

طراحی کنترل کننده هوشمند برای بازیابی ولتاژ و اشتراک گذاری کنترل شده بار در یک ریزشبه DC ولتاژ پایین

حسین خرمی کیا^۱، سید محمد دهقان^۲، سعید حسن زاده^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه صنعتی قم

^۲استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، dehghan@qut.ac.ir

^۳استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم

چکیده

ریزشبکه‌های DC با توجه به بازدهی بالا، قابلیت اطمینان قابل توجه و همچنین اتصال آسان به اکثر منابع انرژی، در مقایسه با ریزشبه‌های جریان متناوب محبوبیت زیادی را به دست آورده‌اند. در این ریزشبه‌ها، اشتراک گذاری قابل کنترل بار بین منابع و همچنین حفظ ولتاژ باس مشترک از مهم ترین موارد چالش برانگیز بشمار می‌روند. دو کنترل کننده افت کلاسیک و کنترل کننده متمرکز برای تحقق این اهداف معرفی شده‌اند. اگرچه کنترل کننده‌های متمرکز دقت بالاتری در پیاده‌سازی اهداف مذکور دارند ولی به دلیل نیاز به شبکه ارتباطی با سرعت بالا برای ارتباط بین مبدل‌ها، از قابلیت اطمینان پایین رنج می‌برند. در این مقاله، جهت افزایش کارایی روش کنترل افت کلاسیک، یک روش کنترل مبتنی بر منطق فازی برای کنترل ریزشبه جریان مستقیم معرفی می‌شود. در روش پیشنهادی، ضرایب کنترل کننده بازیابی ولتاژ و متوسط جریان توسط کنترل کننده فازی تعیین می‌گردد که باعث می‌شود ریزشبه در حالت‌های مختلف بار و امپدانس‌های متفاوت خط، اشتراک گذاری جریان بار و بازیابی ولتاژ باس مشترک را به خوبی انجام دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی باعث افزایش دقت اشتراک گذاری جریان و همچنین بازیابی مناسب ولتاژ می‌شود.

کلیدواژه

ریزشبکه جریان مستقیم، کنترل کننده PID، کنترل کننده فازی، بازیابی ولتاژ، اشتراک گذاری جریان

مقدمه

می‌شوند، بستگی دارد. به‌عنوان مثال، برای یک شبکه که بر اساس منابع انرژی خورشیدی و بادی است، تعداد مبدل‌ها در یک ریزشبه DC کمتر از ریزشبه AC است. همچنین بارهایی چون محرکه‌های کنترل سرعت موتور، چراغ‌های LED^۱ و سیستم‌های تغذیه انرژی بدون وقفه در یک ریزشبه AC نسبت به ریزشبه DC، نیاز به مبدل‌های بیشتری دارند که در نتیجه باعث تلفات توان می‌شوند [۹-۵].

با توجه به این‌که در یک ریزشبه DC واحدهای تولید توان به‌صورت موازی به باس DC متصل می‌شوند، از این‌رو برای کنترل اشتراک‌گذاری توان در بین واحدها روش‌های کنترلی مختلفی مطرح شده است [۱۱-۱۰]. از مهم‌ترین روش‌های کنترل ریزشبه DC می‌توان به روش‌های متمرکز، غیرمتمرکز و سلسله‌مراتبی اشاره کرد. روش کنترل متمرکز شامل

امروزه ریزشبه‌ها با توجه به توانایی یکپارچه‌سازی منابع انرژی، ذخیره‌کننده‌ها، بارها و همچنین بهبود پایداری سیستم، بازدهی بالا و کمک به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی محبوبیت زیادی به دست آورده‌اند [۱]. ساختار ریزشبه‌ها به دو صورت AC و DC طراحی می‌شود. مشکلات مرتبط با شبکه AC از جمله نیاز به سنکرون کردن ژنراتورها، جریان هجومی ترانسفورماتورها، گردش توان راکتیو، جریان هارمونیک، نامتعادلی سه فاز، پیچیدگی فرآیند کنترل و همچنین این حقیقت که بسیاری از منابع مرسوم انرژی الکتریکی، جریان مستقیم می‌باشند، باعث توجه بیشتر به ریزشبه‌های DC شده است [۴-۲]. یکی دیگر از فاکتورهای اصلی برای تعیین نوع ریزشبه (AC یا DC)، تعداد مبدل‌های موردنیاز است که به نوع منابع تولید پراکنده و بارهایی که به سیستم متصل

^۱ Light emitting diode

روش را می‌توان به عنوان میانگین استاتیکی در نظر گرفت که به میزان کافی انعطاف‌پذیر نیست و منجر به اختلالات ارتباطی می‌شود.

در [۲۵-۲۷] جبران سازی ولتاژ باس DC و افزایش دقت اشتراک‌گذاری به‌طور عمده به‌وسیله اضافه کردن یک مقدار شیفت ولتاژ به کنترل‌کننده افت محقق می‌شود. این به معنی ثابت نگه‌داشتن ضریب افت و تغییر منحنی افت است. استمرار اشتراک‌گذاری دقیق جریان مبدل‌های موازی می‌تواند به‌وسیله کنترل حلقه بسته بهبود یابد. با این حال از آنجاکه ضریب افت ثابت استفاده می‌شود، امپدانس معادل خروجی یعنی جمع ضریب افت و امپدانس خط یکسان نیست که در نتیجه به تنظیم دقیق‌تر کنترل‌کننده جریان برای تغییرات سریع بار نیاز است. به‌جای استفاده از روش شیفت ولتاژ، تنظیم ضریب افت به روش تنظیم شیب در [۲۸] برای افزایش دقت اشتراک‌گذاری جریان پیشنهاد شده است. اجرای این روش کنترل، نسبتاً پیچیده است همچنین از کنترل‌کننده PID برای جبران سازی استفاده شده است که تنظیم مناسب پارامترهای این کنترل-کننده یکی از چالش‌های این روش است.

با توجه به ساختار ساده و عملکرد مناسب کنترل‌کننده PID از آن به‌صورت گسترده در فرآیندهای کنترلی استفاده می‌شود. بهره‌برداری مناسب از کنترل‌کننده‌های PID به انتخاب مناسب پارامترهای آن بستگی دارد. کنترل‌کننده‌های خطی PID معمولاً بر اساس پاسخ فرکانسی مدل سیگنال کوچک مبدل‌های DC-DC طراحی می‌شوند، در حالی که پاسخ فرکانسی این مبدل‌ها با تغییر شرایط سیستم تغییر می‌کند از این رو استفاده از یک کنترل‌کننده هوشمند برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده PID در هر لحظه ضروری است. در مواقعی که مدل‌سازی سیستم به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن آن دشوار است، استفاده از کنترل‌کننده فازی می‌تواند مؤثر باشد. مبدل‌های DC-DC نیز به دلیل ساختار متغیر با زمان و وجود عناصر غیرخطی و همچنین مؤلفه‌های پارازیتی از جمله سیستم‌های پیچیده و غیرخطی می‌باشند. کنترل‌کننده‌های فازی بر اساس دانش و آگاهی از رفتار سیستم طراحی و به مدل دقیق ریاضی آن نیاز ندارد، از این رو برای کنترل مبدل‌های واحدهای تولید توان در ریزشبكة‌ها مناسب می‌باشد [۲۹-۳۴].

در این مقاله یک طرح کنترلی جدید برای بازیابی ولتاژ و اشتراک‌گذاری برابر بار در ریزشبكة DC پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی برای بهبود اشتراک‌گذاری برابر بار و بازیابی ولتاژ باس DC در هنگام تغییرات بار و همچنین تغییر مقاومت خط از کنترل‌کننده فازی استفاده شده است.

در ادامه مقاله، در بخش دوم روش کنترل راهبر و پیرو و در بخش سوم روش کنترل افت بررسی می‌شوند. در بخش چهارم

روش‌های کنترل مرکزی، راهبر و پیرو^۲ و زنجیر دایره‌ای^۳ می‌باشد. در روش متمرکز، تعیین پارامترهای سیستم کنترلی در هر لحظه، وابسته به شبکه ارتباطی است، در حالی که بدون شبکه ارتباطی سرعت بالا، سیستم دچار فروپاشی می‌گردد [۱۲-۱۳].

از روش‌های غیرمتمرکز می‌توان به روش کنترل افت [۲۰-۱۴] اشاره کرد که خود، شامل روش‌های مقاومت سری و امپدانس مجازی می‌باشد. در روش کنترل افت به وجود شبکه ارتباطی بین واحدها نیاز نیست. عدم وجود ارتباط بین واحدها، قابلیت اطمینان سیستم کنترل را بدون محدود کردن محل فیزیکی واحدها بهبود می‌بخشد. علی‌الرغم مزایای اشاره شده برای روش کنترل افت، این روش دارای محدودیت‌هایی است که باید به آن‌ها توجه شود. یکی از معایب روش کنترل افت کلاسیک، کاهش خطی ولتاژ خروجی با افزایش جریان خروجی است که باعث انحراف ولتاژ روی باس DC نسبت به مقدار نامی ولتاژ می‌شود. همچنین اشتراک‌گذاری جریان در ریزشبكة DC تحت تأثیر امپدانس خط است.

روش‌های سلسله‌مراتبی از چندین حلقه کنترلی استفاده می‌کنند که بصورت غیرمتمرکز و متمرکز (با لینک ارتباطی سرعت پایین) کنترل می‌شوند [۲۸-۲۱]. در این روش‌ها، در صورت اختلال در کنترل‌کننده‌های متمرکز ناشی از قطع لینک ارتباطی، به دلیل وجود کنترل‌کننده غیرمتمرکز، سیستم دچار فروپاشی نمی‌گردد و تنها از دقت کاسته می‌شود. روش کنترل سلسله‌مراتبی ارائه شده در [۲۳] از سه حلقه کنترلی تشکیل شده است. حلقه کنترل اول، مدیریت به اشتراک‌گذاری جریان را انجام می‌دهد. حلقه کنترل دوم، نوسانات ولتاژ خروجی را تصحیح و حلقه کنترل سوم، مدیریت گردش توان ریزشبكة را کنترل می‌کند. به‌منظور حل مشکلات اشاره شده در روش کنترل افت، کنترل ثانویه در [۲۴-۲۸] برای جبران سازی ولتاژ و افزایش دقت اشتراک‌گذاری جریان به‌طور همزمان پیشنهاد شده است که کنترل‌کننده ثانویه با تبادل اطلاعات از طریق یک لینک ارتباطی، قادر به تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده اولیه است.

در [۲۴] یک طرح کنترل ثانویه برای بازیابی ولتاژ DC خروجی و افزایش دقت اشتراک‌گذاری جریان با دو کنترل‌کننده اضافی برای کنترل ولتاژ و جریان خروجی مبدل‌ها پیشنهاد شده است. با استفاده از دو حلقه کنترل، می‌توان به افزایش دقت اشتراک‌گذاری جریان و بازیابی ولتاژ به‌صورت همزمان رسید. با این حال، هر مبدل نیاز به ولتاژ و جریان خروجی مبدل‌های دیگر دارد تا مقدار متوسط ولتاژ و جریان را محاسبه کند. این

^۲ Master-Slave
^۳ Circular chain

تجزیه و تحلیل روش کنترل افت

همان طور که قبلاً اشاره شد یکی از روش‌های غیرمتمرکز روش کنترل افت است که به ارتباط بین مبدل‌ها نیاز ندارد و در نتیجه باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. از جمله روش‌های کنترل افت، می‌توان به روش‌های مقاومت سری و امپدانس مجازی اشاره کرد [۱۲].

مقاومت سری

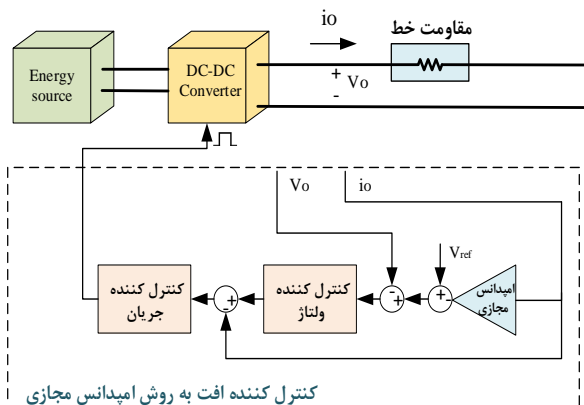
در روش مقاومت سری، یک مقاومت به صورت سری با خروجی برای ایجاد افت ولتاژ قرار داده می‌شود. در این روش کنترل همه واحدهای از یک تنظیمات اولیه و یک پتانسیومتر تقریباً یکسان استفاده می‌کنند.

بدیهی است اگر افت در ولتاژ خروجی بزرگ باشد، توان زیادی در مقاومت سری تلف می‌شود که به عنوان نقطه ضعف این روش است. با توجه تلفات بالای توان در مقاومت مذکور، این روش اغلب برای شبکه‌های توان پایین استفاده می‌شود [۳۵].

امپدانس مجازی

در روش کنترل امپدانس مجازی، جریان در خروجی واحد اندازه‌گیری و به ورودی سیستم کنترل از طریق امپدانس مجازی R_D برگشت داده شده و با ولتاژ خروجی مرجع در بی‌باری مقایسه می‌شود که در شکل (۲) بلوک دیاگرام آن نشان داده شده است. معادله ولتاژ مرجع خروجی به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$V_o^* = V_{ref} - i_o R_D \quad (2)$$



شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترل کننده افت به روش امپدانس مجازی

در رابطه (۲)، i_o جریان خروجی واحد، R_D امپدانس خروجی مجازی، V_{ref} ولتاژ خروجی در بی‌باری و V_o^* ولتاژ خروجی مبدل است [۱۲].

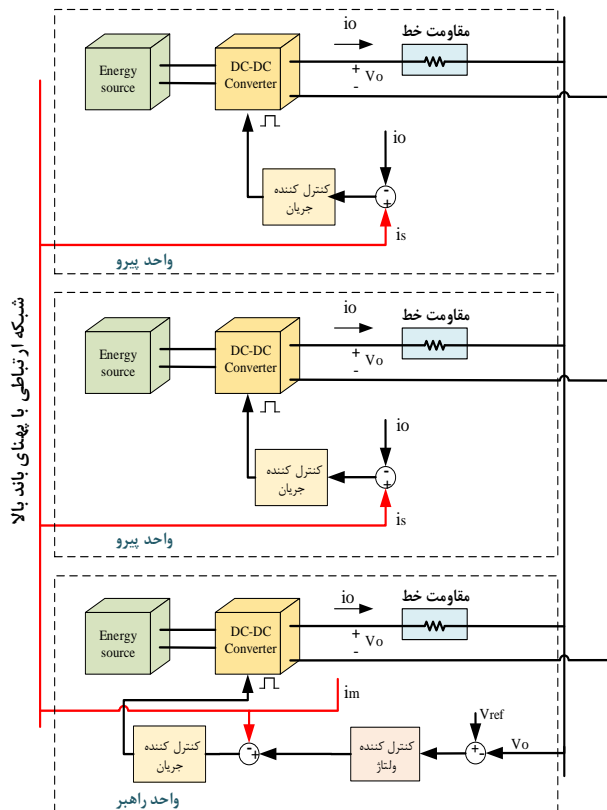
محدودیت‌های روش کنترل افت به صورت مختصر ارائه می‌گردد. در بخش پنجم روش کنترل سلسله مراتبی توضیح داده شده است. در بخش ششم روش کنترل پیشنهادی برای کنترل جریان و ولتاژ ریزش‌بکه معرفی می‌شود. بخش هفتم به نتایج شبیه‌سازی برای روش کنترل راهبر و پیرو، روش کنترل افت، روش کنترل سلسله مراتبی و روش کنترل پیشنهادی اختصاص داده شده و در بخش آخر نتیجه‌گیری ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل روش راهبر و پیرو

در کنترل راهبر و پیرو، واحد راهبر ولتاژ خروجی را تنظیم می‌کند. از این رو جریان راهبر i_m ، جریان مرجع بقیه واحدها (پیرو) را بصورت (۱) مشخص می‌کند.

$$i_s = i_m, \quad s = 2, \dots, N. \quad (1)$$

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، راهبر به عنوان یک مبدل منبع ولتاژ می‌باشد، در حالی که پیرو به عنوان یک مبدل منبع جریان کار می‌کند. در این روش کنترلی نیاز به یک



شکل ۱. بلوک دیاگرام کنترل کننده راهبر و پیرو

سیستم ارتباطی سرعت بالا می‌باشد که همین موضوع باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود [۱۲].

انحراف ولتاژ DC

با توجه به معادله (۲)، از آنجایی که روش کنترل افت بکار گرفته شده است، میزان انحراف ولتاژ DC را می توان از رابطه (۴) به دست آورد.

$$\Delta v_{dci} = i_{dci} \cdot R_{di} \quad (i=1,2) \quad (4)$$

با توجه به معادله (۴) هنگامی که مبدل واسط با ریزشبه در شرایط مدار باز بهره برداری می شود، انحراف ولتاژ DC صفر است. هنگامی که جریان خروجی مبدل صفر نباشد، انحراف ولتاژ وجود دارد که مقدار آن با جریان بار تغییر می کند. برای تضمین اینکه انحراف ولتاژ بیشتر از مقدار حداکثر قابل قبول نشود، مقدار ضریب افت (R_{di}) باید به صورت (۵) محدود شود [۲۴].

$$R_{di} \leq \frac{\Delta v_{dc \max}}{i_{dc}} \quad (5)$$

روش کنترل سلسله مراتبی

برای رفع مشکل انحراف ولتاژ روش کنترل افت، روش کنترل سلسله مراتبی پیشنهاد می شود. در این روش کنترل یک حلقه کنترل کننده ولتاژ به روش کنترل افت اضافه می گردد. حلقه اول در این روش کنترلی ولتاژ مرجع را برای حلقه داخلی کنترل ولتاژ و جریان تنظیم می کند که شامل حلقه امپدانس مجازی خروجی است. برای حل مشکل انحراف ولتاژ، کنترل کننده دوم ارائه شده است که در آن سطح ولتاژ در ریزشبه اندازه گیری شده و با مقدار مرجع مقایسه می شود و در نهایت خطای پردازش از طریق یک جبران سازی (δv_o) به تمام واحدها برای بازیابی ولتاژ خروجی فرستاده می شود [۳۶]. شکل (۴) ساختار یک کنترل کننده مبتنی بر روش سلسله مراتبی را نشان می دهد که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

طرح کنترل ثانویه پیشنهادی

در طرح کنترل پیشنهادی، از کنترل کننده های مبتنی بر منطق فازی در ساختار سلسله مراتبی ارائه شده در شکل (۴) استفاده شده است. مزایای کلیدی این طرح، هوشمند بودن فرآیند کنترل، اتصال آسان منابع به باس DC بدون نیاز به تنظیمات زمان گیر، قابلیت اطمینان بالا، اشتراک گذاری قابل کنترل بار و تنظیم ولتاژ مناسب است. برای روش کنترل افت کلاسیک در صورت نابرابر بودن امپدانس خط مبدل ها، هر چند تطبیق بهره افت بالاتر، عملکرد اشتراک گذاری بار را افزایش می دهد ولی باعث افت ولتاژ می شود و همچنین بهره افت بالا ممکن است،

محدودیت های روش کنترل افت کلاسیک در

ریزشبه های DC

اولین محدودیت روش کنترل افت کلاسیک، کاهش دقت اشتراک گذاری جریان با توجه به متفاوت بودن مقاومت خط مبدل ها و محدودیت دیگر، انحراف ولتاژ با توجه به عملکرد روش افت است. محدودیت های روش کنترل افت کلاسیک را می توان به صورت زیر بررسی کرد.

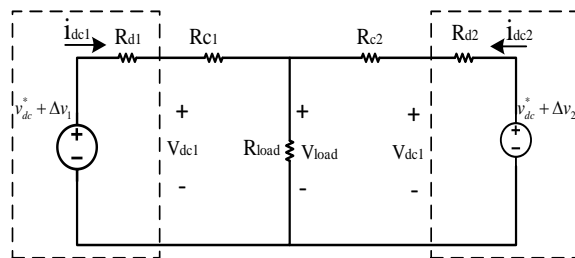
اشتراک گذاری جریان بار

اگر مقاومت خط مبدل ها در نظر گرفته شود ولتاژ خروجی برای هر مبدل دقیقاً یکسان نیست و دقت اشتراک گذاری جریان تحت تأثیر قرار می گیرد. مدار معادل شیفت ولتاژ بر اساس کنترل ثانویه در شکل (۳) نشان داده شده است.

r_{c1} و r_{c2} امپدانس خط و r_{d1} و r_{d2} امپدانس های مجازی می باشند. امپدانس های مجازی برابر با ضرایب افت کنترل کننده هستند. v_{DC1} ، v_{DC2} ، i_{DC1} و i_{DC2} به ترتیب ولتاژ DC و جریان در سمت خروجی مبدل ها و Δv_1 و Δv_2 مقادیر شیفت ولتاژ دو مبدل می باشند. با توجه به شکل (۳)، تأثیر تغییرات بار بر روی دقت اشتراک گذاری جریان مبدل ها، به صورت زیر قابل بیان است (ضمیمه ملاحظه شود):

$$\frac{d\Delta i_{dc}}{dI_{load}} = \frac{(r_{c1} + r_{d1} - r_{c2} - r_{d2})[(r_{c2} + r_{d2})v_{dc1}^* + (r_{c1} + r_{d1})v_{dc2}^*]}{[(r_{c1} + r_{d1} + r_{c2} + r_{d2})I_{load} + (r_{c1} + r_{d1})(r_{c2} + r_{d2})]^2} \quad (3)$$

از (۳) می توان نتیجه گرفت که چنانچه اشتراک گذاری برابر بار بین مبدل ها مدنظر باشد باید شرط $r_{c1} + r_{d1} = r_{c2} + r_{d2}$ (یعنی برابر بودن امپدانس معادل خروجی مبدل های واسط) برقرار باشد. از این رو هنگامی خطای اشتراک گذاری جریان توسط کنترل ثانویه حذف می شود که امپدانس معادل خروجی برابر حفظ شود. با این حال افزایش مقاومت مجازی، تنها برای سیستم های کوچک مناسب است، چراکه با مقاومت مجازی بزرگ، پایداری سیستم به چالش می افتد [۲۸].



شکل ۳. دو منبع توان DC متصل شده به صورت موازی

طراحی بهینه ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از منطق فازی

در روش کنترلی ارائه شده بهره‌ها به صورت برخط از طریق برنامه‌ریزی بهره فازی تنظیم می‌شوند. فرض بر این است که K_p و K_d در محدوده تعیین شده $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ و $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ باشد. برای راحتی K_p و K_d بین صفر و یک، توسط تبدیل خطی (۹) و (۱۰) نرمالیزه می‌شوند.

$$K'_p = \frac{(K_p - K_{pmin})}{(K_{pmax} - K_{pmin})} \quad (10)$$

$$K'_d = \frac{(K_d - K_{dmin})}{(K_{dmax} - K_{dmin})} \quad (11)$$

ثابت زمانی انتگرال گیر با توجه به ثابت زمانی مشتق گیر توسط رابطه (۱۱) تعیین می‌شود:

$$T_i = \alpha T_d \quad (12)$$

و بهره انتگرال گیر از رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$K_i = \frac{K_p}{(\alpha T_d)} = \frac{K_p^2}{(\alpha K_d)} \quad (13)$$

که پارامترهای K'_p ، K'_d و α توسط قوانین فازی تنظیم می‌شود. در این طرح پارامترهای PID بر اساس خطا $e(k)$ و تغییرات خطا $\Delta e(k)$ به دست می‌آیند.

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \quad (14)$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K'_d + K_{d,min} \quad (15)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{(\alpha K_d)} \quad (16)$$

بر اساس مطالعه و شبیه‌سازی گسترده در فرآیندهای مختلف و همچنین روش زیگلر-نیکولز، یک قاعده کلی برای تعیین محدوده K_p و K_d به صورت (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) قابل بیان است:

$$K_{p,min} = 0.32 K_u \quad (17)$$

$$K_{p,max} = 0.6 K_u \quad (18)$$

$$K_{d,min} = 0.08 K_u T_u \quad (19)$$

$$K_{d,max} = 0.15 K_u T_u \quad (20)$$

در روابط بالا K_u و T_u ، بهره و دوره نوسان در محدوده پایدار تحت کنترل کننده تناسبی می‌باشند.

پایه‌سازی توابع عضویت خطا $e(k)$ و تغییرات خطا $\Delta e(k)$ تابع عضویت خروجی K'_p و K'_d تابع عضویت α به صورت شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) می‌باشند. مجموعه قوانین برای K'_p و K'_d و α نیز به ترتیب در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.

پایداری سیستم را تحت تأثیر قرار دهد که طرح کنترلی ارائه شده برای بهبود این محدودیت‌ها پیشنهاد می‌شود.

کنترل جریان و ولتاژ

افت ولتاژ DC به دلیل عملکرد روش کنترل افت در خروجی مبدل‌ها ایجاد می‌گردد و کاهش دقت اشتراک‌گذاری جریان از نابرابر بودن امپدانس خروجی مبدل‌ها نتیجه می‌شود. ساختار پیشنهادی از یک خط ارتباطی برای اشتراک‌گذاری برابر بار و کنترل ولتاژ ریزش‌بکه DC استفاده می‌کند. در روش کنترلی جریان خروجی از تمام واحدها برای ایجاد جریان مرجع اشتراک‌گذاری (i_{avg}) دریافت می‌شود که به صورت (۶) بیان می‌شود:

$$i_j^{avg} = \frac{\sum_{m=1}^n i_m^{pu}}{n} \quad (6)$$

همچنین برای حل مشکل انحراف ولتاژ، یک کنترل کننده ولتاژ ارائه شده است. ولتاژ باس ریزش‌بکه (V_{MG}) اندازه‌گیری شده و از طریق یک شبکه ارتباطی با مقدار مرجع مقایسه می‌شود و در نهایت با توجه به خطای انحراف ولتاژ، میزان جبران سازی افت ولتاژ (δv_o) مبدل‌ها تعیین می‌گردد. از این رو ولتاژ مرجع می‌تواند به صورت (۷) بیان شود.

$$v_o^* = v_{ref} + \delta v_o - R_D \cdot i_o \quad (7)$$

برای تنظیم ولتاژ و اشتراک‌گذاری دلخواه بار می‌توان از کنترل کننده‌های PID استفاده کرد، ولی با توجه باینکه کنترل کننده PID با تغییر شرایط ریزش‌بکه مانند اضافه شدن منابع جدید با مقاومت خط مختلف و تغییر بار نمی‌تواند همیشه فرآیند کنترل را به طور مؤثر انجام دهد، از این رو برای رفع این مشکلات استفاده از یک کنترل کننده فازی برای تخمین پارامترهای PID و عملکرد صحیح سیستم پیشنهاد شده است. در شکل (۵) بلوک دیاگرام کنترل کننده ثانویه ولتاژ و جریان

نشان داده شده است.

کنترل کننده PID

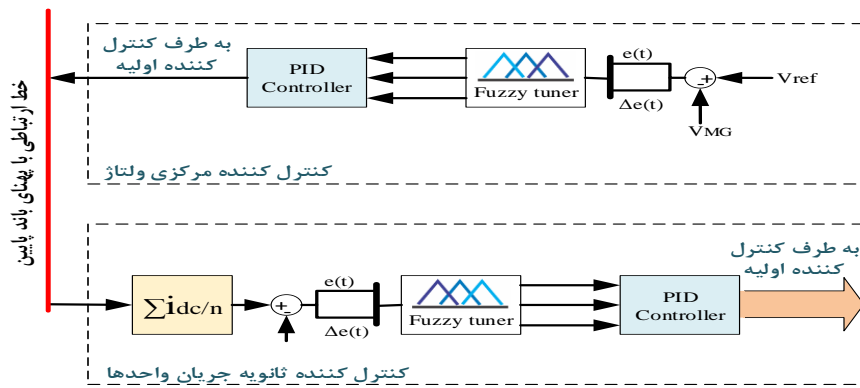
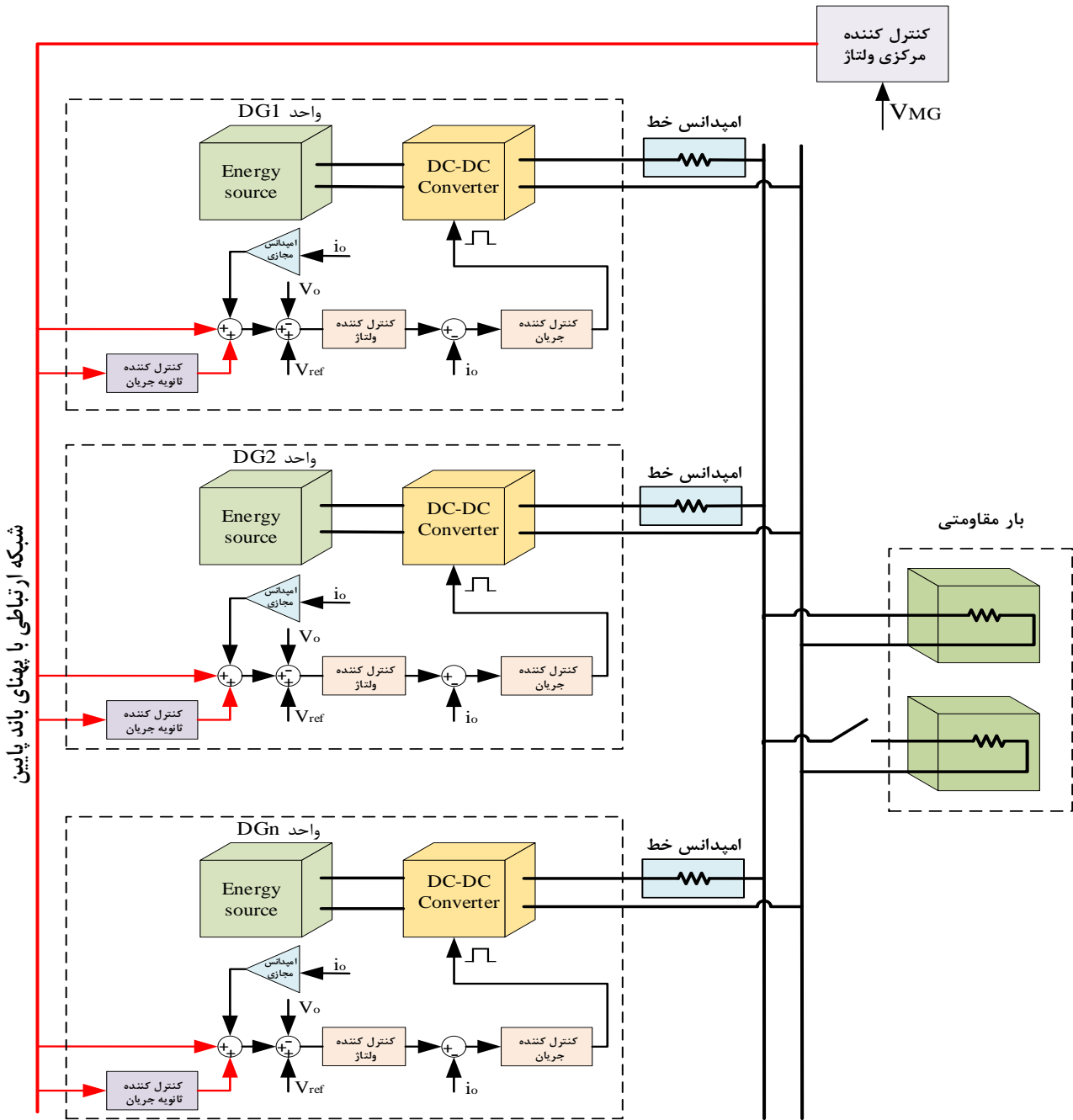
تابع انتقال کنترل کننده PID به صورت معادله (۸) بیان می‌شود:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (8)$$

و می‌توان آن را به صورت (۹) بازنویسی کرد:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

که K_p ، K_i و K_d به ترتیب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر هستند. به طور مشابه $T_i = K_p / K_i$ و $T_d = K_d / K_p$ به ترتیب ثابت‌های زمانی انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر نامیده می‌شود.



جدول ۳. قوانین تنظیم بهره α

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(k)	NB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
	NM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳
	NS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴
	ZO	۵	۴	۳	۳	۳	۴	۵
	PS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴
	PM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳
	PB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

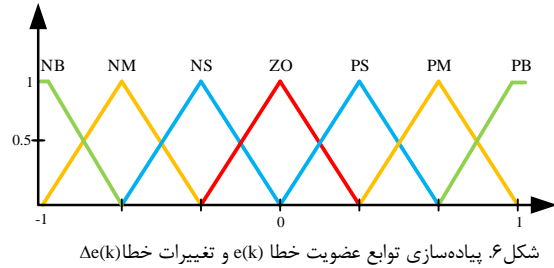
شبیه‌سازی

برای بررسی صحت و کارایی عملکرد روش پیشنهادی، یک ریزشبه مطابق شکل (۴) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شد. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۴) داده شده است که بر اساس مرجع [۳۷] انتخاب شده‌اند. برای شبیه‌سازی توان منابع برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده و هر منبع توسط مبدل DC-DC به باس DC متصل شده است.

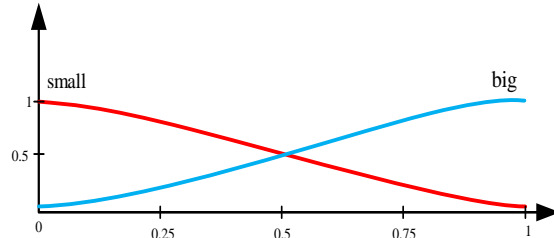
جدول ۴. مشخصات پارامترهای سیستم

مقدار	متغیر
مبدل DC-DC	
۳۰ ولت	ولتاژ ورودی
۷۵۰ میکرو هانری	سلف
۰.۶۸ اهم	مقاومت سلف
۲۲۰۰ میکروفاراد	خازن
۱ میلی اهم	مقاومت سوئیچ
۰.۸ ولت	افت ولتاژ دیود
۱۰ کیلوهرتز	فرکانس سوئیچینگ
پارامترهای شبکه	
۵۰ ولت	ولتاژ باس DC
۲.۴۰۱۵ اهم	مقاومت خط مبدل‌ها
۲۵ و ۳۰ اهم	بار

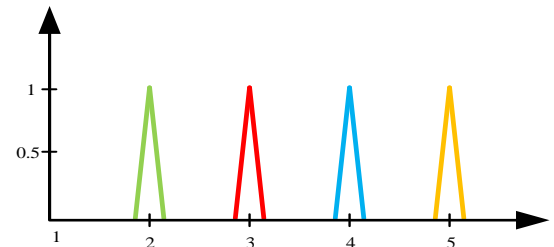
کنترل‌کننده فازی پیشنهادی پارامترهای کنترل‌کننده جریان و ولتاژ باس DC را تعیین کرده که جریان مبدل‌ها و ولتاژ باس DC توسط یک شبکه ارتباطی انتقال می‌یابد. شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف کنترل از جمله روش کنترل راهبر و پیرو، کنترل افت، کنترل سلسله مراتبی و کنترل پیشنهادی برای شرایط متغیر بار و مقاومت‌های مختلف خط مبدل‌ها انجام گرفته است. در تمام شبیه‌سازی‌ها، برای بررسی



شکل ۶. پیاده‌سازی توابع عضویت خطا $e(k)$ و تغییرات خطا $\Delta e(k)$



شکل ۷. پیاده‌سازی تابع عضویت $K'd$ و $K*p$



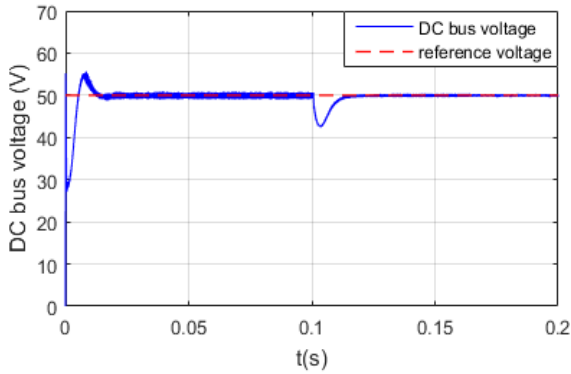
شکل ۸. پیاده‌سازی تابع عضویت α

جدول ۱. قوانین تنظیم بهره تناسبی

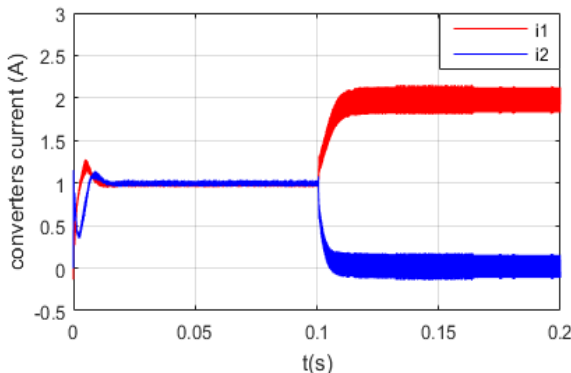
		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(k)	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	S	B	S	S
	PM	S	B	S	S	S	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

جدول ۲. قوانین تنظیم بهره تفاضلی

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(k)	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S



شکل ۱۱. ولتاژ باس DC در حالت کنترل راهبر و پیرو (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و قطع شبکه ارتباطی در یک دهم ثانیه)

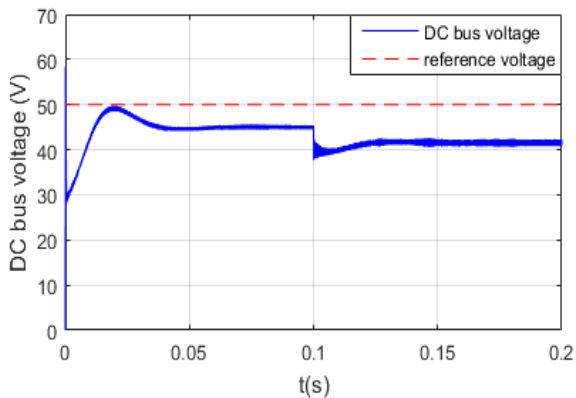


شکل ۱۲. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل راهبر و پیرو (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و قطع شبکه ارتباطی در یک دهم ثانیه)

حالت دوم

شبیه‌سازی برای ریزشبكة DC با استفاده از روش کنترل افت کلاسیک انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژ

باس DC و همچنین جریان خروجی مبدل‌ها برای منابع با مقاومت‌های خط 2Ω و 4Ω در شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، ولتاژ باس DC با اضافه شدن بارها کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش پایداری سیستم می‌شود.

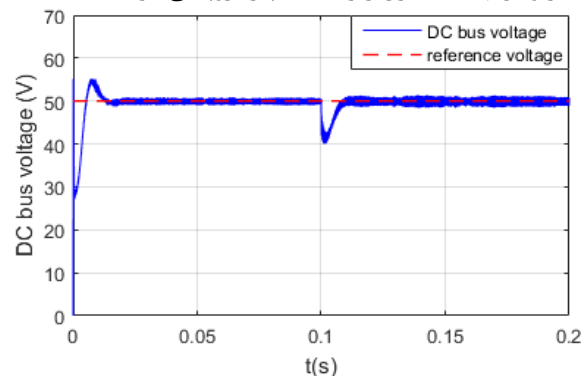


شکل ۱۳. ولتاژ باس DC در حالت کنترل افت کلاسیک (مقاومت خط 2Ω و 4Ω)

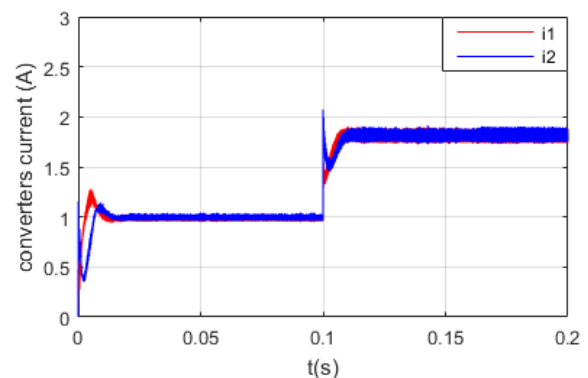
پاسخ دینامیکی، در ابتدا یک بار با مقاومت 25Ω به ریزشبكة متصل است و در زمان $t=0.1s$ ، بار دیگری با مقاومت 30Ω به بار اول اضافه می‌شود.

حالت اول

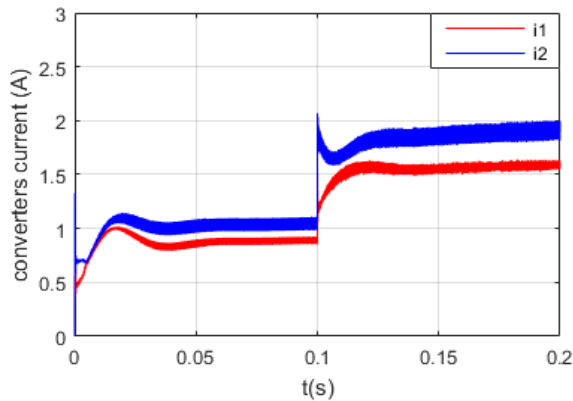
در این حالت شبیه‌سازی، از روش راهبر و پیرو برای کنترل ریزشبكة DC استفاده شده است. میزان مقاومت‌های خط مبدل‌ها 2Ω و 4Ω در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژ باس DC و همچنین جریان خروجی مبدل‌ها در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب نشان داده شده است. همچنین برای حالتی از ریزشبكة که در آن شبکه ارتباطی بین واحدها در زمان $t=0.1s$ حذف شود، شبیه‌سازی انجام گرفته است. شکل موج‌های ولتاژ باس DC و اشتراک‌گذاری جریان واحدها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، ریزشبكة از کنترل ولتاژ مناسب و اشتراک‌گذاری بار برابری برخوردار است ولی به دلیل اینکه به شبکه ارتباطی سرعت بالا برای انتقال اطلاعات واحدها نیاز دارد باعث می‌شود که قابلیت اطمینان ریزشبكة پایین باشد. همچنین در صورت از دست رفتن شبکه ارتباطی، تمام توان بار توسط کنترل کننده راهبر تامین شده که این باعث ایجاد اضافه بار و در نهایت کنترل ریزشبكة دچار فروپاشی گردد.



شکل ۹. ولتاژ باس DC در حالت کنترل راهبر و پیرو (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک دهم میکروثانیه)

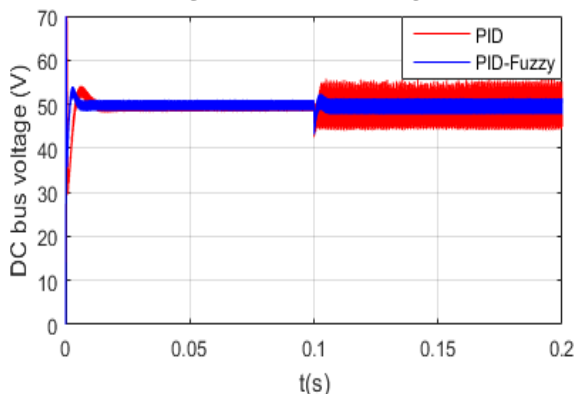


شکل ۱۰. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل راهبر و پیرو (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک دهم میکروثانیه)

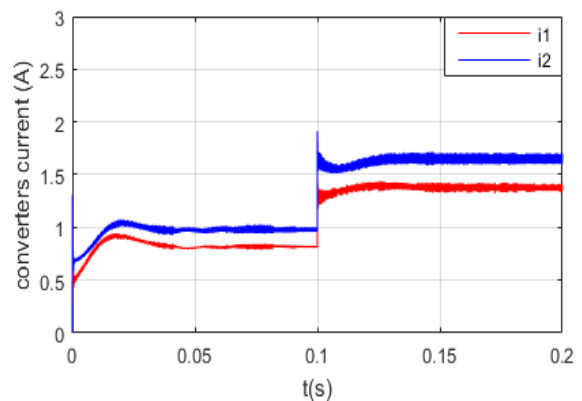


شکل ۱۶. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل سلسله مراتبی (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

شبیه‌سازی برای هر دو حالت با کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده PID-Fuzzy انجام گرفته است. ضرایب کنترل‌کننده PID در ابتدا بصورت بهینه انتخاب شده است. نتایج حاصل از مقایسه شبیه‌سازی‌ها برای بازیابی ولتاژ باس DC و همچنین اشتراک‌گذاری جریان برای مقاومت‌های خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه و شرایط متغیر بار در شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) و همچنین برای مقاومت‌های خط 2Ω و 15Ω به ترتیب در شکل‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی ملاحظه می‌گردد، با استفاده از کنترل‌کننده PID-Fuzzy، در شرایط مختلف از جمله تغییر بار و تغییر مقاومت خط مبدل‌ها، زمان رسیدن به پاسخ نهایی کمتر و نوسانات ولتاژ خروجی کوچک‌تر و در محدوده پایدارتری است و اشتراک‌گذاری جریان و بازیابی ولتاژ باس DC به خوبی کنترل می‌گردد. با توجه به اینکه ضرایب کنترل‌کننده PID در ابتدا بصورت بهینه انتخاب شده است، پاسخ آن در ابتدای شبیه‌سازی مناسب می‌باشد ولی با تغییر بار دچار نوسان می‌شود، درحالی‌که کنترل‌کننده PID-Fuzzy با تغییر ضرایب و با تغییر شرایط، پاسخ مناسب خود را حفظ می‌کند.



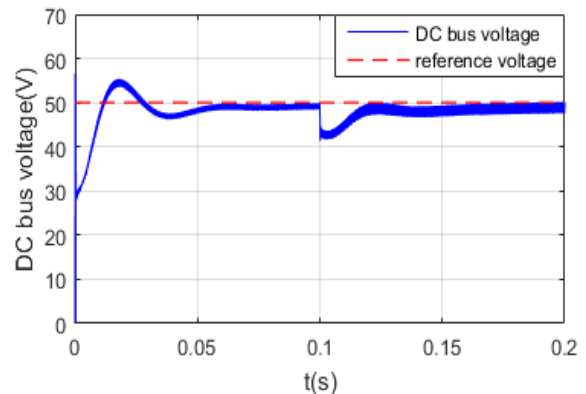
شکل ۱۷. مقایسه بازیابی ولتاژ باس DC در دو حالت کنترل‌کننده PID و PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)



شکل ۱۴. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل افت کلاسیک (مقاومت خط 2Ω و 4Ω)

حالت سوم

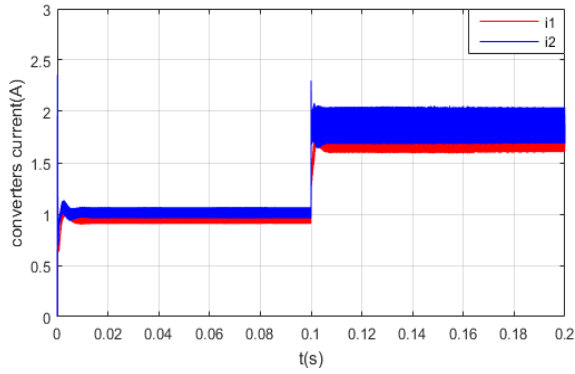
در این حالت، شبیه‌سازی برای ریزش‌بکه DC با استفاده از روش کنترل سلسله مراتبی انجام گرفته است. در این روش از یک حلقه کنترل ولتاژ برای بازیابی ولتاژ استفاده شده است. تأخیر ارتباطی در این حالت یک میکروثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی برای ولتاژ باس DC و همچنین جریان خروجی مبدل‌ها برای مقاومت‌های خط 2Ω و 4Ω در شکل (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی با تغییر بار و ایجاد حالت گذرا، ولتاژ باس DC نسبت به روش کنترل افت کلاسیک بهبود یافته ولی اشتراک‌گذاری برابر جریان بین مبدل‌ها برقرار نیست.



شکل ۱۵. ولتاژ باس DC در حالت کنترل سلسله مراتبی (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

حالت چهارم

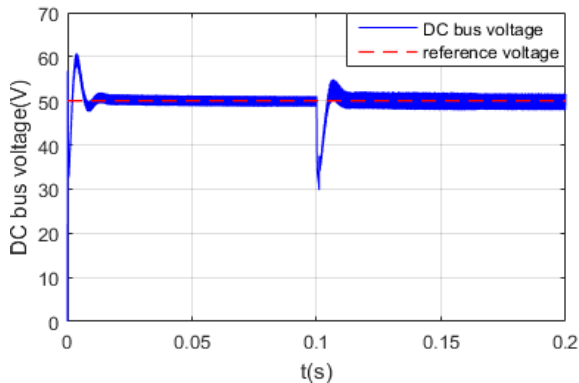
در این حالت، شبیه‌سازی برای ریزش‌بکه DC با استفاده از روش کنترل پیشنهادی انجام گرفته است. طرح پیشنهادی از یک حلقه کنترل برای اشتراک‌گذاری جریان و یک حلقه کنترل برای بازیابی ولتاژ و از کنترل‌کننده فازی برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده PID بهره می‌برد.



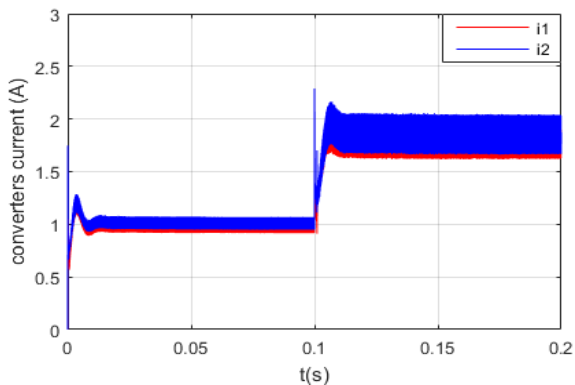
شکل ۲۲. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

حالت پنجم

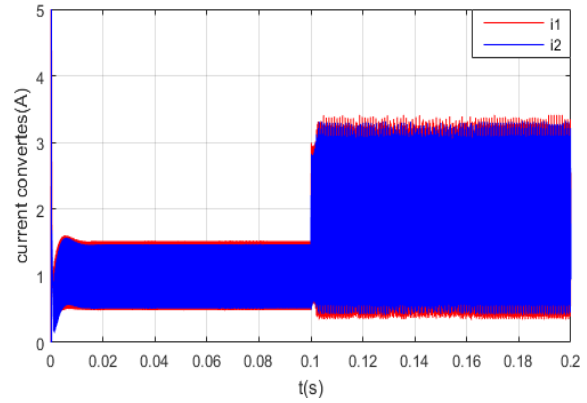
در این حالت، شبیه‌سازی سیستم کنترلی پیشنهادی با افزایش تأخیر ارتباطی برای کنترل ریزشبكة DC انجام شده است. نتایج حاصل از مقایسه شبیه‌سازی‌ها برای بازیابی ولتاژ باس DC و همچنین اشتراک‌گذاری جریان برای مقاومت‌های خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی‌ثانیه و شرایط متغیر بار در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی با افزایش زمان تأخیر همچنان سیستم کنترل پیشنهادی عملکرد مناسبی را در کنترل ولتاژ و اشتراک‌گذاری جریان ریزشبكة دارد که نشان دهنده وابستگی کم سیستم کنترل پیشنهادی به شبکه ارتباطی سرعت بالا می‌باشد.



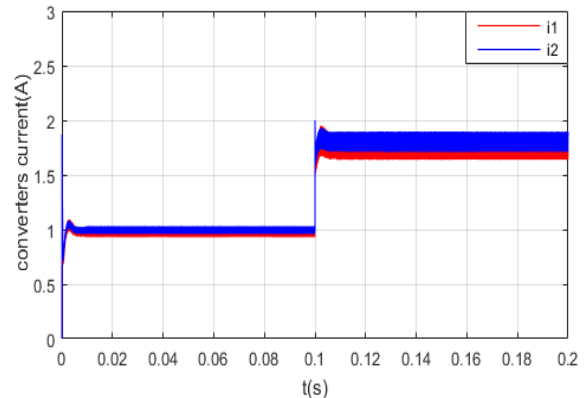
شکل ۲۳. ولتاژ باس DC در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی‌ثانیه)



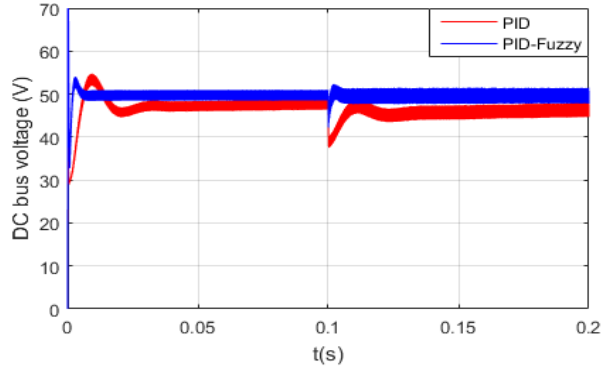
شکل ۲۴. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی‌ثانیه)



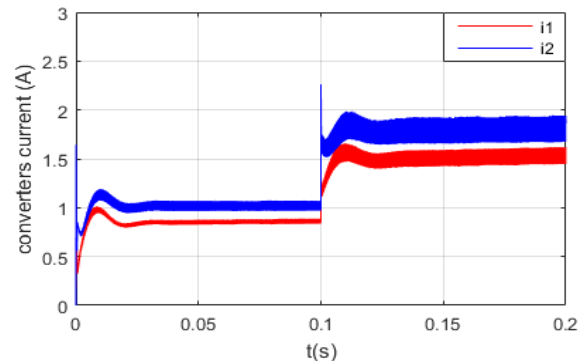
شکل ۱۸. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)



شکل ۱۹. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 4Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

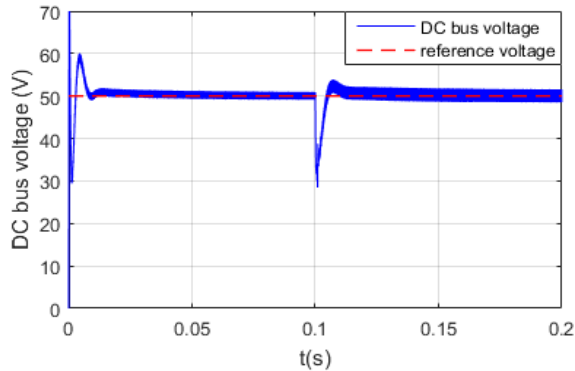


شکل ۲۰. مقایسه ولتاژ باس DC در دو حالت کنترل کننده PID و PID-Fuzzy (مقاومت خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

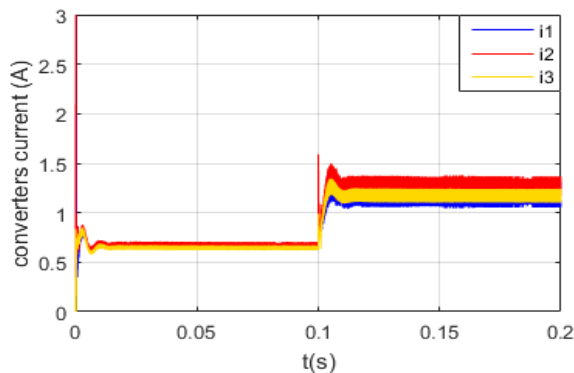


شکل ۲۱. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID (مقاومت خط 2Ω و 15Ω و تأخیر ارتباطی یک میکروثانیه)

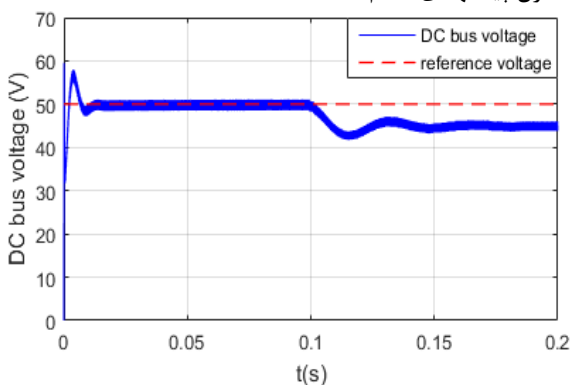
حالت ششم



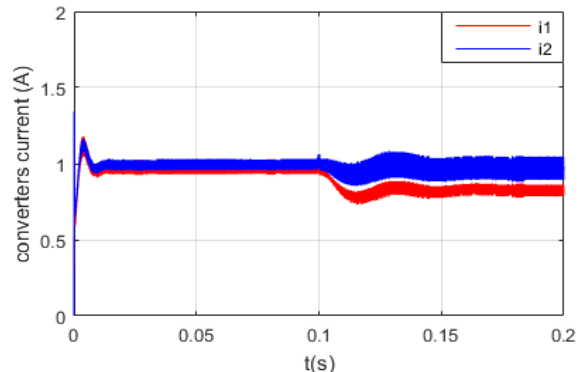
شکل ۲۷. ولتاژ باس DC در دو حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط ۲Ω، ۴Ω و ۱۵Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی ثانیه)



شکل ۲۸. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط ۲Ω، ۴Ω و ۱۵Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی ثانیه)



شکل ۲۵. ولتاژ باس DC در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط ۲Ω، ۴Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی ثانیه)



شکل ۲۶. جریان خروجی مبدل‌ها در حالت کنترل کننده PID-Fuzzy (مقاومت خط ۲Ω و ۴Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی ثانیه)

حالت هفتم

در این حالت، شبیه‌سازی سیستم کنترلی پیشنهادی برای سه منبع انجام شده است. نتایج بازیابی ولتاژ باس DC و همچنین اشتراک‌گذاری جریان برای مقاومت‌های خط ۲Ω، ۴Ω و ۱۵Ω و تأخیر ارتباطی یک میلی‌ثانیه و شرایط متغیر بار در شکل‌های (۲۷) و (۲۸) نشان داده شده است. با توجه به هوشمند بودن فرآیند کنترل منبع سوم بدون نیاز به تنظیمات اضافی به ریزشکته متصل و سیستم کنترل پیشنهادی با وجود تأخیر ارتباطی و تغییرات بار و همچنین نامساوی بودن امپدانس خطوط انتقال، انعطاف‌پذیری مطلوبی از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این مقاله یک سیستم کنترل مبتنی بر منطق فازی را برای اشتراک‌گذاری جریان و بازیابی ولتاژ در یک ریزشکته DC پیشنهاد می‌دهد. سیستم کنترل پیشنهادی ضرایب کنترل-کننده اشتراک‌گذاری جریان و بازیابی ولتاژ را با تغییر شرایط سیستم از جمله اضافه شدن منابع با مقاومت‌های خط مختلف و همچنین بارهای مختلف به صورت هوشمند تعیین می‌کند. استفاده از روش فوق‌نه‌تنها باعث بهبود بازیابی ولتاژ و افزایش دقت اشتراک‌گذاری جریان می‌شود بلکه زمان تنظیم ضرایب کنترل‌کننده‌ها را که معمولاً طی فرآیندی زمان‌بر و به شیوه‌های مختلف تعیین می‌شوند را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه روش‌های کنترلی، بهبود عملکرد سیستم را با استفاده از روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ و اشتراک‌گذاری برابر جریان به‌خوبی نشان می‌دهد.

ضمیمه

با توجه به شکل (۱)، می‌توان نوشت:

$$g_i = 1/(r_{ci} + r_{di}), g_{load} = 1/r_{load}, v_{dci}^* = v_{dc}^* + \Delta v_i, i=1,2 \quad (پ-۱)$$

از این رو جریان‌های خروجی بصورت زیر قابل بیان است:

Journal of Engineering, vol. 2017, no. 13, pp. 2477-2482, 2017.

- [8] Huddy, S.R. and J.D. Skufca, Amplitude death solutions for stabilization of dc microgrids with instantaneous constant-power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1): p. 247-253, 2013.
- [9] M. Wang, S. Tan, C. Lee and S. Y. Hui, "A Configuration of Storage System for DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 3722-3733, May 2018.
- [10] Ketabi, A., Rajamand, S., Shahidehpour, M., "Accurate power sharing for parallel DGs in microgrid with various-type loads", *Energy Equipment and Systems*, No. 1, pp. 27-41, 2017.
- [11] M. A. Setiawan, A. Abu-Siada and F. Shahnia, "A New Technique for Simultaneous Load Current Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1403-1414, April 2018.
- [12] Guerrero, J.M., L. Hang, and J. Uceda, Control of distributed uninterruptible power supply systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8): p. 2845-2859, 2008.
- [13] I. Federico, E. Jose and F. Luis, "Master-slave DC droop control for paralleling auxiliary DC/DC converters in electric bus applications," in *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 10, pp. 1156-1164, 18 8 2017 .
- [14] M. Mokhtar, M. I. Marei and A. A. El-Sattar, "An Adaptive Droop Control Scheme for DC Microgrids Integrating Sliding Mode Voltage and Current Controlled Boost Converters," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 1685-1693, March 2019.
- [15] Khorsandi, A., et al., Automatic droop control for a low voltage DC microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(1): p. 41-47, 2016
- [16] Zhang, Y. and Y.W. Li, Energy Management Strategy for Supercapacitor in Droop-controlled DC Microgrid Using Virtual Impedance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4): p. 2704-2716, 2017.
- [17] Khorsandi, A., M. Ashourloo, and H. Mokhtari, A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(4): p. 793-801, 2014.
- [18] Alizadeh, E., Motie Birjandi, A., Hamzeh, M., "Economic Droop Scheme for Decentralized Power Management in DC Microgrids", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, No. 4, pp. 301, 2016.

$$i_{dc1} = \frac{g_1 [(g_2 + g_{load}) \cdot v_{dc1}^* - g_2 \cdot v_{dc2}^*]}{g_1 + g_2 + g_{load}} \quad (2-پ)$$

$$i_{dc2} = \frac{g_2 [(g_1 + g_{load}) \cdot v_{dc2}^* - g_1 \cdot v_{dc1}^*]}{g_1 + g_2 + g_{load}} \quad (3-پ)$$

تفاوت بین i_{DC1} و i_{DC2} می تواند بصورت زیر محاسبه شود:

$$\Delta i_{dc} = i_{dc1} - i_{dc2} = \frac{2(v_{dc1}^* - v_{dc2}^*)r_{load} + [(r_{c2} + r_{d2})v_{dc1}^* - (r_{c1} + r_{d1})v_{dc2}^*]}{(r_{c1} + r_{d1} + r_{c2} + r_{d2})r_{load} + (r_{c1} + r_{d1})(r_{c2} + r_{d2})} \quad (4-پ)$$

به منظور بررسی تأثیر تغییرات بار، مشتق $\frac{d\Delta i_{dc}}{dr_{load}}$ بصورت زیر بدست می آید:

$$\frac{d\Delta i_{dc}}{dr_{load}} = \frac{(r_{c1} + r_{d1} - r_{c2} - r_{d2})[(r_{c2} + r_{d2})v_{dc1}^* + (r_{c1} + r_{d1})v_{dc2}^*]}{[(r_{c1} + r_{d1} + r_{c2} + r_{d2})r_{load} + (r_{c1} + r_{d1})(r_{c2} + r_{d2})]^2} \quad (5-پ)$$

مراجع

- [1] یار احمدی فاطمه، لشکرآرا افشین، ربیعی عبدالرضا، بهره برداری بهینه چند منظوره ریزشبكة در حضور پاسخ تقاضا، فصلنامه صنایع الکترونیک، شماره ۲، صفحه ۱۱-۲۰، ۱۳۹۳.
- [2] P. Gupta and M. A. Ansari, "Analysis and Control of AC and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review," 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 2019, pp. 281-286.
- [3] Y. Han, X. Ning, P. Yang and L. Xu, "Review of Power Sharing, Voltage Restoration and Stabilization Techniques in Hierarchical Controlled DC Microgrids," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202-149223, 2019.
- [4] J. He, Y. Pan, B. Liang and C. Wang, "A Simple Decentralized Islanding Microgrid Power Sharing Method Without Using Droop Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6128-6139, Nov. 2018.
- [5] Xu, L. and D. Chen, Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4): p. 2513-2522, 2011.
- [6] M. Nasir, H. A. Khan, A. Hussain, L. Mateen and N. A. Zaffar, "Solar PV-Based Scalable DC Microgrid for Rural Electrification in Developing Regions," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 390-399, Jan. 2018.
- [7] T. Shi, L. Shi, Y. Zhao and Y. Ni, "Operation and coordination control of a DC micro-grid incorporating all-DC wind farm," in *The*

- [۲۹] صداقتی رضا، شاکرمی محمودرضا، «استراتژی کنترل و مدیریت توان منابع انرژی تجدیدپذیر هیبرید در ریزشبکه جزیره‌ای»، فصلنامه صنایع الکترونیک، شماره ۲، صفحه ۵، ۱۳۹۷.
- [30] M. I. Ghiasi, M. A. Golkar and A. Hajizadeh, "Lyapunov Based-Distributed Fuzzy-Sliding Mode Control for Building Integrated-DC Microgrid With Plug-In Electric Vehicle," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7746-7752, 2017.
- [31] R. Bhosale and V. Agarwal, "Fuzzy Logic Control of the Ultracapacitor Interface for Enhanced Transient Response and Voltage Stability of a DC Microgrid," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 712-720, Jan.-Feb. 2019.
- [32] Y. Mi, H. Zhang, Y. Fu, C. Wang, P. C. Loh and P. Wang, "Intelligent Power Sharing of DC Isolated Microgrid Based on Fuzzy Sliding Mode Droop Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2396-2406, May 2019.
- [33] Y. Mi, H. Zhang, Y. Fu, C. Wang, P. C. Loh and P. Wang, "Intelligent Power Sharing of DC Isolated Microgrid Based on Fuzzy Sliding Mode Droop Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2396-2406, May 2019.
- [34] Lashkar Ara, A., Bagheri Tolabi, H., Hosseini, R., "Dynamic Modeling and Controller Design of Distribution Static Compensator in a Microgrid Based on Combination of Fuzzy Set and Galaxy-based Search Algorithm", *International Journal of Engineering*, No. 10, pp. 1392-1400, 2016.
- [35] Luo, S., et al. A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules. in *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE. 1999. IEEE.*
- [36] Guerrero, J.M., et al., Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1): p. 158-172, 2011.
- [37] Augustine, S., M.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(1): p. 132-141, 2015.
- [19] Dragičević, T., et al., DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7): p. 4876-4891, 2016
- [20] Hamzeh, M., et al., Modeling and design of an oscillatory current-sharing control strategy in DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11): p. 6647-6657, 2015.
- [21] C. Dong et al., "Time-Delay Stability Analysis for Hybrid Energy Storage System With Hierarchical Control in DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6633-6645, Nov. 2018 .
- [22] Y. Yang, Y. Qin, S. Tan and S. Y. R. Hui, "Efficient Improvement of Photovoltaic-Battery Systems in Standalone DC Microgrids Using a Local Hierarchical Control for the Battery System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 11, pp. 10796-10807, Nov. 2019.
- [23] Guerrero, J.M., et al., Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1): p. 158-172, 2011.
- [24] Lu, X., et al., 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(4): p. 1800-1812, 2014.
- [25] Anand, S., B.G. Fernandes, and J. Guerrero, Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, 28(4): p. 1900-1913, 2013.
- [26] Nasirian, V., et al., Distributed cooperative control of dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4): p. 2288-2303, 2015.
- [27] Y. Han, X. Ning, P. Yang and L. Xu, "Review of Power Sharing, Voltage Restoration and Stabilization Techniques in Hierarchical Controlled DC Microgrids," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202-149223, 2019.
- [28] Wang, P., et al., An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(9): p. 6658-6673, 2016.