

کنترل متوسط‌گیری ثانویه توزیع‌شده زمان محدود برای تنظیم ولتاژ و تقسیم توان ریزشکده‌های AC

محمدجواد بابایی^۱ محمد رضوانی^۲ عبدالرضا نوری شیرازی^۳ برزو یوسفی^۴

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور- نور- ایران
mjavad1988@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور- نور- ایران
Mohammad.Rezvani@iau.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور- نور- ایران
a_noorishirazi@iaunour.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور- نور- ایران
b_yousefi@iaunour.ac.ir

چکیده: این مقاله یک ساختار کنترل سلسله مراتبی مناسب متشکل از یک کنترل‌کننده اکتیو بهبودیافته در سطح اولیه و یک کنترل‌کننده متوسط‌گیری زمان محدود توزیع‌شده در سطح ثانویه را پیشنهاد می‌دهد. هدف این مقاله دستیابی به تقسیم توان اکتیو و راکتیو دقیق و تنظیم فرکانس ولتاژ در یک ریزشکده AC جزیره‌ای می‌باشد. به منظور انجام این کار، یک ریزشکده AC نوعی در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده و روش پیشنهادی مدل‌سازی و به کار گرفته شده است. در ریزشکده شبیه‌سازی شده، واحدهای DG مبتنی بر فتوولتائیک هستند. نتایج به دست آمده از به‌کارگیری روش پیشنهادی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حالت‌های بهره‌برداری مختلف نظیر تغییر بار، افزایش یا کاهش توان خروجی واحدهای DG و همچنین قطع و وصل این واحدها، به‌طور مناسبی توان را میان واحدهای تولید پراکنده موجود تقسیم می‌کند. همچنین، فرکانس و ولتاژ این واحدها به مقادیر نامی به‌دقت بازیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تقسیم توان، تنظیم فرکانس/ولتاژ، ریزشکده AC، زمان محدود، کنترل‌کننده اکتیو بهبودیافته، کنترل‌کننده ثانویه توزیع‌شده

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.2724

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد رضوانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - نور - ابتدای جاده نور به چمستان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

تعریف مفهوم ریزشبکه‌ها^۱ (MG)، چالش‌ها و موضوعات جدیدی خصوصاً در کنترل آن‌ها مطرح شد. از آنجایی که MG شامل واحدهای تولید پراکنده^۲ (DG)، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۳ (ESS)، بارهای مختلف و ... می‌شود، یک استراتژی کنترلی مناسب برای دستیابی به تقسیم توان میان واحدهای DG، تنظیم متغیرهایی نظیر ولتاژ و فرکانس و افزایش کیفیت توان مورد نیاز می‌باشد. به‌منظور دستیابی به این اهداف و استفاده از حداکثر ظرفیت DGها، استراتژی کنترلی سلسله مراتبی در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۱].

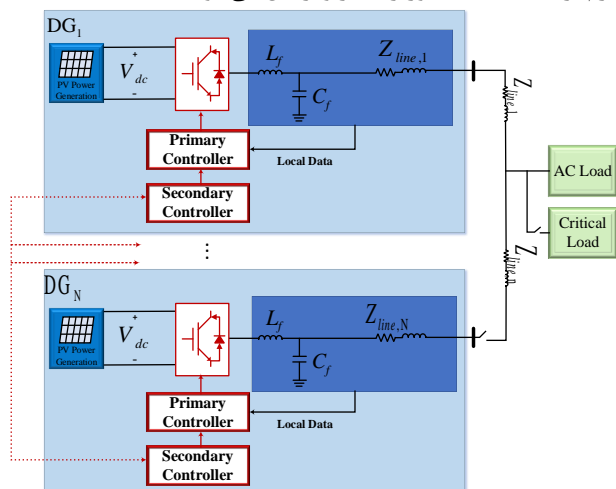
تحقیقات بسیاری از روش کنترل افقی سنتی در سطح اولیه استفاده کرده‌اند. باین‌حال، به دلیل امپدانس نابرابر خط، کارایی این روش کاهش می‌یابد [۲]. برای غلبه بر معایب روش افقی سنتی، مطالعات بسیاری استراتژی‌های کنترلی افقی بهبود یافته را پیشنهاد کرده‌اند [۳-۱۱۲]. در مرجع [۳]، روشی پیشنهاد شده که تقسیم توان دقیق حین قطع شبکه ارتباطی را تضمین می‌کند اما اگر حین قطع شبکه ارتباطی، تغییر باری رخ دهد دقت تقسیم توان کاهش خواهد یافت. استراتژی کنترل افقی مقاوم بهبودیافته دیگری بر اساس کنترل امپدانس مجازی در مرجع [۴] ارائه شده است. این استراتژی در برابر تغییرات پله‌ای بار مقاوم است. همچنین، یک کنترل‌کننده مقاوم برای بهبود پایداری ولتاژ در [۵] پیشنهاد شده که از اسیلاتور داخلی برای کنترل فرکانس و کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی^۴ (PI) کلاسیک برای کنترل ولتاژ استفاده می‌کند. در مرجع [۶]، یک استراتژی سیستمی برای AC MG پیشنهاد شده است. این روش یک محدوده و مقدار بهینه امپدانس مجازی در روش کنترل افقی را تعریف می‌کند که برحسب پروفیل ولتاژ، تقسیم توان راکتیو، میرایی سیستم و تزویج توان عملکرد مناسبی دارد. نویسندگان مرجع [۷]، یک روش محلی در یک MG جزیره‌ای را برای تقسیم توان راکتیو بهتر پیشنهاد داده‌اند. طبق روش آن‌ها، با اعمال یک ترم توان راکتیو گذرا به منحنی افقی فرکانس، یک اغتشاش در توان اکتیو خروجی DG ایجاد می‌شود. این اغتشاش برای تعیین خطای تقسیم توان راکتیو به کار گرفته می‌شود. همچنین، برای حذف خطا و اصلاح منحنی توان راکتیو-ولتاژ، یک حلقه کنترل انتگرالی نیز در نظر گرفته می‌شود. روش پیشنهادی آن‌ها می‌تواند تقسیم توان میان DGها را اصلاح کند. یک استراتژی با ترکیب روش‌های افقی و ارباب برده در مرجع [۸] برای AC MG جزیره‌ای پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر افقی که می‌تواند به تقسیم توان دقیق میان اینورترهای ارباب دست یابد به عنوان کنترل‌کننده ارباب MG نیز عمل می‌کند. به‌علاوه، بازیابی فرکانس و ولتاژ نیز به دست می‌آید. در مرجع [۹]، یک استراتژی کنترلی سلسله مراتبی در نظر گرفته شده است که در آن یک کنترل‌کننده با دو حلقه و یک کنترل‌کننده ولتاژ تطبیقی مستقل از مدل با استخراج داده‌ها در سطح اولیه دربرگرفته شده است؛ سطح کنترل ثانویه ولتاژ و فرکانس را

بازیابی می‌کند. طرح کنترل افقی اصلاح یافته دیگری در مرجع [۱۰] مبتنی بر تابع نمایی به کارگرفته شده است تا به دست تقسیم توان میان AC DG های یک MG ترکیبی دست یابد. روش پیشنهادی آن‌ها ساده و تنظیم ولتاژ و فرکانس خوبی داد. در مرجع [۱۱]، یک استراتژی کنترل افقی متشکل از آنالیز پایداری لیاپانوف، تبدیل قاب مرجع و تکنیک کنترلی افقی DC بهبود یافته در AC MG جزیره‌ای ارائه شده است. این روش توان را بدون تغییر فرکانس و دامنه ولتاژ شین میان DGها تقسیم می‌کند. نویسندگان در مرجع [۱۲] با استفاده از روش کنترل ردیاب بهینه، یک کنترل‌کننده یکپارچه برای لایه کنترل اولیه معرفی کرده‌اند که به هدف کنترل جریان و ولتاژ دست‌یافته‌اند، اما در مورد تقسیم توان بحثی صورت نگرفته است.

اگرچه کنترل‌کننده‌های اولیه مذکور توانسته‌اند به تقسیم توان یا تنظیم ولتاژ/فرکانس بهتری در مقایسه با کنترل افقی سنتی دست یابند، هنوز مشکل تنظیم دقیق ولتاژ/فرکانس و کیفیت توان وجود دارد. در نتیجه، نیاز است تا یک روش کنترلی در سطح ثانویه DGها به کار گرفته شود. اخیراً محققان از روش‌های توزیع‌شده برای دست‌یابی به قابلیت اطمینان بالا با استفاده از یک شبکه ارتباطی کم حجم استفاده کرده‌اند [۱۳، ۱۴]. یک روش کنترل ثانویه مبتنی بر شبکه ارتباطی با پهنای باند کم^۵ (LBC) در مرجع [۱۵] برای توزیع توان بار میان DGهای یک AC MG جزیره‌ای ارائه کرده‌اند. یک طرح کنترل تمام توزیع‌شده در مرجع [۱۶] به کار گرفته شده است. این روش کنترلی از ماژول تنظیم‌کننده ولتاژ، ماژول تنظیم‌کننده توان راکتیو و ماژول تنظیم‌کننده توان اکتیو/فرکانس تشکیل شده است. در مرجع [۱۷]، یک روش کنترل ثانویه توزیع‌شده مبتنی بر اجماع PI پیشنهاد شده است. طرح ثانویه توزیع‌شده مبتنی بر اجماع دیگری در مرجع [۱۸] پیشنهاد شده که در حقیقت یک استراتژی کنترلی رویداد محور^۶ می‌باشد. این روش می‌تواند فرکانس به‌روزرسانی کنترل‌کننده را در مقایسه با کنترل فیدبک زمان پیوسته کاهش دهد. نویسندگان مرجع [۱۹]، یک کنترل‌کننده ثانویه تمام توزیع‌شده مبتنی بر اجماع و عامل ناسالم‌کننده^۷ پیشنهاد کرده‌اند. کنترل‌کننده پیشنهادی آن‌ها تنظیم ولتاژ و تقسیم توان راکتیو را تضمین می‌کند. در مرجع [۲۰]، یک روش کنترل ولتاژ و فرکانس ثانویه مشارکتی جدید معرفی شده است. تکنیک کنترل مشارکتی خوشه محور در مرجع [۲۱] برای ساختار خوشه‌ای چند MG ارائه شده است. هدف این روش، تقسیم توان بین خوشه‌های MG و تنظیم ولتاژ و فرکانس در هر خوشه MG می‌باشد. کنترل‌کننده توزیع‌شده مشارکتی دیگری در مرجع [۲۲] مطالعه شده که به تقسیم توان مناسب و تنظیم ولتاژ و فرکانس در یک MG ترکیبی دست می‌یابد.

اغلب مراجع مذکور از پروتکل خطی استفاده کرده‌اند که نرخ همگرایی را کاهش می‌دهد. برای غلبه بر این مشکل، روش‌های مبتنی بر زمان محدود مورد توجه قرارگرفته‌اند [۲۳-۲۸]. یک روش کنترل پیش‌بین مدل مجموعه کنترل محدود در مرجع [۲۳] برای حالت‌های

کنترل‌کننده اولیه ارسال شده و سپس، با استفاده از آن‌ها فرمان‌های لازم برای کلیدهای اینورتر صادر و ارسال می‌شوند.



شکل (۱): شماتیک کلی ریزشبه به همراه لایه‌های کنترلی

۳- کنترل‌کننده‌های اولیه و ثانویه

۳-۱- کنترل‌کننده اولیه مبتنی بر افتی بهبودیافته
معادلات کنترل افتی سنتی که در تحقیقات مختلف نیز مورد استفاده قرار گرفته است را می‌توان در مختصات dq به صورت زیر بیان کرد [۲۹].

$$\begin{cases} v_{od} = V_{od_n} - n_Q \cdot Q \\ v_{oq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega = \omega_n - m_p \cdot P \quad (2)$$

که در روابط بالا، V_{od_n} و ω_n به ترتیب ولتاژ و فرکانس زاویه‌ای نامی هستند؛ P و Q توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده می‌باشند؛ n_Q و m_p ضرایب افتی بوده و به صورت $\frac{\Delta V}{Q_{ref}}$ و

$$\frac{\Delta f}{P_{ref}}$$
 به دست می‌آیند. ω و V_{od} نیز مقادیر مرجع هستند.

در این روش، به سبب اختلاف امپدانس فیدرها و اختلاف در مقدار و محل بارها، دقت مناسبی در تقسیم توان به دست نمی‌آید. در مرجع [۲]، یک افت توان راکتیو-ولتاژ بهبودیافته با استفاده از ترم ولتاژ نامی خودتنظیم شونده به صورت زیر تعریف شده است:

$$v_{od} = V_{od_n - m} - n_Q \cdot Q \quad (3)$$

که در آن، $V_{od_n - m}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{od_n - m} = \alpha \cdot V_{od_n} \quad (4)$$

که در این رابطه، α به صورت نسبت $\frac{\beta + v_{od_{pu}}}{\beta + \omega_{pu}}$ تعریف می‌شود

(β پارامتر تنظیم)؛ و $v_{od_{pu}} = \frac{v_{od}}{V_{od_n}}$ می‌باشد. شماتیک کلی

متصل به شبکه و جزیره‌ای نشان داده شده است. هدف کنترلی در حالت متصل به شبکه تقسیم توان میان DG ها و هدف کنترلی در حالت جزیره‌ای تنظیم ولتاژ و فرکانس می‌باشد. روش کنترل ثانویه زمان محدود چند تابعی توسط مرجع [۲۴] به کار گرفته شده است. این استراتژی شامل کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده مبتنی بر اجماع و مبتنی بر عامل ناسالم‌کننده برای مصالحه میان بازیابی ولتاژ و تقسیم توان راکتیو و تنظیم فرکانس و تقسیم توان اکتیو در زمان محدود می‌شود. در مرجع [۲۵]، روش کنترل ثانویه مبتنی بر عامل زمان محدود جدیدی برای ESS‌های یک AC MG جزیره‌ای پیشنهاد شده است. نویسندگان مرجع [۲۶] یک استراتژی کنترل زمان محدود مبتنی بر رؤیت گر توزیع‌شده جدیدی معرفی کرده‌اند که می‌تواند تاب‌آوری MG در برابر حملات را افزایش دهد. اثبات شده که استراتژی آن‌ها سرعت همگرایی ولتاژ و فرکانس را افزایش می‌دهد. کنترل ثانویه زمان محدود توزیع‌شده مبتنی بر رویداد محور در مرجع [۲۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. این استراتژی ضمن تضمین تقسیم توان اکتیو و راکتیو، به‌طور مؤثری ولتاژ و فرکانس را نیز تنظیم می‌کند. نویسندگان مرجع [۲۸]، کنترل‌کننده ولتاژ ثانویه زمان محدود مقاوم مبتنی بر اجماع توزیع‌شده را بررسی کرده‌اند. این استراتژی به اطلاع پیشین از عدم قطعیت و مدل دینامیکی غیرخطی MG نیاز ندارد.

اگرچه تحقیقات مورد مطالعه قرار گرفته عملکرد قابل قبولی داشته‌اند، هیچ تحقیقی به‌طور هم‌زمان تقسیم توان، تنظیم ولتاژ/فرکانس، سرعت بالای همگرایی، کاهش اضافه جهش و تزریق اغتشاش را در نظر نگرفته است. در نتیجه، این پژوهش یک تکنیک کنترلی توزیع‌شده مشارکتی زمان محدود برای تنظیم متغیرها و تقسیم توان اکتیو و راکتیو ارائه می‌دهد. استراتژی زمان محدود عملکرد MG را با بهبود عملکرد کنترل‌کننده مقابل اغتشاشاتی مانند قطع و وصل DG بهتر می‌کند. این روش همچنین اضافه جهش گذرا را کاهش و زمان نشست را نیز کمتر می‌کند.

ادامه این مقاله به این صورت نوشته شده است: در بخش دوم، شمای کلی ریزشبه ارائه می‌گردد. در بخش سوم، استراتژی کنترل اولیه در ابتدا ارائه می‌شود و سپس کنترل‌کننده زمان محدود فرمول نویسی می‌شود. مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک در بخش چهارم توضیح داده می‌شود. در بخش پنجم، نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و مقایسه‌های انجام شده ارائه می‌گردد. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- شمای کلی ریزشبه مورد مطالعه

پیش از ارائه روش کنترلی، در ابتدا شمای کلی ریزشبه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، اطلاعات مربوط به هر واحد DG در ابتدا به کنترل‌کننده اولیه فرستاده می‌شود و اطلاعات مربوط به واحدهای مجاور به کنترل‌کننده‌های ثانویه ارسال می‌گردد. مقدار مرجع تولیدی از کنترل‌کننده ثانویه به

کنترل‌کننده ثانویه زمان محدود توزیع‌شده برای دستیابی به این اهداف پیشنهاد می‌شود.

در ابتدا، برای بلوک کنترل ولتاژ زمان محدود توزیع‌شده، معادلات زیر به‌منظور تنظیم ولتاژ و توان راکتیو به کار گرفته می‌شوند.

$$v_{od_i}(t) = \int_0^t \sum_{j \in N} w_{ij} (v_{od_j}(\tau) - v_{od_i}(\tau)) d\tau \quad (7)$$

$$Q_i(t) = \int_0^t \sum_{j \in N} c_i w_{ij} \left(\frac{Q_j(\tau)}{Q_j^{max}} - \frac{Q_i(\tau)}{Q_i^{max}} \right) d\tau \quad (8)$$

که در آن، w_{ij} و c_i به ترتیب مجموعه واحدهای مجاور، یال وزن‌دار بین واحدهای i ام و j ام و ضریب تزویج مورد نظر می‌باشند.

برای عامل i ام سیستم، اصول کنترل‌کننده طراحی‌شده زمان محدود عبارت است از:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = y_i(t) \\ \dot{y}_i(t) = Au_i(t) \end{cases} \quad (9)$$

که در آن، A یک ماتریس مطلقاً مثبت است. بنابراین، معادله زیر با مشتق‌گیری از رابطه (۱) و جایگذاری در رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$\dot{v}_{od}^* = \int (u_i^{od} - n_Q u_i^Q) \quad (10)$$

که در آن، $u_i^{V_{od}} = \dot{v}_{od}$ و $u_i^Q = \dot{Q}$ هستند. هدف اصلی این روش رسیدن به $u_i^{V_{od}}$ و u_i^Q به‌عنوان فیدبک است تا بتوان سرعت همگرایی را افزایش داد.

تقسیم توان راکتیو و تنظیم ولتاژ مناسب برای هر واحد باید در یک زمان محدود به‌صورت زیر همگرا می‌شود:

$$\lim_{x \rightarrow t_{V_{od}}^*} |v_{od_i}(t) - V_{od_n}| = 0, \quad v_{od_i}(t) = V_{od_n} \quad \forall t \geq t_{V_{od}}^* \quad (11)$$

$$\lim_{x \rightarrow t_Q^*} \left| \frac{Q_j(t)}{Q_j^{max}} - \frac{Q_i(t)}{Q_i^{max}} \right| = 0, \quad \frac{Q_i(t)}{Q_i^{max}} = \frac{Q_j(t)}{Q_j^{max}} \quad \forall t \geq t_Q^* \quad (12)$$

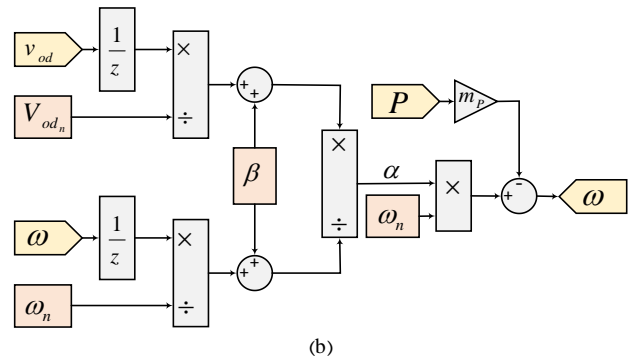
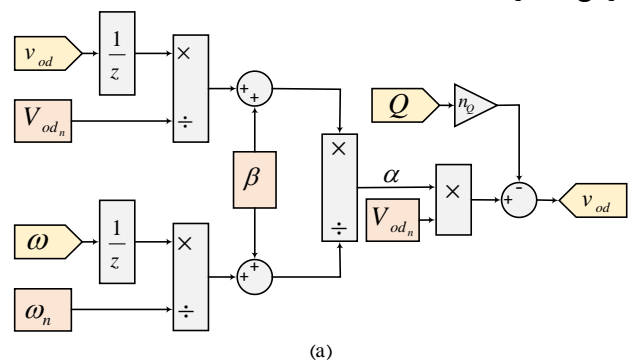
دو معادله (۱۱) و (۱۲) ذاتاً در تضاد با همدیگر هستند؛ معمولاً تنظیم ولتاژ نیز به تقسیم توان ترجیح داده می‌شود. به‌علاوه، رابطه (۷) را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$\dot{v}_{od_i}(t) = sat_{\sigma_v} \left[\sum_{j \in N} w_{ij} (v_{od_j}(t) - v_{od_i}(t)) \right] \quad (13)$$

که در آن sat_{σ_v} به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف شده و برای کاهش پدیده چترینگ^۱ و همچنین کاهش اغتشاشات غیرمعمول و اضافه جهش در نظر گرفته می‌شود.

$$sat_{\sigma} = \begin{cases} x, & \text{if } |x| \leq \sigma \\ \sigma \text{ sign}(x), & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

در شکل (۲) (a) نشان داده شده است (برای جزئیات بیشتر مرجع [۲] را ببینید).



شکل (۲): (a) دیاگرام کنترل افقی Q-V اصلاحی [۲]، (b) دیاگرام کنترل افقی P-f اصلاحی

به سبب اختلاف موجود در امیدانس فیدرها، با به‌کارگیری کنترل افقی مرسوم لازم است که مصالحه‌ای میان تقسیم توان اکتیو و تنظیم فرکانس در نظر گرفته شود. در این مقاله افت توان اکتیو-فرکانس بهبودیافته با الهام از روش پیشنهادی مرجع [۲] ارائه می‌شود تا ضمن تقسیم توان مناسب، تنظیم فرکانس نیز تضمین شود. ترم فرکانس نامی خود تنظیم‌شونده را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$\omega = \omega_{n-m} - m_P . P \quad (5)$$

که در آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_{n-m} = \alpha . \omega_n \quad (6)$$

شماتیک کلی در شکل (۲) (b) نشان داده شده است.

۳-۲- کنترل‌کننده ثانویه توزیع‌شده

اگرچه کنترل‌کننده افقی بهبودیافته می‌تواند به تقسیم توان بهتری دست یابد، با این حال، هنوز خطای تقسیم توان بزرگ بوده و همچنین ناتوان در بازیابی ولتاژ به مقدار نامی است. از این‌رو، نیاز است که یک کنترل‌کننده ثانویه مناسب به‌منظور تنظیم ولتاژ و تقسیم توان مقبول اتخاذ گردد. در اینجا، یک

دیاگرام به دست آمده کلی مربوط به استراتژی کنترل V-Q در شکل (۳) ترسیم شده است.

سیس، برای بلوک کنترل فرکانس زمان محدود توزیع‌شده، معادلات زیر برای تنظیم ولتاژ و تقسیم توان تعریف می‌شوند:

$$\omega_i(t) = \int_0^t \sum_{j \in N} w_{ij} (\omega_j(\tau) - \omega_i(\tau)) d\tau \quad (29)$$

$$P_i(t) = \int_0^t \sum_{j \in N} c_j w_{ij} \left(\frac{P_j(\tau)}{P_j^{max}} - \frac{P_i(\tau)}{P_i^{max}} \right) d\tau \quad (30)$$

سیس، معادله زیر را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه (۲) و جایگذاری در رابطه (۹) به دست آورد.

$$\dot{\omega}^* = \int (u_i^\omega - m_p u_i^p) \quad (31)$$

که در آن، $u_i^p = \dot{P}$ و $u_i^\omega = \dot{\omega}$ می‌باشد. در اینجا، هدف دستیابی به u_i^p و u_i^ω به‌عنوان فیدبکی جهت افزایش سرعت همگرایی می‌باشد.

تنظیم فرکانس و تقسیم توان اکتیو مناسب برای هر واحد

باید در زمان محدودی به‌صورت زیر همگرا شود:

$$\lim_{x \rightarrow x^*} |\omega_i(t) - \omega_n| = 0, \quad \omega_i(t) = \omega_n \quad \forall t \geq t_\omega^* \quad (32)$$

$$\lim_{x \rightarrow x^*} \left| \frac{P_j(t)}{P_j^{max}} - \frac{P_i(t)}{P_i^{max}} \right| = 0, \quad \frac{P_i(t)}{P_i^{max}} = \frac{P_j(t)}{P_j^{max}} \quad \forall t \geq t_p^* \quad (33)$$

معادلات بالا ذاتاً در تضاد با همدیگر هستند؛ ازاین‌رو، تنظیم فرکانس ارجحیت داده می‌شود. به‌علاوه، رابطه (۲۹) را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$\dot{\omega}(t) = sat_{\sigma\omega} \left[\sum_{j \in N} w_{ij} (\omega_j(t) - \omega_i(t)) \right] \quad (34)$$

جهت دستیابی به بازیابی فرکانس در زمان محدود، ω باید مقدار مرجع را با فرآیند توضیح‌داده‌شده طی کند. قابل ذکر است که این استراتژی برای رابطه (۳۱) در نظر گرفته می‌شود تا خطای فرکانس کلی زیر را تولید کند.

$$e_i^\omega = \sum_{j \in N} w_{ij} (\omega_j - \omega_i) + g_i (\omega_i - \omega^{ref}) \quad (35)$$

این خطا در ادامه به دینامیک‌های انتگرالی زیر اعمال می‌شوند.

$$\zeta_i^\omega = e_i^\omega \quad (36)$$

$$\dot{\zeta}_i^\omega = \kappa_i^\omega \quad (37)$$

$$\dot{\kappa}_i^\omega = u_i^\omega \quad (38)$$

$$\kappa_i^\omega = \frac{de_i^\omega}{dt} e_i^{\dot{\omega}} \quad (39)$$

$$e_i^{\dot{\omega}} = \sum_{j \in N} w_{ij} (\dot{\omega}_j - \dot{\omega}_i) + g_i (\dot{\omega}_i) \quad (40)$$

از سویی، خطای زیر را می‌توان برای تقسیم توان اکتیو تعریف کرد:

جهت دستیابی به بازیابی ولتاژ در زمان محدود، v_{od} باید مقدار مرجع خود را با فرآیند مربوطه دنبال کند. ازاین‌رو، خطای ولتاژ کلی زیر تولید می‌شود.

$$e_i^{v_{od}} = \sum_{j \in N} w_{ij} (v_{od_j} - v_{od_i}) + g_i (v_{od_i} - V^{ref}) \quad (15)$$

که در آن، g_i بهره پینینگ^۱ ($g_i \neq 0$ برای عامل مرجع) است. سیس، این خطا به دو دینامیک انتگرال‌گیر زیر اعمال می‌شود.

$$\zeta_i^{v_{od}} = e_i^{v_{od}} \quad (16)$$

$$\dot{\zeta}_i^{v_{od}} = \kappa_i^{v_{od}} \quad (17)$$

$$\dot{\kappa}_i^{v_{od}} = u_i^{v_{od}} \quad (18)$$

$$\kappa_i^{v_{od}} = \frac{de_i^{v_{od}}}{dt} e_i^{\dot{v}_{od}} \quad (19)$$

$$e_i^{\dot{v}_{od}} = \sum_{j \in N} w_{ij} (\dot{v}_{od_j} - \dot{v}_{od_i}) + g_i (\dot{v}_{od_i}) \quad (20)$$

از سویی، خطای زیر را می‌توان برای تقسیم توان راکتیو تعریف کرد:

$$e_i^Q = \sum_{j \in N} c_j w_{ij} \left(\frac{Q_j}{Q_j^{max}} - \frac{Q_i}{Q_i^{max}} \right) \quad (21)$$

و متشابهاً، این خطا نیز به سیستم انتگرال‌گیری به‌صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$\zeta_i^Q = e_i^Q \quad (22)$$

$$\dot{\zeta}_i^Q = \kappa_i^Q \quad (23)$$

$$\dot{\kappa}_i^Q = u_i^Q \quad (24)$$

$$\kappa_i^Q = \frac{de_i^Q}{dt} \quad (25)$$

سیس، ورودی کنترلی بازیابی ولتاژ و تقسیم توان راکتیو را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$u_i^{v_{od}} = sat_{\sigma v} \left[k_1 \text{sign}(e_i^{v_{od}})^\alpha \right] + sat_{\sigma v} \left[k_2 \text{sign}(e_i^{\dot{v}_{od}})^\beta \right] \quad (26)$$

$$u_i^Q = Q_i^{max} sat_{\sigma Q} \left[k_3 \text{sign}(e_i^Q)^\alpha \right] \quad (27)$$

که در آن، $k_1, k_2, k_3 > 0$ است؛ σv ، σQ و σv به ترتیب ضرایب اشباع بازیابی ولتاژ، مشتق ولتاژ و تقسیم توان راکتیو هستند. α و β نیز سرعت همگرایی را نشان می‌دهند.

درنهایت، ولتاژ مرجعی که به سطح اولیه ارسال می‌شود را می‌توان با استفاده از روابط (۱۰)، (۲۶) و (۲۷) به‌صورت زیر بیان کرد:

$$V_{od}^* = \int \left[\left[sat_{\sigma v} \left[k_1 \text{sign}(e_i^{v_{od}})^\alpha \right] + sat_{\sigma v} \left[k_2 \text{sign}(e_i^{\dot{v}_{od}})^\beta \right] \right] \right. \quad (28)$$

$$\left. - n_Q \left(Q_i^{max} sat_{\sigma Q} \left[k_3 \text{sign}(e_i^Q)^\alpha \right] \right) \right]$$

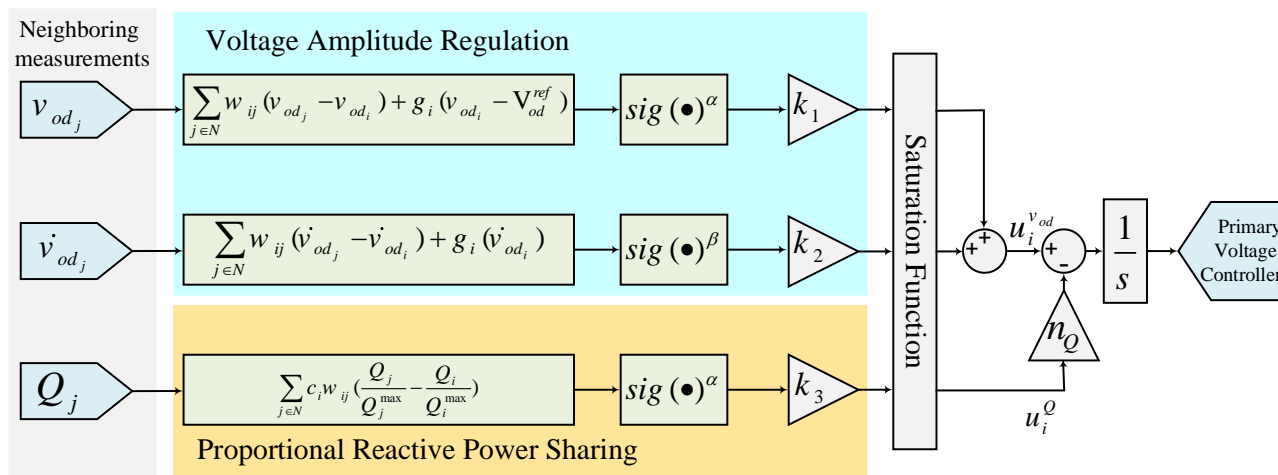
$$\dot{\zeta}_i^P = \kappa_i^P \quad (43)$$

$$\dot{\kappa}_i^P = u_i^P \quad (44)$$

$$e_i^P = \sum_{j \in N} c_i w_{ij} \left(\frac{P_j}{P_j^{max}} - \frac{P_i}{P_i^{max}} \right) \quad (41)$$

و متشابهها، این خطا نیز به سیستم انتگرال‌گیری به صورت زیر اعمال می‌گردد:

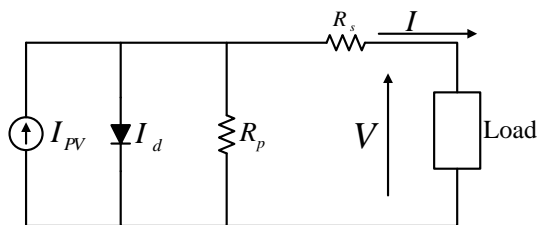
$$\zeta_i^P = e_i^P \quad (42)$$



شکل (۳): دیاگرام کنترل توزیع‌شده زمان محدود ولتاژ-توان راکتیو ثانویه

۴- مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

مدار معادل یک سلول فتوولتائیک در شکل (۵) نشان داده شده است. این مدل شامل یک منبع جریان، دیود و مقاومت‌های سری و موازی می‌شود.



شکل (۵): مدار معادل یک سلول فتوولتائیک

مشخصه ماژول PV به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰-۳۲]:

$$I = I_{PV} + I_o \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s \alpha kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (49)$$

در این رابطه، I_{PV} جریان PV، I_o جریان اشباع معکوس دیود، q بار الکترونی برابر با 1.6×10^{-19} C، N_s تعداد سلول‌های سری یک ماژول PV، α ضریب ایدئال دیود، k ثابت بولتزمن برابر با 1.38×10^{-23} J/K، T دمای ماژول PV برحسب کلوین و R_p مقاومت موازی می‌باشد. طبق رابطه زیر، I_{PV} بر اساس میزان تابش نور و دمای خورشید توصیف می‌شود:

$$\kappa_i^P = \frac{de_i^P}{dt} \quad (45)$$

سپس، ورودی کنترلی بازبایی فرکانس و تقسیم توان اکتیو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$u_i^{\omega} = \text{sat}_{\sigma\omega} \left[k_1 \text{sign}(e_i^{\omega})^{\alpha} \right] + \text{sat}_{\sigma\omega} \left[k_2 \text{sign}(e_i^{\omega})^{\beta} \right] \quad (46)$$

$$u_i^P = P_i^{max} \text{sat}_{\sigma P} \left[k_3 \text{sign}(e_i^P)^{\alpha} \right] \quad (47)$$

که در آن، $\sigma\omega$ ، مشتق فرکانس و تقسیم توان اکتیو هستند.

درنهایت، فرکانس مرجعی که به سطح اولیه ارسال می‌شود را می‌توان با استفاده از روابط (۳۱)، (۳۶) و (۳۷) به صورت زیر بیان کرد:

$$\omega^* = \int \left[\left(\text{sat}_{\sigma\omega} \left[k_1 \text{sign}(e_i^{\omega})^{\alpha} \right] + \text{sat}_{\sigma\omega} \left[k_2 \text{sign}(e_i^{\omega})^{\beta} \right] \right) - n_p \left(P_i^{max} \text{sat}_{\sigma P} \left[k_3 \text{sign}(e_i^P)^{\alpha} \right] \right) \right] dt \quad (48)$$

دیاگرام به دست آمده کلی مربوط به استراتژی کنترل f-P در شکل (۴) ترسیم شده است.

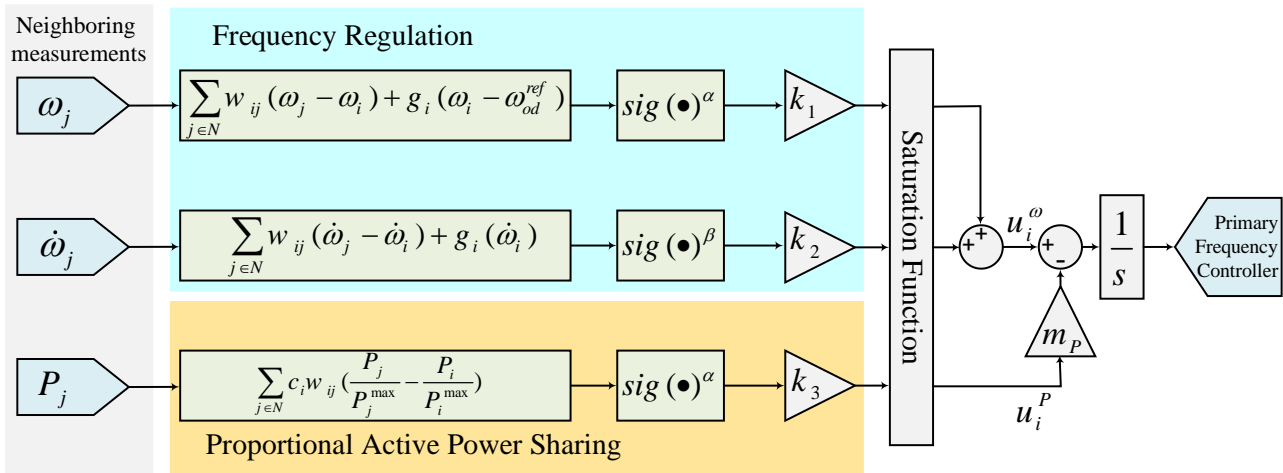
I_o و $I_{PV,n}$ تابش نور خورشید در شرایط نامی می‌باشند. نیز از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$I_{PV} = ((R_p + R_s)R_p) / I_{sc,n} \quad (51)$$

$$I_o = (I_{sc,n} + K_I \Delta T) \times \left(\exp\left(\frac{q(V_{oc,n} + K_V \Delta T)}{N_s \alpha k T}\right) - 1 \right) \quad (52)$$

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_I \Delta T) \times (G/G_n) \quad (50)$$

در رابطه فوق، $I_{PV,n}$ جریان I_{PV} در شرایط نامی (دمای 25°C و میزان تابش نور 1000 W/m^2)، K_I جریان اتصال کوتاه در هر ضریب دمایی، ΔT اختلاف میان دمای نامی و دمای اندازه‌گیری شده، G میزان تابش نور اندازه‌گیری شده بر روی سطح ماژول و



شکل (۴): دیاگرام کنترل توزیع‌شده زمان محدود فرکانس-توان اکتیو ثانویه

۱۰ kHz	فرکانس کلیدزنی	f_{sw}
$5 \times 10^{-5} \text{ rad/W.s}$	ضرایب افتی	m_p
$5 \times 10^{-7} \text{ V/Var}$		n_Q
پارامترهای کنترل‌کننده ثانویه		
۰/۳	سرعت همگرایی	α
۰/۴۶۱۵	سرعت همگرایی	β
۵/۵	ضرایب اشباع بازیابی ولتاژ،	k_1
۲/۶	مشق ولتاژ	k_2
۱۱/۳	و تقسیم توان	k_3

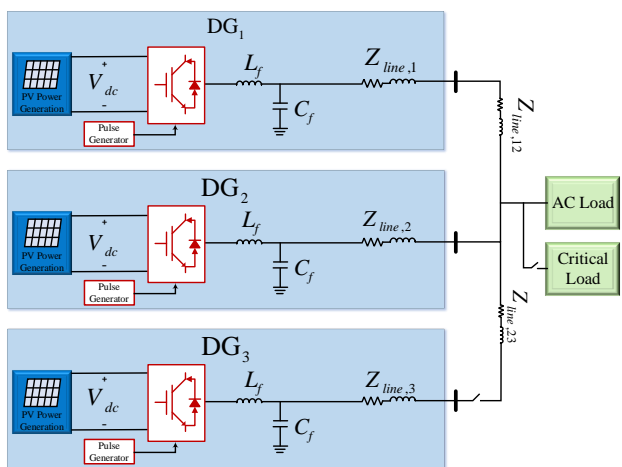
در رابطه قبل $V_{oc,n}$ و $I_{sc,n}$ جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در شرایط نامی می‌باشند. ولتاژ مدار باز در هر ضریب دمایی می‌باشد.

۵- نتایج و تشریح مطالب

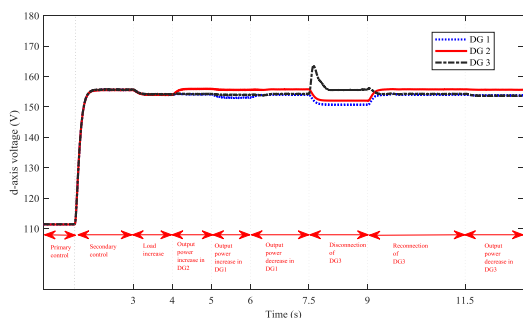
یک AC MG جزیره‌ای در این مقاله در نظر گرفته شده و در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. این ریزشبهه شامل سه DG می‌شود و دو بار W وجود دارند. دامنه ولتاژ مبنای ریزشبهه برابر با $\sqrt{3}110$ می‌باشد. پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است. دیاگرام AC MG شبیه‌سازی شده در شکل (۶) ترسیم شده است.

جدول (۱): پارامترهای سیستم مورد مطالعه

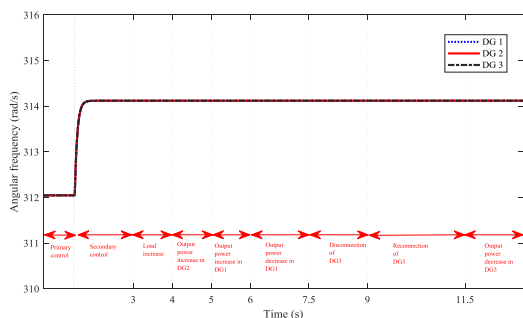
نماد	کمیت	مقدار
L_f <td>اندوکتانس فیلتر</td> <td>۳ mH</td>	اندوکتانس فیلتر	۳ mH
V_{dc} <td>ولتاژ منبع</td> <td>۴۵۰ V</td>	ولتاژ منبع	۴۵۰ V
C_f <td>ظرفیت خازنی فیلتر</td> <td>۵۰ μF</td>	ظرفیت خازنی فیلتر	۵۰ μF
Z_{Line} <td>امپدانس خط</td> <td>$0.7 \Omega + j2 \text{ mH}$</td>	امپدانس خط	$0.7 \Omega + j2 \text{ mH}$
f_n <td>فرکانس نامی</td> <td>۵۰ Hz</td>	فرکانس نامی	۵۰ Hz
V_{od_n} <td>ولتاژ نامی محور d</td> <td>۱۵۵/۶ V</td>	ولتاژ نامی محور d	۱۵۵/۶ V



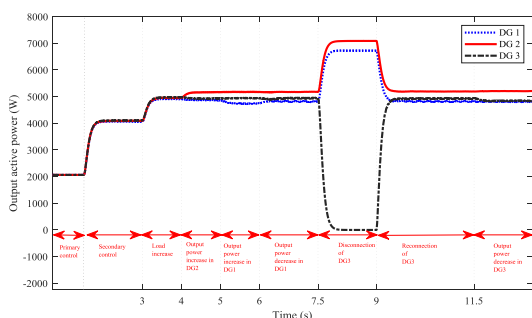
شکل (۶): شماتیک ریزشبهه AC تحت مطالعه



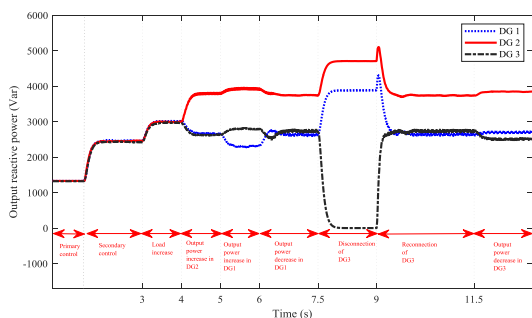
شکل (۷): واحدها ولتاژ خروجی محور d



شکل (۸): فرکانس زاویه‌ای خروجی واحدها



شکل (۹): توان اکتیو خروجی واحدها



شکل (۱۰): توان راکتیو خروجی واحدها

جهت ارزیابی بهتر روش، نتایج به دست آمده از کنترل‌کننده اولیه مورد استفاده و کنترل‌کننده ثانویه با کنترل‌کننده اولیه اکتیو سنتی و کنترل‌کننده ثانویه مرجع [۲۸] مقایسه شده و خطای ولتاژ، خطای فرکانس و همچنین خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده است. نتایج به دست آمده به‌طور خلاصه در جدول (۲) ارائه گردیده است.

- شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های زیر انجام شده است:
- ریزشبکه تنها با استفاده از کنترل اولیه کار می‌کند (کنترل‌کننده ثانویه غیرفعال است).
- کنترل‌کننده ثانویه در $t = 1.5$ s فعال می‌شود.
- افزایش باری در ثانیه ۳ رخ می‌دهد (توان بار افزایش می‌یابد ($P_{\text{Added Load}} = 500$ W)).
- توان خروجی DG_2 در $t = 4$ s به دلیل کاهش دما افزایش می‌یابد.
- در ثانیه ۵، توان خروجی DG_1 به دلیل افزایش شدت تابش افزایش می‌یابد؛
- در $t = 6$ s، توان خروجی DG_1 به دلیل افزایش دما کاهش می‌یابد.
- در ثانیه ۷/۵، DG_3 از ریزشبکه قطع می‌شود؛
- و در ثانیه ۹، DG_3 مجدداً به ریزشبکه متصل می‌شود.
- و در آخرین حالت، توان خروجی DG_3 با کاهش شدت تابش نور خورشید در $t = 11.5$ s کاهش می‌یابد.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری SIMULINK در شکل‌های (۷)–(۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها می‌توان دید، با فعال شدن کنترل‌کننده ثانویه در $t = 1.5$ s، مقدار ولتاژ محور d خروجی و همچنین فرکانس زاویه‌ای واحدهای DG، به‌طور دقیقی به ترتیب به مقادیر نامی یعنی $155/6$ V (شکل (۷)) و $314/16$ rad/s (شکل (۸)) بازیابی می‌شوند. افزایش بار در ثانیه ۳ تأثیر چشمگیری بر روی فرکانس زاویه‌ای نداشته و مقدار افت ولتاژ دیده شده نیز ناچیز است؛ با افزایش بار توان خروجی واحدها افزایش یافته است. با افزایش یا کاهش توان خروجی واحدهای DG به سبب تغییر در شدت تابش و دما، توان واحد مربوطه تغییر می‌کند و سایر واحدها کمبود یا بیش‌بود توان را جبران می‌کنند (شکل (۹) و (۱۰)). با خارج شدن واحد DG_3 ، توان خروجی این واحد صفر شده و دو واحد موجود در مدار توان بار را تقسیم می‌کنند، با اتصال مجدد این واحد، همان‌طور که قابل مشاهده است، تقسیم توان میان سه واحد به‌طور مناسبی انجام می‌شود. همچنین، همان‌طور که آشکار است، با تغییر از یک حالت بهره‌برداری به حالت دیگر، مقادیر بدون (با مقدار کمی) فروجهش یا فراجاهش و به‌سرعت به مقدار نامی همگرا می‌شوند.

- [2] Dheer, D. K., Gupta, Y., Doolla, S., "A Self Adjusting Droop Control Strategy To Improve Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 11, No. 3, pp. 1624-1635, 2019.
- [3] Pham, X.H.T., "Power Sharing Strategy in Islanded Microgrids Using Improved Droop Control", Electric Power Systems Research, Vol. 180, pp. 106164, 2020.
- [4] Kulkarni, S.V., Gaonkar, D. N., "Improved Droop Control Strategy for Parallel Connected Power Electronic Converter Based Distributed Generation Sources in an Islanded Microgrid", Electric Power Systems Research, Vol. 201, pp. 107531, 2021.

[۵] حسامی نقشبندی، علی، حبیبی، فرشید، بیورانی، حسن. "طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم برای پایداری ولتاژ یک ریزشبه‌یکه در حالات مختلف کاری". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۰، ۱، ۳۲-۳۳، ۱۳۹۲.

- [6] Wu, X., Shen, C., Iravani, R., "Feasible Range And Optimal Value Of The Virtual Impedance For Droop-Based Control Of Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 3, pp. 1242-1251, 2016.
- [7] Fani, B., Zandi, F., & Karami-Horestani, A., "An Enhanced Decentralized Reactive Power Sharing Strategy For Inverter-Based Microgrid", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 98, pp. 531-542, 2018.
- [8] Kalke, D., Suryawanshi, H. M., Talapur, G. G., Deshmukh, R., Nachankar, P., "Modified Droop and Master Slave Control for Load Sharing in Multiple Standalone AC Microgrids", In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, pp. 1862-1867, IEEE, Oct., 2019.
- [9] Zhang, H., Zhou, J., Sun, Q., Guerrero, J. M., Ma, D., "Data-Driven Control for Interlinked AC/DC Microgrids via Model-Free Adaptive Control and Dual-Droop Control", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 2, pp. 557-571, 2015.
- [10] Biglarahmadi, M., Ketabi, A., Baghaee, H.R., Guerrero, J.M., "Integrated Nonlinear Hierarchical Control and Management of Hybrid AC/DC Microgrids", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 902-913, 2022.
- [11] Toub, M., Weaver, W.W., Robinett, R.D., Maaroufi, M., Aniba, G., "A dq Droop Control Strategy for Fixed Frequency VSI-Based AC Microgrids", In 2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), pp. 332-335, IEEE, Feb., 2018.

[۱۲] باتمانی، یزدان، نجفی، شهاب‌الدین. "طراحی یک کنترل‌کننده اولیه یکپارچه در ریزشبه‌یکه‌های AC با استفاده از روش کنترل ردیاب بهینه". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۶، ۱، ۶۵-۷۶، ۱۳۹۸.

- [13] Nasirian, V., Shafiee, Q., Guerrero, J.M., Lewis, F.L., Davoudi, A., "Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 2, pp. 1600-1617, 2015.
- [14] Yazdani, M., Mehrizi-Sani, A., "Distributed Control Techniques in Microgrids" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 6, pp. 2901-2909, 2014.
- [15] Deng, F., Mattavelli, P., Zhang, X. "A Distributed Current Sharing Strategy for Islanded AC Microgrids Based on Low-Bandwidth Communication", Electric Power Systems Research, Vol. 206, pp. 107777, 2022.
- [16] Shafiee, Q., Nasirian, V., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., Davoudi, A., "A Multi-Functional Fully Distributed Control Framework for AC Microgrids", IEEE

جدول (۱): خطای توان، ولتاژ و فرکانس از مقایسه روش پیشنهادی

واحد	افتی سنتی و مرجع [۲۸]	کنترل‌کننده این مقاله
e_p (%)		
DG ₁	۷/۸۹	۳/۱۸
DG ₂	۷/۸۹	۳/۱۸
DG ₃	۷/۱۶	۳/۰۲
e_Q (%)		
DG ₁	۶/۹۱	۲/۹۶
DG ₂	۶/۹۱	۲/۹۶
DG ₃	۶/۷۶	۲/۵۷
e_V (%)		
DG ₁	۶/۴۸	۱/۲۸
DG ₂	۶/۴۸	۱/۲۸
DG ₃	۵/۹۳	۱/۰۶
e_f (%)		
DG ₁	۰/۷۸	۰
DG ₂	۰/۷۸	۰
DG ₃	۰/۵۴	۰

۶- نتیجه‌گیری

یک روش کنترل افتی اصلاحی خودتنظیم و استراتژی کنترل توزیع‌شده مشارکتی زمان محدود در سطوح کنترل اولیه و ثانویه یک AC MG جزیره‌ای در این مقاله به کار گرفته شد. استراتژی افتی پیشنهادی برای غلبه بر مشکلات عدم امیدانس برابر خطوط به کار گرفته شد. کنترل‌کننده ثانویه زمان محدود پیشنهادی از روند ردیابی مبتنی بر همگرایی مجانب‌وار سنتی استفاده می‌کند. چارچوب کنترل تنظیم ولتاژ/فرکانس متوسط به دست آمده از اجماع دینامیکی عامل‌ها برای هر عامل مدوله شد که در یک فاصله زمانی محدود انجام می‌شد. این ترم اصلاح ولتاژ/فرکانس، ضمن تضمین تنظیم ولتاژ و فرکانس دقیق، به تقسیم توان اکتیو و راکتیو مناسبی دست می‌یابد. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با در نظر گرفتن اینکه واحد DG در نظر گرفته شده یک واحد فتوولتائیک است، نشان داد که زمان نشست کاهش یافته است و تنظیم ولتاژ و فرکانس سریع می‌باشد.

در ادامه کار می‌توان قطع سیستم ارتباطی و یا تأخیر در دریافت داده‌های دریافتی از واحدهای مجاور را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. همچنین، می‌توان حضور بارهای نامتعادل و هارمونیک را در نظر گرفت و در صورت لزوم، کنترل‌کننده پیشنهادی اضافه گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Delghavi, M.B., Advanced Islanded Mode Control Of Microgrids, 2011.

- Systems", IEEE transactions on industry applications, Vol. 29, No. 1, pp. 136-143, 1993.
- [30] Hasanien, H.M., "Shuffled Frog Leaping Algorithm for Photovoltaic Model Identification", IEEE Transaction on Sustainable Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 509-515, 2015.
- [31] Mahmoud, Y. A., Xiao, W., Zeineldin, H. H., "A Parameterization Approach for Enhancing PV Model Accuracy", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 12, pp. 5708-5716, 2012.
- [32] Kadri, R., Gaubert, J. P., Champenois, G., "An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid-Connected Inverter Based on Voltage-Oriented Control", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.58, No. 1, pp. 66-75, 2010.
- transactions on smart grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3247-3258, 2016.
- [17] Shi, M., Chen, X., Zhou, J., Chen, Y., Wen, J., He, H., "PI-Consensus Based Distributed Control of AC Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 3, pp. 2268-2278, 2019.
- [18] Lai, J., Lu, X., Yu, X., Yao, W., Wen, J., Cheng, S., "Consensus-Based Distributed Event-Triggered Communication Control for AC Microgrids", In 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3740-3745, IEEE, Sep., 2018.
- [19] Han, R., Meng, L., Ferrari-Trecate, G., Coelho, E. A. A., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M., "Containment and Consensus-Based Distributed Coordination Control to Achieve Bounded Voltage and Precise Reactive Power Sharing in Islanded AC Microgrids", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 6, pp. 5187-5199, 2017.
- [20] Wu, X., Shen, C., Iravani, R. "A Distributed, Cooperative Frequency and Voltage Control for Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 2764-2776, 2016.
- [21] Lai, J., Lu, X., Yu, X., Monti, A., "Cluster-Oriented Distributed Cooperative Control for Multiple AC Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 11, pp. 5906-5918, 2019.
- [22] Nabian Dehaghani, M., Taher, S. A., Dehghani Arani, Z., "An Efficient Power Sharing Approach in Islanded Hybrid AC/DC Microgrid Based on Cooperative Secondary Control", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 31, No. 6, pp. e12897, 2021.
- [23] Poonahela, I., Bayhan, S., Abu-Rub, H., Begovic, M., "Implementation of Finite Control State Model Predictive Control with Multiple Distributed Generators in AC Microgrids", In 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Vol. 1, pp. 206-211, IEEE, Jul., 2020.
- [24] Yao, W., Wang, Y., Xu, Y., Nguyen, T. L., Feng, X., "Distributed Multi-Functional Finite-Time Secondary Control in Cyber-Physical Microgrid", In 2019 IEEE Power 7 Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, IEEE, Aug., 2019.
- [25] Poonahela, I., Bayhan, S., Abu-Rub, H., Begovic, M., "Implementation of Finite Control State Model Predictive Control with Multiple Distributed Generators in AC Microgrids", In 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Vol. 1, pp. 206-211, IEEE, Jul., 2020.
- [26] Lu, R., Wang, J., Wang, Z., "Distributed Observer-Based Finite-Time Control of AC Microgrid Under Attack", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 12, No. 1, pp. 157-168, 2020.
- [27] Choi, J., Habibi, S. I., Bidram, A., "Distributed Finite-Time Event-Triggered Frequency and Voltage Control of AC Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 37, No. 3, pp. 1979-1994, 2021.
- [28] Islam, S., Liu, P. X., El Saddik, A., "Distributed Robust Adaptive Finite-Time Voltage Control for Microgrids with Uncertainty", In 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 2200-2202, IEEE, Oct., 2017.
- [29] Chandorkar, M.C., Divan, D.M., Adapa, R., "Control of Parallel Connected Inverters in Standalone AC Supply

زیر نویس‌ها

- ¹ Microgrid
² Distributed generation
³ Energy storage system
⁴ Proportional-integral
⁵ Low bandwidth communication
⁶ Event triggered
⁷ Contaminant
⁸ Chattering phenomenon
⁹ Pinning gain