilevel converter control approach of active power filter for harmonics elimination in electric grids," Energy, Vol. 84, pp. 722–731, 2015.

[7] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, H. Mehrjerdi, B. N. Jørgensen, and J. P. S. Catalão, "Control technique for enhancing the stable operation of distributed generation units within a microgrid," Energy Convers. Manag., Vol. 97, pp. 362–373, 2015.

[8] M. Mehrasa, M. E. Adabi, E. Pouresmaeil, and J. Adabi, "Passivity-based control technique for integration of DG resources into the power grid," Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 58, pp. 281–290, 2014.

[9] H. Hua, L. Yao, S. Yao, S. Mei, and J. M. Guerrero, "An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid," Power Electron. IEEE Trans., Vol. 30, No. 6, pp. 3133–3141, 2015.

[10] J. M. Guerrero, L. GarciadeVicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 52, No. 4, pp. 1126–1135, 2005.

[11] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, "Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No. 99. pp. 1–13, 2016.

[12] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, Rodri, x, P. guez, and I. Paper, "Control of Power Converters in AC Microgrids," Power Electron. IEEE Trans., Vol. 27, No. 11, pp. 4734–4749, 2012.

[13] Z. Wang, W. Wu, and B. Zhang, "A Distributed Quasi-Newton Method for Droop-Free Primary Frequency Control in Autonomous Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No. 99. p. 1, 2016.

[14] H. Bevrani and S. Shokoohi, "An Intelligent Droop Control for Simultaneous Voltage and Frequency Regulation in Islanded Microgrids," Smart Grid, IEEE Trans., Vol. 4, No. 3, pp. 1505–1513, 2013.

[15] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters," Power Electron. IEEE Trans., Vol. 22, No. 4, pp. 1107–1115, 2007.

[16] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach," Smart Grid, IEEE Trans., Vol. 3, No. 4, pp. 1935–1944, 2012.

[17] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids - A Novel Approach," Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 29, No. 2. pp. 1018–1031, 2014.

[18] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid," Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 3, No. 2. pp. 797–807, 2012.

[19] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. John Wiley & Sons, 2010.

[20] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, B. N. Jørgensen, and J. P. S. Catalão, "A control plan for the stable operation of microgrids during grid-connected and islanded modes," Electr. Power Syst. Res., Vol. 129, pp. 10–22, Dec. 2015.

[21] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std 1547-2003, pp. 0_1–16, 2003.

[22] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J. M. Guerrero, "Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 1. pp. 200–215, 2016.

[23] IEC. Standard, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances

and signalling in public low-voltage power supply systems," IEC 61000-2-2, 2002.

[24] H. Hosseini Kordkheili, and M. Banejad, "Modified local voltage controller design of inverter-based DGs in a microgrid", 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016), Feb. 2016.

[25] F. Jamshidi, M. M. Ghanbarian, " Robust Frequency Control of Islanded Microgrids: ICA-Based FFOPID Control Approach," Computational Intelligence in Elec. Eng., Vol. 8, No. 1, pp. 51–62, 2017.

[1] Microgrid
[2] Distributed Generation
[3] Droop
[4] Passivity
[5] Current-based Capacity Curve