

## کنترل ولتاژ ریز شبکه DC با استفاده از کنترل کننده‌ی سلسله مراتبی مبتنی بر تئوری خاریتانوف

محمد حافظ علویان<sup>۱</sup>، نیا مهدیان دهکردی<sup>۲</sup> و محمد جواد نجفی راد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران hafezalavian96@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران nimamahdian@sru.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران najafirad.mj@gmail.com

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹

**چکیده:** در این مقاله، یک رویکرد کنترل مقاوم سلسله مراتبی جدید مبتنی بر ترکیب کنترل غیرمتمرکز و توزیع شده برای کنترل ولتاژ و تسهیم توان در ریز شبکه‌های DC جزیره‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات در حلقه‌های کنترل اولیه و کانال‌های مخابراتی در لایه‌ی ثانویه پیشنهاد شده است. عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات عوامل اساسی هستند که می‌توانند بر پایداری یک ریز شبکه تأثیر بگذارند. برخلاف روش‌های قبلی، ابتدا با استفاده از یک ساختار کنترل مقاوم غیرمتمرکز PI مبتنی بر تئوری خاریتانوف حلقه‌ی کنترل اولیه ولتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات به صورت مقاوم طراحی می‌شود؛ با پیش‌خور کردن این تغییرات و عدم ورود آن‌ها به کانال مخابراتی در لایه‌ی ثانویه با استفاده از ساختار کنترل مقاوم PI توزیع شده به جبران اغتشاشات ولتاژ در لایه‌ی اولیه می‌پردازیم. کنترل کننده پیشنهادی علاوه بر سادگی و مقاوم بودن مبتنی بر پروتکل اجماع و غیرمتمرکز مقاوم جدید است که نرخ هم‌گرایی بالاتری نسبت به پروتکل‌های قبلی دارد و عملکرد آن در شرایط عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات بزرگ کاملاً رضایت‌بخش است. شبیه‌سازی‌های مختلف در جعبه ابزار MATLAB/SimPowerSystems بر روی یک ریز شبکه‌ی DC استاندارد شامل چهار منبع تولید پراکنده و تحت سناریوهای مختلف انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی کارایی کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. به طور کلی، کنترل کننده پیشنهادی قابلیت اطمینان ریز شبکه‌ها را از طریق ارسال بسیار کم داده‌ها در کانال مخابراتی افزایش می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** کنترل سلسله مراتبی، تئوری خاریتانوف، کنترل توزیع شده، ریز شبکه DC، کنترل ثانویه.

### Voltage control of DC microgrids using hierarchical controller based on Kharitonov theory

Mohammad Hafez Alavian, Nima Mahdian Dehkordi, Mohammad Javad Najafirad

**Abstract:** In this paper, a new hierarchical robust control approach based on the combination of decentralized and distributed control is proposed for voltage control and power sharing in islanded DC microgrids by considering uncertainties and disturbances in the primary control loops and communication channels in the secondary layer. Uncertainties and disturbances are the main factors that can affect the stability of a microgrid. Unlike the previous methods, first by using a decentralized robust PI control structure based on Kharitonov's theory, the primary voltage control loop is robustly designed considering uncertainties and disturbances. By anticipating these changes and preventing them from entering the communication channel in the secondary layer, we compensate for the voltage deviations in the primary layer by using the distributed PI robust control structure. In addition to being simple and robust, the proposed controller is based on a new consensus and robust decentralized protocol, which has a higher convergence rate than the previous protocols and its performance is completely satisfactory under the conditions of uncertainties and large disturbances. Different simulations are performed in MATLAB/SimPowerSystems toolbox on a standard DC microgrid

including four distributed generations and under different disturbances. The simulation results show the effectiveness of the proposed controller. In general, the proposed controller increases the reliability of microgrid by sending low data in communication channels.

**Keywords:** Hierarchical control, Kharitonov theory, distributed controller, DC microgrid, secondary controller

## ۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها<sup>۱</sup> شبکه‌های توزیعی می‌باشند که مشابه شبکه‌های بزرگ قدرت بوده با این تفاوت که در مقیاس کوچک شکل گرفته‌اند و قابلیت تولید، کنترل و بهره‌برداری از تجهیزات محلی خود را دارند. با وجود تنوع زیاد در ریزشبه‌ها که به دلیل تنوع در منابع تولیدپراکنده<sup>۲</sup>، ذخیره‌سازها، بارها و مبدل‌ها که در واقع عناصر اجزای اصلی یک ریزشبه DC به حساب می‌آیند؛ اغلب ریزشبه‌ها نیاز به عناصر حفاظتی و سامانه‌ی نظارت و کنترل دارند.

ساختار کنترل سلسله مراتبی اخیراً به عنوان یک طرح قابل دفاع که قابلیت گسترش ریزشبه را نیز فراهم می‌کند بسیار مورد توجه قرار گرفته است که توانسته زمان پاسخ، چارچوب کنترل و عملکرد مناسبی را در ریزشبه‌ها ارائه دهد. کنترل سلسله مراتبی به سه سطح اولیه، ثانویه و ثالثیه طبقه بندی می‌شود. سطح کنترل اولیه همچنین به عنوان کنترل کننده محلی شناخته می‌شود چرا که از اطلاعات محلی استفاده می‌کند و در پی بازیابی و تثبیت ولتاژ باس DC است. اما در تسهیم توان مناسب برای جلوگیری از عدم تعادل توان در سطح پایین ریزشبه نقش دارد. کنترل ثانویه با زمان پاسخ کندتر از کنترل کننده اولیه برای جبران انحراف ولتاژ ناشی از سطح اولیه استفاده می‌شود. بنابراین، کنترل کننده ثانویه بر بازیابی ولتاژ در باس DC و اشتراک جریان مناسب بین منابع تولیدپراکنده تمرکز می‌کند. در نهایت کنترل کننده سطح سوم، کنترل سطح بالایی است که برای حفظ عملکرد بهینه از نظر کارایی و هزینه در ریزشبه‌ها، بین ریزشبه و شبکه برق شهری و بالعکس استفاده می‌شود [۱-۳]. همچنین مسئول مدیریت جریان نیرو و برنامه ریزی انرژی است [۴-۵]. این سطوح مختلف کنترل را می‌توان به صورت متمرکز یا غیرمتمرکز یا توزیع شده بسته به سطح کنترل و ساختار ریزشبه اجرا کرد.

یکی از عناصر لازم برای کنترل ریزشبه‌ها مبدل‌ها هستند که به مثابه عملگر برای سیگنال‌های کنترلی هستند و دستورات کنترلی را به اجرا در می‌آورند. این مبدل‌ها در ابتدا توسط حلقه‌ی ولتاژ و جریان کنترل می‌شوند. به منظور اطمینان از عملکرد محلی مناسب ریزشبه و مبدل‌ها و همچنین برای فراهم کردن اتصال هماهنگ بین ماژول‌های مختلف در یک ریزشبه، باید جریان و ولتاژ محلی دارای کنترل منعطف بوده و تسهیم توان میان منابع تولیدپراکنده نیز با دقت انجام گیرد. یک طرح کنترل محلی رایج شامل کنترل کننده‌های جریان و ولتاژ محلی و یک حلقه کنترل دروپ است [۶].

برای سیستم‌هایی که جریان و ولتاژ DC را در ریزشبه‌های DC به صورت محلی کنترل می‌کنند، معمولاً از کنترل کننده تناسبی-انترگالی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. اما بعضی از ریزشبه‌ها نیز از کنترل کننده تناسبی-مشتق‌گیر بهره می‌برند. لذا در حالت بهتر می‌توان با ترکیب اثرات مفید کنترل کننده‌های PI و PD، از کنترل کننده PID که باعث کاهش خطا ماندگار توأم با اصلاح پاسخ گذرا می‌شود، بکار گرفته می‌شود.

مواردی که در این سطح کنترلی به آن‌ها پرداخته می‌شود شامل: کیفیت توان، سنکرون کردن ریزشبه با شبکه اصلی برای اتصال نرم، هماهنگی بین منابع تولیدپراکنده و... است. با اینکه بهبود کیفیت توان اغلب به عهده‌ی کنترل ثانویه است اما وظیفه‌ی اصلی تسهیم توان را کنترل اولیه برعهده دارد. نکته مهم اینکه بین عملکرد تسهیم توان و تنظیم ولتاژ یک نوع رابطه مصالحه‌ای وجود دارد یعنی هنگامی که عملکرد تنظیم ولتاژ ضعیف است و انحراف ولتاژ، تحت بهره‌های بالای دروپ زیاد است، تسهیم توان دقیق در میان منابع توسط بهره‌ی دروپ بالا تضمین می‌شود. لذا یک کنترل کننده ثانویه می‌تواند برای یک ریزشبه DC تحت کنترل دروپ ضمن حفظ ولتاژ باس اصلی، مرجع را به کنترل اولیه تنظیم کند.

سیستم کنترل ثانویه متمرکز، عملکرد کنترلی بسیار دقیق، بسیار انعطاف پذیر و قابل قبولی را با استفاده از یک کنترل کننده مرکزی برای برآوردن عملکرد فوق‌العاده ارائه می‌دهد. با این حال، نیاز به یک شبکه ارتباطی بزرگ، بدون دفاع در برابر خرابی ارتباطات، این سیستم را به دلیل امنیت و پیچیدگی عملیاتی کمتر قابل اعتماد می‌کند. علاوه بر این، کنترل ثانویه متمرکز نیز قابلیت قطع و وصل منابع تولیدپراکنده<sup>۴</sup> را برای یک ریزشبه محدود می‌کند [۷-۸].

کنترل ثانویه غیرمتمرکز نسبتاً پیچیده‌تر از کنترل ثانویه متمرکز است زیرا هیچ ارتباطی یا حداقل نیاز ارتباطی وجود ندارد. این تنظیم محلی را بر اساس متغیرهای محلی موجود ماژول‌های جداگانه با استفاده از استراتژی‌های مختلف مانند کنترل کننده تناسبی برای متعادل‌سازی امپدانس کابل، کنترل پیش‌خور مبتنی بر دروپ برای مرجع ولتاژ ترمینال و غیره انجام می‌دهد. کنترل غیرمتمرکز اجرای ساده‌تری دارد که قابلیت اطمینان و مدولار بودن سیستم را افزایش می‌دهد. با این حال، به دلیل در دسترس نبودن داده‌های کلی سیستم در واحدهای کنترل غیرمتمرکز، عبارت تصحیح خطای ارائه شده توسط این طرح دقیقاً با عبارت جبرانی مورد نیاز مطابقت ندارد و همچنین بهینه سازی سیستم بدتر می‌شود [۸-۱۰].

<sup>3</sup> Proportional Integral (PI)

<sup>4</sup> Plug-and-Play (PnP)

<sup>1</sup> Microgrids (MGs)

<sup>2</sup> Distributed Generator (DG)

بر روی کاربرد تئوری خارتانوف در ریزشبه‌های جریان مستقیم انجام نشده است.

در این پژوهش، یک کنترل سلسله مراتبی جدید که از کنترل ثانویه توزیع شده با ترکیب کنترل غیرمتمرکز محلی بهره می‌برد ارائه شده است. این کنترل کننده نسبت به عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات که در پیاده سازی عملی به کثرت وجود دارد. مقاوم است و برخلاف روش‌های پیشین، ابتدا توسط یک ساختار کنترل غیرمتمرکز PI مبتنی بر تئوری خارتانوف، حلقه‌ی کنترل اولیه‌ی با پیشخور کردن این تغییرات و جلوگیری از ورود اغتشاشات به کانال مخابراتی تاثیر بسزایی در بی اثر کردن عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات دارد. سپس کنترل کننده‌ی ثانویه توزیع شده با استفاده از ساختار کنترل مقاوم PI توزیع شده انحرافات ولتاژ ناشی از کنترل غیرمتمرکز را رفع می‌کند. کنترل کننده پیشنهادی ضمن سادگی، مقاوم بودن و سهولت در پیاده سازی از پروتکل اجماع جدید نیز بهره می‌برد که منجر به بالا رفتن نرخ هم‌گرایی آن نسبت به پروتکل‌های قبلی دارد و عملکرد آن در شرایط عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات بزرگ کاملاً رضایت‌بخش است. لذا کنترل کننده ارائه شده قابلیت اطمینان ریزشبه‌ها را از طریق ارسال بسیار کم داده‌ها در کانال مخابراتی افزایش می‌دهد.

## ۲- مدل سازی ریزشبه DC مورد مطالعه

شکل (۱) دو منبع تولیدپراکنده را در حالت متصل به ریزشبه DC نشان می‌دهد که در آن از مبدل باک<sup>۱</sup> نیز به کار رفته است و امپدانس خط و بار در نظر گرفته شده است. لذا با توجه به قانون کیرشهف (KCL-KVL) می‌توان نوشت:

$$DGU_i \begin{pmatrix} C_{ii} \dot{V}_i = I_{ii} - I_{ij} - I_{Li} \\ L_{ij} \dot{I}_{ij} = V_{ii} - R_{ij} I_{ij} - V_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $V_i$  و  $V_{ii}$  به ترتیب ولتاژ خروجی و ولتاژ مبدل باک هستند و  $I_{ii}$ ،  $I_{ij}$  و  $I_{Li}$  جریان بار، جریان مبدل باک و جریان خط بین منابع تولیدپراکنده  $i$  و  $j$  است. ظرفیت خازن خروجی، مقاومت و اندکتانس معادل مبدل باک نیز به ترتیب با  $C_{ii}$ ،  $R_{ij}$  و  $L_{ij}$  نشان داده شده است و مطابق مدل تقریب خطی<sup>۲</sup> که در آن  $\frac{dI_{ij}}{dt} = 0$  و  $\frac{dV_{ii}}{dt} = 0$  خواهیم داشت:

$$I_{ij} = -I_{ji} = \frac{V_i}{R_{ij}} - \frac{V_j}{R_{ji}} \quad (2)$$

که در این رابطه اندکتانس و مقاومت بین منبع  $i$  و  $j$  به ترتیب  $R_{ij}$  و  $L_{ij}$  است. مقادیر اولیه‌ی جریان‌ها به صورت  $I_{ij}(0) = -I_{ji}(0)$  هستند.

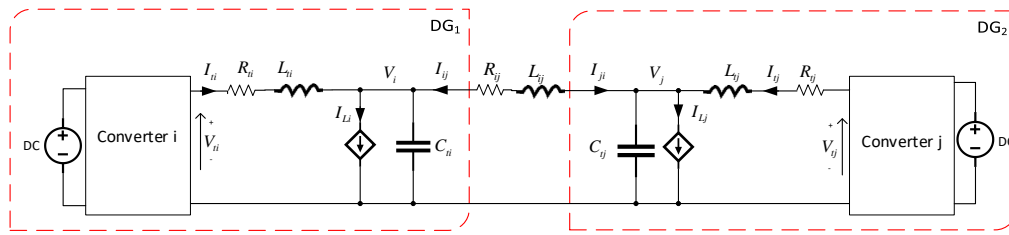
کنترل ثانویه توزیع شده به یک شبکه ارتباطی توزیع شده و رویکرد کنترل توزیعی برای اجرا بر روی متغیرهای موجود محلی نیاز دارد. لو و همکاران [۱۰]، یک طرح کنترل ثانویه توزیعی را پیشنهاد کرد که تقریباً تمام الزامات رویکرد کنترل غیرمتمرکز یک ریزشبه را برآورده می‌کند. در اینجا، بازیابی ولتاژ و تسهیم جریان با استفاده از یک کنترل کننده ولتاژ متوسط جداگانه و یک کنترل کننده میانگین جریان مجزا در سطح محلی کنترل ثانویه برای هر مبدل بهبود یافته است. نسبت به طرح کنترل ثانویه متمرکز و غیرمتمرکز، تنظیم ولتاژ و تسهیم جریان متناسب بهتری را ارائه می‌دهد. با این حال، روش فوق از یک استراتژی کنترل مبتنی بر دروپ پیروی می‌کند و در صورت تغییر سریع بارها، ضرایب دروپ ممکن است با امپدانس خط مطابقت نداشته باشد که منجر به انحراف بیشتر در کنترل کننده جریان و خروجی‌های کنترل کننده ولتاژ می‌شود. از این رو، دونگ و همکاران [۱۱] یک کنترل ثانویه توزیع شده را بدون استفاده از دروپ برای بازیابی ولتاژ و تسهیم جریان برابر در ریزشبه DC با تولید ولتاژ خروجی مورد بحث قرار می‌دهد.

مرجع ولتاژ از طریق یک الگوریتم اجماع توزیع شده با استفاده از ولتاژ و جریان متوسط. با این حال، در کار Guo و همکاران [۱۲]، یک نسخه بهبود یافته از کنترل ثانویه توزیع شده مورد بحث قرار گرفته است که تمام محاسبات را در سطح محلی با استفاده از ولتاژ باس DC بدون دانستن اطلاعات کلی سیستم برای بازیابی ولتاژ و تخصیص توان انجام می‌دهد. نتیجه اصلی تحقیق این مطالعه نیاز محدود به اطلاعات است که پیچیدگی و هزینه کنترل کننده ثانویه را برای دستیابی به هدف مورد نظر به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. کنترل ثانویه به طور قابل توجهی قابلیت اشتراک توان ریزشبه خوشه‌ای را بهبود می‌بخشد. از این رو توجه به کنترل ثانویه ریزشبه خوشه‌ای مهم است. برای این کار، چارچوب کنترل کنترل ثانویه ریزشبه خوشه‌ای باید بهبود یابد [۱۳].

به طور کلی، بیشتر روش‌های موجود به منظور بهینه کردن پارامترهای کنترل کننده PI ممکن است در مواجهه با عدم قطعیت‌ها و مشخصه‌های متغیر با زمان شبکه مخابراتی به خوبی کار نکنند. تئوری خارتانوف به منظور بررسی پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت‌ها معرفی شده است. تنظیم کنترل کننده PI را می‌توان با انتخاب پارامترهایی که پایداری را در محدوده مشخص شده برای همه تغییرات احتمالی در پارامترها تضمین کرد [۱۴]. در سیستم‌های کنترل و شبکه‌های مخابراتی، که پارامترها نامشخص و با متغیر با زمان هستند، قضیه خارتانوف می‌تواند به عنوان راهی برای بهبود عملکرد و پایداری مفید باشد. در [۱۵] یک ساختار کنترلی شامل یک اسیلاتور داخلی برای کنترل فرکانس و یک کنترل کننده PI مبتنی بر تئوری خارتانوف در ریزشبه‌های جریان متناوب به کار گرفته شده است. اما پژوهش‌های کمی بر روی کاربرد تئوری خارتانوف در ریزشبه‌ها انجام شده است. طبق آخرین تحقیقات نویسندگان، پژوهشی

<sup>2</sup> Quasi-Stationary line (QSL)

<sup>1</sup> Buck Converter



شکل ۱: شماتیک مدار دو منبع تولیدپراکنده متصل به ریزشیکه با استفاده از مبدل باک

### ۳- نظریه گراف مخابراتی

شبکه مخابراتی یک ریزشیکه را می‌توان به صورت یک گراف جهت‌دار در نظر گرفت که منابع تولیدپراکنده نقش گره‌ها و خطوط مخابراتی نقش لبه‌های گراف را ایفا می‌کنند. یک گراف به صورت  $G = (V, E, A)$  را در نظر بگیرید. مجموعه  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  نشان‌دهنده یک مجموعه متناهی غیرتهی از  $N$  گره است و  $E \subseteq V \times V$  بیان‌کننده مجموعه لبه‌ها می‌باشند. هم‌چنین، ماتریس وزن‌دار شده همسایگی را با  $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$  نشان می‌دهند. اگر یک خط مخابراتی بین منبع  $i$  ام و منبع  $j$  ام وجود داشته باشد، آنگاه لبه  $(i, j) \in E, a_{ij} > 0$ ، در غیر این صورت،  $a_{ij} = 0$ . مجموعه همسایگان منبع  $i$  ام را با  $N_i = \{j \in V \mid (i, j) \in E\}$  نشان می‌دهند. به این صورت که اگر  $j \in N_i$  باشد، منبع  $j$  ام اجازه دارد تا اطلاعات خود را به منبع  $i$  ام بفرستد. ماتریس درجه داخلی  $D$  به صورت  $D = \text{diag}\{d_i\}$  تعریف می‌شود که  $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$  می‌باشد. ماتریس لاپلاسیان  $L$  به صورت  $L = D - A$  بدست می‌آید که مجموع هر سطر این ماتریس برابر صفر است. گراف  $G$  قویا متصل نامیده می‌شود، اگر یک خط مخابراتی بین هر منبع متمایز وجود داشته باشد. به علاوه، گراف جهت‌دار  $G$  یک درخت پوشا نامیده می‌شود، اگر گره بتواند از طریق خطی مستقیم با بقیه گره‌ها در تماس باشد.

### ۴- کنترل ولتاژ ریزشیکه DC با استفاده از کنترل کننده‌ی سلسله مراتبی مبتنی بر خارتانوف

در این قسمت، یک رویکرد کنترل مقاوم سلسله مراتبی جدید مبتنی بر ترکیب کنترل غیرمتمرکز و توزیع‌شده برای کنترل ولتاژ و تسهیم توان در ریزشیکه‌های DC جزیره‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات در حلقه‌های کنترل اولیه و کانال‌های مخابراتی در لایه‌ی ثانویه پیشنهاد شده است. عدم قطعیت‌ها و اختلالات عوامل اساسی هستند که می‌توانند بر پایداری یک ریزشیکه تأثیر بگذارند. برخلاف روش‌های قبلی، ابتدا با استفاده از یک ساختار کنترل مقاوم غیرمتمرکز PI مبتنی بر تئوری خارتانوف حلقه‌ی کنترل اولیه‌ی ولتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات به صورت مقاوم طراحی می‌شود؛ با پیشخور کردن این تغییرات و عدم ورود آن‌ها به کانال مخابراتی در لایه‌ی ثانویه با استفاده از ساختار

اگر بخواهیم شکل (۱) را از دو منبع به  $N$  منبع تولیدپراکنده گسترش دهیم می‌توان یک مدل تقریب خطی را با استفاده از روابط (۱) و (۲) به صورت زیر به دست آورد:

$$\sum_{[i]} DGU : \begin{cases} \dot{x}_{[i]}(t) = A_{ii}x_{[i]}(t) + B_{ii}u_{[i]}(t) + M_{ii}d_{[i]}(t) + \xi_{[i]}(t) \\ y_{[i]}(t) = C_{ii}x_{[i]}(t) \end{cases}$$

در این رابطه  $u_{[i]}(t) = V_{ii}$  ورودی کنترلی،  $x_{[i]}(t) = [V_i \ I_{ii}]^T$  متغیر حالت است و ماتریس‌های رابطه به صورت زیر است:

$$A_{ii} = \begin{pmatrix} \sum_{j \in N} \frac{-1}{R_{ij}C_{ii}} & \frac{1}{C_{ii}} \\ -\frac{1}{L_{ii}} & -\frac{R_{ii}}{L_{ii}} \end{pmatrix}, B_{ii} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_{ii}} \end{pmatrix}, C_{ii} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \sum_j \frac{1}{R_{ij}C_{ii}} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, M_{ii} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_{ii}} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

حال اگر نامعینی‌های بار و امپدانس خطوط واسط مابین پارامترها و مبدل‌ها را هم لحاظ نماییم. رابطه (۳) به شکل زیر در می‌آید:

$$\dot{x}_{ai} = -\frac{1}{R_{ij}C_{ii}}x_{ai} + \frac{1}{C_{iin}}x_{bi} + \frac{1}{C_{ii}} \underbrace{\left( \frac{1}{R_{ij}}V_j - I_{Li} \right)}_{d_{ai}} + \Delta_{1i}x_{ai} + \Delta_{2i}x_{bi}$$

$$\dot{x}_{bi} = -\frac{1}{L_{iin}}x_{ai} - \frac{R_{iin}}{L_{iin}}x_{bi} + \frac{1}{L_{iin}}u_i + \underbrace{\left( \Delta_{3i}x_{ai} + \Delta_{4i}x_{bi} + \Delta_{3i}u_i \right)}_{d_{ai}}$$

$$y_i = x_{ai}$$

پس خواهیم داشت:

$$\Delta_{1i} = \frac{1}{R_{ijn}C_{iin}} - \frac{1}{R_{ij}C_{ii}} \quad \Delta_{2i} = -\frac{1}{C_{iin}} + \frac{1}{C_{ii}} \quad \Delta_{3i} = \frac{1}{L_{iin}} - \frac{1}{L_{ii}}$$

$$\Delta_{4i} = \frac{R_{iin}}{L_{iin}} - \frac{R_{ii}}{L_{ii}} \quad d_{ai} = \frac{1}{C_{ii}} \left( \frac{1}{R_{ij}}V_j - I_{Li} \right) + \Delta_{1i}x_{ai} + \Delta_{2i}x_{bi}$$

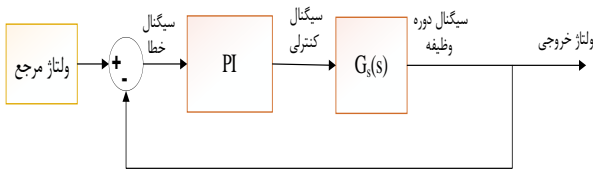
$$d_{bi} = \Delta_{3i}x_{ai} + \Delta_{4i}x_{bi} - \Delta_{3i}u$$

$d_{bi}$  و  $d_{ai}$  اختلال‌های ناشی از نامعینی‌هایی نظیر جریان خطی بار یا نامعینی در پارامترها است و مقادیر  $\Delta$  اختلاف مقدار نامی و واقعی در نظر گرفته شده است.

مفهوم هرویتز بودن برای این سیستم یعنی بررسی شرایطی که موجب ناپایداری سیستم می‌شود یا اینکه اگر سیستم ناپایدار است چگونه باید آن را به حالت پایداری رساند. مطابق [۱۶] برای چند جمله‌ای‌های با مرتبه‌ی پایین‌تر از ۵، صورت‌های ساده‌تری از صورت قبلی وجود دارد. اگر مرتبه چند جمله‌ای برابر ۳ و  $C_0^- > 0$  باشد شرط لازم و کافی برای پایداری مقاوم  $P$  پایدار بودن چند جمله‌ای  $K_4(s)$  است. برای چند جمله‌ای‌های مرتبه ۴،  $K_2(s)$  و  $K_4(s)$  را برای تست پایداری نیاز داریم و برای چند جمله‌ای‌های مرتبه ۵،  $K_1(s)$  و  $K_3(s)$  و  $K_4(s)$  نیاز است و از آنجا که در تئوری خارتانوف منظور از  $K(s)$  معادله مشخصه سیستم حلقه بسته است لذا با توجه به سیستم انتخاب شده در این مقاله، چند جمله‌ای مرتبه ۴ را خواهیم داشت.

### ۴-۲- محاسبه ضرایب PI با استفاده از تئوری خارتانوف

کنترل کننده اولیه ریزشیکه DC یک کنترل کننده PI است که مطابق بلوک دیاگرام شکل (۲) به سیستم  $G_s(s)$  اعمال شده و کنترل ولتاژ و تا حدی تسهیم جریان سیستم را به مقدار مطلوب نزدیک می‌کند.



شکل ۲: بلوک دیاگرام حلقه کنترل داخلی ولتاژ مبتنی بر کنترل کننده PI

تابع تبدیل سیستم و کنترل کننده‌ی اولیه به صورت زیر است:

$$\frac{y}{r} = \frac{G(s)(K_p + \frac{K_I}{s})}{1 + G(s)(K_p + \frac{K_I}{s})} \quad (12)$$

از طرفی تابع تبدیل بلوک دیاگرام (۴) با مقادیر ماتریسی رابطه (۳) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$G(s) = \frac{1}{LCs^2 + (RC + \frac{L}{R})s + 2} \quad (13)$$

و معادله مشخصه  $\Delta(s)$  نیز طبق (۱۳) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\Delta(s) = LCs^3 + (RC + \frac{L}{R})s^2 + (K_p + 2)s + K_I \quad (14)$$

با تطبیق رابطه‌ی (۱۴) و رابطه‌ی (۱۱)،  $q_0$  و  $q_1$  فقط بر مبنای ضرایب  $K_I$  و  $K_p$  هستند پس دارای نامعینی نخواهند بود اما  $q_2 = RC + \frac{L}{R}$  و  $q_3 = LC$  دارای نامعینی هستند. از آنجا که برای تشکیل چند جمله‌ای‌ها نیاز به محاسبه‌ی مقادیر بیشینه و کمینه‌ی  $q_0, q_1, \dots, q_3$  داریم،  $q_2$  و  $q_3$  را با تقریب ۵۰ درصد مقادیر نامی مطابق جدول (۱) زیر محاسبه می‌کنیم.

کنترل مقاوم PI توزیع شده به جبران انحرافات ولتاژ در لایه‌ی اولیه می‌پردازیم. در ادامه به معرفی تئوری خارتانوف می‌پردازیم.

### ۴-۱- تئوری خارتانوف

این تئوری یک ابزار بسیار کارآمد در بررسی پایداری سیستم‌ها و عملکرد مقاوم آن‌ها است. از تئوری خارتانوف می‌توان در تحلیل سیستم‌ها، سنتز و طراحی کنترل کننده‌های مقاوم بهره برد. این تئوری علاوه بر سیستم‌های با متغیرهای معین و ثابت، در سیستم‌های با نامعینی در ساختار پارامتری نیز بسیار کاربردی است. در ادامه به بررسی قضیه‌ی خارتانوف می‌پردازیم.

#### تعریف ۱:

اگر تابع تبدیل سیستم با وجود نامعینی در پارامتر را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$P(s, q, r) = \frac{N(s, q)}{D(s, r)} = \frac{\sum_{i=0}^m q_i s^i}{\sum_{i=0}^n r_i s^i} \quad (7)$$

یک مجموعه‌ی مرزی نامعینی فرض می‌شود:

$$Q = \{q \in \mathbb{R}^m : q_i^- \leq q_i \leq q_i^+; i = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (8)$$

$$R = \{r \in \mathbb{R}^n : r_i^- \leq r_i \leq r_i^+; i = 1, 2, 3, \dots, n\}$$

برای نشان دادن بازه تغییرات هر پارامتر از علامت (+) و (-) در بالای پارامتر استفاده شده است و به عنوان بیشترین و کمترین مقدار هر پارامتر محسوب می‌شوند. پس دسته‌ای از سیستم‌ها را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$P = \{P(s, q, r) : q \in Q, r \in R\} \quad (9)$$

#### تعریف ۲:

چند جمله‌ای  $K(s, q, r) = \sum_{i=0}^n a_i(q, r)S^i$  را در نظر بگیرید. اگر با ثابت نگه داشتن همه پارامترهای  $q$  و  $r$  به جز  $q_k$  و  $r_k$  و  $a_i(q, r)$  به ازای  $i = 0, 1, 2, \dots$  بر حسب  $q_k$  و  $r_k$  خطی شود درواقع این چند جمله‌ای یک چندجمله‌ای با ساختار نامعینی چند خطی است.

#### قضیه ۱:

چند جمله‌ای‌های  $p$  دارای ضرایب حقیقی و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$K(s) = q_0 + q_1s + q_2s^2 + q_3s^3 + \dots \quad (10)$$

این خانواده به صورت مقاوم پایدار خواهد بود اگر و تنها اگر شرط پایداری روث\_هرویتز برای چند جمله‌ای‌های زیر صادق باشد.

$$K_1(s) = q_0^+ + q_1^+s + q_2^-s^2 + q_3^-s^3 + \dots$$

$$K_2(s) = q_0^- + q_1^-s + q_2^+s^2 + q_3^+s^3 + \dots \quad (11)$$

$$K_3(s) = q_0^- + q_1^+s + q_2^+s^2 + q_3^-s^3 + \dots$$

$$K_4(s) = q_0^+ + q_1^-s + q_2^-s^2 + q_3^+s^3 + \dots$$

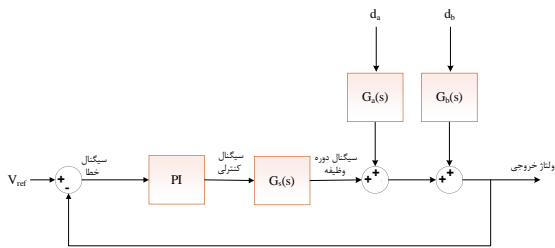
$$y(s) = G(s)u_i + G_a(s)d_{ai} + G_b(s)d_{bi} \quad (17)$$

تابع تبدیل نامعینی مربوط به  $d_{ai}$  و  $d_{bi}$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$G_a(s)d_{ai} = \frac{s + 250}{s^2 + 9.091 \times 10^8 s + 4.545 \times 10^{11}}$$

$$G_b(s)d_{bi} = \frac{4.545 \times 10^8}{s^2 + 9.091 \times 10^8 s + 4.545 \times 10^{11}} \quad (18)$$

به طور کلی کنترل اولیه با در نظر گرفتن نامعینی‌ها و ضرایب و متغیرها را می‌توان در بلوک دیاگرام شکل (۴) مشاهده کرد.



شکل ۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده و سیستم همراه با نامعینی‌ها

### ۳-۴- کنترل توزیع شده ثانویه

در این مقاله برای کنترل ریزشبه DC از کنترل سلسله‌مراتبی استفاده کردیم که دارای سطوح مختلفی است. ابتدایی‌ترین سطح آن که به سطح صفر مشهور است دارای کنترل‌های حلقه‌های داخلی ولتاژ و جریان است که با روش کنترل دروپ پیاده سازی شده است. در سطح اولیه آن از روش خارتانوف بهره برده شده است و حال کنترل ثانویه‌ی آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. کنترل ثانویه با دو هدف اصلی تضمین برطرف کردن انحراف ولتاژ ناشی از کنترل اولیه و تنظیم تسهیم جریان ریزشبه بین منابع طراحی می‌گردد. این کنترل کننده با استفاده از تئوری خارتانوف طراحی شده است. سطح کنترلی ثانویه باید بتواند خطای تقسیم بار بین واحدهای DG که ناشی از امپدانس‌های خط متفاوت است را از بین ببرد و افت ولتاژهای ایجاد شده از کنترل دروپ و همچنین تلفات خط انتقال را جبران نماید. ولتاژ را در مقدار مطلوب تنظیم نماید. این اهداف کنترلی با استفاده از کنترل دروپ تحقق پذیر نیست. بنابراین به سراغ کنترل ثانویه می‌رویم. لذا انتظار داریم روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه بتواند در عملکرد حالت دائم سه شرط زیر را برقرار سازد:

$$R_{di} I_{outi} = R_{dj} I_{outj}$$

$$e = V_B - V_{ref} = 0 \quad (19)$$

$$R_{di} \leq \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{ni}}$$

جدول ۱: مقادیر نامعینی  $q_i$

مقدار محاسبه شده	متغیر نامعینی
$1,3 \times 10^{-3}$	$q_2^-$
$12 \times 10^{-3}$	$q_2^+$
$1,1 \times 10^{-6}$	$q_3^-$
$1,9 \times 10^{-6}$	$q_3^+$

برای محاسبه‌ی ضرایب PI در شرایط پایداری از روش راوث\_هرویتز استفاده می‌کنیم. ابتدا چند جمله‌ای‌ها را با توجه به جدول (۲) به صورت زیر محاسبه می‌کنیم

$$K_1(s) = (1.1 \times 10^{-6})s^3 + (1.3 \times 10^{-3})s^2 + (K_p + 2)s + K_I$$

$$K_2(s) = (9.9 \times 10^{-6})s^3 + (12 \times 10^{-3})s^2 + (K_p + 2)s + K_I$$

$$K_3(s) = (1.1 \times 10^{-6})s^3 + (12 \times 10^{-3})s^2 + (K_p + 2)s + K_I$$

$$K_4(s) = (9.9 \times 10^{-6})s^3 + (1.3 \times 10^{-3})s^2 + (K_p + 2)s + K_I$$

در چند جمله‌ای‌های درجه ۳ شرایط راوث\_هرویتز را بررسی می‌کنیم. شرط اول هم علامت بودن ضرایب است که در این چند جمله‌ای‌ها تحقق یافته است. شرط دوم تحقق نامساوی  $q_1 q_2 > q_0 q_3$  است. لذا خواهیم داشت:

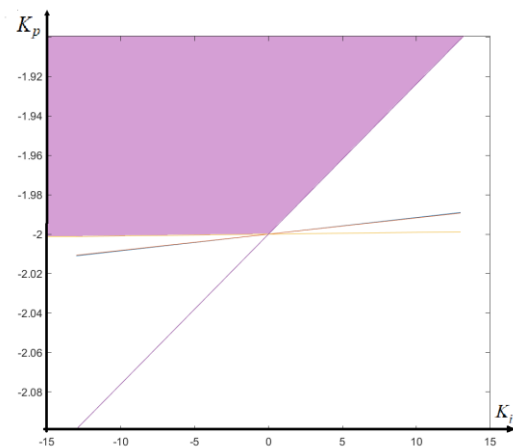
$$K_p > \frac{1.1}{1300} K_I - 2$$

$$K_p > \frac{9.9}{12000} K_I - 2$$

$$K_p > \frac{1.1}{12000} K_I - 2$$

$$K_p > \frac{9.9}{1300} K_I - 2$$

اشتراک چهار معادله (۱۶) مطابق شکل (۳) است که در محدوده  $0 < K_I < 0$  رابطه‌ی چهارم و در محدوده  $0 > K_I$  رابطه‌ی سوم ارضا کننده‌ی تمام معادلات (۱۶) است.



شکل ۳: اشتراک چند جمله‌ای‌های خارتانوف

با توجه به ماتریس‌های معادله (۳) برای نامعینی‌های سیستم تابع تبدیل تشکیل می‌دهیم. نهایتاً تابع تبدیل زیر به عنوان تابع تبدیل اصلی سیستم کنترل کننده اولیه ریزشبه DC است.

می گردد. پس از حذف خطاها، نقطه  $A$  به عنوان نقطه کار جدید ریزشیکه DC است. دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی در شکل (۶) در دو بخش مجزای کنترل اولیه و کنترل ثانویه آورده شده است. کنترل اولیه آن شامل کنترل ولتاژ و جریان داخلی و کنترل دروپ است و کنترل ثانویه آن به صورت توزیع شده طراحی شده است. یک رابط سیگنال کنترل ثانویه طراحی شده است تا به کنترل کننده دروپ در کنترل اولیه اضافه شود، این بخش را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V_i^{ref} = V^* - K_i I_i + u_i \quad (21)$$

که برای به دست آوردن ولتاژ باس خواهیم داشت:

$$V_b = V^* - (R_i + K_i) I_i + u_i \quad (22)$$

از معادله (۲۲) به راحتی می توان نتیجه گرفت که ما نیاز به حفظ دقت در تقسیم بار توسط کنترل کننده دروپ داریم، چرا که اگر فقط دروپ کنترل در مدار باشد تقسیم بار با توجه به اختلاف امپدانس بین واحدهای تولید کننده و باس DC خواهد بود در حالی که تقسیم بار باید بر اساس توان تولیدی هر واحد پراکنده باشد و مستقل از امپدانس خط و بار باشد. در حالت پایدار که تمام DGها سالم و مشابه هستند، ورودی های کنترل ثانویه باید برابر باشند، یعنی:

$$(u_i)^s = (u_j)^s, \forall i, j \quad (23)$$

که در آن  $(u_i)^s$  مقدار  $u_i$  را در حالت پایدار نشان می دهد. از تجزیه و تحلیل بالا، نتیجه می گیریم که هدف کنترل کننده ثانویه پیشنهادی بازگرداندن ولتاژ باس DC به مقدار مرجع  $V_{nom}$ ، یعنی  $\lim_{t \rightarrow \infty} e^V(t) = 0$  است. در حالی که محدودیت ورودی کنترل را برآورده می کند. یعنی:  $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{u(t)}(t) = 0, \forall i$  که در آن  $e^V$  و  $e^{u(t)}$  به عنوان خطای بازیابی ولتاژ و خطای اجماع ورودی کنترل نام گذاری شده اند که به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند

$$e^V = V^* - V_b \quad (24)$$

$$e^{u_i} = \sum_{j \in N_i} (u_j - u_i) \quad (25)$$

که در آن  $N_i$  مجموعه همسایگی کنترل کننده دوم را نشان می دهد. سپس یک کنترل ثانویه توزیع شده به طراحی شده است.

$$u_i = K_{p_i} e_i + K_{i_i} \int e_i dt \quad (26)$$

که در آن  $K_{p_i}$  و  $K_{i_i}$  ضرایب کنترل کننده نسبی و انتگرال (PI)

برای  $DG_i$  هستند.  $e_i$  خطای ترکیبی است که به صورت زیر تعریف

$$e_i = \alpha_i e^V + \beta_i e^{u_i} \quad (27)$$

به طوری که  $\alpha_i, \beta_i \in R^+$  دستاوردهای ترکیبی هستند. نمودار دقیق کنترل ثانویه پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. توجه داشته

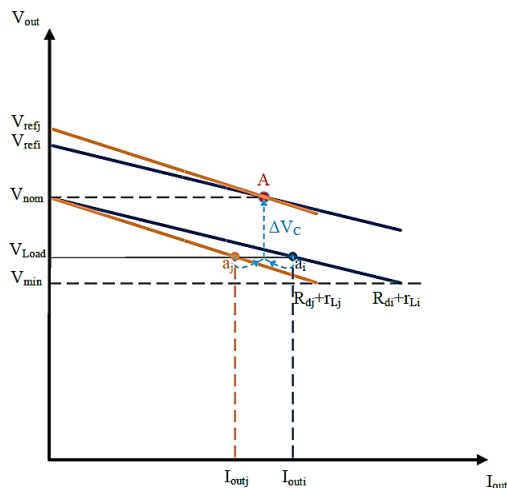
که در آن  $I_{out_i}, I_{out_j}, R_{d_i}$  و  $R_{d_j}$  به ترتیب معرف جریان های خروجی و ضریب دروپ منبع  $i$  ام و  $j$  ام هستند.  $V_{nom}$  و  $V_{min}$  نیز به ترتیب کمترین ولتاژ باس و ولتاژ نامی فرض شده اند. جریان نامی واحد DG شماره  $i$  ام با  $I_{ni}$  نشان داده شده است. شرط سوم برخلاف دو شرط اول که به تنظیم ولتاژ و تقسیم بار مربوط اند به پایداری سیستم مربوط می شود بدین صورت که برقراری این شرط از این جهت اهمیت دارد که با انتخاب ضریب دروپ بزرگ DC می تواند منجر به انحراف ولتاژ خروجی مبدل از مقدار مجاز فراتر رود و حاشیه پایداری ریزشیکه تحت تاثیر قرار گیرد.

یک ریزشیکه نظیر شکل (۱) در نظر بگیرید.  $R_{d1}$  و  $R_{d2}$  ضرایب دروپ کنترل و به عنوان مقاومت های مجازی،  $r_{L1}$  و  $r_{L2}$  مقاومت های خط انتقال  $R_{Load}$  مقاومت بار است که ولتاژ دو سر بار و نسبت جریان های دو واحد DG برابر می شود با:

$$V_{load} = V_{dc} - R_{d_j} I_{out_j} - r_{L_j} I_{out_j} \quad (20)$$

$$\frac{I_{out_i}}{I_{out_j}} = \frac{R_{d_j} + r_{L_j}}{R_{d_i} + r_{L_i}}$$

بنابراین می توان نتیجه گرفت که اگر امپدانس های خط متفاوت باشند، تقسیم توان بار متناسب نخواهد بود. اما دو هدف دقت در تقسیم بار بین واحدهای DG و بازیابی ولتاژ باس DC می توانند فقط از طریق تنظیم ولتاژ  $V_{dc}$  حاصل شوند. شکل (۵) مشخصه های کنترل دروپ روش پیشنهادی را در قالب ولتاژ و جریان خروجی نشان می دهد. نقاط  $a_i$  و  $a_j$  به ترتیب نقاط کار واحدهای DG اول و دوم قبل از اجرای روش کنترل توزیع شده هستند.

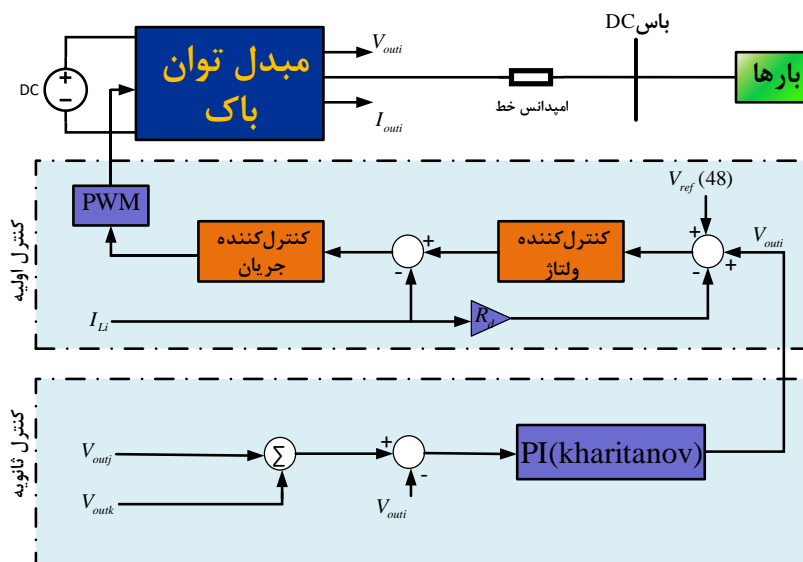


شکل ۵: تغییر مشخصه دروپ دو واحد تولید پراکنده هنگام اجرای کنترل توزیع شده ثانویه

همان طور که مشاهده می شود در این روش هر دو هدف تنها با اضافه کردن پارامتر  $\Delta V_c$  به ولتاژ نامی تحقق می یابد. در واقع این پارامتر ولتاژ نامی هر واحد DG را تصحیح می کند و خطا در تقسیم بار به تبع آن حذف

اغلب روش های کنترل ریزشبه، برای اجرا روش ارائه شده خود به سیستم ارتباط سرتاسری نیاز دارند، این سیستم ارتباطی افزایش هزینه ها را به دنبال دارد و از قابلیت اطمینان کافی برخوردار نیست. اما روش کنترل ثانویه توزیع شده پیشنهادی در این مقاله نیاز به ارتباط سراسری ندارد و فقط با ارتباط گرفتن و تبادل اطلاعات با واحدهای مجاور خود می تواند اهداف کنترلی را تحقق بخشد. شکل (۸) ارتباطات ریزشبه را نشان می دهد.

باشید که بر خلاف روش های پیش خور [۱۷] موجود، بازیابی ولتاژ ثانویه پیشنهادی با یک سازوکار فیدبک تحقق می یابد. علاوه بر این، هیچ اطلاعات جهانی مورد نیاز نیست. جمع سه جمله در رابطه فوق خطای ورودی کنترل کننده PI را می سازد، جمله اول مربوط به دقت در تقسیم بار است و شرط اول را محقق می سازد و شرط دوم و سوم نیز در جملات بعدی ارضا می شوند. جمله دوم جهت جبران افت ولتاژ خروجی ناشی از کنترل دروپ و جمله سوم جبران کننده افت ولتاژ خط انتقال ناشی از امپدانس خط انتقال است.

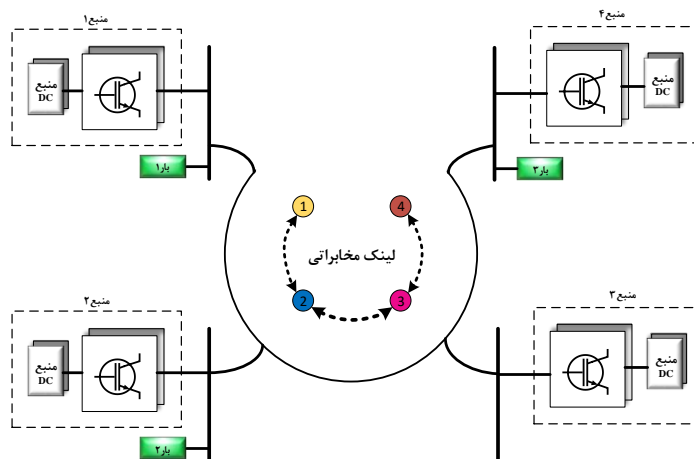


شکل ۶: بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

محیط Simulink/SimPowerSystems شبیه سازی شده است و در آن ویژگی عملکرد قطع و وصل واحدهای تولیدپراکنده (PnP) و بارها روی روش پیشنهادی انجام گرفته است. این مدل آزمایشی یک ریزشبه DC جزیره ای شامل ۴ واحد تولیدپراکنده معمولی مطابق شکل (۸) است

### ۵- نتایج شبیه سازی و مطالعات موردی

به منظور اعتبارسنجی طرح کنترل ثانویه توزیع شده با روش خارتانوف که در این مقاله پیشنهاد شده است، یک مدل آزمایشی در



شکل ۷: سیستم ارتباطی بین واحدهای تولیدپراکنده در ریزشبه DC

آزمایشی ۴۸ ولت است؛ به عنوان فیدبک خطای ولتاژ به کنترل ثانویه توزیع شده متصل می گردد. بنابر تعریف مرجع شماره [۱۸] اتصال یا عدم اتصال این خطا به هر واحد تولیدپراکنده بهره ای اتصال<sup>۱</sup> نامیده می شود. به عنوان مثال در ابتدا بهره های اتصال را به صورت  $g_1 = 1$  و  $g_2 = g_3 = g_4 = 0$  تنظیم شده است، در این نحوه ی تنظیم ولتاژ باس DC فقط به DG<sub>1</sub> ارسال می شود.

جدول ۳: پارامترهای کنترل کننده ثانویه

DG <sub>i</sub>		
مقدار	پارامتر	کنترل ثانویه
۱	$K_{Pi}$	
۴۰	$K_{Ii}$	
$V^* = 48$ ولت		ولتاژ مرجع
$R_{Li} = 5$ اهم		بارها

### ۱-۵ سناریوهای کنترل ثانویه توزیع شده

#### پیشنهادی

مدل ارائه شده در ۵ مرحله مورد آزمایش واقع شده است:

سناریو ۱. (۵-۰ ثانیه): اتصال فیدبک خطای باس اصلی فقط به یک واحد تولیدپراکنده به جای اتصال خطا به همه ی DGها.

سناریو ۲. (۱-۰ ثانیه): فقط کنترل اولیه در  $t = 0$  s فعال است و هنوز کنترل ثانویه به مدار اعمال نشده است.

سناریو ۳. (۵-۱ ثانیه): کنترل ثانویه از  $t = 1$  s فعال می شود.

سناریو ۴. (۴-۲ ثانیه): بار دوم در ثانیه ی ۲ به باس اصلی ریزشبه DC که در حال عملیات است، متصل می شود و پس از ۲ ثانیه از آن جدا می شود.

سناریو ۵. (۵-۳ ثانیه): واحد تولیدپراکنده چهارم به ریزشبه وصل می شود.

با بررسی این مطالعات موردی می توان میزان کارایی کنترل کننده ی پیشنهادی را بدست آورد. این مطالعات هم شامل کنترل کننده اولیه می شود و هم کنترل کننده ی ثانویه را مورد آزمایش قرار می دهد. نمودار ارتباطی در شکل (۸) نشان داده شده است و نتایج شبیه سازی در شکل های (۹) تا (۱۲) ارائه شده است.

در ابتدا همه ی واحدهای تولیدپراکنده به باس اصلی متصل نیستند و DG شماره ی ۴ به عنوان پشتیبان سیستم در نظر گرفته شده است.  
جدول ۲: پارامترهای ریزشبه و کنترل اولیه

DG <sub>4</sub> و DG <sub>3</sub>		DG <sub>2</sub> و DG <sub>1</sub>		
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	
۱۰۰ ولت	$V_{DC}$	۱۰۰ ولت	$V_{DC}$	ریزشبه
۱٫۲۵ کیلوهرتز	$f_B$	۱٫۲۵ کیلوهرتز	$f_B$	
$10^{-1}$ $1 \times 10^2$ هانری	$L_f$	$10^{-1}$ $1 \times 10^2$ هانری	$L_f$	فیلتر LC مقاومت خط
۲۲۰۰ میکروفاراد	$C_f$	۲۲۰۰ میکروفاراد	$C_f$	
۰٫۰۱ اهم	$R_3$ و $R_4$	۰٫۰۱ اهم	$R_1$ و $R_2$	مقاومت خط
۴	$K_{VP}$	۴	$K_{VP}$	حلقه ولتاژ
۸۰۰	$K_{VI}$	۸۰۰	$K_{VI}$	
۵	$K_{IP}$	۵	$K_{IP}$	حلقه جریان
۱۱۰	$K_{II}$	۱۱۰	$K_{II}$	
۲ و ۲	$K_3$ و $K_4$	۶ و ۳	$K_1$ و $K_2$	بهره دروپ

واحد تولیدپراکنده ۴م در ابتدا به ریزشبه متصل نیست و بعد از به راه انداختن همه ی سطوح کنترلی، از جهت آزمون کارایی روش پیشنهادی، به مدار افزوده می گردد. در این شبیه سازی که در شکل (۶) نشان داده شده است. مبدل باک DC/DC در هر DG استفاده می شود و حلقه کنترل اولیه آن در شکل (۷) نشان داده شده است، که در آن دو کنترل کننده استاندارد PI به ترتیب در حلقه کنترل ولتاژ و حلقه کنترل جریان استفاده می شود. پارامترهای لایه کنترل اولیه و همچنین سیستم ریزشبه DC در جدول (۲) به طور مختصر آورده است. پارامترهای کنترل کننده ثانویه پیشنهادی در جدول (۳) فهرست شده است. در مطالعات موردی، بهره های دروپ DGها به صورت  $K_1 = 2$ ،  $K_2 = 2$ ،  $K_3 = 3$ ،  $K_4 = 6$  انتخاب شده اند و مطابق ساختار کنترل کننده ی ثانویه توزیع شده، ولتاژ باس DC اندازه گیری می شود و اختلاف آن از ولتاژ مرجع که در این مدل

<sup>1</sup> Pinning Gain

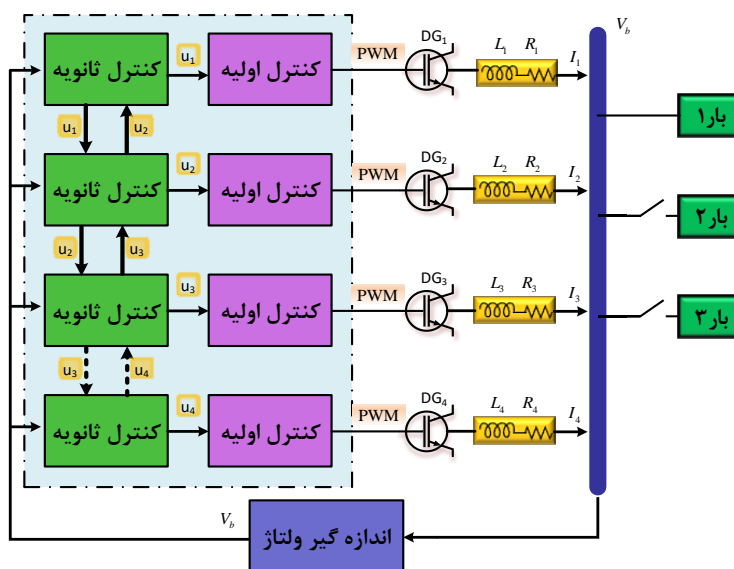
اول از آن جهت که اگر سیستم بدون نیاز به اتصال فیدبک به همه‌ی واحدهای تولیدپراکنده بتواند به طور نسبی کنترل ریزشیکه را انجام دهد؛ کابل کشی کم‌تری بین اجزای کنترل‌کننده نیاز است. لذا در قیمت تمام شده کنترل‌کننده تاثیر دارد. ثانياً قابلیت گسترش ریزشیکه، که یکی از مهم‌ترین دلایل به کار بستن کنترل‌کننده‌های توزیع شده است.

۵-۱-۱ سناریو ۱: اتصال فیدبک خطای باس اصلی

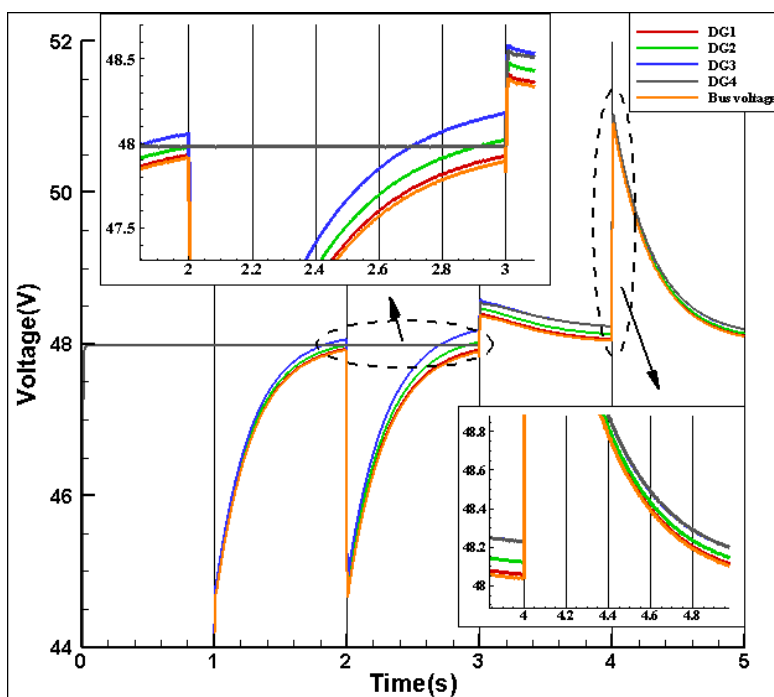
فقط به یک واحد تولیدپراکنده به جای اتصال خطا به

همه‌ی DGها

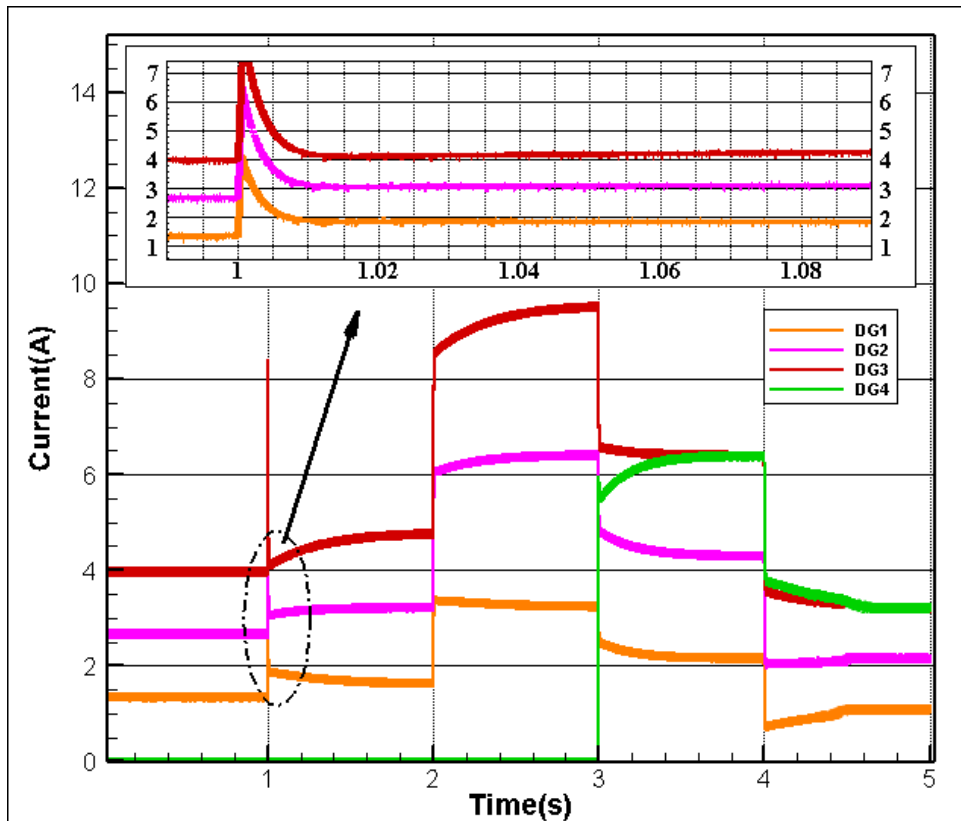
در سناریو اول قصد داریم تاثیر اتصال فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی را به همه‌ی DGها را با حالتی که فیدبک مذکور فقط به یک DG متصل است را مورد بررسی قرار دهیم. این مسئله از دو جهت حائز اهمیت است.



شکل ۸: نمودار ارتباطی بین واحدهای تولیدپراکنده



شکل ۹: خروجی ولتاژ ریزشیکه DC جزیره‌ای مورد آزمایش در حالت اتصال فیدبک ولتاژ فقط به یک DG



شکل ۱۰: خروجی جریان ریزشبه DC جزیره‌ای آزمایشی در حالت اتصال فیدبک ولتاژ فقط به یک DG

ضمن اطمینان از عملکرد کنترل کننده در این مطالعه موردی، ادامه آزمایش‌ها را با دسترسی همه‌ی DGها به ولتاژ باس اصلی DC ادامه می‌دهیم.

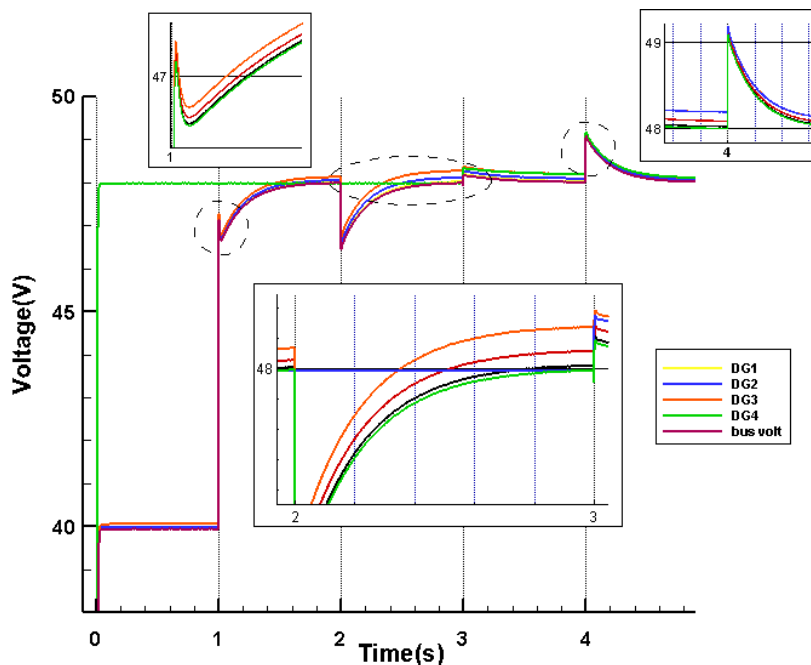
۲-۱-۵ سناریو ۲: فقط کنترل اولیه فعال است و هنوز

کنترل ثانویه به مدار اعمال نشده است.

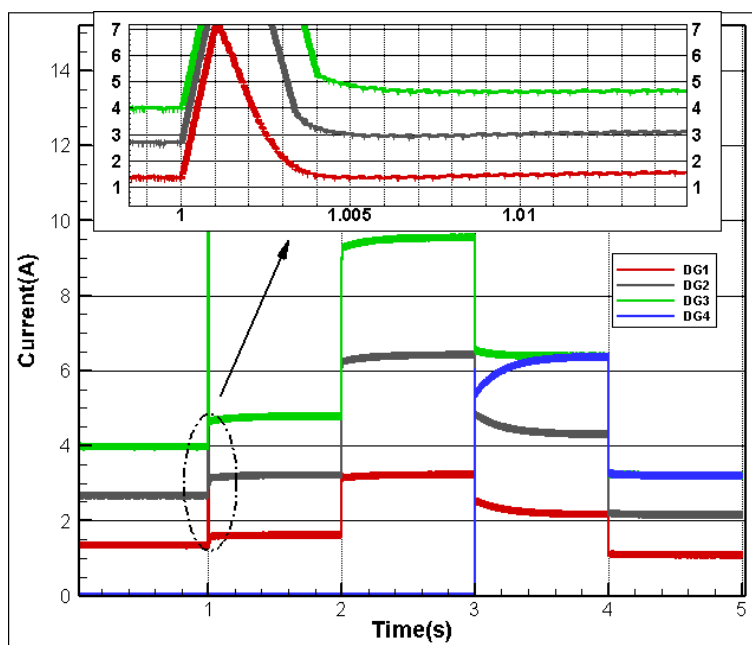
همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، ولتاژ باس اصلی پس از اعمال کنترل کننده به جای ۴۸ ولت به ۳۹٫۹۴ ولت کاهش می‌یابد که دلیل آن اثر کنترل دروپ است، چرا که فقط کنترل اولیه فعال است. لذا شاهد افت ولتاژ باس اصلی DC از ولتاژ مرجع هستیم. البته در این حالت نیز ریزشبه تا حدودی به اهداف کنترلی نزدیک شده است یعنی علاوه بر تنظیم ولتاژ، تسهیم توان متناسب با ظرفیت هر واحد تولیدپراکنده انجام شده است، اما همانطور که در بخش ۱ اشاره شد؛ اهداف به طور دقیق تامین نشده است و برای تامین دقیق اهداف نیاز به کنترل کننده‌ی ثانویه داریم.

در ساختاری که فیدبک فقط به یک DG متصل است راحت‌تر و کم هزینه‌تر قابل انجام است. در این مطالعه موردی، ما عملکرد روش پیشنهادی خود را تحت دو نوع اتصال مختلف مقایسه می‌کنیم. در شکل (۹) و (۱۰) فقط واحد کنترل پراکنده‌ی شماره ۱ به فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی DC متصل است و از کنترل کننده‌ی توزیع شده انتظار می‌رود بتواند با ارتباطاتی که هر DG با همسایه‌ی خود دارد میزان انحراف ولتاژ باس اصلی DC را به سایر واحدهای تولیدپراکنده برساند و سیگنال کنترلی لازم برای جبران این انحراف ولتاژ از طرف همه‌ی DGها صادر شود؛ به طوری که تسهیم جریان مطابق توان تولیدی هر DG باشد که این انتظارات مطابق شکل (۹) و (۱۰) تحقق یافته است.

اما همان طور که مشاهده می‌شود در مقام مقایسه با شکل‌های (۱۱) و (۱۲) زمان رسیدن به هدف کنترلی در حالتی که همه‌ی واحدهای تولیدپراکنده به ولتاژ باس اصلی DC دسترسی دارند؛ طولانی‌تر است. لذا



شکل ۱۱: خروجی ولتاژ ریزشبه DC جزیره‌ای مورد آزمایش در حالت دسترسی همگی DGها به ولتاژ باس اصلی



شکل ۱۲: خروجی جریان ریزشبه DC جزیره‌ای آزمایشی در حالت دسترسی همگی DGها به ولتاژ باس اصلی

پس از انحرافات گذرا، به حالت پایدار می‌رسد. نکته‌ی قابل تامل این است که جبران ولتاژ باس اصلی DC نباید منجر به برهم زدن نسبت تسهیم توان بین واحدهای تولیدپراکنده شود. در شکل (۱۰) به وضوح مشاهده می‌شود که در لحظات ابتدایی اعمال شدن کنترل ثانویه، افزایش جریان DG<sub>1</sub> بیش از DG<sub>2</sub> است و DG<sub>3</sub> کمترین افزایش جریان و به تبع کمترین نقش را در جبران انحراف ولتاژ ناشی از دروپ دارد. این موضوع به دلیل دسترسی مستقیم DG<sub>1</sub> به فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی، و دسترسی غیر مستقیم و

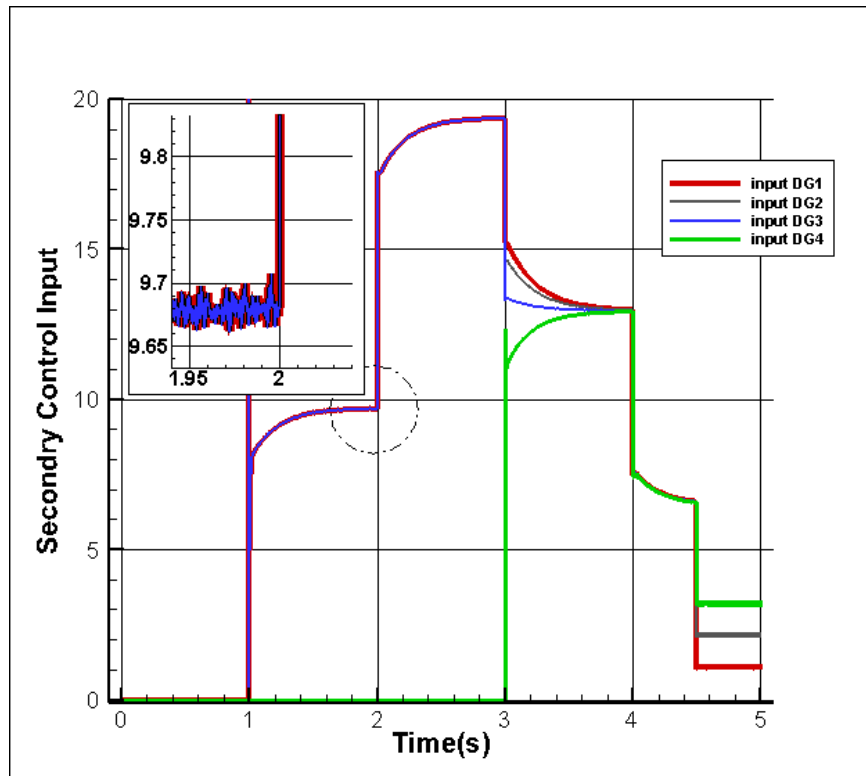
۳-۵ سناریو ۳: کنترل ثانویه از ثانیه اول فعال می‌شود.

هنگامی که کنترل ثانویه پیشنهادی ما در  $t = 1$  s فعال می‌شود، ولتاژ باس اصلی به سرعت به مقدار مرجع  $V_{ref} = 48$  ولت باز می‌گردد. البته خطاهای گذرا در لحظات اولیه وجود دارد ولی در نهایت ولتاژ باس DC

این حالت پایداری ولتاژ باس اصلی، بدون توجه به توپولوژی بارها است چرا که اگر به طور مثال بار دوم به باس متصل شود یا از آن قطع شود، ولتاژ باس اصلی در ۴۸ ولت باقی می ماند. این نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی قادر به حذف انحراف ولتاژ باس ناشی از کنترل دروپ است. علاوه بر این، با نگاهی بیشتر به خروجی جریان که در شکل (۱۰) به طور کامل نشان داده شده است؛ می توان دریافت که روش پیشنهادی قادر است اشتراک گذاری توان ارائه شده توسط کنترل کننده اولیه را حفظ کند، به عنوان مثال اگر نسبت جریان ها را به صورت  $I_1 = 1$ ،  $I_2 = 2$  و  $I_3 = 3$  در نظر بگیریم، مشاهده خواهیم کرد که صرف نظر از افزایش بار در مرحله ۳ یا کاهش بار در مرحله ۵ نسبت اشتراک گذاری توان یکسانی است.

با تاخیر DG2 و DG3 به ولتاژ باس اصلی است. در حالت ماندگار، تسهیم جریان مطلوب هم در حالت دسترسی محدود به ولتاژ باس اصلی و هم در حالت دسترسی همه ی DGها به ولتاژ باس اصلی، رقم می خورد و هر واحد تولیدپراکنده به نسبت توان تولیدی در جبران ولتاژ انحرافی نقش ایفا می کند. نتایج شبیه سازی ورودی های کنترل ثانویه که در شکل (۱۳) نشان داده شده اند به وضوح تایید می کند که ورودی های کنترل ثانویه در حالت ماندگار برابر هستند [۱۲].

۴-۱-۵ سناریو ۴: بار دوم در ثانیه ی ۲ به باس اصلی ریزشبه DC که در حال عملیات است، متصل می شود و پس از ۲ ثانیه از آن جدا می شود.



شکل ۱۳: ورودی های کنترل ثانویه

شکل ها نشان داده شده است. در شکل (۱۳) هنوز واحد تولیدپراکنده چهارم به باس متصل نشده است و در حالت آماده به کار با ولتاژ خروجی ۴۸ ولت است و ورودی کنترل ثانویه آن صفر است. هنگامی که DG4 در  $t = 3$  s وصل می شود، ولتاژ باس اصلی به ۴۸٫۶ ولت افزایش می یابد. اما سپس به سرعت به ۴۸ ولت باز می گردد. در نهایت به وضوح مشاهده می شود که ورودی کنترل ثانویه DG4 به یک مقدار ثابت می گراید. هنگامی که DG4 در  $t = 5$  s قطع می شود، هر دو ولتاژ و جریان خروجی مانند مرحله ۲ هستند. این نتایج نشان می دهد که می توان منابع تولیدپراکنده را بدون نیاز به خاموش کردن ریزشبه DC قطع و وصل کرد.

۵-۱-۵ سناریو ۵: واحد تولیدپراکنده چهارم به ریزشبه وصل می شود.

یکی از مهم ترین رخدادهایی که در ریزشبه ها وجود دارد رخداد قطع و وصل واحدهای تولیدپراکنده است که در اصطلاح به PnP شهرت دارد. در این مطالعه موردی، این ویژگی روش پیشنهادی مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. ریزشبه مورد آزمایش دارای یک واحد تولیدپراکنده پشتیبان (DG4) است که از  $t = 3$  s به باس DC با همان نسبت تسهیم توان DG3 وصل شده و در  $t = 5$  s قطع شده است. نتایج شبیه سازی در

- IEEE Transactions on power electronics, vol. 31, no. 7, pp. 4876-4891.
- [7] P. C. Loh, F. Blaabjerg, S. Peyghami-Akhuleh, H. Mokhtari, 2016. 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), IEEE, pp. 641-645.
- [8] J. Yang, X. Jin, X. Wu, P. Acuna, R. P. Aguilera, T. Morstyn, V. G. Agelidis. 2017. Decentralised control method for DC microgrids with improved current sharing accuracy. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 3, pp. 696-706.
- [9] F. Gao, R. Kang, J. Cao, T. Yang. 2019. Primary and secondary control in DC microgrids: a review. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 2, pp. 227-242.
- [10] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, in 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2013, pp. 1-6.
- [11] M. Dong, L. Li, Y. Nie, D. Song, J. Yang. 2019. Stability analysis of a novel distributed secondary control considering communication delay in DC microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6690-6700.
- [12] F. Guo, Q. Xu, C. Wen, L. Wang, P. Wang. 2018. Distributed secondary control for power allocation and voltage restoration in islanded DC microgrids. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 4, pp. 1857-1869.
- [13] A. Abhishek, A. Ranjan, S. Devassy, B. Kumar Verma, S. K. Ram, A. K. Dhakar. 2020. Review of hierarchical control strategies for DC microgrid. IET Renewable Power Generation, vol. 14, no. 10, pp. 1631-1640.
- [۱۴] سیاوش اشنویی و رضا غنی زاده، ۱۳۹۷، طراحی کنترل کننده مقاوم فرکانس مبتنی بر تئوری خارتانوف، سومین کنفرانس ملی فناوری در مهندسی برق و کامپیوتر، تهران.
- [۱۵] علی حسامی نقشبندی، فرشید حبیبی و حسن بیورانی، ۱۳۹۱، طراحی یک کنترل کننده مقاوم ولتاژ برای یک ریزشیکه منفک براساس تئوری خارتانوف، بیستمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تهران.
- [16] B. R. Barmish, E. Jury. 1994. New tools for robustness of linear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 12, pp. 2525-2525.
- [17] J. P. Lopes, C. L. Moreira, A. Madureira. 2006. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp. 916-924.
- [18] M. S. Sadabadi, Q. Shafiee, A. Karimi. 2017. Plug-and-play robust voltage control of DC microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6886-6896.
- تمامی سناریوهای فوق و نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهند که کنترل کننده پیشنهادی قادر به تنظیم ولتاژ و تقسیم صحیح توان مابین منابع تولید پراکنده در حضور عدم قطعیت ها در پارامترهای نامی ریزشیکه می باشد. این مهم با به کارگیری ساختار کنترل غیر متمرکز مبتنی بر تئوری خارتانوف قادر به حذف عدم قطعیت ها و اغتشاشات میسر شده است.
- ## ۶- نتیجه گیری
- در این مقاله، یک کنترل کننده مقاوم مبتنی بر ترکیب دو ساختار کنترل غیر متمرکز و کنترل ثانویه توزیع شده پیشنهاد شد. در این سیستم کنترل غیر متمرکز PID توسط روش خارتانوف طراحی شده است که در نتیجه اغتشاشات و عدم قطعیت هایی که اغلب در پیاده سازی عملی شاهد آن هستیم، پیش از ورود به کانال کنترل ثانویه اصلاح می شود. از طرفی کنترل کننده مزایای کنترل توزیع شده را نیز در بردارد. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل کننده را در سناریوهای مختلف نظیر PnP، تغییرات بار و محدود شدن فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی نشان می دهد. در تمام موارد مطالعه شده ردیابی ولتاژ مرجع و تسهیم توان متناسب با توان هر واحد تولید پراکنده به خوبی انجام گرفته است.
- ## مراجع
- [1] S. Dadjo Tavakoli, J. Khajesalehi, M. Hamzeh, K. Sheshyekani. 2016. Decentralised voltage balancing in bipolar dc microgrids equipped with trans-z source interlinking converter. IET Renewable Power Generation, vol. 10, no. 5, pp. 703-712.
- [2] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Irvani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke. 2014. Trends in microgrid control. IEEE Transactions on smart grid, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919.
- [3] S. Islam, S. Agarwal, A. Shyam, A. Ingle, S. Thomas, S. Anand, S. R. Sahoo. 2018. Ideal current-based distributed control to compensate line impedance in DC microgrid. IET Power Electronics, vol. 11, no. 7, pp. 1178-1186.
- [4] C. Papadimitriou, E. Zountouridou, N. Hatzargyriou. 2015. Review of hierarchical control in DC microgrids. Electric Power Systems Research, vol. 122, pp. 159-167.
- [5] A. C. Zambroni de Souza, M. Santos, M. Castilla, J. Miret, L. Garcia de Vicuna, D. Marujo. 2015. Voltage security in AC microgrids: a power flow-based approach considering droop-controlled inverters. IET Renewable Power Generation, vol. 9, no. 8, pp. 954-960.
- [6] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero. 2015. DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques.