



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Design of An Adaptive Droop Control System for DC Microgrids Considering the Intermittent Behavior of DGs

Zahra Karemian ^a, Mehdi Monadi ^{a,*}, Mohsen Saniei ^a , S. Ghotratollah Seifossadat ^a

^a Electrical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-15

Revised: 2025-04-30

Accepted: 2025-05-17

Keywords:

Adaptive droop control;
DC micro-grid;
Distributed generation
resources.

ABSTRACT

To overcome the weaknesses of classic droop control, in this paper, an adaptive droop control system is presented for DC microgrids. In this method, the DC microgrid is equipped with a centralized control unit which includes an adaptive droop control algorithm for modifying the droop control coefficients and sending them to the de-centralized control units of the DGs converters. The droop coefficients are calculated based on the proposed process to not only satisfy the load-generation balance in the study microgrid but also minimize the grid losses, voltage deviations, and differences in DGs' loading. The method, moreover, covers the effects of cable resistances on the accuracy of the droop control and can be implemented in multi-terminal microgrids. To provide a more accurate evaluation than simulation-based tests, the proposed method was tested on a hardware-in-the-loop (HIL) structure in which the proposed algorithm is implemented on a microprocessor and connected to the simulated study system.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34139.2669>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: m.monadi@scu.ac.ir

How to cite this article:

Z. Karimian , M. Monadi , M. Saniei and S. Seifossadat, "Design of An Adaptive Droop Control System for DC Microgrids Considering the Intermittent Behavior of DGs," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 205-222, doi: 10.22075/jme.2025.34139.2669

طراحی یک سیستم کنترل افی تطبیقی برای ریز شبکه های DC با در نظر گرفتن ماهیت متغیر توان منابع تولید پراکنده

زهرا کریمیان^۱، مهدی منادی^{۱*}، محسن صنیعی^۱، سید قدرت اله سیف السادات^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶	در این مقاله یک روش کنترل افی تطبیقی برای اصلاح نقاط ضعف روش کنترل افی کلاسیک در ریز شبکه های DC ارائه شده است. در این روش، ریز شبکه DC به یک واحد کنترل متمرکز مجهز می شود که الگوریتم اصلاح پارامترهای کنترل افی در آن پیاده سازی شده و سپس به سیستم های کنترل کانورترهای هر کدام از DG ها اعمال می شود. پارامترهای کنترل افی در این مقاله به گونه ای انتخاب می شوند که در هر لحظه، ضمن حفظ تعادل بار و تولید در ریز شبکه، میزان تلفات ریز شبکه، مجموع کلی انحراف ولتاژ در شین ها و نیز تفاوت در بارگذاری DG ها را نیز در مقدار بهینه خود نگه دارد. این روش، همچنین اثر وجود مقاومت کابل ها و نیز موازی نبودن DG ها در میزان خطای تقسیم جریان را پوشش داده و از این رو استفاده از آن برای ریز شبکه های چندشینه نیز به راحتی امکان پذیر است. برای ارزیابی روش پیشنهادی در این مقاله از ساختار (سخت افزار در حلقه) HIL ^۲ استفاده شده است تا برخی از تفاوت های موجود بین نتایج مبتنی بر شبیه سازی با نتایج عملی پوشش داده شود.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷	
واژگان کلیدی:	
کنترل افی تطبیقی،	
ریز شبکه DC،	
منابع تولید پراکنده.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34139.2669>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

یکی از اهداف اصلی معرفی ریز شبکه ها، مدیریت به کارگیری انرژی های تجدید پذیر و تولیدات پراکنده (DG)^۳ در شبکه های توزیع برق است. ریز شبکه به عنوان یک شبکه مقیاس کوچک با سطوح ولتاژ پایین یا متوسط شناخته می شود که به صورت AC یا DC ایجاد می شود. ریز شبکه DC در مقایسه با ریز شبکه AC دارای بازده بالاتر، قابلیت اطمینان بهتر و انعطاف پذیری بیشتری بوده و همچنین مطرح نبودن اثر پوستی و توان راکتیو از جمله مزایای دیگر آن است [۱، ۲]. ضمن آنکه، شبکه و ریز شبکه های DC، به دلیل ماهیت DC توان خروجی برخی

از منابع تولید پراکنده، همچون PV^۴ ها و منابع ذخیره انرژی، و نیز به دلیل نیاز به یک مرحله تبدیل DC در برخی دیگر از منابع تولید تجدید پذیر دیگر، همچون توربین های بادی، مورد توجه قرار گرفته اند [۳، ۴]. یکی از مشخصات ریز شبکه ها آن است که در حالت جزیره ای و جدا از شبکه اصلی هم باید بتوانند به کار ادامه دهند که در این حالت، بارهای موجود در آن ها صرفاً با استفاده از منابع محلی تغذیه می شوند. در نتیجه، ریز شبکه ها نیازمند سیستم های کنترلی هستند که مستقل از سیستم کنترل شبکه اصلی، ولتاژ شین ها و نحوه توزیع توان بین منابع را کنترل نمایند. در حقیقت، مهم ترین وظیفه سیستم کنترل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.monadi@scu.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ Hardware In the Loop

^۳ Distributed Generation

^۴ Photovoltaic

استناد به این مقاله:

زهرا کریمیان، مهدی منادی، محسن صنیعی و سید قدرت اله سیف السادات، "طراحی یک سیستم کنترل افی تطبیقی برای ریز شبکه های DC با در نظر گرفتن ماهیت متغیر توان منابع تولید پراکنده"، مدل سازی در مهندسی، ۸۲ (۱۴۰۴): ۲۲۲-۲۰۵. doi: 10.22075/jme.2025.34139.2669

ریزشبکه‌ها، جلوگیری از انحراف ولتاژ در شین‌های مختلف شبکه و در کنار آن تضمین تقسیم جریان مناسب بین منابع موجود در آن است [۱].

از سوی دیگر، در بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده، محدودیت‌هایی ازجمله کاهش توان تولیدی DGها وجود دارد که عمدتاً به دلیل ماهیت متغیر^۵ منبع تأمین توان و نیز هزینه‌های تولید آن‌ها است. به تعبیر دیگر، بسیاری از DGهایی که مبتنی بر منابع تجدید پذیر هستند ماهیت متغیر داشته و ممکن است در برخی شرایط با محدودیت روبرو شده و نیاز به کاهش توان خروجی داشته باشند. به این دلیل، لازم است در هنگام تقسیم توان مصرفی یک شبکه بین DGهای متصل به آن، تقسیم توان به‌گونه‌ای انجام شود که سهم هر منبع در تأمین توان، با توجه به محدودیت‌های آن، مشخص شود [۵]. به بیان دیگر، وجود یک سیستم تقسیم جریان (توان) در ریزشبکه‌ها الزامی است تا ضمن تضمین تعادل بین بار و تولید، از اضافه‌بار شدن DGها نیز جلوگیری کند [۶].

یکی از روش‌های اصلی کنترل تقسیم جریان و نیز تنظیم ولتاژ در ریزشبکه‌های DC استفاده از روش کنترل اکتیو است که به دلیل سادگی پیاده‌سازی آن، روش کنترل پرکاربرد و محبوبی به شمار می‌رود [۱]. در روش کنترل اکتیو، ولتاژ و جریان خروجی کانورتر بر اساس منحنی کنترل اکتیو مشخص می‌شود [۲]. در نتیجه، سیستم‌های کنترل مبتنی بر کنترل اکتیو دو پارامتر اصلی دارند که شامل شیب منحنی کنترل اکتیو و ولتاژ رفرنس هستند. شیب منحنی کنترل اکتیو که آن را به عنوان مقاومت مجازی اضافه‌شده به سیستم نیز می‌توان در نظر گرفت، با توجه به توان نامی مبدل و DG آن تنظیم و مشخص می‌شود [۱]. چالش اصلی روش کنترل اکتیو کلاسیک، وجود خطا در میزان به اشتراک‌گذاری جریان و ایجاد افت ولتاژ اضافه در شبکه DC است که باید با استفاده از روش‌های مناسب آن را برطرف نمود [۷، ۸]. همچنین وجود جریان گردشی بین کانورترهای موازی به عنوان یکی دیگر از مشکلات این روش کنترلی شناخته شده است [۲، ۷]. از سوی دیگر، در حالتی که ریزشبکه به صورت جزیره‌ای کار می‌کند، کنترل اکتیو کلاسیک تقسیم جریان بین DGها را بر اساس ظرفیت نامی آن‌ها انجام می‌دهد، حال آنکه با توجه به تغییرات توان قابل تأمین و در حقیقت تغییرات توان نامی DGهای مبتنی بر

منابع تجدیدپذیر، ظرفیت نامی همواره در دسترس نیست.

۱-۱- مرور مقالات

با توجه به نقاط ضعف سیستم کنترل مبتنی بر کنترل اکتیو کلاسیک که نوعاً به دلیل ثابت بودن پارامترهای کنترل اکتیو (یعنی شیب منحنی اکتیو و ولتاژ رفرنس) است، این موضوع عملاً مسئله مدیریت خروجی‌های DG را محدود و آن را غیرقابل انعطاف می‌کند [۹]. برای رفع این مشکل، استفاده از منطق کنترل اکتیو تطبیقی پیشنهاد شده است. کنترل اکتیو تطبیقی به آن معنا است که با تغییر شرایط ریزشبکه، پارامترهای کنترل اکتیو اصلاح شوند و در نتیجه آن، نحوه به اشتراک‌گذاری جریان بار بین DGها تغییر نموده و میزان خطای تقسیم جریان به حداقل برسد [۲]. برای ایجاد کنترل اکتیو تطبیقی، تغییر ولتاژ رفرنس سیستم کنترل یکی از راه‌حل‌هایی است که در مقالات مختلفی پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در کنترل اکتیو کلاسیک از مقایسه یک ولتاژ ثابت رفرنس با ولتاژ خروجی DG، برای تنظیم ولتاژ استفاده می‌شود، در [۵، ۱۰] و [۱۱] مقدار ولتاژ رفرنس سیستم کنترل هر کانورتر، با توجه به میانگین ولتاژ خروجی سایر DGها تعیین شده و بدین‌وسیله تنظیم ولتاژ بهتری برای ریزشبکه فراهم می‌شود. بر اساس همین ایده، در [۲، ۱۲] جهت تنظیم توان خروجی همه DGها و اطمینان از تقسیم جریان متعادل بین همه آن‌ها، از میانگین جریان‌های همه DGهای دیگر استفاده شده است. همچنین، در [۵، ۱۲، ۱۳] برای تنظیم ولتاژ و تقسیم بهتر جریان، ولتاژ رفرنس هر کانورتر با توجه به متوسط ولتاژ خروجی و نیز میانگین جریان‌های خروجی سایر کانورترها انتخاب شده و بدین‌صورت می‌توان انتظار داشت که بارگیری از DGها به صورت متعادل انجام شود. در [۱۴] ولتاژ بر اساس میانگین‌گیری مشتقات جریان مجازی ارائه شده است که اجرای آن به شدت به مقادیر اندوکتانس‌های خط وابسته است. برخلاف روش‌های بیان‌شده در بالا که در آن‌ها با ثابت نگه‌داشتن شیب منحنی کنترل اکتیو و صرفاً با تغییر ولتاژ رفرنس، کنترل ریزشبکه DC انجام می‌شد، در برخی دیگر از مقالات از تطبیقی سازی کنترل اکتیو کلاسیک با تغییر شیب منحنی آن استفاده شده است. در این مقالات، تغییر شیب منحنی کنترل اکتیو با اهداف و روش‌های مختلفی انجام می‌شود. در [۱۵] بیان شده است که

⁵ Intermittent

در صورتی که جریان خروجی مبدل از حد مشخصی بیشتر شود، متناسب با میزان تجاوز از جریان تنظیم شده، تغییر در شیب منحنی کنترل افی و مقدار مقاومت مجازی آن اعمال شود. به عبارت دیگر، در این روش، اگر جریان خروجی کانورتر از حد مشخصی بیشتر شود، شیب منحنی کنترل افی تغییر می‌کند تا سهم جریان کانورتر کاهش یابد. در حالی که در این روش، صرفاً دو شیب برای منحنی کنترل افی در نظر گرفته شده است، در [۹، ۱۶] شیب منحنی کنترل افی در هر لحظه متناسب با تغییر میزان بار تغییر می‌کند. در [۸] میزان شیب منحنی کنترل افی هر مبدل متناسب با میزان انحراف ولتاژ و جریان آن از مقادیر متوسط سایر کانورترها تغییر می‌یابد. همچنین در روش کنترل افی تطبیقی ارائه شده در مقالات [۵، ۱۷] نیز علاوه بر آنکه میزان ولتاژ رفرنس مورد استفاده برای هر مبدل بر اساس متوسط ولتاژ و متوسط جریان خروجی همه DGهای موجود در شبکه تنظیم می‌شود، مقدار شیب کنترل افی نیز متناسب با تفاضل جریان و ولتاژ خروجی مبدل از میانگین جریان و ولتاژ سایر مبدل‌ها مشخص می‌شود.

قابل ذکر است که در [۵] اثر مقاومت کابل‌ها در نسبت تقسیم جریان نیز در نظر گرفته شده است. هدف اصلی در همه مقالات بیان شده در بالا، تنظیم ولتاژ و تقسیم جریان مناسب بوده است. حال آنکه در [۷] هدف آن بوده است که علاوه بر تقسیم جریان و تثبیت ولتاژ مناسب، میزان پارامترهای کنترل افی به گونه‌ای تنظیم شود که تلفات شبکه نیز به حداقل برسد. برای این منظور یک شاخص به نام شاخص کنترل افی تعریف شده است که معیاری برای میزان تلفات کلی شبکه است. برای رسیدن به حداقل تلفات، میزان شیب کنترل افی از میزان حداقل خود تا حداکثر مجاز آن تغییر داده می‌شود و سپس هر مقدار مقاومت که کمترین میزان شاخص کنترل افی را فراهم کند به عنوان شیب کنترل افی انتخاب می‌شود. به طور مشابه، در [۱۸] نیز در انتخاب شیب کنترل افی به حداقل رساندن افت ولتاژ شین‌های مختلف ریزشبکه و نیز کمینه کردن میزان انحراف جریان توجه شده است. از سوی دیگر، یکی از مسائل چالشی مبدل‌های موازی‌ای که به خوبی تنظیمات ولتاژ و جریان آن‌ها انجام نشده باشد، وجود جریان‌های گردشی بین مبدل‌ها است که می‌تواند باعث

اضافه بار کانورترها گردد. لذا، در [۲] هدف از ارائه کنترل افی تطبیقی، تنظیم شیب منحنی کنترل افی به گونه‌ای است که جریان‌های گردشی بین مبدل‌ها کمتر شود. بر اساس توضیحات قبل مشخص است که روش‌های کنترل افی تطبیقی نیازمند به استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در سطح شبکه و در حقیقت استفاده از لینک‌های مخابراتی و سطوح دوم و سوم کنترل در قالب سیستم کنترل سلسله مراتبی هستند [۱]. این روش‌ها نوعاً نیاز به استفاده از لینک مخابراتی با پهنای باند مناسب دارند، هرچند برخی از روش‌ها همچون [۱۳] به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با لینک‌های مخابراتی با پهنای باند کم هم قابل پیاده‌سازی هستند. برای مثال، در مقاله [۱۹] برای کاهش بار ارتباطی و تراکم ترافیک، داده‌های عملیاتی به صورت محلی نمونه‌برداری می‌شود و زمانی که شرایط خاصی ایجاد می‌شود به کنترل‌کننده مجاور ارسال می‌شود. علاوه بر این، در مورد نحوه ایجاد ارتباط بین بخش‌های مختلف ریزشبکه، در روش‌های بالا، از دو ساختار کنترل متمرکز [۲۰] و توزیع شده [۶، ۱۸، ۲۱، ۲۲] استفاده شده است که با توجه به مزایا و معایب آن‌ها، برای شبکه‌های مختلف می‌توان از آن‌ها بهره گرفت.

ساختار متمرکز کنترل ریز شبکه‌ی DC، شبیه آنچه در [۲۰] ارائه شده است، در زمانی که ریزشبکه در فضایی محدود ایجاد شده و عناصر آن در نزدیکی هم باشند به طور مؤثری قابل استفاده است.

علاوه بر روش‌های بیان شده در بالا، استفاده از روش‌های گوناگون کنترل خطی و غیرخطی نیز برای ایجاد کنترل افی تطبیقی استفاده شده است. استفاده هم‌زمان از کنترلگرهای مد لغزشی و کنترلگرهای PI^۶ در [۱] اشاره شده است که در آن پارامترهای کنترلگر PI متناسب با شرایط کاری تغییر می‌یابد تا رفتار تطبیقی فراهم آید. در [۶، ۲۳] از روش کنترل فازی برای تعیین پارامترهای کنترل افی و اصلاح تقسیم جریان استفاده شده است. همچنین، در مقاله [۶] یک کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر کنترل افی استفاده شده است که در آن پارامترهای سیستم کنترل با استفاده از منطق فازی تنظیم می‌شوند. این روش خصوصاً در برابر نامعینی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم (شامل تغییرات در بار، مقاومت کابل و غیره) پایدار است. بدیهی است که در این قبیل کنترلگرها، طراحی سیستم

^۶ Proportional-Integral

افتی به گونه‌ای نوشته شده‌اند که اثر مقاومت کابل هم در آن‌ها دیده شود و بدین وسیله میزان دقت سیستم کنترل افزایش یابد. به تعبیر دیگر در این روش، مقاومت کابل نیز در نسبت تقسیم جریان بین کانورترها وارد شده است. طراحی سیستم کنترل اُفتی در [۸] هم به گونه‌ای است که متفاوت بودن میزان مقاومت خطوط اتصال DGها به شبکه، مشکلی در تنظیم جریان ایجاد نمی‌کند. همچنین در [۲]، [۲۸] وجود مقاومت کابل و تغییر آن به عنوان عاملی در تغییر شیب کنترل اُفتی و تطبیقی سازی آن در نظر گرفته شده است. همچنین، با توجه به اهمیت نقش مقاومت‌های کابل‌ها، در [۲، ۲۹] روش‌هایی برای محاسبه این مقاومت‌ها و سپس اعمال آن‌ها در مشخصات کنترل اُفتی ارائه شده است.

۱-۲- اهداف مقاله و نوآوری

در این مقاله به دنبال آن هستیم که سیستم کنترل مبتنی بر کنترل اُفتی را به گونه‌ای مورد استفاده قرار دهیم که بتواند در مواجهه با عدم قطعیت‌های مرتبط با توان خروجی DGهای موجود در یک ریزشبه DC، تقسیم توان بهینه را انجام دهد. همچنین در روش پیشنهادی در این مقاله، علاوه بر آنکه اثر امپدانس کابل‌ها در تقسیم جریان در نظر گرفته شده است، معادلات تعیین شیب کنترل اُفتی به گونه‌ای نوشته شده است که برای ریزشبه‌های چند شینه هم قابل استفاده است. به طور خلاصه، در این مقاله مواد زیر ارائه شده‌اند:

۱. یک روش ریاضی و معادلات مورد نیاز آن برای یافتن پارامترهای کنترل اُفتی سیستم کنترل DGهای یک ریزشبه DC چندشینه ارائه شده است که با استفاده از آن سهم بهینه‌ای از جریان بار به هر منبع تخصیص داده می‌شود. روش ارائه شده برای محاسبه پارامترهای کنترل اُفتی به گونه‌ای طراحی شده است که برای ریز شبکه‌های چندشینه با بارهای توزیع شده که اثر مقاومت کابل در آن قابل صرف نظر نیست به راحتی قابل پیاده سازی است. حال آنکه در مقالات پیش از این، به دلیل عدم در نظر گرفتن این دو موضوع، موضوعاتی همچون تقسیم جریان بهینه برای کاهش تلفات شبکه، قابل پیاده سازی نبوده و به دلیل یکسان فرض کردن ولتاژهای همه شین‌ها باهم، خطای محاسباتی در شبکه‌های واقعی چندشینه به وجود می‌آوردند.

فازی که نوعاً بر اساس سعی و خطا انجام می‌شود، به عنوان یکی از چالش‌های عمده شناسایی می‌شود. همچنین این روش متکی به استفاده از روش کنترل مد لغزشی است که به نوبه خود می‌تواند استرس و نویز را در سیستم افزایش دهد و باعث سوئیچینگ فرکانس بالا شود و به دلیل ثبت داده‌های بلادرنگ نیازمند محاسبات پیچیده است. در [۲۴] نویسندگان یک کنترل حالت لغزشی بهینه مبتنی بر ناظر برای تنظیم خروجی هر مبدل با در نظر گرفتن مقاومت خط ارائه داده‌اند.

در [۲۵] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ضرایب دروپ مبدل‌ها استفاده می‌کند، دقت این روش به شدت به تنظیم پارامترهایی مانند نرخ انتخاب، نرخ جهش و اندازه جمعیت بستگی دارد. علاوه، در [۱، ۲۶] با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی PSO^۷ به دنبال محاسبه مقادیر بهینه برای پارامترهای کنترل اُفتی بوده‌اند. این روش‌ها نوعاً نیازمند به محاسبات پیچیده و زمان بر هستند و با توجه به محدود بودن ابعاد ریزشبه‌ها ممکن است با استفاده از روش‌های ریاضی با حجم محاسبات کم بتوان به نتایجی شبیه آن‌ها دست یافت. همچنین در مقاله [۲۷] از یک الگوریتم اجماع دینامیک برای محاسبه میانگین جریان گردشی و کاهش آن استفاده می‌کند. این رویکرد از جریان گردشی میانگین دینامیک برای تنظیم مقاومت دروپ مبدل‌ها استفاده می‌کند که باعث بهبود عملکرد سیستم در برابر تغییرات بار می‌شود.

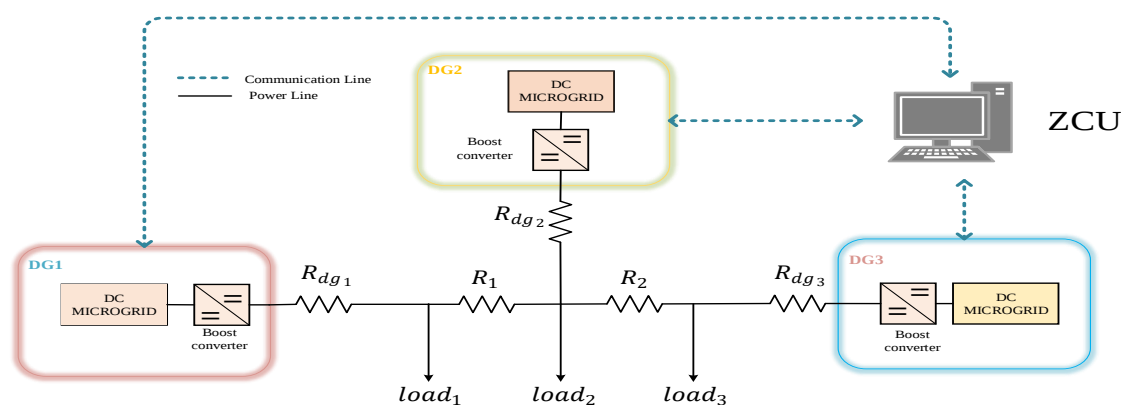
از سوی دیگر، در سیستم کنترل اُفتی کلاسیک، فرض بر آن است که همه DGها باهم موازی بوده و در حقیقت ولتاژ خروجی آن‌ها باهم برابر باشد. در نتیجه، اثر وجود مقاومت کابل‌ها در آن‌ها دیده نشده است. علاوه بر آن، در بسیاری از مقالات، همچون [۷]، موضوع مورد بحث پیرامون کنترل ولتاژ و توزیع جریان در یک ریزشبه تک شینه بوده است که در آن عملاً همه منابع و بارها باهم موازی هستند. در واقع در این مقالات، شرایطی که بیش از یک شین در ریزشبه موجود است و عملاً ولتاژ شین‌ها یکسان نخواهد بود در نظر گرفته نشده است. در نتیجه استفاده از کنترل اُفتی کلاسیک، بدون توجه به میزان مقاومت کابل‌ها، به طور اساسی بر روی دقت تقسیم جریان بین DGها تأثیر می‌گذارد [۹]. برای رفع این مشکل، در روش ارائه شده در [۲] معادلات مورد نیاز برای یافتن مقاومت مجازی کنترل

^۷ Particle Swarm Optimization

اختلال در سیستم کنترل و افزایش خطای تقسیم توان نخواهد شد. این موارد می‌تواند گامی در جهت رفع مشکلات پیاده‌سازی ریزشبه‌های چندشینه در صنعت گردد. همچنین قابل ذکر است که پیاده‌سازی و آزمایش روش کنترل اکتیو پیشنهادی بر اساس ساختار HIL است. ساختار HIL کمک می‌کند که در هنگام بررسی روش‌های کنترلی، برخی از تفاوت‌های بین نتایج مبتنی بر شبیه‌سازی با نتایج عملی کاهش یابد. در حقیقت نتایج حاصل از این قبیل آزمایشها به نتایج عملی نزدیک‌تر شده است.

۲- ریزشبه تحت بررسی

قابلیت‌ها و نحوه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی در این مقاله، در قالب ریزشبه نشان داده شده در شکل (۱) مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. به همین منظور، در این بخش به بیان و معرفی سیستم تحت مطالعه می‌پردازیم.



شکل ۱- دیگرام تک‌خطی ریزشبه DC.

کلاسیک باعث کاهش دقت تقسیم جریان می‌شود نیز در نظر گرفته شده است. در این شبکه، DGها از طریق میدل‌های افزاینده DC به شین‌های ۴۸ ولت مربوط به خود متصل شده‌اند. همچنین فرض شده است که این شبکه با در اختیار داشتن زیرساخت‌های موردنیاز شبکه‌های هوشمند و با استفاده از لینک‌های مخابراتی اطلاعات موردنیاز برای تحلیل شبکه را از بارها، منابع و سایر بخش‌های آن دریافت نموده و به یک واحد کنترل ناحیه^۸ (ZCU) منتقل می‌کنند. ZCU با اتصال به کنترلگر محلی کانورترها، میزان توان قابل تحویل DG را دریافت می‌نماید. همچنین وضعیت و میزان بار متصل به هر شین نیز به ZCU گزارش می‌شود. با توجه به مدیریت کلی ریز شبکه

۲. برخلاف مقالات ارائه شده پیشین که عمدتاً تنظیم میزان جریان هر DG را بر اساس تأمین شرط تعادل بارگیری از آن‌ها انجام می‌داد، روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر تأمین این شرط به پارامترهای دیگری همچون حداقل سازی تلفات و افت ولتاژ عمومی شبکه هم توجه نموده است. با استفاده از این ساختار، همچنین می‌توان در آینده اثر تقسیم توان متناسب با هزینه‌های بهره‌برداری هر DG را هم در محاسبات وارد نمود. به بیان دیگر روش ارائه شده در این مقاله، روش عمومی‌تر و کامل‌تر از مقالاتی است که صرفاً تقسیم جریان بر اساس تعادل در بارگیری DGها را هدف‌گذاری نموده‌اند. بر اساس موارد بیان شده در بالا، با استفاده از روش پیشنهادی میزان خطای سیستم کنترل مبتنی بر کنترل اکتیو در ریزشبه‌های چندشینه که در آن‌ها لزوماً همه منابع و بارها به یک شین متصل نیستند افزایش خواهد داشت. همچنین تغییرات توان خروجی DGها باعث ایجاد

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، برخلاف مقالات گذشته که عمدتاً پیاده‌سازی کنترل اکتیو را بروی یک ریزشبه تک شینه مورد توجه قرار داده‌اند، ریزشبه مورد مطالعه، دارای چند شین با منابع و بارهای پراکنده است. در نتیجه، عملاً خروجی کانورترهای DGها لزوماً باهم موازی و هم ولتاژ نمی‌باشند. در حقیقت، برای در نظر گرفتن یک ریزشبه عمومی‌تر نسبت به اغلب مقالات ارائه شده در این زمینه، شبیه ریزشبه‌های اشاره شده در [۳۰، ۳۱]، فرض شده است که بارها و منابع در چند شین توزیع شده‌اند. همچنین در این ریزشبه وجود مقاومت کابل‌های رابط بین کانورتر و شین‌ها و نیز کابل‌های بین شین‌ها که صرف نظر کردن از آن‌ها در سیستم کنترل اکتیو

⁸ Zone Control Unit

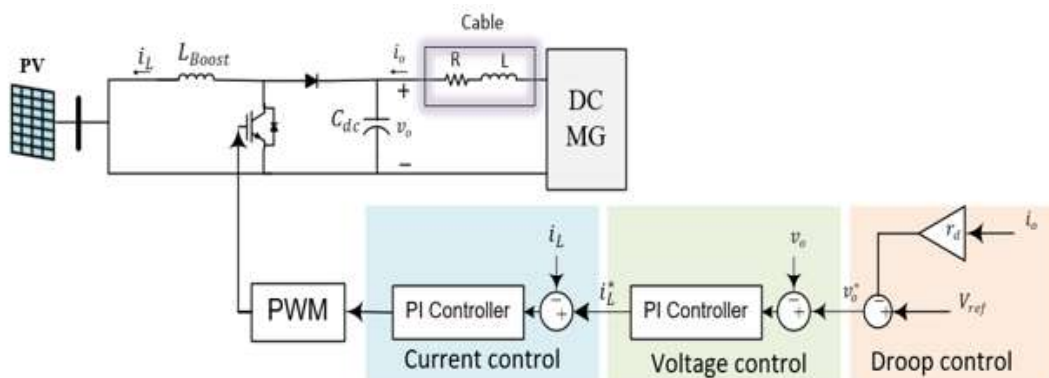
می‌تواند به صورت ثابت باشد (در کنترل اف‌تی کلاسیک) و یا بر اساس سیگنال‌های دریافتی از سطح کنترل بالاتر تغییر نماید (در کنترل اف‌تی تطبیقی). در ساختار شبیه‌سازی شده در این مقاله، این حلقه نیز دارای یک بلوک کنترلی PI است. سومین حلقه کنترلی مورداستفاده در سیستم کنترل شکل (۲) که بیرونی‌ترین و کندترین حلقه است، حلقه مربوط به پیاده‌سازی کنترل اف‌تی است که در حقیقت میزان ولتاژ رفرنس (V_{ref}) را برای لوپ کنترلی ولتاژ نیز تعیین می‌کند. قابل ذکر است که ولتاژ V_{ref} در حقیقت ولتاژ بی‌باری کانورتر تحت کنترل است که در صورت لزوم، از طریق سطح دوم کنترل و با استفاده از لینک‌های مخابراتی قابل تنظیم است. در محاسبات مرتبط با این حلقه، مقدار شیب منحنی کنترل اف‌تی (r_d) نقش اساسی دارد که همان گونه که در بخش مرور مقالات بیان شد، روش‌های مختلف ارائه شده برای سیستم‌های کنترل اف‌تی تطبیقی، با الگوریتم‌های گوناگون آن را به دست می‌آورند. در حقیقت، کنترلگرهای سیستم کنترل اف‌تی، بر اساس اطلاعات دریافتی از اندازه‌گیری‌های محلی و داده‌هایی که توسط لینک‌های مخابراتی به آن‌ها رسیده است، سیگنال مناسب را برای واحد تولید کنند PWM ایجاد می‌کنند [۲]. برای توصیف بهتر نحوه کار کنترل اف‌تی و نقش مقاومت مجازی آن، مدار معادل کلی یک DG متصل به شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، رابطه زیر توصیف‌کننده ارتباط پارامترهای کنترل اف‌تی است:

$$V_0 = V_{ref} - r_d * i_o \quad (۱)$$

توسط ZCU، این واحد کنترلی باید بتواند در حالت کار جزیره‌ای ریزشبه، تعادل بین بار و تولید را تضمین نماید. به همین دلیل، روش کنترلگر ارائه شده در این مقاله در حقیقت در ZCU اجرا خواهد شد.

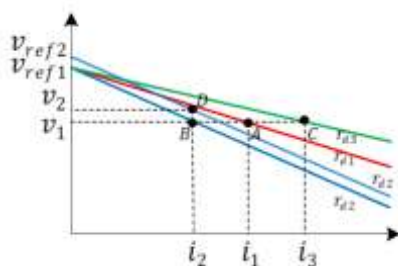
۳- سیستم‌های کنترل مبتنی بر کنترل اف‌تی

منطق کنترل اف‌تی، به عنوان یک روش کنترل غیرمتمرکز، برای تنظیم خروجی هر یک از مبدل‌های متصل به ریزشبه به صورت مجزا عمل می‌کند. در حقیقت این روال کنترلی به بخشی از لوپ‌های کنترلی کانورترهایی که DGها را به ریزشبه متصل می‌کنند اضافه شده و همچنین می‌تواند آن سیستم کنترل محلی را از این طریق به سیستم کنترل بالادست (در اینجا ZCU) متصل کند. شکل (۲) حلقه‌های کنترلی یک مبدل افزایشی را که برای اتصال یک مجموعه سلول خورشیدی به ریزشبه DC مورداستفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد. این ساختار کنترلی شامل سه حلقه کنترلی است که هر کدام وظایف مربوط به خود را انجام می‌دهند. حلقه کنترل جریان که داخلی‌ترین حلقه این سیستم کنترل است، بر اساس جریان رفرنسی که از حلقه کنترل ولتاژ دریافت می‌کند و با مقایسه آن با جریان خروجی DG، سیگنال‌های لازم را جهت تنظیم سیکل کاری کانورتر به بخش تولیدکننده (مدولاسیون عرض پالس) PWM^۹ ارسال می‌کند. این حلقه سریع‌ترین حلقه کنترلی مبدل مورداستفاده می‌باشد که در سیستم شبیه‌سازی شده در این مقاله دارای یک بلوک کنترلی PI است. حلقه کنترلی دیگر، حلقه کنترل ولتاژ است که برای تنظیم ولتاژ خروجی این مبدل مورداستفاده قرار می‌گیرد. رفرنس ولتاژ این حلقه



شکل ۲- لوپ‌های کنترل DG متصل به ریزشبه DC.

^۹ Pulse Width Modulation



شکل ۴- منحنی کنترل افی با مقدار مقاومت مجازی متفاوت.

به‌طور مشابه، در صورتی که توان قابل تأمین توسط این DG مجدداً قابل افزایش بوده و حتی بتوان آن را به بیش از مقدار اولیه (مثلاً به جریان i_3) رساند لازم است با تغییر شیب منحنی به r_{d3} ، در همان ولتاژ قبل، جریان افزایش یافته و به نقطه C رسانده شود. در این حالت نیز میزان تغییر شیب مورد نیاز با رابطه (۴) قابل بیان است.

$$\Delta r_{d2} = \frac{(v_{ref} - v_o)(i_3 - i_2)}{i_3 i_2} \quad (4)$$

قابل ذکر است، در هر دو حالت کنترلی بیان شده در بالا، رسیدن به نقاط کنترلی جدید صرفاً با تغییر شیب منحنی کنترل افی و ثابت نگه داشتن ولتاژ رفرنس آن انجام شده است؛ اما اگر فرض شود که در حالتی که در نقطه کار B قرار داریم، به دلیل افت ولتاژ در برخی از نقاط سیستم، نیاز به افزایش ولتاژ داشته باشیم، می‌توان این کار را با تغییر ولتاژ رفرنس از v_{ref1} به v_{ref2} انجام داد. که نتیجه آن رسیدن به نقطه کار D بر روی منحنی کنترل افی جدید است. بدیهی است که در این حالت، DG تحت کنترل باید ظرفیت تولید متناسب با این حالت کاری را داشته باشد.

۴- ساختار سیستم کنترل پیشنهادی

در این بخش به معرفی سیستم کنترل پیشنهادی برای ریزشبه‌های DC می‌پردازیم. این سیستم کنترل، شامل یک روال برای تعیین مقدار بهینه جریان‌های خروجی از DGها، نحوه یافتن شیب منحنی کنترل افی در یک ریزشبه چند شینه بر اساس مقادیر انتخاب شده برای جریان‌های DGها و نیز شامل یک الگوریتم جهت پیاده‌سازی در بخش کنترل ریزشبه می‌باشد.

۴-۱- تقسیم توان بین DGها با کنترل افی تطبیقی

با توجه به توضیحات بخش ۳، در این بخش به بیان نحوه فرموله بندی روش کنترل افی تطبیقی برای یک ریزشبه DC می‌پردازیم که در آن، یکی از پارامترهای مهم، یافتن مقدار مطلوب شیب کنترل افی بر اساس قیود و

که در آن، پارامتر r_d (شیب منحنی کنترل افی)، به‌عنوان یک مقاومت مجازی عمل می‌کند [۲]. بر اساس این رابطه، ولتاژ خروجی V_o هر DG با افزایش بار آن (i_o) نسبت به مقدار V_{ref} ، کاهش می‌یابد. در این رابطه بدیهی است که r_d مقدار حداکثری دارد که نمی‌تواند از آن بیشتر شود [۳۲].

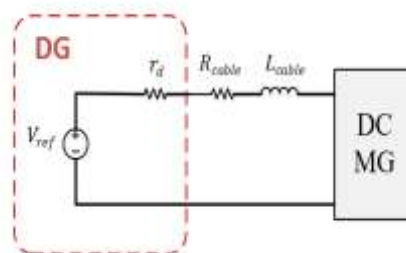
۳-۱- نحوه اعمال کنترل افی تطبیقی

نحوه اعمال کنترل تطبیقی بر روی پارامترهای کنترل افی مربوط به کانورتر یک DG را می‌توان بر اساس شکل (۴) توضیح داد. در ابتدا فرض کنید که درحالی که شیب کنترل افی در نظر گرفته شده برای یک کانورتر، r_{d1} است، نقطه کار کانورتر نقطه A است که در آن، جریان i_1 این کانورتر در ولتاژ v_1 به شبکه تحویل می‌شود. اکنون فرض کنید، به دلیل عدم امکان تولید توانی معادل قبل، لازم است جریان خروجی این DG کمتر شده و به میزان i_2 برسد. اگر این تغییر با همان شیب کنترل افی قبلی انجام شود، نتیجه آن افزایش ولتاژ شین است که نامطلوب است. لذا، برای رسیدن به جریان کمتر در ولتاژ v_1 قبل، و کار کردن در نقطه کار B لازم است شیب منحنی کنترل افی تغییر یابد و به r_{d2} برسد. که می‌توان آن را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$r_{d2} = r_{d1} + \Delta r_{d1} \quad (2)$$

که در آن، Δr_{d1} عنصر تطبیق‌دهنده منحنی کنترل افی است که برای اصلاح شیب منحنی کنترل افی باید اعمال شود تا شیب را از r_{d1} به r_{d2} تغییر دهد. در حقیقت، Δr_{d1} معادل میزان مقاومت مجازی اضافی است که باید در مسیر اتصال کانورتر به شبکه اضافه شود تا خروجی آن اصلاح شود. این میزان تغییرات شیب با استفاده از رابطه (۳) قابل توصیف است.

$$\Delta r_{d1} = \frac{(v_{ref} - v_o)(i_2 - i_1)}{i_2 i_1} \quad (3)$$



شکل ۳- مدار معادل یک DG متصل به شبکه DC.

(۲) با توجه به شرایط کاری هر کدام از DGها، توان مجاز آن در کنترلگر محلی DG محاسبه شده و به ZCU ریزشبه اعلام شده است.

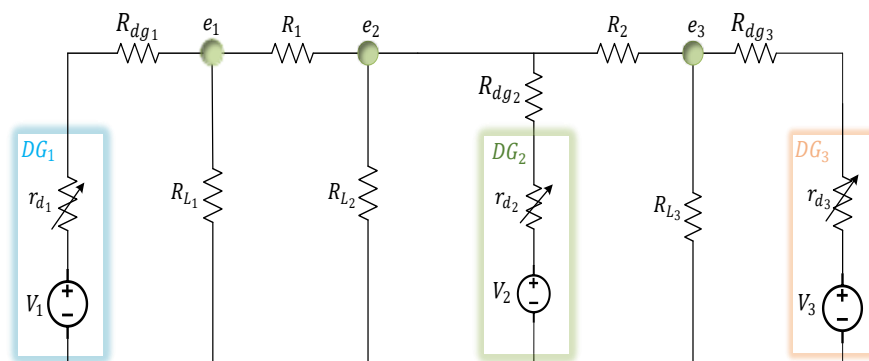
(۳) علاوه بر دانستن میزان مجاز توان کاری هر کدام از DGها، سیستم کنترل این ریزشبه، می‌تواند بر اساس روال محاسباتی بیان شده در بخش ۴-۲ حالت تقسیم جریان بهینه را برای رسیدن به اهداف مختلف (همچون کاهش تلفات، کاهش انحراف ولتاژ شین‌ها و بارگذاری مساوی بین DGها) مشخص کند.

قابل ذکر است، یکی از فرض‌های اصلی در محاسبات مرتبط با یافتن میزان مقاومت کنترل افی در این مقاله، فرض کردن این موضوع است که میزان حداکثر افت ولتاژ در شینی که دارای بیشترین میزان افت ولتاژ است باید به‌گونه‌ای باشد که ولتاژ آن شین همچنان در محدوده مجاز قرار بگیرد. در حقیقت روال پیشنهادشده در این مقاله، تقسیم جریان بهینه و اطمینان از تنظیم ولتاژ مناسب در همه شین‌های ریزشبه به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود. برای محاسبه رابطه بین شیب کنترل افی و میزان توان هر DG، مدار معادل شبکه شکل (۱) به‌صورت نشان داده شده در شکل (۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدار، همانند روش بیان شده در [۱۳، ۲]، معادل هر DG و سیستم کنترل آن، به‌صورت یک منبع ولتاژ و مقاومت نشان داده شده است. همچنین بر اساس مدل مورد استفاده در [۱۳]، بارها نیز به‌صورت مقاومت در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به اینکه هدف نهایی از تحلیل مدار شکل (۵) به دست آوردن رابطه‌ای بین r_d و جریان‌های DGها خواهد بود.

محدودیت‌های توان تولیدی در DGهاست. معادلاتی که ادامه می‌آیند معادلاتی است که در سیستم کنترل پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا بر اساس شرایط تعریف شده برای توان خروجی هر کدام از DGها، میزان r_d سیستم کنترل آن را تغییر داده و تقسیم جریان بین DGها را عوض نماید. همان‌گونه که پیش‌ازین بیان شد، در اغلب مقالات ارائه شده در این حوزه، معادلات مورد نیاز برای محاسبه کنترل افی برای ریزشبه‌هایی نوشته شده است که تک شینه بوده و بارها و منابع همگی به یک شین متصل باشند. بر همین اساس، روابط ارائه شده برای بیان نسبت بین جریان‌های DGها و شیب کنترل افی آن‌ها در آن مقالات، در ریزشبه‌هایی که بارها و DGها در آن‌ها پراکنده شده و با کابل به هم متصل شده باشند (مقاومت کابل‌ها مهم باشد) قابل استفاده نیست. به‌علاوه، در مقالات دیگری هم بار و یا DGهای موجود در یک ریزشبه به‌صورت متمرکز در یک نقطه در نظر گرفته شده‌اند (مثل مقاله [۹] که بارها را متمرکز فرض کرده است) که این موضوع نیز برای بسیاری از ریزشبه محقق نیست. بر این اساس یکی از تفاوت‌های عمده این روش با روش‌های بیان شده در سایر مقالات، فرض کردن وجود چند شین در ریزشبه و به‌بیان دیگر، فرض کردن وجود کابل در بین منابع و بارهای توزیع شده در شبکه است. در نوشتن این معادلات پیش‌رو فرض‌های زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

(۱) ولتاژ گره‌ها و نقاط مختلف این شبکه باید در حد محدوده مجاز (مثلاً با افت ولتاژ حداکثر ۵ درصد [۳۰]) باقی بمانند.



شکل ۵- مدار معادل ریزشبه مورد مطالعه.

با نوشتن معادلات ماتریسی گره برای این مدار معادل خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2j} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & Y_{k3} & \dots & Y_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن:

Y_{ij} : مجموع ادمیتانس‌های متصل به گره i -ام.

Y_{ij} : منفی ادمیتانس بین گره i و گره j .

e_i : ولتاژ گره i -ام.

همان‌گونه که پیش‌ازاین مشخص شد، با توجه به معلوم بودن میزان جریان‌های مطلوب برای هر کدام از DGهای شکل (۵)، بر اساس روالی که در بخش ۲-۴ توضیح داده خواهد شد، در حقیقت مقادیر i_{dg1} تا i_{dg3} از طریق ZCU مشخص شده است. با توجه به مشخص بودن مقادیر i_{dg1} تا i_{dg3} برای تعیین و مشخص شدن r_d ها لازم است مقادیر ولتاژ هر کدام از گره‌ها، e_1 تا e_3 طبق معادله (۹)، که از معادلات (۶) تا (۸) حاصل شده است، به دست می‌آید.

$$-i_{dg1} + \frac{e_1}{R_{L1}} + \frac{e_1 - e_2}{R_1} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{e_3 - e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_{L3}} - i_{dg3} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{e_2 - e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_{L2}} - i_{dg2} + \frac{e_2 - e_3}{R_2} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dg1} \\ i_{dg2} \\ i_{dg3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{L1}} + \frac{1}{R_1} & \frac{-1}{R_1} & 0 \\ \frac{-1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{L2}} & \frac{-1}{R_2} \\ 0 & \frac{-1}{R_2} & \frac{1}{R_{L3}} + \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن e_1, e_2, e_3 ولتاژ گره‌های اول تا سوم، R_{L1}, R_{L2}, R_{L3} بارهای سیستم و R_1, R_2 مقاومت کابل‌ها هستند. از سوی دیگر، مقدار جریان موردنیاز سیستم با محاسبه مجموع نسبت ولتاژ گره به مقدار بار متصل به آن گره به دست می‌آید که در قالب رابطه (۱۰) بیان شده است.

$$\sum I_{DG_i} = \sum \frac{e_i}{R_{Li}} \quad (10)$$

پس از به دست آوردن مجموع کل بار موردنیاز، با حل معادله‌ی (۹) مقادیر e_1, e_2 و e_3 نیز به دست آمده و در نهایت همه ولتاژها مشخص خواهند شد. با مشخص شدن ولتاژهای همه گره‌های شبکه می‌توان، شیب کنترل افی همه DGها را بر اساس معادلات زیر محاسبه نمود.

$$r_{d1} = ((V_1 - e_1)/i_{dg1}) - R_{dg1} \quad (11)$$

$$r_{d2} = ((V_2 - e_2)/i_{dg2}) - R_{dg2} \quad (12)$$

$$r_{d3} = ((V_3 - e_3)/i_{dg3}) - R_{dg3} \quad (13)$$

که در این روابط $R_{dg1}, R_{dg2}, R_{dg3}$ مقاومت کابل بین DGها و شین i (از ۱ تا ۳) می باشد.

در حقیقت روابط (۱۱) تا (۱۳) معادلات موردنیاز برای محاسبه شیب کنترل افی (مقاومت‌های مجازی) سیستم کنترل هر کانورتور را مشخص می‌کنند. با تعیین شیب کنترل افی کانورتورهای منابع گوناگون بر اساس روابط بالا، علاوه بر آنکه تقسیم جریان موردنظر ZCU از طریق کنترل محلی کانورتورها اعمال می‌شود، به‌طور هم‌زمان تنظیم ولتاژ و اطمینان از قرار گرفتن همه شین‌ها در محدوده مجاز ولتاژی نیز محقق گشته است. بدیهی است که این معادلات همچنین مسیری برای پیاده‌سازی اهداف بهینه‌سازی است که در سیستم کنترل ثانویه ریزشبه مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، اگر سیستم کنترل ثانویه این ریزشبه به‌گونه‌ای طراحی شده باشد که با در نظر گرفتن مسائل بهره داری، قیمت‌گذاری، تعمیر و نگهداری و امثال آن، میزان توان خروجی هر مبدل را مشخص کند، حاصل این بهینه‌سازی به‌راحتی قابل اعمال بر روی سیستم کنترل DGهای متصل به این ریزشبه است.

۴-۲- انتخاب مقادیر بهینه سهم جریان هر DG

در بخش قبل فرمول‌ها و نحوه محاسبه شیب‌های منحنی‌های کنترل افی هر DG در ریزشبه DC موردبررسی معین شد. بر اساس فرمول‌های (۱۱) تا (۱۳) می‌توان با مشخص بودن میزان جریان موردنظر برای هر DG پارامترهای کنترل افی آن را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که هم تقسیم جریان موردنظر و هم تنظیم ولتاژ دقیق در شبکه انجام شود. آنچه در این بخش باید موردتوجه باشد آن است که نحوه مشخص نمودن جریان‌های بهینه را مشخص نماییم. برای مشخص نمودن میزان جریان‌های

یکی از کمیت‌هایی تبدیل می‌شود که باید در حالت بهینه در حداقل مقدار خودش باشد.

$$F_2 = \sum_{k=1}^N |V_k - V_{ref}| \quad (۱۶)$$

که در آن V_k ولتاژ شین k -ام می‌باشد.

ج. به حداقل رساندن میزان انحراف در بارگذاری DGها

اگرچه هدف اصلی در روش ارائه شده در این مقاله، تقسیم جریان مساوی بین همه DGها نیست ولی مشخص است که هرچه درصد بارگذاری DGها به هم نزدیک‌تر باشد، شرایط کاری متعادل‌تری در شبکه فراهم شده است. بر این اساس، یکی از اهدافی که بر اساس آن‌ها تقسیم جریان بهینه انجام می‌شود، به حداقل رساندن تابع زیر است:

$$F = \sum_{i=1}^N |I_i - I_{avg}| \quad (۱۷)$$

که در آن I_i جریان هر کانورتر و I_{avg} متوسط بارگذاری بر روی کانورترها ست که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{n} \quad (۱۸)$$

د. تابع کلی

اهداف سه‌گانه فوق را می‌توان با تابع F_m توصیف شده در زیر یکپارچه کرد. در این تابع، F_1 معرف تلفات ریزشبه، F_2 معرف میزان انحراف ولتاژ و F_3 معرف میزان انحراف جریان هستند و اندازه ضرایب K_1 تا K_3 ، وزن یا میزان اولویت هر کدام از توابع را مشخص می‌کنند.

$$F_m = k_1 * F_1 + k_2 * F_2 + k_3 * F_3 \quad (۱۹)$$

در صورتی که هر سه هدف مورد اشاره وزن یکسانی داشته باشند، ضرایب را یکسان و مثلاً برابر ۱ می‌توان در نظر گرفت اما در صورتی که یکی از اهداف انتخاب جریان بهینه DGها، مثلاً کاهش توان تلفاتی، از اهمیت و اولویت بیشتری برخوردار باشند، ضریب مربوط به آن بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود.

قابل ذکر است، نحوه محاسبه مقادیر هر کدام از توابع F_1 تا F_3 نیز، بدون نیاز به روال‌های بهینه‌سازی، صرفاً با انجام محاسبات حالات ممکن برای هر شبکه انجام خواهد شد. حالات ممکن برای رسیدن به هدف کنترلی اصلی (تقسیم

خروجی از منابع می‌توان به پارامترهای مختلفی توجه داشت. به تعبیر دیگر، علاوه بر اهداف اصلی سیستم کنترل که تضمین تعادل بار-تولید، تنظیم ولتاژ مناسب و جلوگیری از اضافه بار شدن منابع است، در اینجا اهداف دیگری هم تعیین خواهد شد که عملکرد کلی ریزشبه را بهبود بخشد. در این مقاله، انتخاب این اهداف بر اساس موارد زیر انجام می‌شود [۳۳].

الف. به حداقل رساندن میزان تلفات کلی سیستم

در صورت مشخص بودن مجموع بار مورد نیاز یک شبکه، با تقسیم جریان‌های مختلف بین منابع موجود در آن می‌توان جریان‌های عبوری از شاخه‌های مختلف را تغییر داد و بر این اساس میزان کلی تلفات شبکه تغییر می‌کند. لذا اگر بتوان پخش بار را بتوان به گونه‌ای بین DGها انجام داد که حداقل تلفات در خطوط شبکه رخ دهد، می‌توان بیان نمود که از این منظر تقسیم جریان بهینه اتفاق افتاده است. به این منظور، تابع F_1 به صورت نشان داده شده در زیر، برای مشخص نمودن مجموع تلفات ریزشبه معرفی می‌گردد:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n = \sum_{k=1}^m I_{dgk}^2 (R_{dg}) + \sum_{j=1}^p I_j^2 r_j \quad (۱۴)$$

که در آن میزان P_{Loss_i} توان تلفاتی در هر کدام از خطوط و کابل‌های ریز شبکه، I_{dgk} جریان DGها، R_{dg} مقاومت کابل بین DG و شین، I_j جریان بین شین‌ها، r_j مقاومت خطوط بین شین‌ها است. این تابع را می‌توان به صورت تفاضل کلی مجموع توان تحویلی DGها به مجموع توان دریافتی بارها نیز بیان کرد که در آن صورت صرفاً با پایش شین‌های DGها و بارها و بدون انجام محاسبات بر روی همه خطوط ریزشبه، میزان تلفات کل را می‌توان از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_g} P_{g,i} - \sum_{j=1}^{N_\omega} P_{l,j} \quad (۱۵)$$

بدیهی است که در رابطه (۱۵)، توپولوژی ریزشبه نقشی در محاسبات مربوط به تلفات ندارد.

ب. به حداقل رساندن میزان انحراف ولتاژ در ریزشبه

یکی از مهم‌ترین معیارهایی که بر اساس آن عملکرد یک سیستم کنترل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد توانایی این روش در حفظ ولتاژ شین‌های مختلف ریزشبه در محدوده مجاز است. بر این اساس، تابع F_2 به صورت زیر تعریف شده و به

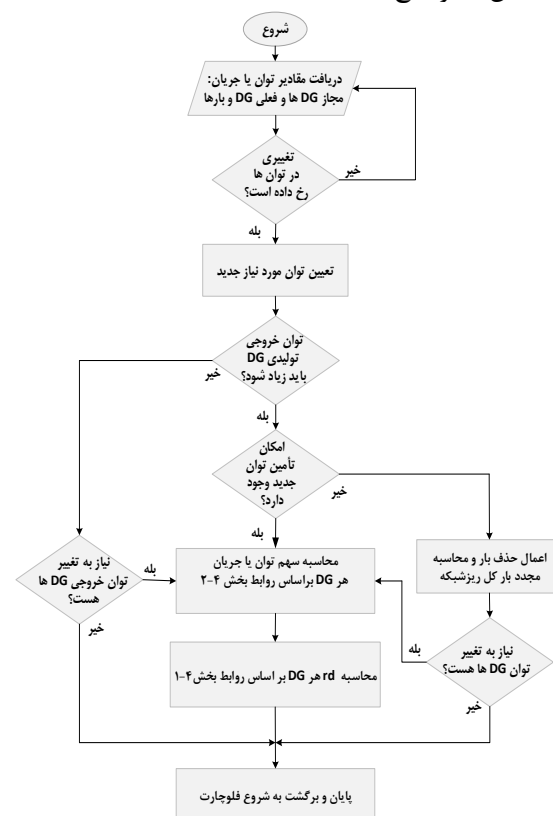
۳-۴- الگوریتم سیستم کنترل پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی برای سیستم کنترل مبتنی بر کنترل اکتیو تطبیقی که در ZCU پیاده‌سازی خواهد شد در شکل (۶) نشان داده شده است. در این الگوریتم، در ابتدا ظرفیت فعلی هر DG، جریان فعلی خروجی آن و جریان مورد نیاز هر بار به ZCU گزارش می‌شود. در صورتی که تغییری در ظرفیت تولیدی یکی از DGها و یا توان مورد نیاز بارها دیده شود، گام‌های بعدی الگوریتم فعال شده و در ابتدا میزان بار مورد نیاز شبکه مشخص می‌شود. سپس، با توجه به توان تحویلی فعلی DGها مشخص می‌شود که آیا امکان تأمین این توان در ریزشبکه وجود دارد یا خیر. در صورت عدم امکان تأمین توان مورد نیاز توسط DGها، لازم است برخی از بارها از مدار خارج شوند. لذا، در این مرحله فرمان قطع به بارهایی که اولویت کمتری دارند ارسال شده و آن‌ها از مدار خارج می‌شوند. سپس، مجدداً میزان کلی توان مورد نیاز محاسبه شده و با توجه به امکان پذیر بودن تأمین توان در این حالت، سهم جریان‌های هر کدام از DGها با توجه به روش بیان شده در بخش ۴-۲ و انجام محاسبات مورد نیاز برای یافتن F_m در حالات گوناگون، مشخص می‌شود. مقادیر مشخص شده برای جریان‌های هر DG، اعدادی هستند که در آن F_m به حداقل ممکن رسیده است. پس از آن، با استفاده از مقادیر جریان به دست آمده برای هر DG، شیب منحنی کنترل اکتیو هر کانورتور با توجه به روابط بیان شده در بخش ۴-۱ مشخص می‌شود. در نهایت، این پارامترهای جدید کنترل اکتیو به سیستم کنترل اعمال و پروسه کنترل به پایان می‌رسد.

با توجه به توضیحات بیان شده در بالا، روش پیشنهادی در این مقاله نه تنها قابلیت استفاده در ریزشبکه‌های چندشینه را دارد، بلکه مقاومت کابلهای بین منابع و بارها را در نظر گرفته و در نتیجه باعث افزایش دقت محاسبات ضرایب دروپ خواهد شد. همچنین در این روش بصورت همزمان چند فاکتور مهم برای یافتن مقدار بهینه ضرایب دروپ مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱ مقایسه بین روش پیشنهادی و برخی از روشهای ارائه شده در مقالات قبل را نشان می‌دهد.

جریان مطلوب) نیز به این گونه یافته می‌شود که با توجه به گام‌های سیستم کنترل هر کدام از DGها میزان سهم ممکن برای آن مشخص و پس از آن محاسبات ریاضی مربوطه انجام خواهد شد. به عنوان مثال، اگر به دلیل محدودیت‌های جریانی در DG3 سیستم شکل (۱)، لازم باشد ۱۲ آمپر از جریان آن کم شده و توسط DGهای دیگر تأمین شود، با توجه به اینکه جریان حداکثر DGهای ۱ و ۲ به ترتیب ۳۵ و ۴۰ آمپر و گام کنترل جریان آن‌ها ۵ درصد فرض می‌شود، همه حالات تقسیم جریان مورد نیاز بین این دو DG در جدولی مشخص شده و سپس محاسبات مورد نیاز برای یافتن F_1 تا F_3 و در نهایت F_m انجام می‌شود. هر کدام از این حالات که میزان F_m کمتری را ایجاد کند، به عنوان حالت بهینه انتخاب می‌شود. سپس شیب منحنی کنترل اکتیو به گونه‌ای اصلاح می‌شود که مقادیر جریان معین شده در حالت بهینه از سوی هر کدام از DGها تزریق شود. این موضوع با جزییات بیشتر در سناریو ۱ بخش ۷ توضیح داده شده است.

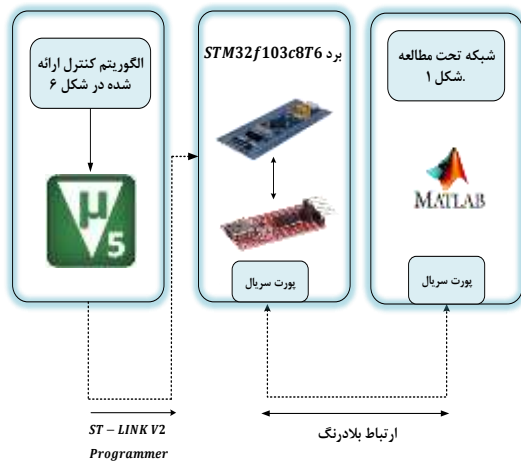


شکل ۶- الگوریتم سیستم کنترل پیشنهادی پیاده شده در ZCU

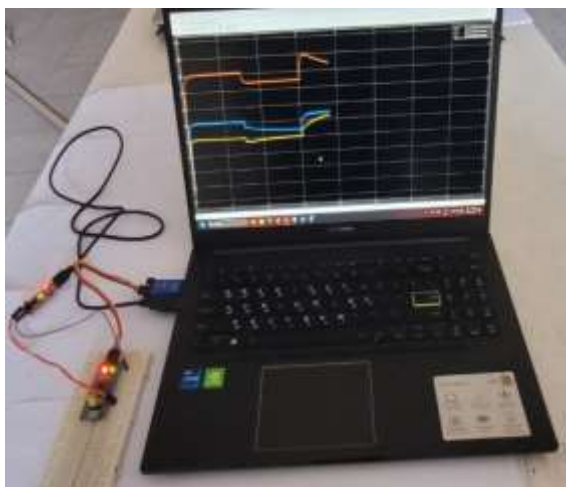
جدول ۱- مقایسه روش پیشنهادی با سایر مقالات.

مرجع	ریزشبکه مورد مطالعه	در نظر گرفتن مقاومت کابل	بهینه سازی ضرایب کنترل افتی	پیاده سازی آزمایشگاهی
[۲]	تک شینه	×	×	✓
[۷]	تک شینه	×	✓	✓
[۱۷]	تک شینه	×	✓	✓
[۱۱]	تک شینه	×	×	✓
روش پیشنهادی	چند شینه	✓	✓	✓

در Simulink متصل می شود.



شکل ۷- ساختار پیاده سازی سخت افزاری HIL.



شکل ۸- تصویر اجرای سیستم کنترل پیشنهادی در ساختار HIL.

۵- ساختار HIL برای بررسی روش پیشنهادی

به منظور بررسی و ارزیابی دقیق تر روش کنترل ارائه شده در این مقاله، مطالعات انجام شده بر روی ریزشبکه مورد مطالعه به صورت سخت افزار در حلقه (HIL) صورت گرفته است. در ساختارهای HIL، سیستم کنترل تحت مطالعه عملاً به صورت واقعی بر روی یک برد پیاده سازی شده و با استفاده از لینک های ارتباطی به سیستم تحت مطالعه (که در کامپیوتر میزبان شبیه سازی شده است) متصل می شود. در نتیجه می توان گفت، استفاده از ساختارهای HIL برای بررسی روش های کنترل، در حقیقت یک گام به جلو به سمت واقعی تر کردن شرایط آزمایش و دقیق تر نمودن ارزیابی ها است. همچنین سیستم کنترل بررسی شده در این ساختار می تواند مستقیماً در کاربردهای عملی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار کلی مورد استفاده به منظور انجام مطالعات HIL سیستم کنترل پیشنهادی در شکل (۷) نمایش داده شده است که در آن سیستم قدرت مورد مطالعه (ریزشبکه شکل (۱)) در نرم افزار Simulink/Matlab شبیه سازی شده و روش کنترلی ارائه شده برای سیستم کنترل آن نیز در یک میکروکنترلر از نوع STM32F103C8T6 برنامه نویسی شده و اجرا می شود. همچنین در این ساختار، از نرم افزار keil به عنوان کامپایلر که در آن سیستم کنترلی به صورت کد پیاده سازی شده است استفاده می شود. در حقیقت، در این ساختار، ZCU مورد نیاز برای ریزشبکه در برد پیاده سازی شده و به ریزشبکه شبیه سازی شده

جدول ۲- پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده.

پارامتر	نماد	مقدار
بارها		
مقاومت بار (اهم)	R_{L1}	۲.۳۵
	R_{L2}	۱.۵۷
	R_{L3}	۲.۳۵
کابل‌ها		
کابل بین شین‌ها	R_1	۳۵ متر (۳ میلی اهم)
	R_2	۴۰ متر (۳.۴ میلی اهم)
کابل اتصال DG به شین آن	R_{dg1}	۳ متر (۰.۳ میلی اهم)
	R_{dg2}	۳ متر (۰.۳ میلی اهم)
	R_{dg3}	۳ متر (۰.۳ میلی اهم)

۶- بررسی های HIL و نتایج آن‌ها

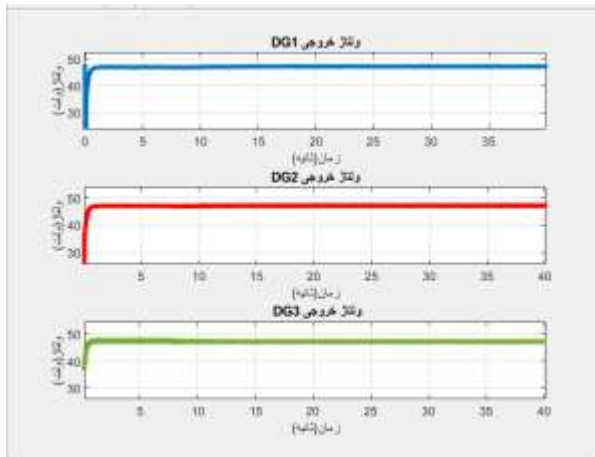
برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی و تایید دقت محاسبه پارامترهای به‌دست‌آمده برای سیستم کنترل افی پیشنهادی، در این بخش مطالعات HIL در قالب دو سناریو انجام شده است. این بررسیها در قالب ساختار پیاده شده در شکل (۷) بوده و شکل (۸) تصویری از نحوه پیاده‌سازی را نشان می‌دهد. پارامترهای سیستم تحت مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

۶-۱- سناریو اول: بررسی محدودیت تولیدی DGها

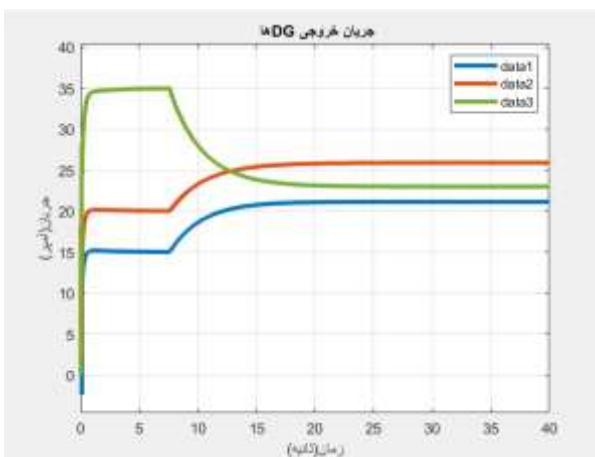
در این سناریو، فرض شده است که در ابتدا با مدیریت اعمالی از سوی سیستم کنترل، ریزشبکه شکل (۱) که از شبکه اصلی جدا شده است، در حالت تعادل به کار خود ادامه داده و میزان جریان خروجی کانورترهای DGهای ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۱۵، ۲۰ و ۳۵ آمپر بوده و فرکانس کلیدزنی مبدل‌ها 5kHz انتخاب شده است. همچنین، حداکثر جریان خروجی قابل تأمین تزریق به شبکه از کانورترهای این DGها نیز به ترتیب، ۳۰، ۴۰ و ۴۰ آمپر می‌باشد که به معنی آن است که توان خروجی هرکدام از واحدهای تولیدی ۱ تا ۳ به ترتیب ۱۴۴۰، ۱۹۲۰ و ۱۹۲۰ وات می‌باشد. قابل ذکر است که در این متن، منظور از هر واحد تولیدی، یک DG و کانورتر آن می‌باشد. در زمان ۷.۵ ثانیه، DG3 دچار محدودیت توان تولیدی شده و می‌تواند صرفاً ۶۵ درصد از توان اولیه خود را تولید کند که در نتیجه آن لازم است جریان تحویلی به شبکه از سوی واحد تولیدی

آن به میزان ۱۲ آمپر کمتر گردد. در نتیجه این تغییر، تعادل بار و تولید در ریزشبکه تحت مطالعه دچار اختلال شده و برای ادامه کار پایدار آن نیاز است که این میزان جریان (توان) توسط دو DG دیگر تأمین شود. با توجه به میزان ظرفیت خالی DGهای ۱ و ۲ بدهی است که هر دو DG امکان تأمین این جریان را دارند ولی لازم است سیستم کنترل به‌صورت بهینه ۱۲ آمپر را بین آن‌ها تقسیم کند. در ادامه بررسی این سناریو، فرض می‌کنیم که جریان واحدهای تولیدی هرکدام از این DGها در پله‌های ۵ درصدی نسبت به جریان نامی شان قابل تغییر است، لذا جریان هرکدام از واحدهای تولیدی DGهای ۱ و ۲ را می‌توان به ترتیب با پله‌های ۱.۵ آمپر و ۲ آمپر تغییر داد. به عبارت دیگر برای انجام این کار می‌توان فرض کرد که جریان ۱۲ آمپر به یکی از حالات نشان داده شده در جدول ۳ قابل تقسیم است.

با توجه به داده‌های جدول ۳، حالت ۴ به دلیل تولید جریان‌های کمتر از میزان موردنیاز، از بین گزینه‌ها حذف می‌شود. در نتیجه ZCU باید با انجام محاسبات بیان شده در بخش (۲-۴)، حالت بهینه که کمترین میزان F_m را داشته باشد را مشخص کند. بر این اساس، و با فرض آنکه در این سناریو ضرایب وزنی K_1, K_2, K_3 به ترتیب برابر ۰.۵ و ۰.۲ و ۰.۳ در نظر گرفته شده است، مقادیر F_1 تا F_3 و نیز مقدار F_m برای همه حالات ممکن در جدول ۳ محاسبه شده و در آن جدول قرار داده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات توابع هدف، حالت ۵ بهینه‌ترین حالت ممکن را بر اساس ضرایب تعریف شده، حاصل خواهد نمود که بر اساس آن، جریان موردنیاز این شبکه به‌طور مساوی بین DG1 و DG2 تقسیم می‌شود. در نتیجه، ZCU با استفاده از معادلات (۱۱) تا (۱۳) میزان شیب منحنی کنترل افی DGهای ۱ تا ۳ را به گونه‌ای تغییر خواهد داد تا جریان‌های تزریقی به شبکه، همان گونه که در شکل (۹) نشان داده است، به ترتیب به ۲۱.۲۶ و ۲۳ آمپر برساند و در نتیجه تعادل بار و تولید مجدداً در ریزشبکه فراهم شده و شبکه به کار عادی خود برگردد. همچنین، همان گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، ولتاژ شین‌های مختلف ریزشبکه نیز در محدوده مجاز باقی خواهد ماند. تغییرات مقادیر جریان هرکدام از منابع در جدول ۴ نیز به‌طور خلاصه قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- سناریو اول: ولتاژ خروجی کانورترها.



شکل ۱۱- سناریو ۱: جریان خروجی کانورترهای هر کدام از DGها.

۶-۲- سناریو دوم: بررسی مدیریت تغییرات بار توسط ZCU

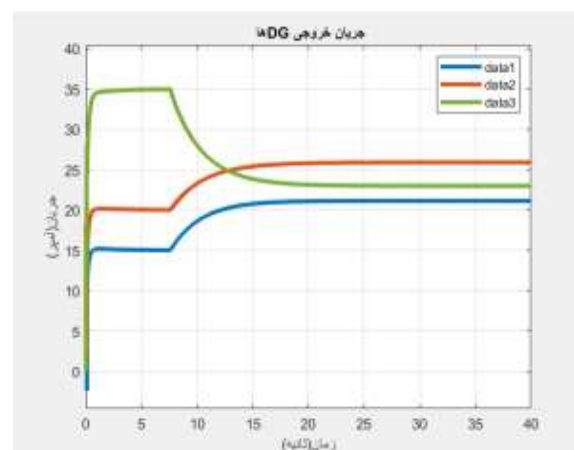
در ابتدا سیستم به گونه‌ای کار می‌کند که جریان تزریقی به شبکه از واحدهای تولیدی ۱ تا ۳ بر اساس درخواست ناظر شبکه بر روی ۱۵ و ۲۰ و ۳۵ آمپر تنظیم شده است. در زمان ۷.۶ ثانیه، میزان بار ۲ به اندازه ۲۰ درصد کاهش یافته است. برای مدیریت بهینه این کاهش بار، ZCU میزان تقسیم بار بین DGهای این زیرسیستم را براساس الگوریتم بهینه سازی تغییر داده و با محاسبه میزان F_m برای این حالت، سهم جریان بهینه واحدهای ۱ تا ۳ به ترتیب به ۱۵، ۱۷ و ۳۲.۵ آمپر تغییر یابد. لذا ZCU فرمان مناسب را به سیستم کنترل این DGها ارسال می‌نماید تا سهم جریانی آن‌ها به صورت جدید تغییر یابد.

جدول ۳- حالات مختلف تأمین توان مورد نیاز ریزشبکه توسط دو DG در سناریو اول.

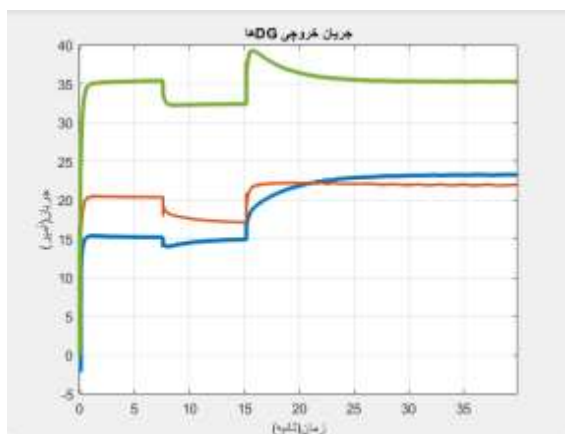
شماره حالت	سهم جریان واحد تولیدی ۱ (آمپر)	سهم جریان واحد تولیدی ۲ (آمپر)	مجموع جریان تأمین شده (آمپر)	F_1	F_2	F_3	F_m
1	0	12	12	3.00	0	0.29	0.56
2	2	10.5	2.5	26.7	0.5	1.13	3.73
3	4	9	13	0.75	1	0.15	6.10
4	4	7.5	11.5	----	---	---	---
5	6	6	12	2.99	0	0.14	1.52
6	8	4.5	12.5	26.7	0.5	0.16	3.73
7	10	3	13	50.7	1	0.17	6.11
8	12	1.5	13.5	6.7	1.5	0.17	3.74
9	12	0	12	0.07	0	0.25	1.55

جدول ۴- نتایج سناریوی اول.

جریان تزریقی به شبکه بعد از تغییرات (آمپر)	حداکثر ظرفیت تأمین جریان (آمپر)	جریان تزریقی به شبکه قبل از تغییرات (آمپر)
۲۱.۲۶	۳۰	۱۵
۲۶	۴۰	۲۰
۲۲.۷۵	۴۰	۳۵



شکل ۹- سناریو اول: جریان خروجی کانورترهای هر کدام از DGها.



شکل ۱۴-، سناریو ۲: جریان خروجی کانورترهای هر کدام از DGها.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کنترلی جدید برای مدیریت بهینه توان در ریز شبکه‌های DC ارائه شد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با توان خروجی DGها، امکان تقسیم جریان بهینه بین منابع تولید پراکنده موجود در یک ریز شبکه را فراهم می‌آورد. این روش، علاوه بر اینکه امکان تقسیم جریان بهینه و اطمینان از تنظیم ولتاژ مناسب در همه شین‌های ریز شبکه را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌آورد، به نحوی طراحی شده است که در انتخاب نحوه تقسیم جریان بین DGها، کاهش تلفات، انحراف ولتاژ و تفاوت بارگیری بین DGها را نیز مورد توجه دارد. پیاده‌سازی و بررسی HIL روش پیشنهادی نشان داد این روش با دقت بالایی تقسیم جریان بین DGها را انجام خواهد داد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

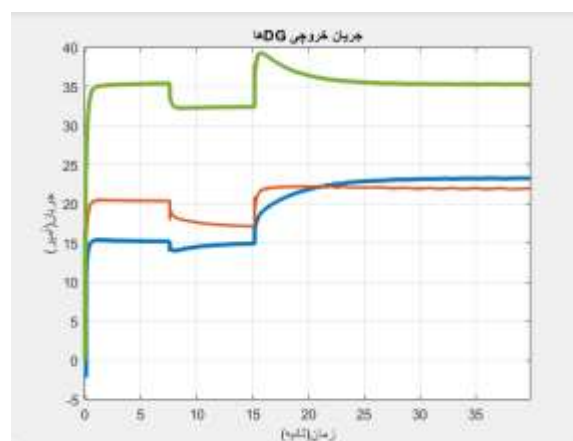
مشارکت‌های نویسندگان

زهرا کریمیان: ایده اولیه، شبیه‌سازی، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیشنویس مقاله
مهدی منادی: ایده اولیه، راهنمایی علمی، تحلیل و ارزیابی نتایج، ویرایش مقاله

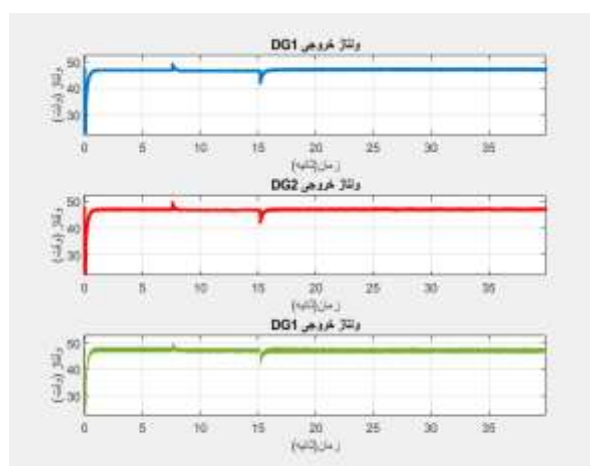
محسن صنیعی: راهنمایی علمی، اعتبارسنجی نتایج

از سوی دیگر در زمان ۱۵.۲ ثانیه، میزان بار ۳ به اندازه ۱۵ درصد مقدار اول خود زیاد شده و به‌طور هم‌زمان فرض شده است که DG۱ نمی‌تواند بیش از ۸۰ درصد توان نامی خود را تحویل دهد. در این حالت، جریان مورد نیاز DGهای ۱ تا ۳ را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که به ترتیب ۲۳، ۲۱.۵ و ۳۵ آمپر جریان خروجی داشته باشند. شکل (۱۲) تغییرات جریان خروجی واحدهای تولیدی شبکه تحت مطالعه را که ناشی از تغییرات در بار آن است را نشان می‌دهد.

همچنین، شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب ولتاژ شین‌های مختلف ریز شبکه و جریان بارها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این دو شکل مشخص است، با اعمال سیگنال‌های کنترلی، عملاً ولتاژهای شین‌های مختلف بدون تغییر مانده و جریان بارها نیز تایید می‌کنند که توان تولیدی در DGها، امکان تأمین بار خواسته‌شده را داشته است.



شکل ۱۲- سناریو دوم: جریان خروجی کانورترهای هر کدام از DGها.



شکل ۱۳- سناریو دوم: ولتاژ خروجی کانورترهای هر کدام از DGها.

سید قدرت اله سیف السادات: مشاوره علمی، منابع مالی
اعتبارسنجی نتایج
ندارد.

مراجع

- [1] Mokhtar, Mohamed, Mostafa I Marei, and Ahmed A El-Sattar. "An Adaptive Droop Control Scheme for Dc Microgrids Integrating Sliding Mode Voltage and Current Controlled Boost Converters." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 2 (2017): 1685-93.
- [2] Ghanbari, Niloofar, and Subhashish Bhattacharya. "Adaptive Droop Control Method for Suppressing Circulating Currents in Dc Microgrids." *IEEE Open Access Journal of Power and Energy* 7 (2020): 100-10.
- [3] Monadi, Mehdi, Catalin Gavriluta, Alvaro Luna, Jose Ignacio Candela, and Pedro Rodriguez. "Centralized Protection Strategy for Medium Voltage Dc Microgrids." *IEEE Transactions on Power Delivery* 32, no. 1 (2016): 430-40.
- [4] Han, Yang, Xing Ning, Luqiao Li, Ping Yang, and Frede Blaabjerg. "Droop Coefficient Correction Control for Power Sharing and Voltage Restoration in Hierarchical Controlled Dc Microgrids." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 133 (2021): 107277.
- [5] Kumar, Rohit, and Mukesh K Pathak. "Distributed Droop Control of Dc Microgrid for Improved Voltage Regulation and Current Sharing." *IET Renewable Power Generation* 14, no. 13 (2020): 2499-506.
- [6] Veysi, Mohammad, Jamshid Aghaei, Mohammad Reza Soltanpour, Mokhtar Shasadeghi, Behrooz Bahrani, and Daniel Joseph Ryan. "Robust, Accurate, and Fast Decentralized Power Sharing Mechanism for Isolated Dc Microgrid Using Droop-Based Sliding-Mode Control." *IEEE Transactions on Smart Grid* 13, no. 6 (2022): 4160-73.
- [7] Augustine, Sijo, Mahesh K Mishra, and N Lakshminarasamma. "Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone Dc Microgrid." *IEEE Transactions on sustainable energy* 6, no. 1 (2014): 132-41.
- [8] Vu, Tuyen V, Dallas Perkins, Fernand Diaz, David Gonsoulin, Chris S Edrington, and Touria El-Mezyani. "Robust Adaptive Droop Control for Dc Microgrids." *Electric Power Systems Research* 146 (2017): 95-106.
- [9] Liu, Guangyuan, Tommaso Caldognetto, Paolo Mattavelli, and Paolo Magnone. "Power-Based Droop Control in Dc Microgrids Enabling Seamless Disconnection from Upstream Grids." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, no. 3 (2018): 2039-51.
- [10] Guerrero, Josep M, Juan C Vasquez, José Matas, Luis García De Vicuña, and Miguel Castilla. "Hierarchical Control of Droop-Controlled Ac and Dc Microgrids—a General Approach toward Standardization." *IEEE Transactions on industrial electronics* 58, no. 1 (2010): 158-72.
- [11] Mi, Yang, Jiahang Guo, Si Yu, Pengcheng Cai, Liang Ji, Yufei Wang, Dong Yue, Yang Fu, and Chi Jin. "A Power Sharing Strategy for Islanded Dc Microgrid with Unmatched Line Impedance and Local Load." *Electric Power Systems Research* 192 (2021): 106983.
- [12] Anand, Sandeep, Baylon G Fernandes, and Josep Guerrero. "Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage Dc Microgrids." *IEEE transactions on power electronics* 28, no. 4 (2012): 1900-13.
- [13] Lu, Xiaonan, Josep M Guerrero, Kai Sun, and Juan C Vasquez. "An Improved Droop Control Method for Dc Microgrids Based on Low Bandwidth Communication with Dc Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy." *IEEE transactions on power electronics* 29, no. 4 (2013): 1800-12.
- [14] Xing, Lantao, Jiong Cai, Xiaokang Liu, Jingyang Fang, and Yu-Chu Tian. "Distributed Secondary Control of Dc Microgrid Via the Averaging of Virtual Current Derivatives." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 71, no. 3 (2023): 2914-23.
- [15] Kim, Jung-Won, Hang-Seok Choi, and Bo Hyung Cho. "A Novel Droop Method for Converter Parallel Operation." *IEEE Transactions on Power Electronics* 17, no. 1 (2002): 25-32.
- [16] Chen, Fang, Rolando Burgos, Dushan Boroyevich, and Wei Zhang. "A Nonlinear Droop Method to Improve Voltage Regulation and Load Sharing in Dc Systems." Paper presented at the 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2015.

- [17] Wang, Panbao, Xiaonan Lu, Xu Yang, Wei Wang, and Dianguo Xu. "An Improved Distributed Secondary Control Method for Dc Microgrids with Enhanced Dynamic Current Sharing Performance." *IEEE Transactions on Power Electronics* 31, no. 9 (2015): 6658-73.
- [18] Augustine, Sijo, N Lakshminarasamma, and Mahesh Kumar Mishra. "Control of Photovoltaic-Based Low-Voltage Dc Microgrid System for Power Sharing with Modified Droop Algorithm." *IET Power Electronics* 9, no. 6 (2016): 1132-43.
- [19] Lu ,Jinghang, Haiyang Jiang, Xiaochao Hou, and Peng Wang. "Distributed Edge-Based Event-Triggered Control for Voltage Restoration and Current Sharing in Dc Microgrids under Dos Attacks." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70, no. 8 (2022): 8053-63.
- [20] Liu, Qi, Yizhen Wang, Shouxiang Wang, Dong Liang, Qianyu Zhao, and Xueshen Zhao. "Voltage Regulation Strategy for Dc Distribution Networks Based on Coordination of Centralized Control and Adaptive Droop Control." *IEEE Transactions on Power Delivery* 37, no. 5 (2021): 3730-39.
- [21] Shaheed, Mohammad Noor Bin, Yilmaz Sozer, Sifat Chowdhury, and J Alex De Abreu-Garcia. "A Novel Decentralized Adaptive Droop Control Technique for Dc Microgrids Based on Integrated Load Condition Processing." Paper presented at the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020.
- [22] Qian, Yangyang, Zongli Lin, Yacov A. Shamash. "Distributed secondary control of energy storage units in a droop-controlled DC microgrid." *Results in Engineering* 28 (2025): 107036.
- [23] Mi, Yang, Han Zhang, Yang Fu, Chengshan Wang, Poh Chiang Loh, and Peng Wang. "Intelligent Power Sharing of Dc Isolated Microgrid Based on Fuzzy Sliding Mode Droop Control." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 3 (2018): 2396-2406
- [24] Firmansyah, Rifqi, and Makbul AM Ramli. "A New Adaptive Droop Control Strategy for Improved Power Sharing Accuracy and Voltage Restoration in a Dc Microgrid." *Ain Shams Engineering Journal* 15, no. 9 (2024): 102899.
- [25] Hussaini, Habibu, Tao Yang, Yuan Gao, Cheng Wang, Ge Bai, and Serhiy Bozhko. "Droop Coefficient Design and Optimization Using Genetic Algorithm-a Case Study of the More Electric Aircraft Dc Microgrid." Paper presented at the IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2022
- [26] Cingoz, Fatih, Ali Elrattyah, and Yilmaz Sozer. "Optimized Droop Control Parameters for Effective Load Sharing and Voltage Regulation in Dc Microgrids." *Electric Power Components and Systems* 43, no. 8-10 (2015): 879-89.
- [27] Nawaz, Arshad, Jing Wu, Jun Ye, Yidi Dong, and Chengnian Long. "Circulating Current Minimization Based Adaptive Droop Control for Grid-Connected Dc Microgrid." *Electric Power Systems Research* 220 (2023): 109260.
- [28] Sun, Xiaofeng, Yanjun Tian, and Zhe Chen. "Adaptive Decoupled Power Control Method for Inverter Connected Dg." *IET Renewable Power Generation* 8, no. 2 (2014): 171-82.
- [29] Asrari, Arash ,Mehran Mustafa, Meisam Ansari, and Javad Khazaei. "Impedance Analysis of Virtual Synchronous Generator-Based Vector Controlled Converters for Weak Ac Grid Integration." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 10, no. 3 (2019): 1481-90.
- [30] Mohammadi, Jafar, and Firouz Badrkhani Ajaei. "Improved Mode-Adaptive Droop Control Strategy for the Dc Microgrid." *IEEE Access* 7 (2019): 86421-35.
- [31] Nasirian, Vahidreza, Ali Davoudi, Frank L Lewis, and Josep M Guerrero. "Distributed Adaptive Droop Control for Dc Distribution Systems." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 29, no. 4 (2014): 944-56.
- [32] Zhao, Pu, Zeng Liu, and Jinjun Liu. "An Adaptive Discrete Piecewise Droop Control in Dc Microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 15, no. 2 (2024).
- [33] Monadi, Mehdi, Hossein Hooshyar, Luigi Vanfretti, Farhan Mahmood, Jose Ignacio Candela, and Pedro Rodriguez. "Measurement-Based Network Clustering for Active Distribution Systems." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 6 (2019): 6714-23.