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

Hadi Hosseini Kordkheili<sup>1</sup>, Mahdi Banejad<sup>2</sup>, Ali Akbarzadeh Kalat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical Engineering and Robotics, Shahrood University of Technology,

Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Faculty of Electrical Engineering and Robotics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup> 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.

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 چندحلقه ای سلسله مراتبی برای یک ریز شبکه <sup>۱</sup> دارای منابع تولید پراکنده (<sup>T</sup>DG) تجدید پذیر به منظور کنترل ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) و تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسب ارائه شده است. از حلقه های جریان و ولتاژ براساس مدل دینامیکی ریز شبکه استفاده شده است تا سیگنال های کلیدزنی مناسب برای اینور ترهای هر DG تولید شود و سیگنال مرجع جریان برای هر DG به وجود آید. همچنین یک کنترلکننده دروپ<sup>۳</sup> اصلاح شده ارائه شده است تا عملکرد حلقهٔ کنترل ولتاژ را بهبود دهد. برای بهبود عملکرد دینامیکی کنترل کنندهٔ ارائه شده در هنگام تأمین توان لازم برای بارهای هارمونیکی، مؤلفه های هارمونیکی ولتاژ را بهبود دهد. برای بهبود عملکرد همچنین حدود بالا و پایین دروپهای دامنهٔ ولتاژ و فرکانس با استفاده از منحنی های ظرفیت هر DG تحلیل شده اند. تأثیر عدمقطعیت تولید توان در مولدهای تجدید پذیر بر تغییرات ولتاژ لینک DC نیز با افزودن یک حلقه کنترل اضافی در ساختار سلسله مراتبی جبران شده است. توان در مولدهای تجدید پذیر بر تغییرات ولتاژ لینک DC نیز با افزودن یک حلقه کنترل اضافی در ساختار سلسله مراتبی جبران شده است. ارائهٔ ساختار کنترلی چندهدفه یاد شده در کنار کنترل دروپ مبتنی بر منحنی های ظرفیت هر DG تحلیل شده اند. تأثیر عدمقطعیت تولید نیز با افزودن یک حلقه کنترل اضافی در ساختار ساین مقاله به شمار می روند. نیز با افزودن یک حلقه کنترل اضافی در ساحین مراتبی میتنی بر منحنی های ظرفیت، از نوآوری های اصلی این مقاله به شمار می ارائهٔ ساختار کنترلی چندهدفه یاد شده در کنار کنترل دروپ مبتنی بر منحنی های ظرفیت، از نوآوری های اصلی این مقاله به شمار می روند. نتایج شبیه سازی در محیط MATLAB/SIMULINK نشان می دهند روش ارائه شده عملکرد مناسبی را در حالتهای ماندگار و گذرا در

**واژههای کلیدی:** ریزشبکه، کنترل اولیه، حلقههای کنترل داخلی، کنترل دروپ، کنترل سلسله مراتبی، منحفیهای 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.

- نام نویسندهٔ مسئول: مهدی بانژاد
- نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران شاهرود دانشگاه صنعتی شاهرود
  - –دانشکدهٔ مهندسی برق و رباتیک کدپستی ۳٦۱۹۹۹۵۱٦۱

قابلیت مهم این ساختار جدید، امکان بهرهبرداری بهصورت سیستم کنترلپذیر مستقل و مجزا از شبکه اصلی است [۱] که با توسعهٔ استفاده از مبدل های 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.

ا تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹٦/۱۲/۰٦

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 پایین تر تولید میکند. این سطوح سلسله مراتبی عبارتاند از: کنترل سطح صفر (حلقه های کنترل داخلی)، کنترل اولیه، کنترل ثانویه و کنترل ثالثیه [۱، ۲]. حلقه های کنترل سطح صفر و کنترل اولیه کنترل کننده های محلی به شمار می روند که برای هر DG در نظر گرفته می شوند.

در کنترل سطح صفر، تنظیم ولت اژ و جریان خروجی انجام می گیرد و دو حلقهٔ کنترل ولت اژ و جریان را شامل می شود. مقادیر مرجع برای جریان های خروجی اینورتر، با کنترل کنندهٔ ولتاژ فراهم می شود. همچنین فرمان ولت اژ ورودی به PWM در اینورتر با کنترل کنندهٔ جریان آماده می شود. ورودی کنترل کنندهٔ ولتاژ، مقادیر مرجع دامنهٔ ولتاژ و فرکانس اند که با اندازه گیری های محلی و با مشخصه های دروپ تولید می شوند [۳، ٤]؛ حتی می توان قسمتی از کنترل کننده محلی را با سایر انواع کنترل کننده ما ماند کنترل کننده های مبتنی بر روش لیاپانوف مستقیم [٥، ٦] یا روش مبتنی بر پسیویتی<sup>3</sup> [۷، ۸] جایگزین کرد که البت ه در مطالعات انجام شده، ساختار استفاده شده به صورت ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفته نشده است.

روش کنترل مبتنی بر منحنی های افتی یا دروپ در سطح کنترل اولیه استفاده می شوند تا تقسیم توان مناسبی میان DGهای موازی مبتنی بر اینورتر صورت گیرد. از ویژگی های 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 توسعه یافته 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 [۱۵، ۱۵]، کنتـرل دروپ تعمـیمیافتـه در DGهـای مبتنی بر اینورتر ارائه شده است. برای کنترل توانهای اکتیو و راکتیو بهصورت مستقل از یکدیگر، معـادلات دروپ بـا عنوان دروپ تعمیمیافته اصلاح شدهاند.

روش های کنترل هوشمند نیز به جای کنترل دروپ استفاده شدهاند [۱۶، ۲۹، ۲۵]. در [۱٤] از کنترلر ANFIS به جای دروپ تعمیم یافته استفاده شده و نتایج مناسبی به ویژه ازنظر عملکرد مقاوم آن به دست آمده است. در [۱7] کنترلکنندهٔ فرکانس با استفاده از کنترلکنندهٔ IP آنلاین ارائه شده است که با استفاده از یک الگوریتم فازی-PSO تنظیم می شود. همین موضوع در [۲۵] با استفاده از کنترلکنندهٔ ID مرتبه کسری فازی بهینه شده صورت گرفته است.

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

سطح کنترل ثانویه، نسبت به کنترل اولیه، حلقهٔ کنترلی بیرونی ریزشبکه به شمار می رود. از این سطح برای جبران نوسانات ولتاژ و فرکانس ناشی از عملکرد سطوح کنترلی اولیه استفاده می شود و به هر دو صورت متمرکز یا توزیع شده پیاده می شود [14].

در [۲٤]، مؤلفان این مقاله قسمتی از یافته های خود را ارائه کردهاند؛ اما در آن به موارد مربوط به تحلیل حالتهای ماندگار و دینامیکی و درنتیجه، تعیین حدود منحنی های 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<sup>°</sup>) 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 منحنی های دروپ، منحنی بیضی شکل *F*-۷ به دست آمده است. علاوه بر ایس، با جداسازی اولیه هارمونیکهای ولتاژ و استفاده مجدد از آنها در فرآیند تولید مرجع ولتاژ برای کنترلکننده ولتاژ، عملکرد دینامیکیکنترلکننده ارائه شده در شرایط اتصال بارهای هارمونیکی به شبکه بهبود یافته است. تغییرات ولتاژ لینک DC که به دلیل عدمقطعیت تولید در DGهای نجدیدپذیر به وجود میآیند، با استفاده از یک حلقهٔ کنترلی اضافه شده در ساختار سلسله مراتبی، جبران و پایداری آن بررسی شدهاند. درنهایت، کنترلرهای طراحی شده در محیط یکی از روش ها مقایسه شده اند. ارائه ساختار کنترلی چندهدفه یادشده در کنار کنترل دروپ مبتنی بر منحنی های طرفیت، از نوآوری های اصلی این مقاله به شمار می روند.

۲ – مدل ریز شبکه مطالعه شده

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

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 به صورت ذیل نوشته می شود:



شکل (۱): دیاگرام تکخطی ریزشبکه مطالعه شده

٤٨ کنترل ولتاژ چندحلقهای سلسله مراتبی بهبودیافته بر اساس کنترل دروپ برای منابع تولید پراکنده مبتنی بر ...

۳-۱- حلقه های کنترل سطح صفر سطح کنترل صفر یا به عبارت دیگر، حلقه های کنترل داخلی، قلب ساختار کنترل سلسله مراتبی ریزشبکه را تشکیل می دهند. این بخش از دو حلقهٔ کنترل جریان و کنترل ولتاژ تشکیل می شود [۱۹].

ولتاژ و جریان خروجی اینورتر باید سیگنالهای مرجعی را تعقیب کند که این سیگنالها به وسیلهٔ کنترلکننده های جریان و ولتاژ به وجود می آیند. به عبارت دیگر، کنترلکننده ولتاژ، سیگنالهای مرجع ورودی به کنترلکنندهٔ جریان را ایجاد میکنند. این ساختار سلسله مراتبی برای دستیابی به الزامات کنترلی ریز شبکه 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 معادل و و بسته به یکدیگرند؛ بنابراین برای جداسازی کامل این دو معادله و کنترل مستقل جریانهای *b* و *p* ، 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 عمکر است یک فروجهش شایان دو مشکل، از جبرانسازی پیش خور استفاده می شود. تابع کلیدزنی معادل با استفاده از روابط (۲) و (۳)، به شرح ذیل محاسبه می شود:

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

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

$$u_{di} = -v_{dci}^{-1} \left( m_{di} - \omega L_i i_{qi} + v_{di} \right)$$
(9)

$$u_{qi} = -v_{dci}^{-1} \left( m_{qi} + \omega L_i \dot{i}_{di} + v_{qi} \right)$$
 (1.)

$$\begin{split} L_{i} \, di_{ki} / dt + R_{i} i_{ki} + u_{ki} v_{dc_{i}} + v_{ki} &= 0 \\ C_{fi} \, dv_{ki} / dt &= i_{fki} \\ C_{dci} \, dv_{dci} / dt \\ &- (u_{ai} i_{ai} + u_{bi} i_{bi} + u_{ci} i_{ci}) - i_{dci} = 0 \end{split} \tag{1}$$



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 می گذارد؛ بنابراین طراحی سیستم کنترل در چارچوب گردان dq یکی از روش های استفاده شده برای رفع این وابستگی است. در واقع تمامی کمیت ها پیش از ورود به سیستم کنترلی، با تبدیل abc/dq [۱۹] به مقادیر DC تبدیل می شوند و درنتیجه، فرآیند طراحی کنترلکننده تسهیل خواهد شد. با این رویکرد، معادلات دینامیکی را در چارچوب گردان *dq* بازنویسی می کنیم:

$$L_{i} di_{di} / dt + R_{i} i_{di} - \omega L_{i} i_{qi} + v_{di} + u_{di} v_{dci} = 0$$
 (Y)

$$L_{i} di_{qi} / dt + R_{i} i_{qi} + \omega L_{i} i_{di} + v_{qi} + u_{qi} v_{dci} = 0 \qquad (\Upsilon)$$

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

$$C_{fi} dv_{qi}/dt + \omega C_{fi} v_{di} - i_{fqi} = 0$$
 (6)

$$C_{dci} \, dv_{dci} / dt - u_{di} i_{di} - u_{qi} i_{qi} - i_{dci} = 0 \tag{7}$$

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.

کنترلکنندهٔ تناسبی ⊣نتگرالی (G<sub>dqi</sub>) بــا ضــرایب ا*k<sub>Idi</sub> ik<sub>Pdi</sub> ب* <sub>kPqi</sub> و <sub>kIqi</sub> به دست میآیند:

$$m_{di} = k_{Pdi} \cdot e_{di} + k_{Idi} \cdot \int e_{di} dt \tag{11}$$

$$m_{qi} = k_{Pqi} \cdot e_{dq} + k_{Iqi} \cdot \int e_{qi} dt \tag{11}$$

که در آن ( $e_{qi}=i_{di\_ref} - i_{qi}$ ) و ( $e_{di}=i_{di\_ref} - i_{di}$ ) خطاهای بین مقادیر جریان های مرجع ( $i_{dqi\_ref}$ ) و اندازه گیری شده ( $i_{dqi}$ ) هر DG هستند.

از فیلتر پیش خور (F<sub>Fdq</sub>) با پهنای باند نسبتاً بزرگ نیز استفاده شده است. یک تابع تبدیل پیشنهادی برای این فیلتر، (1+6<sup>-6</sup>s+1) F<sub>Fdq</sub> است که به خوبی اغتشاشات ورودی (یعنی V<sub>dqi</sub> در کنترل کننده جریان و i<sub>gdqi</sub> در کنترل کننده ولتاژ) را کاهش می دهد و مشکلات ذکرشده در ابتدای این بخش را به خوبی برطرف می کند [19].



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



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

از مدل فضای حالت مبتنی بر ولتـاژ در (٤) و (٥) و شـكل  
(۲)، جریانهای 
$$i_{dqi}$$
 برابر روابط ذیل محاسبه میشوند:  
 $i_{di} = i_{fdi} + i_{gdi} = C_{fi} \frac{dv_{di}}{dt} - \omega C_{fi} v_{qi} + i_{gdi}$  (۱۳)

میزان تزریق تـوان اکتیـو و راکتیـو هـر DG بـا تغییـر سیگنالهای مرجع جریان، تغییر مییاید. این سیگنالها بـا استفاده از یک کنترلکنندهٔ ولتاژ تولید تغییرپذیرند. با استفاده

$$i_{qi} = i_{fqi} + i_{gqi} = C_{fi} \frac{dv_{qi}}{dt} + \omega C_{fi} v_{di} + i_{gqi}$$
(12)

در اینجا نیز از روش مجزاسازی مشابه با کنتـرلکننـدهٔ جریان استفاده میشود که در آن ورودیهای کنترلـی  $n_d$  و  $n_q$  برای کنترل ولتاژ خروجی استفاده میشوند:

$$i_{di\_ref} = n_{di} - \omega C_{fi} v_{qi} + i_{gdi} \tag{10}$$

$$i_{qi_ref} = n_{qi} + \omega C_{fi} v_{di} + i_{gqi} \tag{11}$$

همانند حلقهٔ کنترل جریان، در اینجا نیـز سـیگنالهـای کنترلـی n<sub>di</sub> و n<sub>qi</sub> از دو کنتـرلکننـدهٔ تناسـبی – انتگرالـی (G<sub>vdqi</sub>) بـا ضـرایب k<sub>Ivdi</sub> k<sub>Ivdi</sub> k<sub>Ivdi</sub> بـه دسـت میآیند:

$$n_{di} = k_{Pvdi} \cdot e_{vdi} + k_{Ivdi} \cdot \int e_{vdi} dt \qquad (1\vee)$$

$$n_{qi} = k_{Pvqi} \cdot e_{vqi} + k_{Ivqi} \cdot \int e_{vqi} dt \tag{1A}$$

که (e<sub>vdi</sub>= v<sub>di\_ref</sub> - v<sub>qi</sub>) و (e<sub>vdi</sub>= v<sub>di\_ref</sub> - v<sub>di</sub>) خطاهای بین مقادیر ولتاژهای مرجع (v<sub>dqi\_ref</sub>) و اندازه گیریشـده (v<sub>dqi</sub>) 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 کنترلکننده های محلی هر DG کامل شوند. برای این کار، یک کنترلکنندهٔ اولیه مبتنی بر دروپ استفاده خواهد شد.

### ۳-۲- کنترل اولیه

تغییرات ولتـاژ بـا کمـک تقسیم تـوان مناسب میـان DGهای ریزشبکه تثبیت میشوند که معمولاً با اسـتفاده از روش کنترل دروپ در سطح کنترل اولیه انجام میشود. معادلات مرسـوم دروپ (*P-f*) و (*v-Q*) در هارمونیـک اصلی ولتاژ به شرح ذیلاند:

- $f_{i1} = f_{0i} \alpha_i (P_{i1} P_{0i1}) \tag{19}$
- $v_{i1} = v_{0i} \beta_i (Q_{i1} Q_{0i1}) \tag{(1.1)}$

که در آن،  $V_{i1} e I_{i1}$  دامنه و فرکانس سیگنال مرجع ولتاژ هستند که به عنوان ورودی مرجع برای حلقه های کنترلی داخلی استفاده می شوند. سیگنال های  $V_{0i}$  و  $f_{0i}$ , مقادیر مرجع کنترل کنندهٔ اولیه به شمار می روند. همچنین پارامترهای  $\alpha_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب دروپ و  $I_{0i}$ ,  $I_{0i}$  و  $I_{0i}$  و  $I_{0i}$  به ترتیب  $\beta_i$  ضرایب دروپ و توان های مرجع هر واحد DG در توان های خروجی و توان های مرجع هر واحد DG در فرکانس اصلی اند. روابط (۱۹) و (۲۰) را به صورت ذیل بازنویسی می شوند:

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

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

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

$$P_i = 1.5 \times (v_{di} \dot{i}_{di} + v_{ai} \dot{i}_{ai}) \tag{(YY)}$$

$$Q_i = 1.5 \times (v_{qi} i_{di} - v_{di} i_{qi}) \tag{75}$$

با هم جهت در نظر گرفتن بردار مرجع ولتاژ و محور d، مؤلفه q ولتاژ صفر می شود و درنتیجه، تـوانهـای اکتیـو و راکتیو DGها در شرایط ماندگار و شرایط دینامیکی به شرح ذیل به دست می آیند:

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

$$P_i = 1.5 v_{di} \dot{i}_{di}$$
 ,  $Q_i = -1.5 v_{di} \dot{i}_{qi}$  (17)

با در نظر گرفتن (۲۵)، (۲٦) و جاگذاری (۲٦) 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:

$$f_{i1} = f_{0i}' - \alpha_i' i_{di1} \tag{YV}$$

$$v_{i1} = v'_{0i} + \beta'_i i_{qi1} \tag{YA}$$

 هوش محاسباتی در مهندسی برق، سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۹۲

$$U_{di}^{*} = -V_{dc_{i}}^{*-1}(R_{i}I_{di}^{*} - \omega L_{i}I_{qi}^{*} + V_{di}^{*})$$
(YYY)

$$U_{qi}^{*} = -V_{dc_{i}}^{*-1}(R_{i}I_{qi}^{*} + \omega L_{i}I_{di}^{*})$$
(٣٤)

$$I_{di}^{*2} + I_{qi}^{*2} + \frac{V_{di}^{*}}{R_{i}} I_{di}^{*} - \frac{V_{dc_{i}}^{*} I_{dc_{i}}^{*}}{R_{i}} = 0$$
 (Yo)

 $x^{2}+y^{2}+Dx+F=0$  که معادله یک دایـره بـا فـرم کلـی (h, k) = (-D/2, -k) است. در این رابطه، مرکز دایره از رابطه  $r^{2}=h^{2}+k^{2}-F$  بـه دسـت E/2 و شعاع دایـره (r) از رابطـه  $r^{2}=h^{2}+k^{2}-F$  بـه دسـت میآیند. بر اساس این، مقادیر h k و r عبارتاند از:

$$(h,k) = \left(-\frac{V_{di}^{*}}{2R_{i}},0\right)$$

$$r = (0.5R_{i}^{-1})\sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}}$$
(m)

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 می گیرد. شکل (٦) نمونهای از CBCC حالت ماندگار را نشان می دهد.

همان طور که در این شکل مشخص است چهار کمیت جریان، حدود کنترلی بالا و پایین منحنی های دروپ قبلی اند که از معادله دایره به دست می آیند و به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$I_{di_{max}}^{*} = 0.5R_{i}^{-1}(-\left|V_{di}^{*}\right| + \sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}})$$

$$I_{i}^{*} = -0.5R_{i}^{-1}(\left|V_{i}^{*}\right|)$$
(YV)

$$+ \sqrt{(V_{di}^*)^2 + 4R_i V_{dc_i}^* I_{dc_i}^*})$$

$$I_{q_{i}_{max}}^{*} = 0.5R_{i}^{-1}\sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}}$$

$$I_{q_{i}_{min}}^{*} = -0.5R_{i}^{-1}\sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}}$$
(YA)



## شکل (۵): منحنی های 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.

در شرایط ماندگار، نقط و کار سیستم، همان مقادیر مرجعاند که با سیستم کنترل تعیین می شوند. با وجود این، نیاز به مؤلفه های هارمونیکی جریان ها 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 چشم پوشی است؛ بنابراین میزان زمانی این تغییرات در چارچوب dq برابر صفر خواهد بود: (۲۹)

که <sup>\*</sup> X یکی از مقادیر مرجع ولتاژ یا جریان است. با توجه به (۲)، (۳) و (۲۹)، معادلات حالـت مانـدگار بهصورت زیر بدست میآید:

$$R_{i}I_{di}^{*} - \omega L_{i}I_{qi}^{*} + V_{di}^{*} + U_{di}^{*}V_{dc_{i}}^{*} = 0 \qquad (\Upsilon \cdot)$$

$$R_i I_{qi}^* + \omega L_i I_{di}^* + V_{qi}^* + U_{qi}^* V_{dc_i}^* = 0$$
 (۳۱)  
رابطه (٦) نیز در حالت ماندگار بازنویسی می شود:

$$U_{di}^{*}I_{di}^{*} + U_{qi}^{*}I_{qi}^{*} + I_{dci}^{*} = 0$$
 (mg)

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

٥٢ 👘 كنترل ولتاژ چندحلقهای سلسله مراتبی بهبودیافته بر اساس كنترل دروپ برای منابع تولید پراكنده مبتنی بر ...

$$Af_{i}^{2} + Bv_{i1}^{2} + Df_{i} + Ev_{i1} + F = 0$$
 (2°)

$$A = \alpha_i^{\prime - 2} \qquad , \qquad B = \beta_i^{\prime - 2} \qquad (\mathfrak{t} \mathfrak{t})$$

$$D = -2\alpha_i'^{-2} f_{0i}' - 2\alpha_i'^{-2} \Delta f_{i1} - R_i^{-1} V_{di}^* \alpha_i'^{-1}$$
 (20)

$$E = -2\beta_i'^{-2}v_{0i}' - 2\beta_i'^{-2}\Delta v_{i1}$$
(£7)

$$F = \alpha_i'^{-2} (f_{0i}' + \Delta f_{i1})^2 + \beta_i'^{-2} (v_{0i}' + \Delta v_{i1})^2 + R_i^{-1} V_{di}^* \alpha_i'^{-1} (f_{0i}' + \Delta f_{i1}) - R_i^{-1} V_{dc_i}^* I_{dc_i}^* = 0$$
(£V)

رابطــه (۵۳)، معادلــه یــک بیضــی بــا فــرم کلــی  $Ax^2+By^2+Dx+Ey+F=0$  است. مرکـز ایـن بیضـی نقطـه  $d_I=\mu.a$  آن  $(x_0, y_0) = (-D/2A, -E/2B)$  $d_2=\mu.b$  هستند که بهصورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{pmatrix} x_{0} \\ y_{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f'_{0i} + \Delta f_{i1} + 0.5R_{i}^{-1}\alpha'_{i}V_{di}^{*} \\ v'_{0i} + \Delta v_{i1} \end{pmatrix}$$

$$a = \alpha'_{i} , \quad b = \beta'_{i}$$

$$\mu = 0.5R_{i}^{-1}\sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}}$$

$$(\xi\Lambda)$$

$$\begin{aligned} f_{i_{-\max}^{*}}^{*} &= \frac{d_{i}/2}{2} + x_{0} = f_{0i}' + \Delta f_{i1} \\ &+ 0.5 R_{i}^{-1} \alpha_{i}' \Big[ 0.5 \sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4 R_{i} V_{dc_{i}}^{*} I_{dc_{i}}^{*}} + \left| V_{di}^{*} \right| \Big] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{i_{\min}^*}^* &= -(\frac{d_{2}}{2} - x_0) = f_{0i}' + \Delta f_{i1} \\ &- 0.5 R_i^{-1} \alpha_i' \Big[ 0.5 \sqrt{(V_{di}^*)^2 + 4R_i V_{dc_i}^* I_{dc_i}^*} + \left| V_{di}^* \right| \Big] \end{aligned}$$

$$v_{i_{\perp}\max}^{*} = \frac{d_{2}}{2} + y_{0} = v_{0i}' + \Delta v_{i1} + 0.5R_{i}^{-1}\beta_{i}' \left[ 0.5\sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}} \right]$$
(01)

$$v_{i_{min}}^{*} = -(\frac{d_{2}}{2} - y_{0}) = v_{0i}^{\prime} + \Delta v_{i1} - 0.5 R_{i}^{-1} \beta_{i}^{\prime} \left[ 0.5 \sqrt{(V_{di}^{*})^{2} + 4R_{i} V_{dc_{i}}^{*} I_{dc_{i}}^{*}} \right]$$
(6Y)



شکل (۱): منحنی ظرفیت مبتنی بر جریان (CBCC) یک DG در شرایط ماندگار

یک تغییر کوچک در جریانهای DG (ناشی از تغییرات در بار یا تولید)، ایجاد یک تغییر جریان در معادلات چارچوب dq را موجب می شود که این تغییرات را با Δi<sub>di1</sub> و Δi<sub>di1</sub> نشان می دهیم. این تغییرات درواقع انجراف جریانها نسبت به حالت ماندگارند که به صورت زیر نشان داده می شوند:

 $i_{di1} = I_{di1}^* + \Delta i_{di1}, \quad i_{qi1} = I_{qi1}^* + \Delta i_{qi1}$  (۳۹) که در آن  $I_{dqi1}$  و  $I_{dqi1}^*$  بهترتیب جریانهای DG در دو حالت دینامیکی و ماندگارنـد. بـا اسـتفاده از (۲۷)، (۲۸) و (۳۹)، معادلات زیر به دست میآیند:

$$I_{di1}^* = i_{di1} - \Delta i_{di1} = \alpha_i^{\prime -1} (f_{0i}^{\prime} - f_i + \Delta f_{i1}) \qquad (\mathfrak{t} \cdot)$$

$$I_{qi1}^{*} = i_{qi1} - \Delta i_{qi1} = -\beta_{i}^{\prime - 1}(v_{0i}^{\prime} - v_{i1} + \Delta v_{i1})$$
(£1)

که در آنها، *fil∆ و vil*۵، بهترتیب انحرافات فرکانس و ولتاژ در نقطه PCC بر اساس مؤلفه هارمونیکی اصلیاند. با قراردادن (٤٠) و (٤١) در (٣٥)، رابطهٔ بین فرکانس و دامنـهٔ ولتاژ بهصورت زیر به دست میآید:

$$\begin{aligned} &\alpha_{i}^{\prime -2}(f_{0i}^{\prime}-f_{i}+\varDelta f_{i})^{2}+\beta_{i}^{\prime -2}(v_{0i}^{\prime}-v_{i1}+\varDelta v_{i1})^{2}\\ &+R_{i}^{-1}V_{di}^{*}\alpha_{i}^{\prime -1}(f_{0i}^{\prime}-f_{i}+\varDelta f_{i})-R_{i}^{-1}V_{dc_{i}}^{*}I_{dc_{i}}^{*}=0 \end{aligned} \tag{$\Sigma^{*}$}$$

۳–٥– هارمونیکهای ولتاژ خروجی در ریزشبکه به سبب اینکه کنترلکننده دروپ ارائه شده در فرکانس اصلی به دست آمده است، باید مؤلفههای هارمونیکی مختلف ولتاژهای PCC در حلقهٔ ولتاژ، محاسبه و در نظر گرفته شوند؛ بنابراین مؤلفههای *b* و *p* ولتاژهای PCC به صورت زیر نوشته می شوند:

$$v_{dqi} = V_{dqi} + \sum_{h=2}^{\infty} v_{dqi_h} \tag{67}$$

که در آن، V<sub>dqi</sub>l و Σv<sub>dqi</sub>l، بهترتیب ولتاژهای مؤلفههای فرکانس اصلی و مجموع سایر مؤلفههای هارمونیکی ولتاژ در چارچوب dp در نقطـه PCC هستند. ایـن مجمـوع ولتاژهای هارمونیکی باید با کنتـرلکننـدهٔ محلـی هـر DG جبران شود. جمله مربوط به مجموع ولتاژهای هارمونیکی با استفاده از یک فیلتر پایینگـذر (LPF) از مـوج اصلی استخراج میشود:

$$\sum_{h=2}^{\infty} v_{dqi_h} = (1 - LPF) v_{dqi}$$
 (02)

که LPF یک فیلتر پایین گذر برای استخراج مؤلفه هارمونیک اصلی ولتاژهای Vdqi است. برای کاهش اثر بارهای غیرخطی که در اثر آنها نیز ولتاژهای PCC دچار اعوجاجات هارمونیکی می شوند، رابطه (٥٤) مطابق شکل (٩) به حلقهٔ کنترل ولتاژ اضافه می شود.

DC در نظر گرفتن تغییرات ولت اژ 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 DC در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، ولتاژ خازن DC (یعنی *vdci*)، 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.



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 به گونهای 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 جابه جایی 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 به مقادیر کمتری برای ولتاژ و فرکانس منجر می شود که به مقادیر کمتری برای ولتاژ و فرکانس منجر می شود که پذیرفتنی نیست.

از معـادلات (٦)، (۷) و (۸) و بــا در نظــر گــرفتن *شرح* ذیل بـه، دست میآیند:

$$C_{dc_{i}}\widetilde{v}_{dc_{i}} = i_{dc_{i}} - v_{dc_{i}}^{-1}L_{i}\left(\widetilde{i}_{di}^{2} + \widetilde{i}_{qi}^{2}\right) - v_{dc_{i}}^{-1}R_{i}\left(i_{di}^{2} + i_{qi}^{2}\right) - v_{dc_{i}}^{-1}\left(v_{di}i_{di} + v_{qi}i_{qi}\right)$$

$$(00)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{dc_i}}{dt} &= \frac{M_i v_{dc_i} + N_i}{C_{dc_i} v_{dc_i}} \\ &= \frac{v_{dc_i} i_{dc_i} - v_{di} i_{di} - L_i \left(\tilde{i}_{di}^2 + \tilde{i}_{qi}^2\right) - R_i \left(i_{di}^2 + i_{qi}^2\right)}{C_i \cdot v_i}. \end{aligned}$$
(07)

$$\begin{split} M_{i} &= i_{dc_{i}} \\ N_{i} &= -v_{di}i_{di} - L_{i}\big(\tilde{t}_{di}^{2} + \tilde{t}_{qi}^{2}\big) - R_{i}\big(\dot{t}_{di}^{2} + i_{qi}^{2}\big) \\ \text{ (Inder the equation of t$$

$$v_{dq} \dot{i}_{dq} = v_{di} \dot{i}_{di} + R_i \left( \dot{i}_{di}^2 + i_{qi}^2 \right)$$
 (ov)

در این معادله مشخص است تعادل توان در شرایط دینامیک صفر نیز حفظ می شود و سیستم ما در صورت جبران تغییرات دینامیکی، عملکرد پایداری خواهد داشت. از (٦)، یک سیگنال کنترلی جبرانکننده برای i<sub>di</sub> ، با استفاده از حلقهٔ کنترل ولتاژ خازن سمت DC به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$i_{di_{-}dc}^{*} = u_{di}^{-1} \left( C_{dc_{i}} \widetilde{v}_{dc_{i}} - u_{qi} i_{qi} - i_{dc_{i}} \right)$$
  
$$= u_{di}^{-1} v_{dc_{i}}^{-1} \left( v_{dc_{i}} u_{dc_{i}} - u_{qi} v_{dc_{i}} i_{qi} - v_{dc_{i}} i_{dc_{i}} \right)$$
 (0A)



شکل (۸): حلقهٔ کنترل ولتاژ DC و ایجاد سیگنال DC مرجع مورد نیاز

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

دو جمله v<sub>dci</sub> × v<sub>dci</sub> و u<sub>qi</sub> × v<sub>dci</sub> در (۵۸) وجود دارند که آنها را بهصورت زیر تخمین میزنند:

$$u_{di}v_{dc_i} \cong v_{di} \qquad , \qquad u_{qi}v_{dc_i} \cong v_{qi} = 0 \qquad (09)$$

و (۵۸) به صورت زیر بازنویسی می شوند:

$$\dot{i}_{di\_dc}^{*} \cong v_{d_{i}}^{-1} \Big( v_{dc_{i}} u_{dc_{i}} - v_{dc_{i}} \dot{i}_{dc_{i}} \Big)$$
(\.)

DC سیگنال کنترلی  $i^*_{di\_dc}$  فوق، درواقع یک مؤلف م است که به  $i_{di\_ref}$  در سمت DC اضافه می شود و تغییـرات ولتاژ سمت DC را جبران خواهد کـرد. بـرای ایجـاد ایـن سیگنال کنترلی و تثبیت تغییرات غیرقطعی  $v_{dci}$ ، خطای بین مقادیر ولتاژهای مرجع و اندازه گیری شده سمت DC به یک کنترل کننده PI (G<sub>dci</sub>) به صورت زیر داده می شود:

$$u_{dc_i} = k_{Pdc_i} \cdot e_{dc_i} + k_{Idc_i} \cdot \int (e_{dc_i}) dt$$
 (71)

که در آن، (edi\_ref - vdi\_ref) مقدار خطای یادشده است. ثابت زمانی حلقهٔ ولتاژ DC، باید بزرگتر از حلقه کنترل جریان باشد تا از تداخل عملکرد حلقه های کنترلی جلوگیری شود. شکل (۸) بلوک دیاگرام حلقهٔ کنترل ولتاژ DC ارائه شده را نشان می دهد.

به منظور بررسی و تأیید روش کنترلی ارائه شده، سیستم ریز شبکه شکل (۱) در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شده است. ساختار کلی کنترل کنندهٔ ارائه شده در شکل (۹) نشان داده شده و مشخصات ریز شبکه در جدول (۱) ارائه شده است.





روند شبیه سازی به این صورت در نظر گرفته شده است که ابتدا ریز شبکه در شرایط ماندگار در حال کار است و هر دو DG، بارهای ریز شبکه را تغذیه می کنند. سپس برای بررسی عملکرد کنترل کننده های پیشنهادی در شرایط مختلف، تغییرات تصادفی بار و تولید در دو نوع بار خطی و غیر خطی (هارمونیکی) اعمال شده اند. سناریوهای مد نظر عبارت اند از:

- سناریو ۱: تغییرات بار خطی در شرایط ثابت بودن
   تولید (ثابت بودن ولتاژ سمت DC)؛
- سناریو ۲: تغییرات بار غیرخطی در شرایط
   ثابت بودن ولتاژ سمت DC؛
- سناريو ٣: تغييرات بار غير خطى در شرايط كاهش
   ٥٠ درصدى ولتاژ سمت DC (تغيير توليد).

جدول (۱): مشخصات ریزشبکه بررسی شده

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
٤٠ اهم	R <sub>lbDGi</sub>	۲۲۰/۳۸۰ ولت	ولتاژ نامى
۱۰ میلی هانری	$L_{lbDGi}$	۹۰۰ ولت	ولتاژ لينک
			DC
۳۰ اهم	R <sub>IDGi</sub>	٥٠ هرتز	فركانس اصلى
۱۰ میلی هانری	L <sub>IDGi</sub>	۱۰ کیلوهرتز	فركانس
			كليدزنى
۳۰ اهم	$R_{lc}$	۱,۱ اهم	$R_i$
۱۰ میلی هانری	$L_{lc}$	٤٥ ميلي هانري	$L_i$
77			
	$C_{DCi}$	۱۲۰ ميکروفاراد	$C_{fi}$
ميكروفاراد	C DCi		5/1
		۱۵ کیلوولتآمپر	توان نامي

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 با DG ها تغذیه میشود. سپس تغییر بارها در دو زمان مربوط به ورود بارهای محلی و بارهای مشترک است. همچنین در هنگام تغییر ناگهانی ولتاژ سمت تولید، میزان

ولتاژ DC در t<sub>dc1</sub>=0.3 sec به میزان ۵۰٪ افت میکند و در t<sub>dc2</sub>=0.5 sec به مقدار قبلی باز میگردد.

مقادیر نامی بارها در جدول (۱) ارائه شدهاند. فـرض شده است ازنظر مقادیر نامی DGها مشکلی دربـارهٔ تـأمین توان اکتیو و راکتیو وجود ندارد.

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



می کند، در شرایط افزایش بار در t2=0.4 sec، افت ولتاژ

به دلیل افت محسوس تولید و افزایش بیش از حد بار اجتناب نایذیر است و باید بارگذاری کمتری برای داشتن

ولتاژ مناسب در این حالت صورت گیرد.

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



شكل (١١): تغييرات شكل 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 دارنـد. ایـن شکل ها نشان می دهند تکنیک کنترل ارائه شده در سمت ac و dc، توانایی خوبی برای تنظیم ولتاژ DGهای ریزشبکه برای ایجاد ولتاژهای سه فاز سینوسی متعادل دارد. در سناريو داراي ولتاژ dc متغير، ولتاژ خروجي زماني با سيستم كنترل ييشنهادي تثبيت يذير است كه با وجود افت آن، مقدار توان لازم برای تغذیه بارها تأمین می شود. به عبارت دیگر، در صورت افت ولتاژ بیش از حد در سمت dc، عملاً توان مورد نیاز بار تأمین نمی شود 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 نمی تواند انرژی مورد نیاز بارهای ریز شبکه را تأمین کنـد. هرچنـد در هـر صـورت سیسـتم کنترلی پیشنهادی، به خوبی ولتاژ خروجی پایداری را ایجاد



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

THD همان طور که در این شکل مشخص است مقادیر THD ولتاژ در بازهٔ استاندارد 2-2-IEC61000 [۳۳] قرار گرفته اند و مقدار THD ولتاژ PCC، تقریباً تثبیت شده است و با وجود تغییر چشمگیر در مقادیر بار ریزشبکه و هارمونیکهای آن مطابق سناریوهای شبیه سازی، هنوز مقدار THD در بازهٔ استاندارد حفظ شده و به عبارت دیگر، تکنیک جبران سازی هارمونیکی ارائه شده به خوبی عمل کرده است.

# ٤–۳– تقسیم توان اکتیو و راکتیو

شکلهای (۱۳) و (۱٤)، توانهای اکتیو و راکتیو DGها را در بارهای خطی و غیرخطی ریزشبکه نشان میدهد.

همان طور که مشاهده می شود DGها می توانند توان اکتیو بارهای خطی و غیرخطی محلی خود را که شامل هارمونیک اصلی و سایر هارمونیک هاست، در شرایط ماندگار و با زمان گذرای مناسبی تأمین کنند. از سوی دیگر، DGها توان راکتیو تولیدی با فیلتر ac را مصرف می کنند 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 می شوند کـه توان اکتیو اضافهشـده را مطـابق شـکل (۱۳) تـأمین کننـد؛ 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، توان اکتیو بار را تأمین میکنند؛ همچنین توان راکتیو بار مشترک را نیز تأمین میکنند؛ به گونهای که ولتاژهای PCC در مقادیر مطلوب خود حفظ شوند.

# ٥- نتيجه گيري

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. حلقه های کنترل جریان و ولتاژ سطح صفر برای ایجاد توابع کلیدزنی برای اینورترها و نیز ایجاد سیگنال مرجع جریان برای DGها استفاده شدهاند. به منظور کامل شدن حلقهٔ کنترل ولتاژ، یک کنترل کنندهٔ دروپ بهبودیافته ارائه شده است که تأثیر بارهای غیرخطی بر ولتاژهای PCC را از میان می برد. در این رابطه، از جداسازی مؤلف های هارمونیکی ولتاژ منحنی های دروپ ولتاژ و فرکانس با استفاده از منحنی منحنی های دروپ ولتاژ و فرکانس با استفاده از منحنی عدمقطعیت تولید انرژی تجدیدپذیر و تغییرات ولتاژ لینک

۲۰ 👘 کنترل ولتاژ چندحلقهای سلسله مراتبی بهبودیافته بر اساس کنترل دروپ برای منابع تولید پراکنده مبتنی بر ...

- [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

DC نیز از یک حلقهٔ کنترلی اضافی استفاده شده و پایداری آن نیز بررسی شده است. برای بررسی و تأیید عملکرد مناسب کنترلکننده های ارائه شده، از محیط MATLAB/SIMULINK برای شبیه سازی ریزشبکه تست استفاده شده است و نتایج، عملکرد مناسبی را نشان می دهند.

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.

[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. 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.

<sup>1</sup> Microgrid

- <sup>2</sup> Distributed Generation
- <sup>3</sup> Droop
- <sup>4</sup> Passivity
- <sup>s</sup> Current-based Capacity Curve