مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله کاربردی
جلد۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۶۸-۵۵

کنترل ولتاژ ریزشبکه DC با استفاده از کنترل‌کننده‌ی سلسله مراتبی مبتنی بر تئوری خاریتانوف

محمد حافظ علویان[۱]، نیما مهدیان دهکردی[۲] و محمد جواد نجفی راد[۳]

[۱] دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران hafezalavian96@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران nimamahdian@sru.ac.ir
[۳] دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران najafirad.mj@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

چکیده: در این مقاله، یک رویکرد کنترل مقاوم سلسله مراتبی جدید مبتنی بر ترکیب کنترل غیرمتمرکز و توزیع‌شده برای کنترل ولتاژ و تسهیم توان در ریزشبکه‌های DC جزیره‌ای با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات در حلقه‌های کنترل اولیه و کانال‌های مخابراتی در لایه‌ی ثانویه پیشنهاد شده است. عدم‌قطعیت‌ها و اختلالات عوامل اساسی هستند که می‌توانند بر پایداری یک ریزشبکه تأثیر بگذارند. برخلاف روش‌های قبلی، ابتدا با استفاده از یک ساختار کنترل مقاوم غیرمتمرکز PI مبتنی بر تئوری خاریتانوف حلقه‌ی کنترل اولیه‌ی ولتاژ با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها 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 توزیع‌شده به جبران انحرافات ولتاژ در لایه‌ی اولیه می‌پردازیم. کنترل‌کننده 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 عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات بزرگ کاملاً رضایت‌بخش است. شبیه سازی‌های مختلف در جعبه ابزار MATLAB/SimPowerSystems بر روی یک ریزشبکه‌ی DC استاندارد شامل چهار منبع تولیدپراکنده و تحت سناریوهای مختلف انجام می‌شود. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. به طور کلی، کنترل‌کننده پیشنهادی قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها را از طریق ارسال بسیار کم داده‌ها در کانال مخابراتی افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترل سلسله مراتبی، تئوری خاریتانوف، کنترل توزیع شده، ریزشبکه 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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

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[1] 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 ریزشبکه‌ها که به دلیل تنوع در منابع تولیدپراکنده[2]، ذخیره‌سازها، بارها و مبدل‌ها که در واقع عناصر اجزای اصلی یک ریزشبکه DC به حساب می‌آیند؛ اغلب ریزشبکه‌ها نیاز به عناصر حفاظتی و سامانه‌ی نظارت و کنترل دارند.

ساختار کنترل سلسله مراتبی اخیراً به عنوان یک طرح قابل دفاع که قابلیت گسترش ریزشبکه را نیز فراهم می‌کند بسیار مورد توجه قرار گرفته است که توانسته زمان پاسخ، چارچوب کنترل و عملکرد مناسبی را در ریزشبکه‌ها ارائه دهد. کنترل سلسله مراتبی به سه سطح اولیه، ثانویه و ثالثیه طبقه بندی می‌شود. سطح کنترل اولیه همچنین به عنوان کنترل‌کننده 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 ریزشبکه نیز نقش دارد. کنترل ثانویه با زمان پاسخ کندتر از کنترل‌کننده اولیه برای جبران انحراف ولتاژ ناشی از سطح اولیه استفاده می‌شود. بنابراین، کنترل‌کننده ثانویه بر بازیابی ولتاژ در باس DC و اشتراک جریان مناسب بین منابع تولیدپراکنده تمرکز می‌کند. در نهایت کنترل‌کننده سطح سوم، کنترل سطح بالایی است که برای حفظ عملکرد بهینه از نظر کارایی و هزینه در ریزشبکه‌ها، بین ریزشبکه 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 می توان به صورت متمرکز یا غیرمتمرکز یا توزیع‌شده بسته به سطح کنترل و ساختار ریزشبکه اجرا کرد.

یکی از عناصر لازم برای کنترل ریزشبکه‌ها 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 ریزشبکه و مبدل‌ها و همچنین برای فراهم کردن اتصال هماهنگ بین ماژول‌های مختلف در یک ریزشبکه، 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 کنترل‌کننده‌های جریان و ولتاژ محلی و یک حلقه کنترل دروپ است [۶].

برای سیستم‌هایی که جریان و ولتاژ DC را در ریزشبکه‌های DC به صورت محلی کنترل می‌کنند، معمولاً از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی[3] استفاده می‌شود. اما بعضی از ریزشبکه‌ها نیز از کنترل‌کننده تناسبی-مشتق‌گیر بهره می‌برند. لذا در حالت بهتر می‌توان با ترکیب اثرات مفید کنترل‌کننده‌های PI و PD، از کنترل‌کننده 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، سنکرون‌کردن ریزشبکه 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 هنگامی‌که 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 کنترل‌کننده ثانویه می‌تواند برای یک ریزشبکه 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 انعطاف‌پذیر و قابل قبولی را با استفاده از یک کنترل‌کننده 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[4] را برای یک ریزشبکه 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 کنترل‌کننده 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].

[1] Microgrids (MGs)
[2] Distributed Generator (DG)
[3] Proportional Integral (PI)
[4] Plug-and-Play (PnP)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

کنترل ثانویه توزیع‌شده به یک شبکه ارتباطی توزیع‌شده 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 ریزشبکه را برآورده می‌کند. در اینجا، بازیابی ولتاژ و تسهیم جریان با استفاده از یک کنترل‌کننده ولتاژ متوسط جداگانه و یک کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده جریان و خروجی‌های کنترل‌کننده ولتاژ می‌شود. از این رو، دونگ و همکاران [۱۱] یک کنترل ثانویه توزیع‌شده را بدون استفاده از دروپ برای بازیابی ولتاژ و تسهیم جریان برابر در ریزشبکه DC با تولید ولتاژ خروجی مورد بحث قرار می‌دهد.

مرجع ولتاژ از طریق یک الگوریتم اجماع توزیع‌شده با استفاده از ولتاژ و جریان متوسط. با این حال، در کار Guo و همکاران [۱۲]، یک نسخه بهبود یافته از کنترل ثانویه توزیع‌شده 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 کنترل‌کننده ثانویه را برای دستیابی به هدف مورد نظر به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. کنترل ثانویه به طور قابل توجهی قابلیت اشتراک توان ریزشبکه خوشه‌ای را بهبود می‌بخشد. از این رو توجه به کنترل ثانویه ریزشبکه خوشه‌ای مهم است. برای این کار، چارچوب کنترل کنترل ثانویه ریزشبکه خوشه‌ای باید بهبود یابد [۱۳].

به طور کلی، بیشتر روش‌های موجود به منظور بهینه کردن پارامترهای کنترل‌کننده PI ممکن است در مواجه با عدم قطعیت‌ها و مشخصه‌های متغیر با زمان شبکه مخابراتی به خوبی کار نکنند. تئوری خاریتانوف به منظور بررسی پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت‌ها معرفی شده است. تنظیم کنترل‌کننده 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 خاریتانوف 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 کنترل‌کننده PI مبتنی بر تئوری خاریتانوف در ریزشبکه های جریان متناوب به کار گرفته شده است. اما پژوهش‌های کمی بر روی کاربرد تئوری خاریتانوف در ریزشبکه‌ها انجام شده است. طبق آخرین تحقیقات نویسندگان، پژوهشی بر روی کاربرد تئوری خاریتانوف در ریزشبکه‌های جریان مستقیم انجام نشده است.

در این پژوهش، یک کنترل سلسله مراتبی جدید که از کنترل ثانویه توزیع‌شده با ترکیب کنترل غیرمتمرکز محلی بهره می‌برد ارائه شده است. این کنترل‌کننده نسبت به عدم‌قطعیت‌ها 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 خاریتانوف، حلقه‌ی کنترل اولیه‌ی با پیشخور کردن این تغییرات و جلوگیری از ورود اغتشاشات به کانال مخابراتی تاثیر بسزایی در بی اثر کردن عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات دارد. سپس کنترل‌کننده‌ی ثانویه توزیع‌شده با استفاده از ساختار کنترل مقاوم PI توزیع‌شده انحرافات ولتاژ ناشی از کنترل غیرمتمرکز را رفع می‌کند. کنترل‌کننده پیشنهادی ضمن سادگی، مقاوم بودن و سهولت در پیاده سازی از پروتکل اجماع جدید نیز بهره می‌برد که منجر به بالارفتن نرخ هم‌گرایی آن نسبت به پروتکل‌های قبلی دارد و عملکرد آن در شرایط عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات بزرگ کاملاً رضایت‌بخش است. لذا کنترل‌کننده ارائه شده قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها را از طریق ارسال بسیار کم داده‌ها در کانال مخابراتی افزایش می‌دهد.

۲-مدل‌سازی ریزشبکه DC مورد مطالعه

شکل (۱) دو منبع تولیدپراکنده را در حالت متصل به ریزشبکه DC نشان می‌دهد که در آن از مبدل باک[1] 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:

$$DGU_i \begin{pmatrix} C_{ti}\dot{V}_i = I_{ti} - I_{ij} - I_{Li} \\ L_{ti}\dot{I}_{ti} = V_{ti} - R_{ti}I_{ti} - V_i \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

که در آن V_i و V_{ti} به ترتیب ولتاژ خروجی و ولتاژ مبدل باک هستند و I_{li}، I_{ti} و I_{ij} 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_{ti}، R_{ti} و L_{ti} نشان داده شده است و مطابق مدل تقریب خطی[2] که در آن $\frac{dI_{ij}}{dt}=0$ و $\frac{dI_{jt}}{dt}=0$ خواهیم داشت:

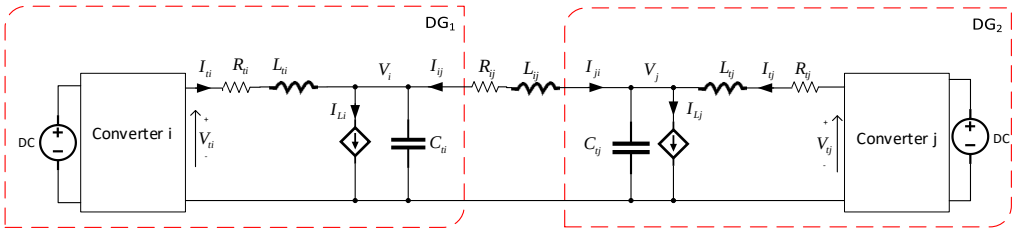
$$I_{ij} = -I_{ji} = \frac{V_i}{R_{ij}} - \frac{V_j}{R_{ji}} \qquad (۲)$$

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.

[1] Buck Converter

[2] Quasi-Stationary line (QSL)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]



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

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:

(۳)

$$\sum_{[i]} DGU: \begin{Bmatrix} \dot{x}_{[i]}(t) = A_{ii}x_{[i]}(t) + B_i u_{[i]}(t) + M_i d_{[i]}(t) + \xi_{[i]}(t) \\ y_{[i]}(t) = C_i x_{[i]}(t) \end{Bmatrix}$$

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

$$A_{ii} = \begin{pmatrix} \sum_{j\in N} \frac{-1}{R_{ij}C_{ti}} & \frac{1}{C_{ti}} \\ -\frac{1}{L_{ti}} & -\frac{R_{ti}}{L_{ti}} \end{pmatrix}, B_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_{ti}} \end{pmatrix}, C_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (۴)$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \sum_{j}^{N} \frac{1}{R_{ij}C_{ti}} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, M_i = \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_{ti}} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

(۵)

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

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

$$y_i = x_{ai}$$

پس خواهیم داشت:

(۶)

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

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

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

d_{at} و d_{bt} اختلال‌های ناشی از نامعینی‌هایی نظیر جریان خطی بار یا نامعینی در پارمترها است و مقادیر Δ اختلاف مقدار نامی و واقعی در نظر گرفته شده است.

۳- نظریه گراف مخابراتی

شبکه مخابراتی یک ریزشبکه 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 $V = \{1, 2, ..., N\}$ نشان‌دهنده یک مجموعه متناهی غیرتهی از N گره است و $E \subseteq V \times V$ بیان‌کننده مجموعه لبه‌ها می‌باشند. هم‌چنین، ماتریس وزن‌دارشده 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 $d_i = \sum_{i=1}^{N} a_{ij}$ می‌باشد. ماتریس لاپلاسین 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.

٤-کنترل ولتاژ ریزشبکه DC با استفاده از کنترل‌کننده‌ی سلسله مراتبی مبتنی بر خاریتانوف

در این قسمت، یک رویکرد کنترل مقاوم سلسله مراتبی جدید مبتنی بر ترکیب کنترل غیرمتمرکز و توزیع‌شده برای کنترل ولتاژ و تسهیم توان در ریزشبکه‌های DC جزیره‌ای با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات در حلقه‌های کنترل اولیه و کانال‌های مخابراتی در لایه‌ی ثانویه پیشنهاد شده است. عدم‌قطعیت‌ها و اختلالات عوامل اساسی هستند که می‌توانند بر پایداری یک ریزشبکه تأثیر بگذارند. برخلاف روش‌های قبلی، ابتدا با استفاده از یک ساختار کنترل مقاوم غیرمتمرکز PI مبتنی بر تئوری خاریتانوف حلقه‌ی کنترل اولیه‌ی ولتاژ با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها 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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

کنترل مقاوم PI توزیع‌شده به جبران انحرافات ولتاژ در لایه‌ی اولیه می‌پردازیم. در ادامه به معرفی تئوری خاریتانوف می‌پردازیم.

۱-٤-تئوری خاریتانوف

این تئوری یک ابزار بسیار کارآمد در بررسی پایداری سیستم‌ها و عملکرد مقاوم آن‌ها است. از تئوری خاریتانوف می‌توان در تحلیل سیستم‌ها، سنتز و طراحی کنترل‌کننده‌های 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 خاریتانوف می‌پردازیم.

تعریف ۱:

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

$$P(s,q,r)=\frac{N(s,q)}{D(s,r)}=\frac{\sum_{i=0}^{m}q_i s^i}{\sum_{i=0}^{n}r_i s^i} \qquad (۷)$$

یک مجموعه‌ی مرزی نامعینی فرض می‌شود:

$$Q=\left\{q\in\Re^m : q_i^- \le q_i \le q_i^+; i=1,2,3,...,m\right\}$$
$$R=\left\{r\in\Re^n : r_i^- \le r_i \le r_i^+; i=1,2,3,...,n\right\} \qquad (۸)$$

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:

$$P=\left\{P(s,q,r): q\in Q, r\in R\right\} \qquad (۹)$$

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، r_k و $a_i(q,r)$ به ازای $i=0,1,2,...$ 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:

$$K(s)=q_0+q_1 s+q_2 s^2+q_3 s^3+... \qquad (۱۰)$$

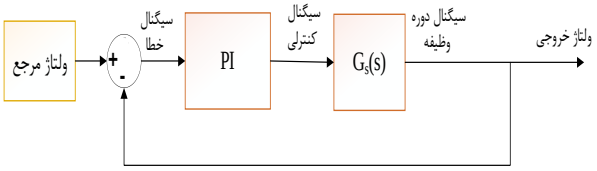
این خانواده به صورت مقاوم پایدار خواهد بود اگر و تنها اگر شرط پایداری روث_هرویتز برای چند جمله ای‌های زیر صادق باشد.

$$K_1(s)=q_0^+ + q_1^+ s+q_2^- s^2+q_3^- s^3+...$$
$$K_2(s)=q_0^- + q_1^- s+q_2^+ s^2+q_3^+ s^3+...$$
$$K_3(s)=q_0^- + q_1^+ s+q_2^+ s^2+q_3^- s^3+... \qquad (۱۱)$$
$$K_4(s)=q_0^+ + q_1^- s+q_2^- s^2+q_3^+ s^3+...$$

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 خاریتانوف 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.

۲-٤-محاسبه ضرایب PI با استفاده از تئوری خاریتانوف

کنترل‌کننده اولیه ریزشبکه DC یک کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده PI

تابع تبدیل سیستم و کنترل‌کننده‌ی اولیه به صورت زیر است:

$$\frac{y}{r}=\frac{G(s)(K_p+\frac{K_I}{s})}{1+G(s)(K_p+\frac{K_I}{s})} \qquad (۱۲)$$

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

$$G(s)=\frac{1}{LCs^2+(RC+\frac{L}{R})s+2} \qquad (۱۳)$$

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

$$\Delta(s)=LCs^3+(\mathrm{RC}+\tfrac{L}{R})\mathrm{s}^2+(\mathrm{K}_p+2)\mathrm{s}+K_I \qquad (۱۴)$$

با تطبیق رابطه‌ی (۱۴) و رابطه‌ی (۱۱)، q_0 و q_1 فقط بر مبنای ضرایب K_P و K_I 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 $q_0,q_1,...$ داریم، q_2 و q_3 را با تقریب ۵۰ درصد مقادیر نامی مطابق جدول (۱) زیر محاسبه می‌کنیم.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

جدول ۱: مقادیر نامعینی q_i

متغیر نامعینی	مقدار محاسبه شده
q_2^-	۱٫۳×۱۰$^{-۳}$
q_2^+	۱۲×۱۰$^{-۳}$
q_3^-	۱٫۱×۱۰$^{-۶}$
q_3^+	۱٫۹×۱۰$^{-۶}$

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

(۱۵)

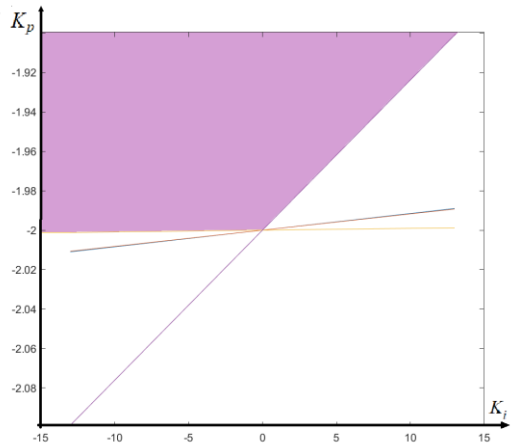
$$K_1(s)=(1.1\times10^{-6})s^3+(1.3\times10^{-3})s^2+(K_p+2)s+K_I$$
$$K_2(s)=(9.9\times10^{-6})s^3+(12\times10^{-3})s^2+(K_p+2)s+K_I$$
$$K_3(s)=(1.1\times10^{-6})s^3+(12\times10^{-3})s^2+(K_p+2)s+K_I$$
$$K_4(s)=(9.9\times10^{-6})s^3+(1.3\times10^{-3})s^2+(K_p+2)s+K_I$$

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 $q_1q_2>q_0q_3$ است. لذا خواهیم داشت:

(۱۶)

$$K_p>\tfrac{1.1}{1300}K_I-2$$
$$K_p>\tfrac{9.9}{12000}K_I-2$$
$$K_p>\tfrac{1.1}{12000}K_I-2$$
$$K_p>\tfrac{9.9}{1300}K_I-2$$

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



شکل ۳: اشتراک چند جمله‌ای‌های خاریتانوف

با توجه به ماتریس‌های معادله (۳) برای نامعینی‌های سیستم تابع تبدیل تشکیل می‌دهیم. نهایتا تابع تبدیل زیر به عنوان تابع تبدیل اصلی سیستم کنترل‌کننده اولیه ریزشبکه DC است.

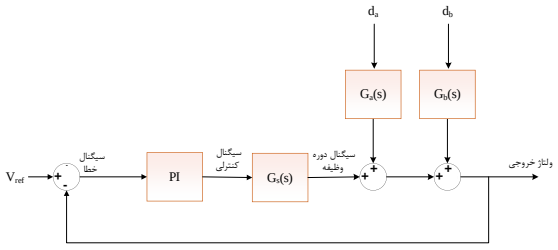
$$y(s)=G(s)u_i+G_a(s)d_{ai}+G_b(s)d_{bi} \qquad (۱۷)$$

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

$$G_a(s)d_{ai}=\frac{s+250}{s^2+9.091\times10^8 s+4.545\times10^{11}}$$

$$G_b(s)d_{bi}=\frac{4.545\times10^8}{s^2+9.091\times10^8 s+4.545\times10^{11}} \qquad (۱۸)$$

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



شکل ۴: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده و سیستم همراه با نامعینی‌ها

۳-٤-کنترل توزیع‌شده ثانویه

در این مقاله برای کنترل ریزشبکه DC از کنترل سلسه‌مراتبی 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 خاریتانوف 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 ریزشبکه بین منابع طراحی می‌گردد. این کنترل‌کننده با استفاده از تئوری خاریتانوف 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 تحقق‌پذیر نیست. بنابراین به سراغ کنترل ثانویه می‌رویم. لذا انتظار داریم روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح ثانویه بتواند در عملکرد حالت دائم سه شرط زیر را برقرار سازد:

$$R_{di}I_{outi}=R_{dj}I_{outj}$$
$$e=V_B-V_{ref}=0 \qquad (۱۹)$$
$$R_{di}\le\frac{V_{nom}-V_{\min}}{I_{ni}}$$

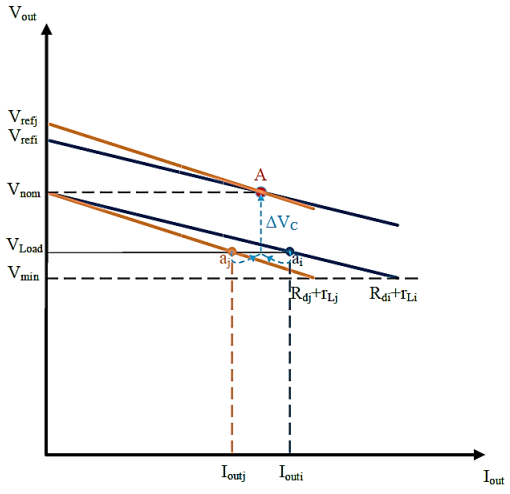
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

که در آن I_{outi}، I_{outj}، R_{di} و R_{dj} به ترتیب معرف جریان‌های خروجی و ضریب دروپ منبع iام و j ام هستند. $V_{\min}$ و V_{nom} نیز به ترتیب کمترین ولتاژ باس و ولتاژ نامی فرض شده‌اند. جریان نامی واحد DG شماره iام با I_{ni} نشان داده شده است. شرط سوم برخلاف دو شرط اول که به تنظیم ولتاژ و تقسیم بار مربوط‌اند به پایداری سیستم مربوط می‌شود بدین صورت که برقراری این شرط از این جهت اهمیت دارد که با انتخاب ضریب دروپ بزرگ DC می‌تواند منجر به انحراف ولتاژ خروجی مبدل از مقدار مجاز فراتر رود و حاشیه پایداری ریزشبکه تحت تاثیر قرار گیرد.

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

$$V_{load} = V_{dc} - R_{dj} I_{outj} - r_{Lj} I_{outj}$$
$$\frac{I_{outi}}{I_{outj}} = \frac{R_{dj} + r_{Lj}}{R_{di} + r_{Li}} \qquad (۲۰)$$

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



شکل ۵: تغییر مشخصه‌ی دروپ دو واحد تولیدپراکنده هنگام اجرای کنترل توزیع‌شده ثانویه

همان طور که مشاهده می‌شود در این روش هردو هدف تنها با اضافه کردن پارامتر ΔV_c به ولتاژ نامی تحقق می‌یابد. در واقع این پارامتر ولتاژ نامی هر واحد DG را تصحیح می‌کند و خطا در تقسیم بار به تبع آن حذف می‌گردد. پس از حذف خطاها، نقطه A به عنوان نقطه کار جدید ریزشبکه 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 توزیع‌شده طراحی شده است. یک رابط سیگنال کنترل ثانویه طراحی شده است تا به کنترل‌کننده دروپ در کنترل اولیه اضافه شود، این بخش را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V_i^{ref} = V^* - K_i I_i + u_i \qquad (۲۱)$$

که برای به دست آوردن ولتاژ باس خواهیم داشت:

$$V_b = V^* - (R_i + K_i) I_i + u_i \qquad (۲۲)$$

از معادله (۲۲) به راحتی می‌توان نتیجه گرفت که ما نیاز به حفظ دقت در تقسیم بار توسط کنترل‌کننده 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، ورودی‌های کنترل ثانویه باید برابر باشند، یعنی:

$$(u_i)^s = (u_j)^s, \forall i, j \qquad (۲۳)$$

که در آن $(u_i)^s$ مقدار u_i را در حالت پایدار نشان می‌دهد. از تجزیه و تحلیل بالا، نتیجه می‌گیریم که هدف کنترل‌کننده ثانویه پیشنهادی بازگرداندن ولتاژ باس DC به مقدار مرجع V_{nom}، یعنی $\lim_{t\to\infty} e^V(t) = 0$ است. در حالی که محدودیت ورودی کنترل را برآورده می‌کند. یعنی: $\lim_{t\to\infty} e^{u(t)}(t) = 0, \forall i$ که در آن e^V و $e^{u(t)}$ به عنوان خطای بازیابی ولتاژ و خطای اجماع ورودی کنترل نام‌گذاری شده‌اند که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$e^V = V^* - V_b \qquad (۲۴)$$
$$e^{ui} = \sum_{j\in N_i} (u_j - u_i) \qquad (۲۵)$$

که در آن N_i مجموعه همسایگی کنترل‌کننده دوم را نشان می‌دهد. سپس یک کنترل ثانویه توزیع‌شده به طراحی شده است.

$$u_i = K_{Pi} e_i + K_{Ii} \int e_i dt \qquad (۲۶)$$

که در آن K_{Pi} و K_{Ii} ضرایب کنترل‌کننده نسبی و انتگرال (PI) برای DG_i هستند. e_i خطای ترکیبی است که به صورت زیر تعریف می‌شود. (۲۷)

$$e_i = \alpha_i e^V + \beta_i e^{ui}$$

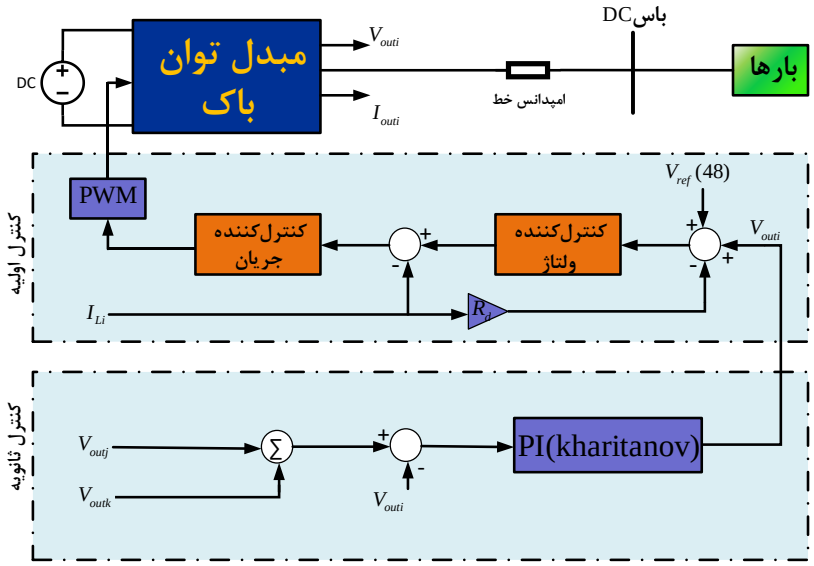
به طوری که $\alpha_i, \beta_i \in R^+$ دستاوردهای ترکیبی هستند. نمودار دقیق کنترل ثانویه پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. توجه داشته

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

باشید که بر خلاف روش‌های پیش‌خور [۱۷] موجود، بازیابی ولتاژ ثانویه پیشنهادی با یک سازوکار فیدبک تحقق می‌یابد. علاوه بر این، هیچ اطلاعات جهانی مورد نیاز نیست.

جمع سه جمله در رابطه فوق خطای ورودی کنترل‌کننده PI را می‌سازد، جمله اول مربوط به دقت در تقسیم بار است و شرط اول را محقق می‌سازد و شرط دوم و سوم نیز در جملات بعدی ارضا می‌شوند. 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.

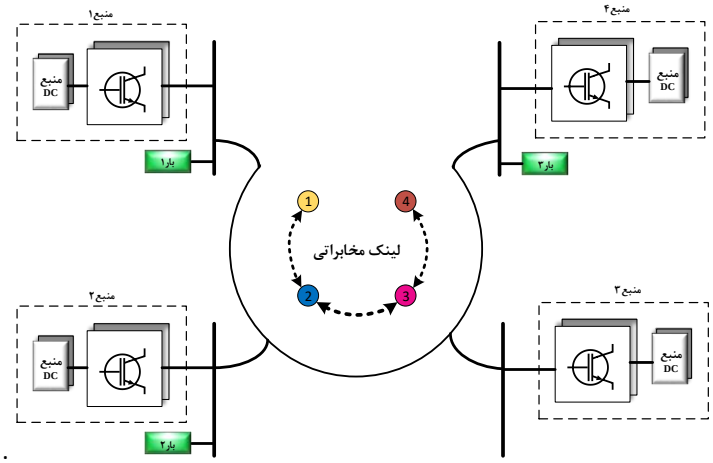
اغلب روش‌های کنترل ریزشبکه، برای اجرا روش ارائه شده‌ی خود به سیستم ارتباط سرتاسری نیاز دارند، این سیستم ارتباطی افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارد و از قابلیت اطمینان کافی برخوردار نیست. اما روش کنترل ثانویه توزیع‌شده پیشنهادی در این مقاله نیاز به ارتباط سراسری ندارد و فقط با ارتباط گرفتن و تبادل اطلاعات با واحدهای مجاور خود می‌تواند اهداف کنترلی را تحقق بخشد. شکل (۸) ارتباطات ریزشبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۶: بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

۵-نتایج شبیه‌سازی و مطالعات موردی

به منظور اعتبارسنجی طرح کنترل ثانویه توزیع‌شده با روش خاریتانوف که در این مقاله پیشنهاد شده است، یک مدل آزمایشی در محیط Simulink/SimPowerSystems شبیه‌سازی 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 ریزشبکه DC جزیره‌ای شامل ۴ واحد تولیدپراکنده معمولی مطابق شکل (۸) است



شکل ۷: سیستم ارتباطی بین واحدهای تولیدپراکنده در ریزشبکه DC

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

در ابتدا همه‌ی واحدهای تولیدپراکنده به باس اصلی متصل نیستند و DG شماره‌ی ۴ به‌عنوان پشتیبان سیستم در نظر گرفته‌شده است.

جدول ۲: پارامترهای ریزشبکه و کنترل اولیه

	DG_1 و DG_2		DG_3 و DG_4	
	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ریزشبکه	V_{DC}	۱۰۰ ولت	V_{DC}	۱۰۰ ولت
	f_B	۱,۲۵ کیلوهرتز	f_B	۱,۲۵ کیلوهرتز
فیلتر LC	L_f	$10^{-2}\times 1$ هانری	L_f	$10^{-2}\times 1$ هانری
مقاومت خط	C_f	۲۲۰۰ میکروفاراد	C_f	۲۲۰۰ میکروفاراد
مقاومت خط	R_1 و R_2	۰,۰۱ اهم	R_3 و R_4	۰,۰۱ اهم
حلقه ولتاژ	K_{VP}	۴	K_{VP}	۴
	K_{VI}	۸۰۰	K_{VI}	۸۰۰
حلقه جریان	K_{IP}	۵	K_{IP}	۵
	K_{II}	۱۱۰	K_{II}	۱۱۰
بهره دروپ	K_1 و K_2	۳ و ۶	K_3 و K_4	۲ و ۲

واحد تولیدپراکنده ۴ام در ابتدا به ریزشبکه متصل نیست و بعد از به‌راه انداختن همه‌ی سطوح کنترلی، از جهت آزمودن کارایی روش پیشنهادی، به مدار افزوده می‌گردد. در این شبیه‌سازی که در شکل (۶) نشان داده شده است. مبدل باک DC/DC در هر DG استفاده می‌شود و حلقه کنترل اولیه آن در شکل (۷) نشان داده شده است، که در آن دو کنترل‌کننده استاندارد PI به ترتیب در حلقه کنترل ولتاژ و حلقه کنترل جریان استفاده می‌شود. پارامترهای لایه کنترل اولیه و همچنین سیستم ریزشبکه DC در جدول (۲) به‌طور مختصر آورده است. پارامترهای کنترل‌کننده ثانویه پیشنهادی در جدول (۳) فهرست شده است. در مطالعات موردی، بهره‌های دروپ DGها به صورت $K_1=2$، $K_2=2$، $K_3=3$ و $K_4=6$ انتخاب شده‌اند و مطابق ساختار کنترل‌کننده‌ی ثانویه توزیع‌شده، ولتاژ باس DC اندازه‌گیری می‌شود و اختلاف آن از ولتاژ مرجع که در این مدل آزمایشی ۴۸ ولت است؛ به عنوان فیدبک خطای ولتاژ به کنترل ثانویه توزیع‌شده متصل می‌گردد. بنابر تعریف مرجع شماره [۱۸] اتصال یا عدم اتصال این خطا به هر واحد تولیدپراکنده بهره‌ی اتصال[1] نامیده می‌شود. به عنوان مثال در ابتدا بهره‌های اتصال را به‌صورت $g_1=1$ و $g_2=g_3=g_4=0$ تنظیم شده است، در این نحوه‌ی تنظیم ولتاژ باس DC فقط به DG_1 ارسال می‌شود.

جدول ۳: پارامترهای کنترل‌کننده ثانویه

	DG_i	
	پارامتر	مقدار
کنترل ثانویه	K_{Pi}	۱
	K_{Ii}	۴۰
ولتاژ مرجع	$V^*=48$ ولت	
بارها	$R_{Li}=5$ اهم	

۱-۵ سناریوهای کنترل ثانویه توزیع‌شده پیشنهادی

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

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

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

سناریو ۳. (۱-۵ ثانیه): کنترل ثانویه از $t=1\,\mathrm{s}$ فعال می‌شود.

سناریو ۴. (۲-۴ ثانیه): بار دوم در ثانیه‌ی ۲ به باس اصلی ریزشبکه DC که در حال عملیات است، متصل می‌شود و پس از ۲ ثانیه از آن جدا می‌شود.

سناریو ۵. (۳-۵ ثانیه): واحد تولیدپراکنده چهارم به ریزشبکه وصل می‌شود.

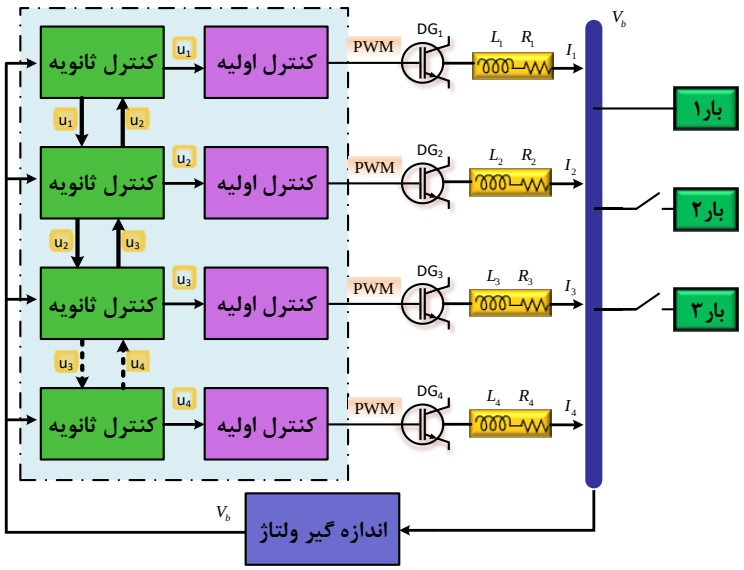
با بررسی این مطالعات موردی می‌توان میزان کارآیی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی را بدست آورد. این مطالعات هم شامل کنترل‌کننده اولیه می‌شود و هم کنترل‌کننده‌ی ثانویه را مورد آزمایش قرار می‌دهد. نمودار ارتباطی در شکل (۸) نشان داده شده است و نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۹) تا (۱۲) ارائه شده است.

[1] Pinning Gain

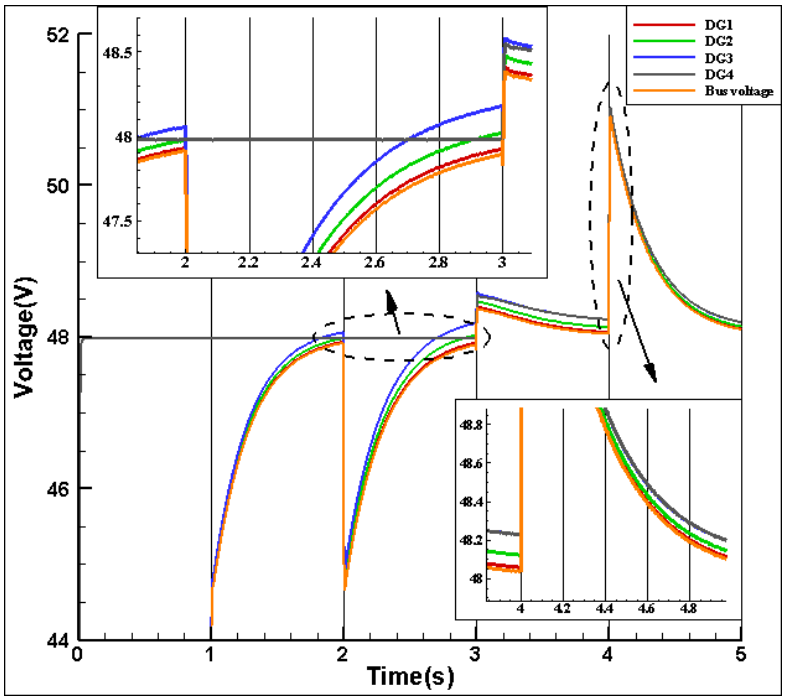
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

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

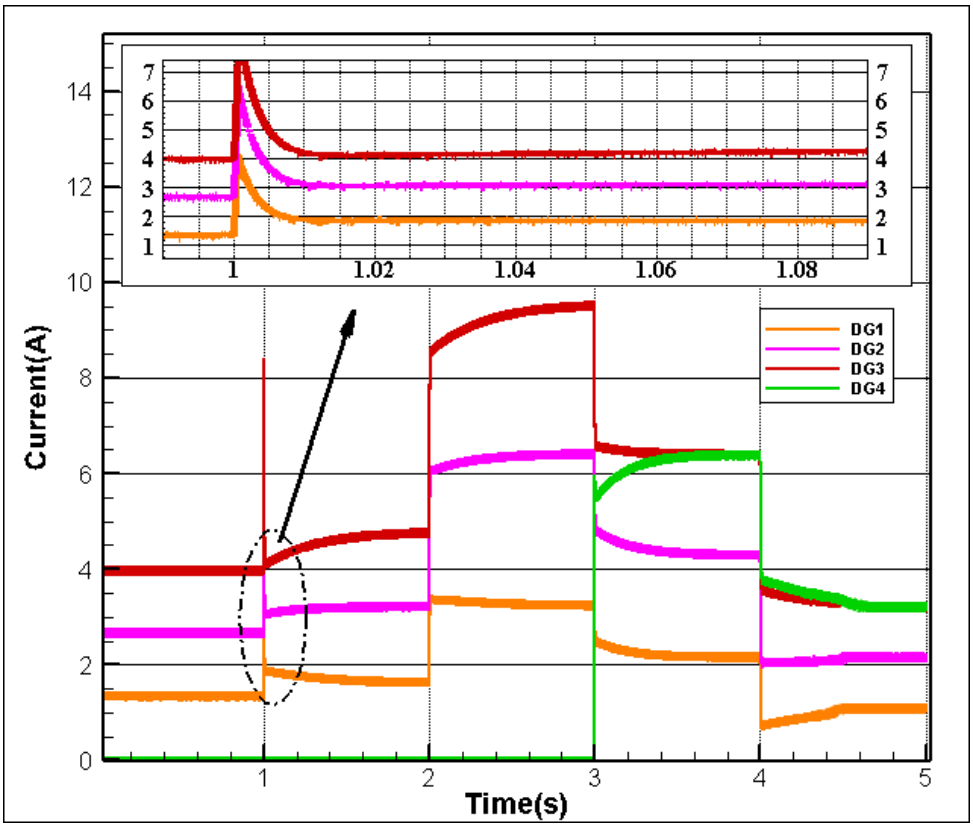


شکل ۸: نمودار ارتباطی بین واحدهای تولیدپراکنده



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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]



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

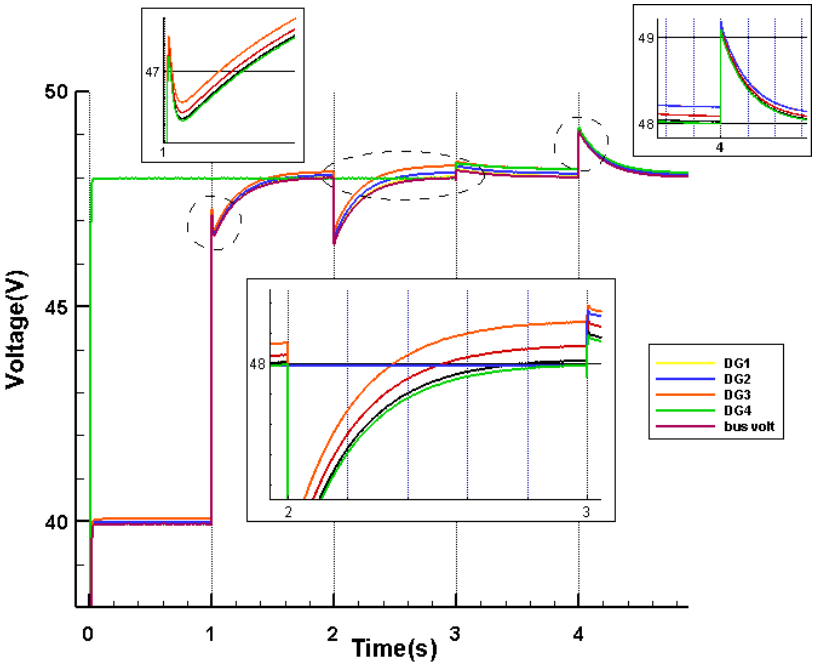
در ساختاری که فیدبک فقط به یک DG متصل است راحت‌تر و کم هزینه‌تر قابل انجام است. در این مطالعه موردی، ما عملکرد روش پیشنهادی خود را تحت دو نوع اتصال مختلف مقایسه می‌کنیم. در شکل (۹) و (۱۰) فقط واحد کنترل پراکنده‌ی شماره ۱ به فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی DC متصل است و از کنترل‌کننده‌ی توزیع‌شده انتظار می‌رود 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 همان‌طور 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 ضمن اطمینان از عملکرد کنترل‌کننده در این مطالعه موردی، ادامه آزمایش‌ها را با دسترسی همه‌ی DGها به ولتاژ باس اصلی DC ادامه می‌دهیم.

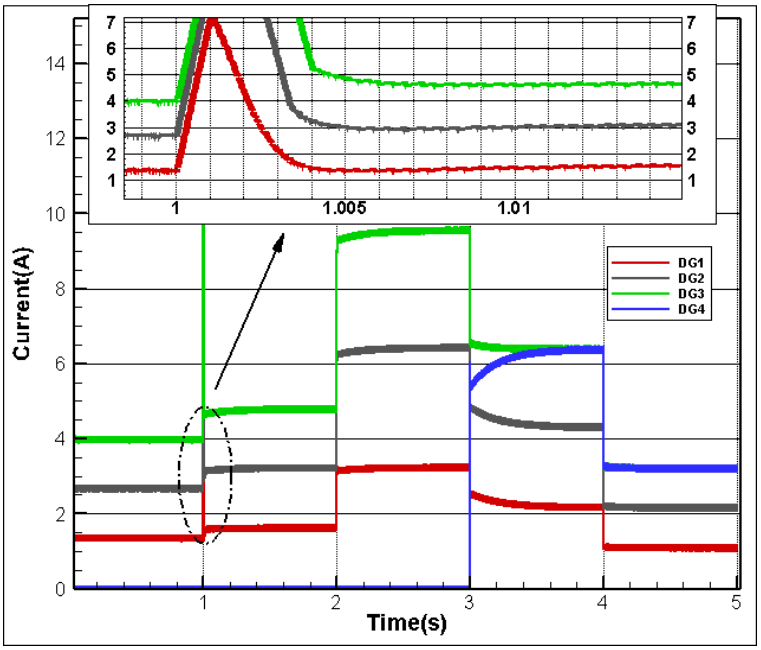
۵-۱-۲ سناریو ۲: فقط کنترل اولیه فعال است و هنوز کنترل ثانویه به مدار اعمال نشده است.

همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، ولتاژ باس اصلی پس از اعمال کنترل‌کننده 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 ریزشبکه 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 کنترل‌کننده‌ی ثانویه داریم.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]



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



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

۳-۱-۵ سناریو ۳: کنترل ثانویه از ثانیه اول فعال می‌شود.

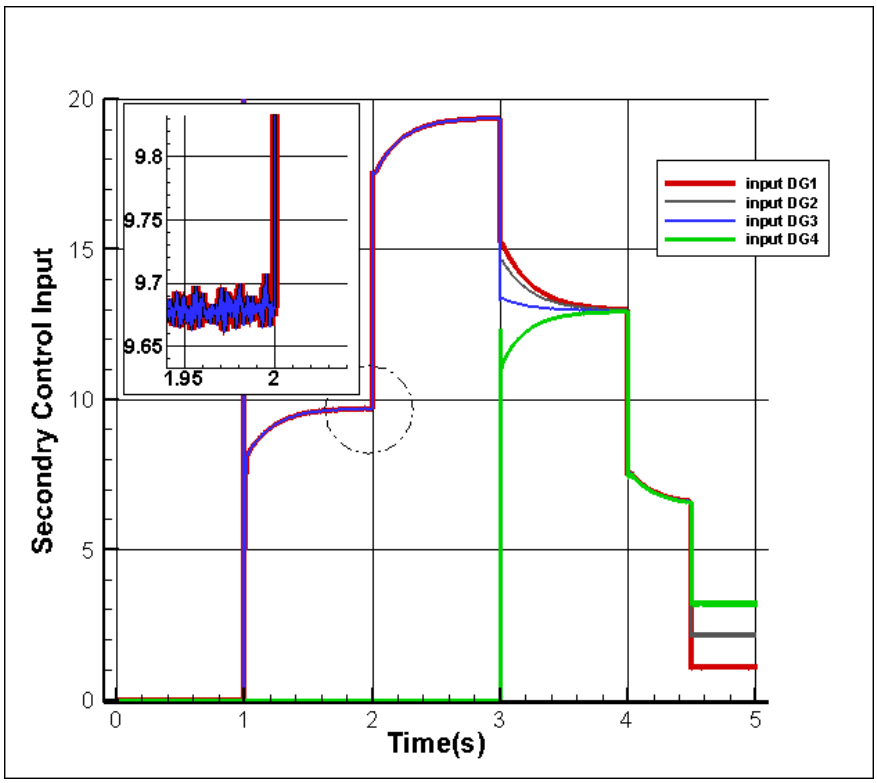
هنگامی که کنترل ثانویه پیشنهادی ما در $t=1\,\mathrm{s}$ فعال می‌شود، ولتاژ باس اصلی به سرعت به مقدار مرجع $V_{\mathrm{ref}}=48$ ولت باز می‌گردد. البته خطاهای گذرا در لحظات اولیه وجود دارد ولی در نهایت ولتاژ باس DC پس از انحرافات گذرا، به حالت پایدار می‌رسد. نکته‌ی قابل تامل این است که جبران ولتاژ باس 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_1 بیش از DG_2 است و DG_3 کمترین افزایش جریان و به تبع کمترین نقش را در جبران انحراف ولتاژ ناشی از دروپ دارد. این موضوع به دلیل دسترسی مستقیم DG_1 به فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی، و دسترسی غیر مستقیم و

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

با تاخیر DG_2 و DG_3 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 همه‌ی DGها به ولتاژ باس اصلی، رقم می‌خورد و هر واحد تولیدپراکنده به نسبت توان تولیدی در جبران ولتاژ انحرافی نقش ایفا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی ورودی‌های کنترل ثانویه که در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند به وضوح تایید می‌کند که ورودی‌های کنترل ثانویه در حالت ماندگار برابر هستند [۱۲].

۵-۱-۴ سناریو ۴: بار دوم در ثانیه‌ی ۲ به باس اصلی ریزشبکه DC که در حال عملیات است، متصل می‌شود و پس از ۲ ثانیه از آن جدا می‌شود.

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 می‌ماند. این نتایج نشان می‌دهد 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؛ می‌توان دریافت که روش پیشنهادی قادر است اشتراک گذاری توان ارائه‌شده توسط کنترل‌کننده اولیه را حفظ کند، به‌عنوان مثال اگر نسبت جریان‌ها 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.



شکل ۱۳: ورودی‌های کنترل ثانویه

۵-۱-۵ سناریو ۵: واحد تولیدپراکنده چهارم به ریزشبکه وصل می‌شود.

یکی از مهم‌ترین رخدادهایی که در ریزشبکه‌ها 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. ریزشبکه مورد آزمایش دارای یک واحد تولیدپراکنده پشتیبان (DG_4) است که از $t=3\,s$ به باس DC با همان نسبت تسهیم توان DG_3 وصل شده و در $t=5\,s$ قطع شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌ها 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. هنگامی‌که DG_4 در $t=3\,s$ وصل می‌شود، ولتاژ باس اصلی به ۴۸٫۶ ولت افزایش می‌یابد. اما سپس به‌سرعت به ۴۸ ولت باز می‌گردد. در نهایت به وضوح مشاهده می‌شود که ورودی کنترل ثانویه DG_4 به یک مقدار ثابت می‌گراید. هنگامی‌که DG_4 در $t=5\,s$ قطع می‌شود، هر دو ولتاژ و جریان خروجی مانند مرحله ۲ هستند. این نتایج نشان می‌دهد که می‌توان منابع تولیدپراکنده را بدون نیاز به خاموش کردن ریزشبکه DC قطع و وصل کرد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

تمامی سناریوهای فوق و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کنترل‌کننده پیشنهادی قادر به تنظیم ولتاژ و تقسیم صحیح توان مابین منابع تولیدپراکنده در حضور عدم قطعیت‌ها در پارامترهای نامی ریزشبکه می‌باشد. این مهم با به کارگیری ساختار کنترل غیرمتمرکز مبتنی بر تئوری خاریتانوف قادر به حذف عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات میسر شده است.

٦-نتیجه گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر ترکیب دو ساختار کنترل غیرمتمرکز و کنترل ثانویه‌ی توزیع‌شده پیشنهاد شد. در این سیستم کنترل غیر متمرکز PID توسط روش خاریتانوف طراحی شده است که در نتیجه اغتشاشات و عدم قطعیت‌هایی که اغلب در پیاده سازی عملی شاهد آن هستیم، پیش از ورود به کانال کنترل ثانویه اصلاح می‌شود. از طرفی کنترل‌کننده مزایای کنترل توزیع‌شده را نیز در بردارد. نتایج شبیه‌سازی کارایی کنترل‌کننده را در سناریوهای مختلف نظیر PnP، تغیرات بار و محدود شدن فیدبک خطای ولتاژ باس اصلی نشان می‌دهد. در تمام موارد مطالعه شده ردیابی ولتاژ مرجع و تسهیم توان متناسب با توان هر واحد تولیدپراکنده 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. Iravani, 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. Hatziargyriou. 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. 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 کنترل‌کننده مقاوم فرکانس مبتنی بر تئوری خاریتانف، 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 ریزشبکه منفک براساس تئوری خاریتانف، 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]