



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 16, No. 4, 2026
pp. 85-98
Research Paper

Optimal Power Sharing and Voltage Improvement Based on Droop Characteristics in the Presence of Constant Power Loads

Hamed Mahnani ¹, Mahdi Banjaad ², Ali Akbarzadeh Kalat ²

¹ Electrical Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Sharood, Iran

² Associate Professor, Electrical Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Sharood, Iran

Abstract:

Accurate power sharing and DC bus voltage regulation are among the fundamental challenges in the control of DC microgrids. Although the droop control method is simple and effective, it suffers from limitations in selecting droop coefficients, which can lead to either increased bus voltage deviation or power sharing errors. In addition, the presence of constant power loads (CPLs), due to their negative incremental resistance behavior, can cause severe voltage oscillations and result in system instability. In this paper, a distributed secondary control strategy is proposed to compensate for voltage deviation, optimize power distribution, and enhance system stability in the presence of CPLs. The proposed method integrates bus voltage recovery and economic load sharing by using a cost function-based optimization approach to optimally regulate the power output of distributed energy resources. Simulations are performed in the MATLAB/SIMULINK environment on a DC microgrid with multiple distributed generators. The results demonstrate that the proposed method not only improves bus voltage stability and mitigates voltage oscillations caused by CPLs but also achieves optimal and economic power sharing. Furthermore, the method exhibits fast convergence, ease of implementation, and considers line losses.

Keywords: Optimal Load Distribution, DC Microgrid, Droop Control, Secondary Control.



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



<https://doi.org/10.22108/isee.2026.144907.1730>

تقسیم بهینه توان و بهبود ولتاژ در ریزشبکه‌های DC مبتنی بر مشخصه افتی در

حضور بار توان ثابت

حامد مهنانی ^۱ ID، مهدی بانژاد ^{۲*} ID، علی اکبرزاده کلات ^۳ ID

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

hamed.mahnani76@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

m.banejad@shahroodut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

akbarzadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده: تقسیم توان دقیق و کنترل ولتاژ باس DC از چالش‌های اساسی در کنترل ریزشبکه‌های DC محسوب می‌شوند. روش کنترل افتی با وجود سادگی و کارایی، در انتخاب ضرایب افتی دچار محدودیت‌هایی است که ممکن است به افزایش انحراف ولتاژ باس یا خطای تقسیم توان منجر شود. علاوه بر این، حضور بارهای توان ثابت (CPLs) به دلیل رفتار مقاومت نموی منفی، موجب نوسانات شدید ولتاژ باس و ناپایداری سیستم می‌شود. در این مقاله، یک روش کنترل ثانویه توزیع شده برای جبران افت ولتاژ، بهینه‌سازی توزیع توان و بهبود پایداری سیستم در حضور بارهای توان ثابت ارائه شده است. این روش ترکیبی از بازیابی ولتاژ باس و پخش بار اقتصادی است که با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی تابع هزینه، توان تولیدی منابع را به صورت بهینه تنظیم می‌کند. شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB/SIMULINK و در یک ریزشبکه DC با چندین منبع تولید پراکنده انجام شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی، علاوه بر بهبود پایداری ولتاژ باس و کاهش نوسانات ناشی از بارهای توان ثابت، تقسیم توان را به صورت بهینه و اقتصادی انجام می‌دهد. همچنین، این روش از سرعت همگرایی مناسب، قابلیت اجرای آسان و در نظر گرفتن تلفات خط برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پخش بار بهینه، ریزشبکه DC، کنترل افتی، کنترل ثانویه.

۱- مقدمه

قابلیت انعطاف‌پذیری، پایداری و بهبود کیفیت توان، جایگاهی ویژه در سیستم‌های قدرت آینده یافته‌اند. در شکل (۱) یک نمونه از ساختار ریزشبکه DC نشان داده شده است [۱، ۲، ۳، ۴].

در میان انواع ریزشبکه‌ها، ریزشبکه‌های DC به دلیل مزایایی همچون کاهش تلفات توان، سازگاری بهتر با منابع انرژی تجدیدپذیر و ساده‌تر بودن طراحی کنترل، در مقایسه با ریزشبکه‌های AC بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع ریزشبکه‌ها به دلیل ماهیت مستقیم خود، نیاز به تبدیل‌های

در سال‌های اخیر، با رشد روزافزون تقاضای انرژی و نیاز به منابع انرژی پایدار، استفاده از ریزشبکه‌ها به عنوان یک راهکار نوین برای مدیریت انرژی در سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته است. ریزشبکه‌ها مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، بارها و تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی هستند که به صورت محلی عمل می‌کنند و می‌توانند به صورت مستقل یا متصل به شبکه اصلی فعالیت کنند. این سیستم‌ها به دلیل

مستقل و بدون نیاز به هماهنگی با یک کنترل‌کننده مرکزی عمل می‌کند. در این روش، هر واحد بر اساس اطلاعات محلی خود، مانند ولتاژ یا جریان در نقطه اتصال، تصمیم‌گیری می‌کند. از مزایای این روش کنترلی کاهش وابستگی به یک نقطه مرکزی است که باعث افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان در برابر خرابی‌ها می‌شود. با این حال، به دلیل عدم وجود هماهنگی مستقیم بین واحدها، دستیابی به عملکرد بهینه کل سیستم دشوارتر است و باعث توزیع نامتناسب توان و افت ولتاژ می‌شود [۱۱، ۱۲، ۱۳].

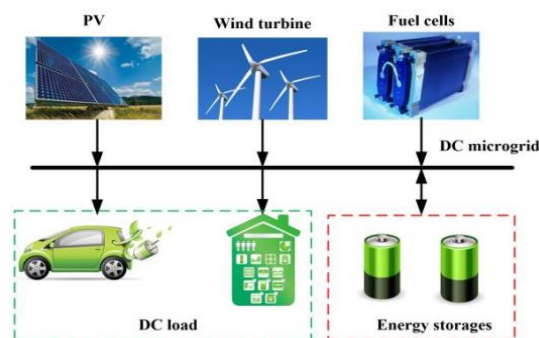
کنترل توزیع‌شده در ریزشبكة‌های DC روشی پیشرفته برای مدیریت واحدهای تولید پراکنده است که در آن هر واحد قادر است به صورت محلی تصمیم‌گیری کند و بدون نیاز به یک کنترل‌کننده مرکزی، عملیات خود را مدیریت کند. در این روش، واحدهای تولید پراکنده از طریق تبادل اطلاعات با واحدهای همسایه خود، هماهنگی لازم را برای تحقق اهداف کل سیستم مانند تثبیت ولتاژ باس، تقسیم بهینه توان و کاهش تلفات شبکه ایجاد می‌کنند.

برخلاف کنترل متمرکز که در آن تمامی تصمیم‌ها توسط یک مرکز کنترل واحد اتخاذ می‌شوند و در صورت بروز مشکل در مرکز، کل سیستم آسیب‌پذیر می‌شود، و همچنین، برخلاف کنترل کاملاً غیرمتمرکز که در آن هر واحد بدون هماهنگی با دیگر واحدها عمل می‌کند و ممکن است بهینه نباشد، کنترل توزیع‌شده مزایای هر دو رویکرد را ترکیب می‌کند. این روش ضمن کاهش وابستگی به یک نقطه مرکزی، انعطاف‌پذیری زیادی در برابر تغییرات بار و شرایط شبکه ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، کنترل توزیع‌شده قابلیت مقیاس‌پذیری زیادی دارد و می‌تواند به راحتی با افزودن واحدهای جدید یا تغییرات در ساختار شبکه سازگار شود. این ویژگی به ویژه در ریزشبكة‌های DC مدرن اهمیت ویژه دارد که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر با تولید متغیر و بارهای پویا هستند. در نهایت، با بهره‌گیری از کنترل توزیع‌شده، ریزشبكة می‌تواند به صورت پایدار و اقتصادی عمل کند، در حالی که نیاز به ارتباطات گسترده یا زیرساخت‌های پیچیده مرکزی کاهش می‌یابد [۱۴، ۱۵].

روش‌های کنترلی به شکل سلسله‌مراتبی طراحی و اجرا

مکرر انرژی را کاهش می‌دهند که این امر موجب افزایش بازدهی کلی سیستم می‌شود. علاوه بر این، استفاده از منابع تجدیدپذیر همچون پنل‌های خورشیدی و باتری‌ها در ریزشبكة‌های DC، به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش استفاده از انرژی پاک کمک می‌کند [۳، ۴، ۵].



شکل (۱): ساختار یک ریزشبكة DC [۴]

با این حال، بهره‌برداری از ریزشبكة‌های DC با چالش‌هایی متعدد همراه است که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به تقسیم توان مناسب بین منابع تولیدی، جبران افت ولتاژ باس و کمینه‌کردن هزینه تولید توان اشاره کرد. حضور بارهای توان ثابت نیز یکی از عواملی است که پیچیدگی عملکرد این سیستم‌ها را افزایش می‌دهد. بارهای توان ثابت، برخلاف بارهای مقاومی، تمایل دارند توانی مشخص را از سیستم جذب کنند، حتی اگر ولتاژ تغییر کند. این رفتار ممکن است به بروز ناپایداری‌های دینامیکی و افت شدید ولتاژ باس منجر شود. برای حل و برطرف کردن این مشکلات و چالش‌ها، روش‌هایی متعدد پیشنهاد شده‌اند که این روش‌ها به سه دسته کلی کنترل متمرکز^۱، کنترل غیرمتمرکز^۲ و کنترل توزیع‌شده^۳ دسته‌بندی می‌شوند [۶، ۷].

در کنترل متمرکز، یک واحد مرکزی وظیفه جمع‌آوری اطلاعات از تمام منابع تولید، بارها و مبدل‌ها را به عهده دارد و تصمیم‌های کنترلی را برای عملکرد بهینه کل سیستم اتخاذ می‌کند. با این حال، یکی از معایب اصلی این روش کنترلی وابستگی زیاد به کنترل‌کننده مرکزی است که در صورت خرابی یا مشکل، کل سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۸، ۹]. [۱۰]

در روش کنترل غیرمتمرکز، هر منبع تولید پراکنده به طور

در حلقه ثانویه استفاده می‌شود که در آن برای تنظیم پارامترهای سیستم کنترلی از روش اجتماع ذرات استفاده می‌شود.

در مقاله حاضر، برای حل مشکلات تنظیم ولتاژ و تقسیم بهینه توان از کنترل ثانویه توزیع شده استفاده می‌شود. نوآوری‌های مقاله به شرح زیر هستند:

(۱) بهینه‌سازی تقسیم توان با در نظر گرفتن تلفات خط و (۲) تقسیم توان بهینه با در نظر گرفتن اثر حضور بار توان ثابت، با هدف تقسیم بهینه توان بین منابع تولید پراکنده بیان می‌شود. از جمله ویژگی‌های مهم این روش‌ها می‌توان به سهولت در اجرا، عدم وابستگی به اطلاعات بار، سازگاری با حضور بارهای توان ثابت و توزیع توان میان منابع تولید پراکنده بر اساس هزینه تولید هر منبع اشاره کرد که موجب برتری قابل ملاحظه آنها در مقایسه با روش‌های سنتی شده است.

در ادامه مقاله در بخش ۲، مسئله مورد مطالعه و اهداف کنترلی بیان می‌شوند. در بخش ۳، روش کنترل پیشنهادی ارائه می‌شود که بر مبنای تقسیم بهینه توان با در نظر گرفتن تلفات خطوط و توزیع بار اقتصادی است. در بخش ۴، فرایند مدل‌سازی بار توان ثابت در چارچوب روش پیشنهادی تشریح شده است. نتایج شبیه‌سازی به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در بخش ۵ ارائه و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ بیان می‌شود.

۲- بیان مسئله و اهداف کنترلی

منابع تولید DC مطابق شکل (۲)، همان‌طور که نشان داده شده است، به وسیله N مبدل به باس DC متصل شده‌اند. به منظور تقسیم توان بین منابع تولید، از روش اکتی استفاده می‌شود. روش اکتی دارای محدودیت‌هایی است که در ابتدا این محدودیت‌ها را بررسی می‌کنیم. سپس، سطحی دیگر از کنترل که مربوط به کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر اصلاح مشخصه اکتی و تقسیم توان با در نظر گرفتن پخش بار اقتصادی است، شرح داده خواهد شد.

می‌شوند، به طوری که در هر سطح از ساختار کنترلی می‌توان از راهبردهای متمرکز، غیرمتمرکز، یا توزیع شده بهره برد. یکی از روش‌های متداول در ریزشبکه‌های DC، کنترل اکتی^۴ است. این روش با ارائه یک ساختار غیرمتمرکز، امکان توزیع بار بین منابع مختلف را بدون نیاز به ارتباطات پیچیده فراهم می‌کند. با این حال، کنترل اکتی دارای محدودیت‌هایی مانند افت ولتاژ باس و انحراف از توان بهینه است که می‌تواند کارایی سیستم را کاهش دهد [۱۶، ۱۷، ۱۸].

برای جبران این محدودیت‌ها، استفاده از کنترل ثانویه ضروری است. کنترل ثانویه به عنوان یک لایه کنترلی بالاتر، امکان بازیابی ولتاژ باس، جبران افت ولتاژ و بهبود شرایط بهینه سیستم را فراهم می‌کند.

مراجع [۱۹، ۲۰، ۲۱] یک روش کنترل توزیع شده برای کمینه کردن هزینه‌های تولید و بهینه‌سازی تقسیم بار بین DGها در ریزشبکه‌های DC جزیره‌ای ارائه می‌کنند. با استفاده از یک پروتکل اجماع پویا، امکان پخش بار اقتصادی بدون کنترل‌کننده مرکزی، بهبود قابلیت اطمینان را فراهم می‌کند. با این حال، عملکرد آن ممکن است تحت تأثیر تاخیرهای ارتباطی و دقت برآورد هزینه باشد. مراجع [۲۲، ۲۳، ۲۴] راهبردی را ارائه می‌دهند که بازیابی ولتاژ را بهبود می‌بخشد و تقسیم جریان قابل تنظیم را در ریزشبکه‌های DC امکان‌پذیر می‌کند. در این مراجع، برای دستیابی به تقسیم جریان منعطف، از یک بهره اکتی متغیر با زمان^۵ و «افت ولتاژ مجازی»^۶ استفاده می‌شود. این مطالعه همچنین تأثیر تأخیرهای زمانی را بر عملکرد کنترل بررسی می‌کند. در مرجع [۲۵]، یک روش کنترل PI متمرکز برای حذف انحراف ناشی از کنترل افت پیشنهاد شده است. با این حال، کنترل متمرکز به پهنای باند ارتباطی زیادی نیاز دارد و پیچیدگی مرکز محاسبات را افزایش می‌دهد. بدتر از آن، خرابی مرکز کنترل باعث از بین رفتن کل سیستم می‌شود.

مراجع [۲۶، ۲۷] یک طرح کنترل ثانویه توزیع شده برای تنظیم ولتاژ و تقسیم بهینه توان در ریزشبکه‌های DC جزیره‌ای ارائه می‌کنند. در این مراجع، با استفاده از یک الگوریتم اجماع میانگین پویا، بازیابی ولتاژ و توزیع توان دقیق بدون کنترل‌کننده مرکزی انجام می‌شود و قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد. همچنین، در مرجع [۲۸]، برای تقسیم توان از الگوریتم اجماع

خطای تقسیم توان کم می‌شود و برعکس، اگر مقدار ضرایب افتی بسیار کوچک در نظر گرفته شود، انحراف ولتاژ بار کم و خطای تقسیم توان زیاد می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت روش افتی به تنهایی نمی‌تواند به اهداف تنظیم ولتاژ و تقسیم توان دست یابد. به همین منظور، باید کنترل‌کننده دیگری در سطح ثانویه طراحی شود تا بتوان مسائل موجود را حل کرد.

۲-۲- اهداف کنترلی

تخصیص توان در بیشتر پژوهش‌های گذشته بر اساس ظرفیت DGها انجام می‌شده است و هرچه ظرفیت بیشتر باشد، توان بیشتری تخصیص داده می‌شود. با این حال، ظرفیت زیاد به این معنا نیست که هزینه تولید توان کمتر باشد. برای این منظور، هدف کنترلی این پژوهش برطرف کردن محدودیت‌های روش افتی است. این روش بازیابی ولتاژ باس به مقدار ولتاژ نامی و کمینه کردن هزینه کل تولید توان را تحقق می‌بخشد. این هدف با طراحی یک کنترل ثانویه V_i محقق می‌شود که بعداً بیان خواهد شد. رابطه مربوط به هدف کنترل پیشنهادی با یک تابع هدف و دو قید طبق رابطه (۵) مشخص شده است:

$$\text{Min } c(p) = \sum c_i(p_i) \quad (5)$$

s.t.

$$\sum p_i = P_{\text{Load}} + \sum R_i I_i^2 ;$$

$$V_{\text{Rated}} - V_{\text{Bus}}(p_1, \dots, p_2) = 0$$

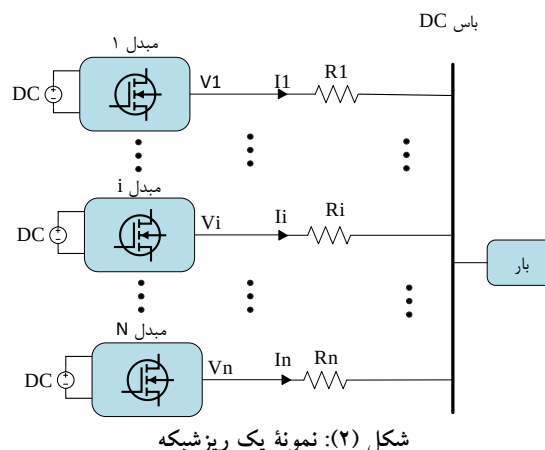
که در آن، $c_i(p_i)$ و p_i به ترتیب هزینه تولید توان و توان بهینه DG ام هستند، R_L مجموع بارها و P_{Load} توان مصرفی بار است. رابطه (۵) نشان‌دهنده بهینه‌سازی هزینه تولید با توجه به قیود موجود است. با حل این مسئله بهینه‌سازی، ولتاژ باس به مقدار نامی خود همگرا و همچنین، هزینه تولید کل توان، با در نظر گرفتن قیود موجود، کمینه می‌شود.

۳- روش کنترل پیشنهادی، مبتنی بر تقسیم

توان با در نظر گرفتن تلفات خط و توزیع بار

اقتصادی

روش پیشنهادی مبتنی بر تقسیم توان با در نظر گرفتن



۲-۱- روش کنترل افتی

مطابق شکل (۲)، رابطه بین ولتاژ خروجی V_i و ولتاژ باس V_{Bus} به صورت زیر است:

$$V_i = R_i I_i + V_{\text{Bus}} \quad (1)$$

که در آن، R_i مقاومت خط انتقال بین خروجی مبدل i و باس DC، I_i جریان DG_i و V_{Bus} ولتاژ باس DC است. برای مبدل i ، با تنظیم مناسب کنترل حلقه بسته دوگانه ولتاژ و جریان، ولتاژ خروجی V_i می‌تواند به سرعت مقدار ولتاژ مرجع $V_{i,\text{Ref}}$ را دنبال کند؛ یعنی V_i به $V_{i,\text{Ref}}$ برسد. رابطه بین ولتاژ مرجع و مقدار نامی ولتاژ باس تحت کنترل افتی به صورت زیر است:

$$V_{i,\text{Ref}} = V_{\text{Rated}} - I_i R_{d,i} \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

که در آن، $R_{d,i}$ ضریب افتی، V_{Rated} ولتاژ نامی باس DC، $V_{i,\text{Ref}}$ ولتاژ مرجع مبدل i ، I_i جریان خروجی مبدل‌ها و N تعداد مبدل‌هاست. مقاومت افتی و ولتاژ باس DC نیز از روابط زیر به دست می‌آید:

$$R_{d,i} = \frac{V_{\text{Rated}} - V_{i,\text{Ref}}}{I_i} \quad (3)$$

$$V_{\text{Bus}} = V_{\text{Rated}} - (R_{d,i} + R_i) I_i \quad (4)$$

از رابطه (۴)، می‌توان نتیجه گرفت کنترل افتی باعث انحراف ولتاژ باس از مقدار نامی می‌شود. همچنین، تقسیم توان (جریان) بین مبدل‌ها به مجموع ضرایب افتی و مقاومت خطوط وابسته است و تفاوت در مقدار مقاومت خطوط باعث ایجاد خطا در تقسیم توان می‌شود. اگر مقدار ضرایب افتی بسیار بزرگ در نظر گرفته شود، انحراف ولتاژ بار زیاد و

می‌آید:

$$V_{i,Ref} = V_{Rated} - I_i R_{d,i} + y_i \quad (6)$$

$$V_{Bus} = V_{Rated} - (R_{d,i} + R_i) I_i + y_i \quad (7)$$

در ادامه، y_i را طراحی و تحلیل می‌کنیم. اگر P_i توان DG_i خروجی باشد، می‌توان آن را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$P_i = I_i V_i = R_i I_i^2 + V_{Bus} I_i \quad (8)$$

هدف در مسئله توزیع اقتصادی کمینه‌کردن هزینه کلی تولید است که به عنوان تابعی از خروجی نیروگاه تعریف می‌شود. در این مقاله، فرض می‌شود توان مورد نیاز توسط منابعی تأمین می‌شود که تابع هزینه آنها توسط رابطه (۹) تأمین می‌شود (در واقع، خروجی این منابع توسط مبدل‌ها به جریان DC تبدیل می‌شود) [۲۹]:

$$C_i(P_i) = 0.5a_i P_i^2 + b_i P_i + w_i \quad (9)$$

$$\text{Min } c(p) = \sum c_i(p_i) \quad (10)$$

s.t.

$$\sum P_i = P_{Load} + \sum R_i I_i^2 ;$$

$$V_{Rated} - V_{Bus}(p_1, \dots, p_2) = 0$$

در روابط بالا، $a_i > 0$ و $b_i > 0$ و $w_i > 0$ ضرایب تابع هزینه هستند.

مسئله بهینه‌سازی رابطه (۹) را می‌توان با استفاده از شرایط کوهن-کان-تاکر^۹ یا همان ضریب لاگرانژ به دست آورد [۲۶، ۲۹]. روش این حل در ادامه شرح داده خواهد شد:

$$\lambda (P_{Load} + \sum R_i I_i^2 - \sum p_{i,opt}) = \sum C_i + \gamma (V_{Rated} - V_{Bus}) \quad (11)$$

با حل مسئله بهینه‌سازی در رابطه (۱۱)، توان بهینه تولیدی ژنراتور ($p_{i,opt}$) تعیین می‌شود و سپس، جریان بهینه تولیدی برای هر ژنراتور ($I_{i,opt}$) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{i,opt} = \frac{P_{i,opt}}{V_{Rated}} \quad (12)$$

پارامتر کنترل‌کننده ثانویه y_i که در رابطه (۶) به آن نیاز است، از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۹]:

$$\dot{y}_i = \delta_i (V_{Rated} - V_{Bus}) \quad (13)$$

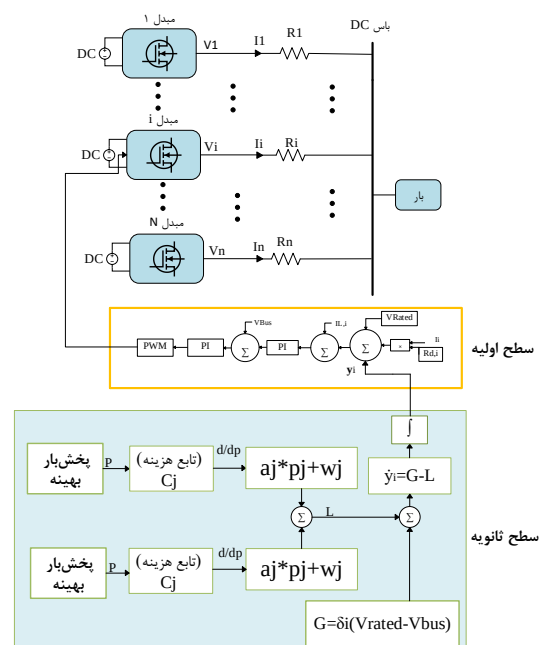
$$-\frac{\varepsilon}{Z_{r,i}} \sum_{j=1}^N h_{ij} [a_i (V_{Bus} I_i) + b_i - a_j (V_{Bus} I_j) - b_j]$$

$$Z_i = \frac{1}{R_{d,i} + R_i}$$

تلفات خط و توزیع بار اقتصادی بررسی می‌شود و هدف کنترلی که در معادله (۵) بیان شده است را تحقق می‌بخشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

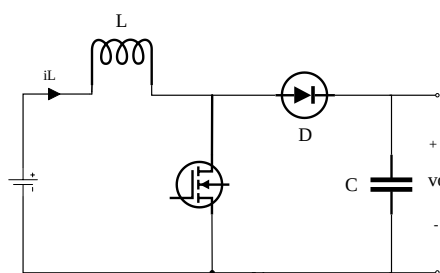
همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، مبدل‌ها توسط دو کنترل‌کننده کنترل می‌شوند: کنترل‌کننده اولیه که شامل کنترل حلقه بسته ولتاژ و جریان و کنترل اکتی است و وظیفه تقسیم توان را به عهده دارد و کنترل‌کننده ثانویه که وظیفه بازیابی ولتاژ و بهینه‌سازی تقسیم توان بر اساس هزینه تولید را به عهده دارد. همان‌طور که از رابطه (۴) مشاهده شد، کنترل اکتی باعث انحراف ولتاژ باس از مقدار مرجع می‌شود.

در نتیجه، کنترل ثانویه که حاوی پارامتر y_i است، به مشخصه اکتی اضافه می‌شود. پارامتر کنترلی y_i شامل دو بخش است که بخش اول وظیفه بازیابی ولتاژ (G) و بخش دوم وظیفه کمینه‌کردن هزینه تولید (L) را به عهده دارد. در این شکل، سطح ثانویه برای ژنراتور i و j دلخواه ترسیم شده است که با هم ارتباط دارند. همچنین، سطح اولیه برای ژنراتور i دلخواه نشان داده شده است.

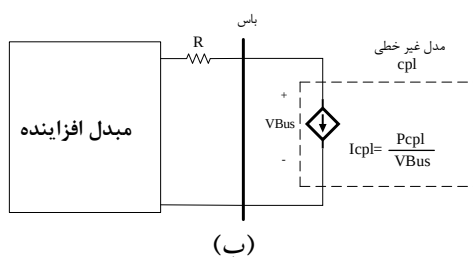


شکل (۳): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی کنترل سطح اولیه و ثانویه

از روابط (۶) و (۷)، ولتاژ مرجع i و ولتاژ باس به دست



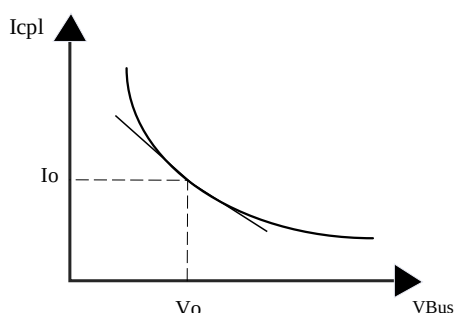
(الف)



(ب)

شکل (۴): الف- دیاگرام مبدل بوست؛ ب- مدل بار توان ثابت

متصل به مبدل بوست با مقاومت R



شکل (۵): مشخصه جریان برحسب ولتاژ در بار توان ثابت [۳۱]

همچنین، برای خروجی مبدل می‌توان رابطه زیر را بار بیان

کرد:

$$I_{cpl} = \frac{P_{cpl}}{V_{Bus}} \quad (۱۴)$$

حال، اگر بار از نوع توان ثابت باشد، با مشتق‌گرفتن از

رابطه (۱۴) می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\frac{dI_{cpl}}{dV_{Bus}} = -\frac{P_{cpl}}{V_o^2} \quad (۱۵)$$

برای نقطه کار می‌توان $P_{cpl} = V_o * I_o$ را بدست آورد که

در آن، V_o و I_o به ترتیب ولتاژ بار و جریان بار در نقطه کار

هستند. با توجه به شکل (۵)، نمودار ولتاژ جریان یک بار توان

ثابت را می‌توان به صورت یک خط راست مماس بر نمودار

حول نقطه کار تقریب زد [۳۲، ۳۳، ۳۴]. با استفاده از نقطه کار

در رابطه بالا، $\varepsilon > 0$ و $\delta_i > 0$ دو ضریب افزایشی^{۱۰}

هستند [۲۶، ۲۹]. انتخاب و طراحی پارامتر کنترلی y_i بر این

نکته استوار است که اولاً، خطای ولتاژ باس را به صفر برساند

و ثانیاً، کل هزینه تولید توان را نیز کمینه کند. بر این اساس،

هدف استفاده از جمله اول این است که ولتاژ باس به ولتاژ

نامی همگرا شود و پس از زمان بی‌نهایت به آن برسد.

همچنین، برای اینکه هزینه توان تولیدشده توسط ژنراتورهای

پراکنده کمینه شود، هزینه نموی دو ژنراتور (j ، i) که با هم

ارتباط دارند، با یکدیگر مقایسه شده است. این رابطه با h_{ij}

مشخص می‌شود که h_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ DG وجود ارتباط بین دو} \\ 0, & i, j \text{ DG وجود عدم ارتباط بین دو} \end{cases}$$

۴- مدل‌سازی بار توان ثابت در روش

پیشنهادی

برای تحلیل و ارزیابی پایداری ریزشبه‌ها در شرایط بار

توان ثابت، ابتدا مدل‌سازی بار توان ثابت توضیح داده می‌شود.

بار توان ثابت برای اینکه توان خروجی خود را ثابت نگه دارد،

جریان ورودی خود را افزایش یا کاهش می‌دهد که باعث

کاهش یا افزایش ولتاژ ورودی می‌شود و این امر موجب

نوسان در ولتاژ باس DC می‌شود. بنابراین، بار توان ثابت به

دلیل ایجاد مقاومت نموی منفی، موجب عدم پایداری ریزشبه‌ها

DC می‌شود. در شکل (۴)، مدل بار توان ثابت غیرخطی نشان

داده شده است. در این مدل، بار توان ثابت به عنوان یک منبع

جریان وابسته به ولتاژ نشان داده می‌شود [۲۹، ۳۰].

برای استفاده از روش‌های کنترل خطی و ارزیابی پایداری

در شرایط بار توان ثابت، به تعیین مدل خطی یک بار توان

ثابت غیرخطی نیاز است. برای این کار، مدل غیرخطی بار بالا

را حول نقطه کار I_{cpl} و V_o خطی می‌کنیم [۳۰].

0.5 Ω	R_C	مقاومت داخلی سلف
500 μF	C	خازن مبدل
0.2, 0.27, 0.3, 0.22 Ω	R_1, R_2, R_3, R_4	مقاومت خطوط انتقال
5 A	I_{Max}	جریان نامی مبدل‌ها
20, 20 Ω 115, 115 W	$R_{L_{cpl}}$	بار
50 KH	fs	فرکانس کلیدزنی
0.161, 0.126 0.183, 0.142 (ϵ/W^2)	a_1, a_2, a_3, a_4	ضریب هزینه
4.6, 6.2, 5.1, 3.9 (ϵ/W)	b_1, b_2, b_3, b_4	ضریب هزینه
110, 120, 85, 95 (ϵ)	w_1, w_2, w_3, w_4	ضریب هزینه
3.2, 3 3.4, 2.9	$R_{d,2}, R_{d,1}, R_{d,3}, R_{d,4}$	ضرایب افتی
1.1	α	ضرایب کنترلی
0.15	ϵ	ضرایب کنترلی

(V_0, I_0) و شیب منحنی شکل (۵) در نقطه کار، معادله این خط به صورت زیر تعیین می‌شود:

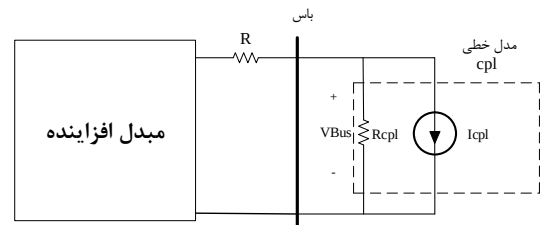
$$I_{cpl} = -\frac{P_{cpl}}{V_0^2} V_{Bus} + 2 \frac{P_{cpl}}{V_0} \quad (16)$$

همان‌طور که از معادله (۱۶) مشاهده می‌شود، بار توان ثابت را می‌توان با یک مقاومت منفی موازی با یک منبع جریان حول نقطه کار به صورت زیر بیان کرد [۳۶، ۳۵]:

$$R_{cpl} = -\frac{V_0^2}{P_{cpl}} \quad (17)$$

$$I_{cpl} = 2 \frac{P_{cpl}}{V_0} \quad (18)$$

روابط بالا در شکل (۶) آورده شده‌اند:



شکل (۶): مدل خطی بار توان ثابت

۵- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

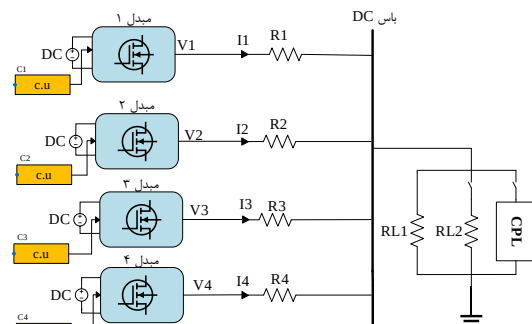
ریزشبکه مورد مطالعه و کنترل‌کننده سطح اولیه و ثانویه در شکل (۷) نشان داده شده است. در شبیه‌سازی روش پیشنهادی، از یک ریزشبکه با وجود چهار مبدل استفاده می‌شود. در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای مختلف ریزشبکه DC مورد بررسی آورده شده‌اند. در شکل (۷)، خروجی کنترل ثانویه بردار است که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Y = [y_1, \dots, y_i, \dots, y_n]^T \quad (19)$$

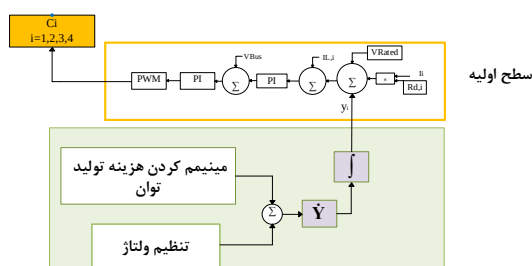
در این شکل، سطح اولیه فقط برای ژنراتور i ترسیم شده که سیگنال کنترلی y_i به آن وارد می‌شود و خروجی آن در شکل وارد مبدل i ام می‌شود. سطح اولیه برای دیگر مبدل‌ها نیز مشابه سطح اولیه مبدل i است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای ریزشبکه DC

عنوان پارامترها	نماد	مقادیر در شبیه‌سازی
ولتاژ نامی	V_{Rated}	48 V
سلف مبدل	L	10 μH



(الف)



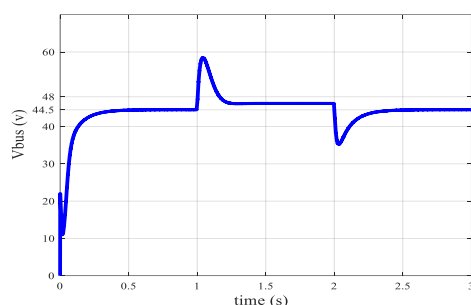
(ب)

شکل (۷): (الف) ریزشبکه مورد مطالعه؛ (ب): کنترل‌کننده سطح

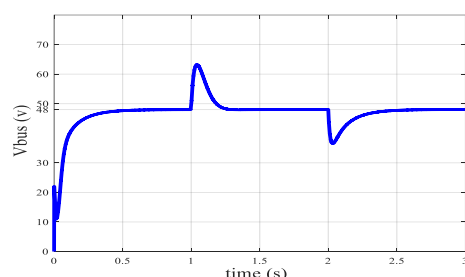
اولیه و ثانویه

صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، یک انحراف ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی آن در ابتدا و هنگام قطع و وصل بار به وجود می‌آید.

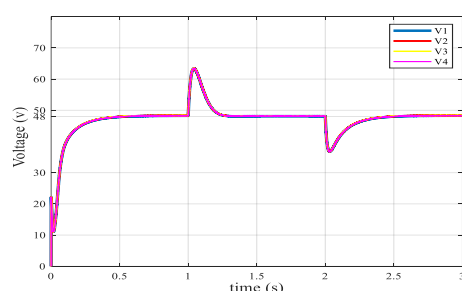
همان‌طور که در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود، هنگامی که کنترل ثانویه پیشنهادی فعال می‌شود، ولتاژ باس منحرف‌شده در ابتدا و در هنگام قطع یا وصل بار به مقدار مرجع بازمی‌گردد که همان ۴۸ ولت است. این امر تأیید می‌کند کنترل ثانویه پیشنهادی می‌تواند انحراف ولتاژ به‌وجودآمده تحت کنترل افتی را حذف کند.



(الف)



(ب)



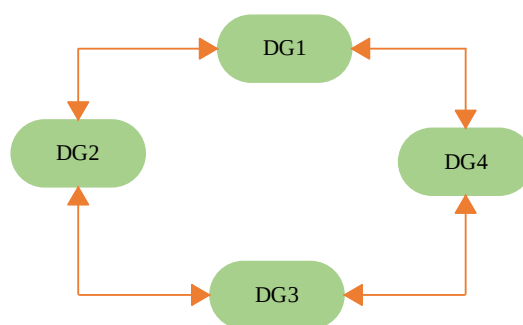
(پ)

شکل (۹): نتایج بررسی آزمایش اول از حالت ۱. (الف): تغییرات ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی؛ (ب): تغییرات ولتاژ باس در حضور کنترل ثانویه فعال؛ (پ): عملکرد ولتاژ خروجی چهار DG

۵-۱-۱-۵- حالت ۱: تقسیم بهینه توان بدون در نظر گرفتن تلفات خط و توزیع بار اقتصادی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، روش افتی به خاطر محدودیت‌های که دارد، قادر به انجام هم‌زمان اهداف مدنظر مانند تقسیم توان و بازیابی ولتاژ نیست؛ به همین علت، وجود کنترل ثانویه ضروری است.

در این قسمت، محدودیت‌های موجود در روش افتی و همچنین، عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر تقسیم توان بدون در نظر گرفتن تلفات خط و با در نظر گرفتن توزیع بار اقتصادی بررسی خواهند شد. ساختار ارتباطی در شکل (۸) نشان داده شده است. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی با استفاده از چهار مبدل و در دو حالت بار مقاومتی و بار توان ثابت انجام شده است که کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۸): ساختار ارتباطی چهار DG در ریزشکه DC

۵-۱-۱-۵- آزمایش اول: تقسیم بهینه توان بدون در نظر گرفتن تلفات خط در حضور بار مقاومتی

روش کنترل پیشنهادی در این مرحله تحت تغییرات بار مقاومتی آزمایش شده است. کل فرایند شبیه‌سازی را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم کرد:

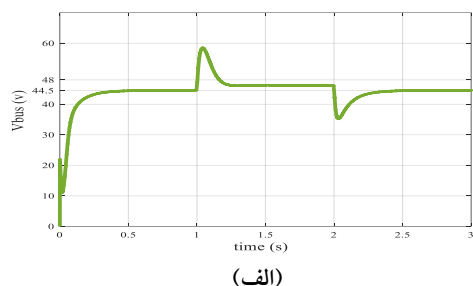
مرحله اول (۱-۰ ثانیه) که در آن هر دو بار به صورت هم‌زمان حضور دارند، حالت تعادل اولیه است.

در مرحله دوم (۲-۱ ثانیه) بار $R_{L,2}$ که بار مقاومتی است، در زمان $t=1$ ثانیه قطع می‌شود.

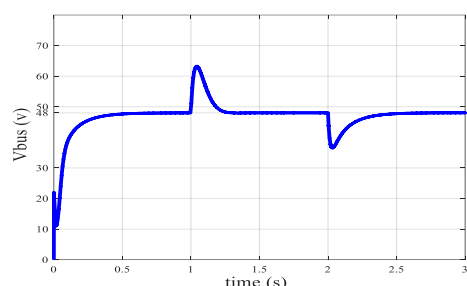
در مرحله سوم (۳-۲ ثانیه) بار $R_{L,2}$ که بار مقاومتی است، در زمان $t=2$ ثانیه دوباره وصل می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود، در

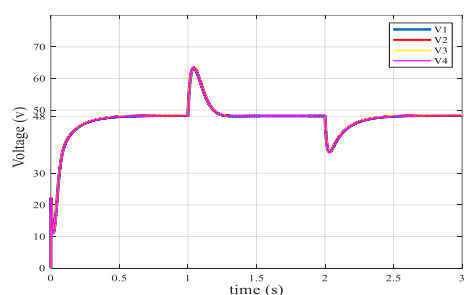
است) بازمی‌گردد. این امر تأیید می‌کند کنترل ثانویه پیشنهادی می‌تواند انحراف ولتاژ به وجود آمده تحت کنترل افری را حذف کند.



(الف)



(ب)



(پ)

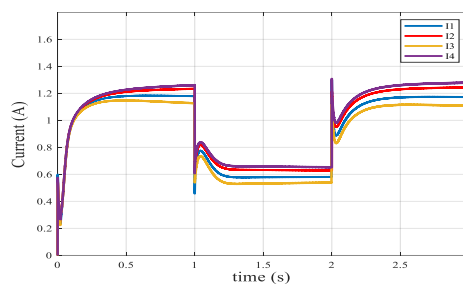
شکل (۱۲): نتایج بررسی آزمایش دوم از حالت ۱. (الف):

تغییرات ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی؛ (ب): تغییرات ولتاژ باس در حضور کنترل ثانویه فعال؛ (پ): عملکرد ولتاژ خروجی

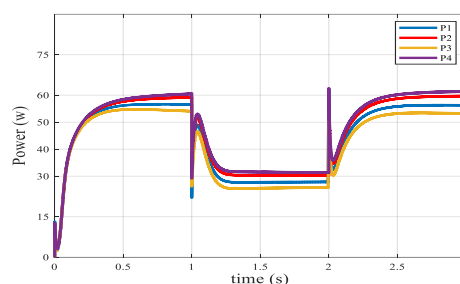
چهار DG

در شکل‌های (۱۲-پ) و (۱۳) به ترتیب، ولتاژ و جریان خروجی DGها نشان داده شده‌اند. شکل (۱۴) توان خروجی هر DG را نشان می‌دهد که مقدار بهینه توان هر DG است. هزینه کل تولید توان بهینه نیز در جدول (۳) نمایش داده شده است.

به ترتیب، ولتاژ و جریان خروجی DGها در شکل‌های (۹-پ) و (۱۰) نشان داده شده‌اند. توان خروجی هر DG در شکل (۱۱) نشان داده شده است که مقدار بهینه توان است. هزینه کل تولید توان در جدول (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱۰): عملکرد جریان خروجی چهار DG



شکل (۱۱): تغییرات توان برای هر DG

جدول (۲): هزینه کل تولید توان بهینه

زمان (ثانیه)	۱-۰	۲-۱	۳-۲
هزینه ($\frac{\text{€}}{\text{kw}}$)	۲۵۵۰۰	۱۲۵۰۰	۲۵۵۰۰

۵-۱-۲- آزمایش دوم: تقسیم بهینه توان بدون در نظر

گرفتن تلفات خط در حضور بار توان ثابت

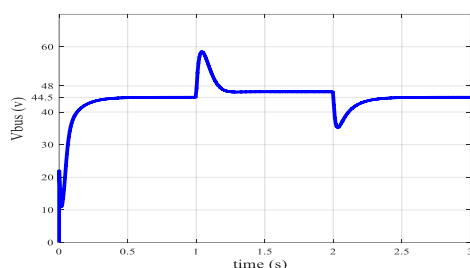
در این آزمایش، روش کنترل پیشنهادی تحت تغییرات بار توان ثابت آزمایش و بررسی شده است. فرایند شبیه‌سازی این آزمایش همانند آزمایش اول انجام می‌شود:

همان‌طور که در شکل (۱۲-الف) مشاهده می‌شود، در صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، یک انحراف ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی آن به وجود می‌آید.

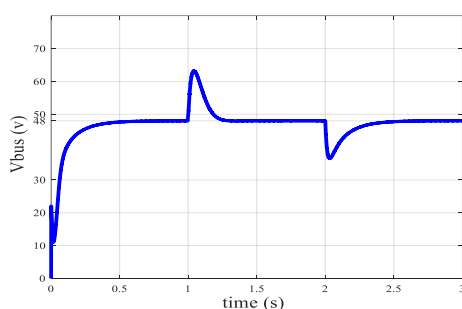
همان‌طور که در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از اینکه $R_{1,2}$ (به عنوان بار توان ثابت) در چه زمانی وارد مدار می‌شود، ولتاژ باس به مقدار نامی (که همان ۴۸ ولت

تقسیم بهینه توان و بهبود ولتاژ در ریزشکه‌های DC مبتنی بر مشخصه افتی در حضور بار توان ثابت

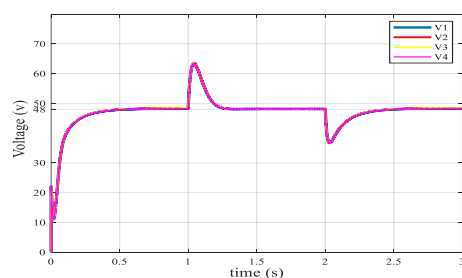
هم‌زمان حضور دارند، حالت تعادل اولیه است. در مرحله دوم (۲-۱ ثانیه) بار $R_{L,2}$ که بار مقاومتی است، در زمان $t=1$ ثانیه قطع می‌شود. در مرحله سوم (۳-۲ ثانیه) بار $R_{L,2}$ که بار مقاومتی است، در زمان $t=2$ ثانیه دوباره وصل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۵-الف) مشاهده می‌شود، در صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، یک انحراف ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی آن در ابتدا و هنگام قطع و وصل بار به وجود می‌آید.



(الف)

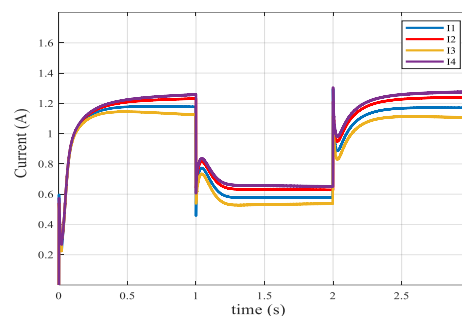


(ب)

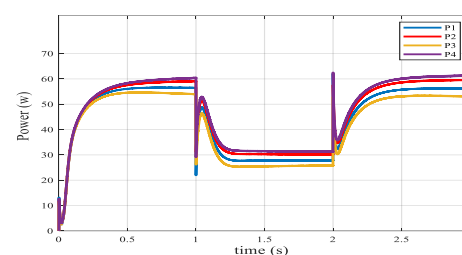


(پ)

شکل (۱۵): نتایج بررسی آزمایش اول از حالت ۲. (الف): تغییرات ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی؛ (ب): تغییرات ولتاژ باس در حضور کنترل ثانویه فعال؛ (پ): عملکرد ولتاژ خروجی چهار DG



شکل (۱۳): عملکرد جریان خروجی چهار DG



شکل (۱۴): تغییرات توان برای هر DG

جدول (۳): هزینه کل تولید توان بهینه

زمان (ثانیه)	۱-۰	۲-۱	۳-۲
هزینه ($\frac{\text{€}}{\text{kw}}$)	۲۵۵۰۰	۱۲۵۰۰	۲۵۵۰۰

۵-۲-۲- حالت ۲: تقسیم بهینه توان با در نظر گرفتن

تلفات خط و توزیع بار اقتصادی

در این قسمت، محدودیت‌های موجود در روش افتی و همچنین، عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر تقسیم بار با در نظر گرفتن تلفات خط و توزیع بار اقتصادی بررسی خواهند شد. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی با استفاده چهار مبدل و در دو حالت بار مقاومتی و بار توان ثابت انجام شده است که کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

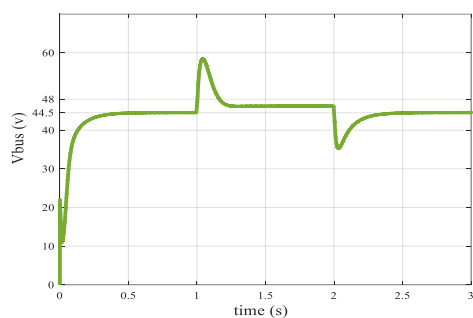
۵-۲-۱- آزمایش اول: تقسیم بهینه توان با در نظر

گرفتن تلفات خط در حضور بار مقاومتی

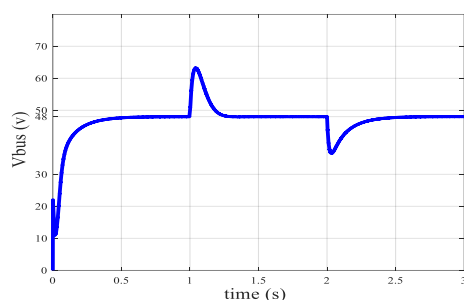
روش کنترل پیشنهادی در این مرحله تحت تغییرات بار مقاومتی آزمایش شده است. کل فرایند شبیه‌سازی را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم کرد:

مرحله اول (۱-۰ ثانیه) که در آن هر دو بار به صورت

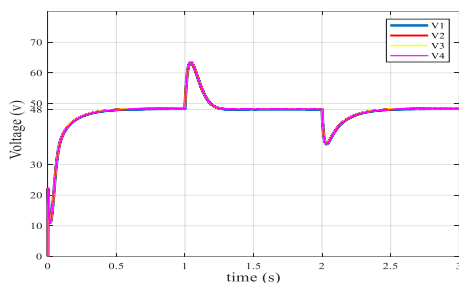
همان‌طور که در شکل (۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، یک انحراف ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی آن به وجود می‌آید.



(الف)



(ب)



(پ)

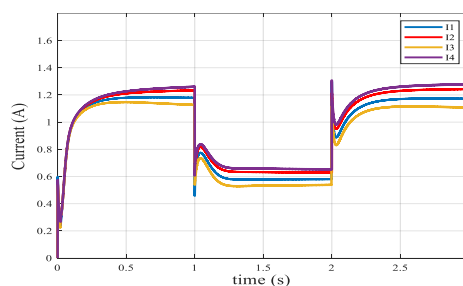
شکل (۱۸): نتایج بررسی آزمایش دوم از حالت ۲. (الف):

تغییرات ولتاژ بین ولتاژ باس و مقدار نامی؛ (ب): تغییرات ولتاژ باس در حضور کنترل ثانویه فعال؛ (پ): عملکرد ولتاژ خروجی چهار DG

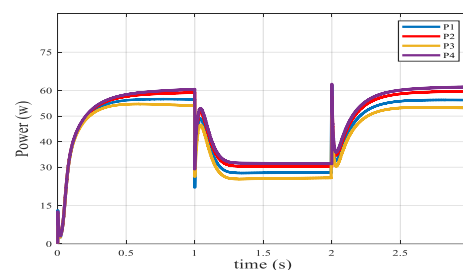
همان‌طور که در شکل (۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، ولتاژ باس از مقدار مرجع خود منحرف می‌شود. بنابراین، فعال‌شدن کنترل ثانویه در کنار کنترل اولیه باعث جبران افت ولتاژ به وجود آمده می‌شود. شکل (۱۸-ب) تغییرات ولتاژ باس در حضور فعال کنترل ثانویه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۵-الف) مشاهده می‌شود، در صورتی که فقط کنترل اولیه فعال باشد، ولتاژ باس از مقدار نامی خود منحرف می‌شود. بنابراین، فعال‌شدن کنترل ثانویه در کنار کنترل اولیه باعث جبران انحراف ولتاژ به وجود آمده می‌شود. تغییرات ولتاژ باس در حضور کنترل ثانویه فعال در شکل (۱۵-ب) نشان داده شده است.

به ترتیب، ولتاژ و جریان خروجی DGها در شکل‌های (۱۵-پ) و (۱۶) نشان داده شده‌اند. مقادیر بهینه توان خروجی هر DG در شکل (۱۷) نشان داده شده‌اند. هزینه کل تولید توان در جدول (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۱۶): عملکرد جریان خروجی چهار DG



شکل (۱۷): تغییرات توان برای هر DG

جدول (۴): هزینه کل تولید توان بهینه

زمان (ثانیه)	۱-۰	۲-۱	۳-۲
هزینه ($\frac{\text{€}}{\text{kw}}$)	۲۵۵۰۰	۱۲۵۰۰	۲۵۵۰۰

۲-۲-۵- آزمایش دوم: تقسیم بهینه توان با در نظر گرفتن تلفات خط در حضور بار توان ثابت

در این آزمایش، روش کنترل پیشنهادی تحت تغییرات بار توان ثابت آزمایش و بررسی شده است. فرایند شبیه‌سازی این آزمایش همانند آزمایش اول انجام می‌شود:

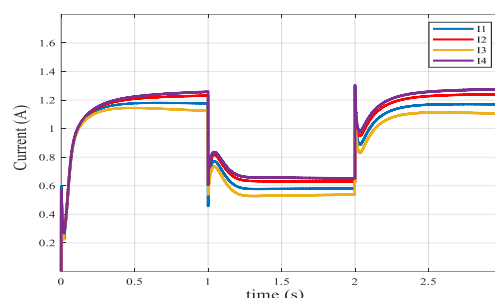
است) وظیفه کمینه‌کردن هزینه کلی تولید توان را به عهده دارد. روش کنترل پیشنهادی در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شد. این روش کنترل پیشنهادی ترکیبی از یک ریزشکه DC با حضور چهار منبع تولید پراکنده است. کارایی و عملکرد روش کنترل پیشنهادی در حضور بارهای مختلف از جمله بار کاملاً مقاومتی، بار مقاومتی به توان ثابت و بار کاملاً توان ثابت بررسی شد.

نتایج شبیه‌سازی صحت و دقت کارایی روش پیشنهادی در خصوص تنظیم ولتاژ باس DC به مقدار مرجع و همچنین کمینه‌کردن هزینه کلی تولید توان را تأیید کرد.

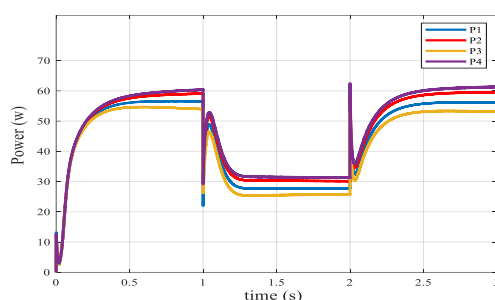
مراجع

- [1] A. Maulik, D. Das, "Stability Constrained Economic Operation of Islanded Droop-Controlled DC Microgrids", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 2, pp. 569-578, 2019. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2837750>.
- [2] L. Xing, Y. Mishra, F. Guo, P. Linet al "Distributed Secondary Control for Current Sharing and Voltage Restoration in DC Microgrid", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 3, pp. 2487-2497, 2020. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2956515>.
- [3] R. Babazadeh-Dizaji, M. Hamzeh, "Distributed Hierarchical Control for Optimal Power Dispatch in Multiple DC Microgrids", IEEE Systems Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 1015-1023, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2937836>.
- [4] K. D. Hoang, H. H. Lee, "Accurate Power Sharing With Balanced Battery State of Charge in Distributed DC Microgrid", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 3, pp. 1883-1893, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2838107>.
- [5] L. Xing, Q. Xu, F. Guo, Z. G. Wu, M. Liu, "Distributed Secondary Control for DC Microgrid With Event-Triggered Signal Transmissions", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 12, No. 3, pp. 1801-1810, 2021. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3066334>.
- [6] L. Xing, F. Guo, X. Liu, C. Wen, Y. Mishra, Y. C. Tian, "Voltage Restoration and Adjustable Current Sharing for DC Microgrid With Time Delay via Distributed Secondary Control", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 12, No. 2, pp. 1068-1077, 2021. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.3032605>.
- [7] A. Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari, "An

در شکل‌های (۱۸-پ) و (۱۹) به ترتیب، ولتاژ و جریان خروجی DGها نشان داده شده‌اند. شکل (۲۰) توان خروجی هر DG را نشان می‌دهد که مقدار بهینه توان هر DG است. هزینه کل تولید توان بهینه نیز در جدول (۵) نمایش داده شده است.



شکل (۱۹): عملکرد جریان خروجی چهار DG



شکل (۲۰): تغییرات توان برای هر DG

جدول (۵): هزینه کل تولید توان بهینه

زمان (ثانیه)	۱-۰	۲-۱	۳-۲
هزینه ($\frac{C}{kw}$)	۲۵۵۰۰	۱۲۵۰۰	۲۵۵۰۰

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور حل و برطرف کردن انحراف ولتاژ باس DC و تقسیم توان بهینه بین منابع تولید پراکنده، یک روش کنترل ثانویه توزیع‌شده ارائه شد. روش کنترل پیشنهادی شامل دو حالت است. حالت اول مبتنی بر تقسیم توان با در نظر گرفتن توزیع بار اقتصادی و حالت دوم مبتنی بر تقسیم توان بدون در نظر گرفتن تلفات خط و با در نظر گرفتن توزیع بار اقتصادی است. پارامتر کنترل پیشنهادی شامل دو بخش کنترلی است. بخش نخست کنترل وظیفه بازیابی انحراف ولتاژ ایجادشده توسط کنترل افتی را به عهده دارد و بخش دوم که شامل پخش بار اقتصادی (با و بدون در نظر گرفتن تلفات خط

- "Distributed Voltage Restoration and Current Sharing Control in Islanded DC Microgrid Systems Without Continuous Communication", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 4, pp. 3043-3053, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2907507>.
- [16] M. Zaery, P. Wang, X. Lu, W. Wang, D. Xu, "Fully Distributed Controller for Economic Load Sharing of DC Microgrid Clusters", in 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 15-19 Mar. 2020, pp. 597-602, 2020. <https://doi.org/10.1109/APEC39645.2020.9124512>.
- [17] M. Zaery, E. M. Ahmed, M. Orabi, M. Youssef, "Operational cost reduction based on distributed adaptive droop control technique in DC microgrids", in 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 Oct. 2017, pp. 2638-2644, 2017. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096498>.
- [18] X. K. Liu, H. He, Y. W. Wang, Q. Xu, F. Guo, "Distributed Hybrid Secondary Control for a DC Microgrid via Discrete-Time Interaction", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 33, No. 4, pp. 1865-1875, 2018. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2850279>.
- [19] J. Zhou, M. Shi, X. Chen, Y. Chen, J. Wen, H. He, "A Cascaded Distributed Control Framework in DC Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 12, No. 1, pp. 205-214, 2021. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3020364>.
- [20] A. Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari, "An adaptive droop control method for low voltage DC microgrids", in The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), 5-6 Feb. 2014, pp. 84-89, 2014. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2014.6799349>.
- [21] M. Zaery, P. Wang, W. Wang, D. Xu, "Distributed Global Economical Load Sharing for a Cluster of DC Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 5, pp. 3410-3420, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2975378>.
- [22] B. Fan, J. Peng, Q. Yang, W. Liu, "Distributed Control of DC Microgrids With Improved ZIP Load Adaptability", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. 52, No. 7, pp. 4623-4633, 2022. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3101813>.
- [23] Y. Dou, M. Chi, Z. W. Liu, G. Wen, Q. Sun, "Consensus algorithm based distributed control for economic operation of islanded DC microgrids", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 30, No. 6, pp. 2561-2572, 2022.
- adaptive droop control method for low voltage DC microgrids", in The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), 5-6 Feb. 2014, pp. 84-89, 2014. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2014.6799349>.
- [8] Y. Zeng, Q. Zhang, Y. Liu, H. Guo, F. Zhang, "Distributed Cooperative Control Strategy for Stable Voltage Restoration and Optimal Power Sharing in Islanded DC Microgrids", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 39, pp. 3431-3443, 2024. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3274932>.
- [9] M. Cucuzzella, S. Trip, C. D. Persis, X. Cheng, A. Ferrara, A. v. d. Schaft, "A Robust Consensus Algorithm for Current Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 27, No. 4, pp. 1583-1595, 2019. <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2834878>.
- [10] B. S. Hartono, Y. Budiyo, R. Setiabudy, "Review of microgrid technology", in 2013 International Conference on QiR, 25-28 June 2013, pp. 127-132, 2013. <https://doi.org/10.1109/QiR.2013.6632550>.
- [11] M. Hamidi, O. Bouattane, A. Raihani, "Microgrid Energy Management System: Technologies and Architectures Review", in 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), 11-13 May 2020, pp. 1-6, 2020. <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121885>.
- [12] M. Hamidi, O. Bouattane, A. Raihani, "Microgrid Energy Management System: Technologies and Architectures Review", in 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), 11-13 May 2020, pp. 1-6, 2020. <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121885>.
- [13] M. N. Hussain, R. Mishra, V. Agarwal, "A Frequency-Dependent Virtual Impedance for Voltage-Regulating Converters Feeding Constant Power Loads in a DC Microgrid", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 6, pp. 5630-5639, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2846637>.
- [14] M. Zaery, E. M. Ahmed, M. Orabi, "Consensus algorithm based distributed control for economic operation of islanded DC microgrids", in 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 27-29 Dec. 2016, pp. 854-859, 2016. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836995>.
- [15] F. Guo, L. Wang, C. Wen, D. Zhang, Q. Xu,

- agent systems”, in 2018 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE), 17-18 Oct. 2018, pp. 1-5, 2018.
<https://doi.org/10.1109/RAEE.2018.8706900>.
- [31] A. M. Rahimi, A. Emadi, “An Analytical Investigation of DC/DC Power Electronic Converters With Constant Power Loads in Vehicular Power Systems”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 6, pp. 2689-2702, 2009.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2008.2010516>.
- [32] A. Kasis, N. Monshizadeh, E. Devane, I. Lestas, “Stability and Optimality of Distributed Secondary Frequency Control Schemes in Power Networks”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 1747-1761, 2019.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2777146>.
- [33] M. Zaery, E. M. Ahmed, M. Orabi, “Consensus algorithm based distributed control for economic operation of islanded DC microgrids”, in 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 27-29 Dec. 2016, pp. 854-859, 2016.
<https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836995>.
- [34] N. Mohammed, L. Callegaro, M. Ciobotaru, J. M. Guerrero, “Accurate power sharing for islanded DC microgrids considering mismatched feeder resistances”, Applied Energy, Vol. 340, p. 121060, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121060>.
- [35] Y. Dou, M. Chi, Z. W. Liu, G. Wen, Q. Sun, “Distributed Secondary Control for Voltage Regulation and Optimal Power Sharing in DC Microgrids”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 30, No. 6, pp. 2561-2572, 2022.
<https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3156391>.
- S. Malek, M. Gholipour, “Robust Scheme for Voltage Regulation and Power Sharing Among DERs in DC Microgrids”, IET Renewable Power Generation, Vol. 14, No. 4, pp. 647-657, 2020.
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0184>.
- <https://doi.org/10.1109/TCST.2021.3125322>.
- [24] F. Guo, L. Wang, C. Wen, D. Zhang, Q. Xu, “Distributed Voltage Restoration and Current Sharing Control in Islanded DC Microgrid Systems Without Continuous Communication”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 4, pp. 3043-3053, 2020.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2907507>.
- [25] F. Zhao, N. Li, Z. Yin, X. Tang, “Small-signal modeling and stability analysis of DC microgrid with multiple type of loads”, in 2014 International Conference on Power System Technology, 20-22 Oct. 2014, pp. 3309-3315, 2014.
<https://doi.org/10.1109/POWERCON.2014.6993873>.
- [26] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, G. A. Williamson, “Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No. 4, pp. 1112-1125, 2006.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483>.
- [27] M. K. Al-Nussairi, R. Bayindir, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, P. Siano, “Constant Power Loads (CPL) with Microgrids: Problem Definition, Stability Analysis and Compensation Techniques”, Energies, Vol. 10, No. 10, 2017.
<https://doi.org/10.3390/en10101656>.
- [28] R. D. Shivam, R. Dahiya, “Stability analysis of islanded DC microgrid for the proposed distributed control strategy with constant power loads”, Computers & Electrical Engineering, Vol. 70, pp. 151-162, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.02.020>.
- [29] W. W. A. G. d. Silva, T. R. Oliveira, P. F. Donoso-Garcia, “Hybrid Distributed and Decentralized Secondary Control Strategy to Attain Accurate Power Sharing and Improved Voltage Restoration in DC Microgrids”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 6, pp. 6458-6469, 2020.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2951012>.
- [30] S. Ali, S. Ahmed, S. N. K. Marwat, “A practical approach to consensus based control of multi-

⁶ Dynamic Consensus Protocol⁷ Flexible Current⁸ Virtual Voltage Droop⁹ Kuhn-Kun-Tucker¹⁰ Increase Coefficient¹ Centralized Control² Decentralized Control³ Distributed Control⁴ Droop Control⁵ Complex Communications